UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Artur Bohnen Piardi

**Proposta de uma Estrutura Híbrida de
Controle para Sistemas de Excitação de
Geradores Síncronos Distribuídos**

Artur Bohnen Piardi

**Proposta de uma Estrutura Híbrida de
Controle para Sistemas de Excitação de
Geradores Síncronos Distribuídos**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Andrade Ramos

São Carlos

2017

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P581p Piardi, Artur Bohnen
Proposta de uma Estrutura Híbrida de Controle para
Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos
Distribuídos / Artur Bohnen Piardi; orientador Rodrigo
Andrade Ramos. São Carlos, 2017.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Geração Distribuída. 2. Ilhamento. 3. Gerador
Síncrono Distribuído. 4. Controle de Tensão. 5.
Controle de Potência Reativa. 6. Estrutura Híbrida de
Controle. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ARTUR BOHNEN PIARDI**.

Título da tese: "Proposta de uma estrutura híbrida de controle para sistema de excitação de geradores síncronos distribuídos".

Data da defesa: 21/11/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Rodrigo Andrade Ramos**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Djalma Mosqueria Falcão**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

APROVADO

Dra. **Mariana Resener**
(Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica/CEEE)

APROVADO

Prof. Dr. **Walmir de Freitas Filho**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Ao meu avô, Arnaldo Bohnen (in memoriam).

Agradecimentos

À Deus, pelo fornecimento dos subsídios necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos brasileiros honestos que pagam os seus tributos, contribuindo para a manutenção de uma universidade pública e de qualidade, e por consequência, para a construção de um futuro melhor para o nosso país.

À Universidade de São Paulo e aos seus colaboradores, os quais me acolheram e contribuíram substancialmente para minha formação profissional e pessoal.

À Débora Martins Mucellini, minha noiva, pelo apoio e compreensão prestados, especialmente na fase final de desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, sem a qual seria impossível eu atingir os meus objetivos. Aproveito para fazer menção especial à Arnaldo Bohnen (*in memoriam*), meu avô, e à Estela Maris Bohnen, minha mãe, pelo fornecimento de referências morais para me tornar a pessoa que sou. Estendo os meus agradecimentos à Felipe Bohnen Piardi, meu irmão, que de um modo especial sempre me deu forças para buscar o melhor. Também estendo meus agradecimentos para Reinaldo Bohnen, pelo exemplo de profissional que um dia almejo ser, e pelo apoio no meu desenvolvimento profissional.

Agradeço os professores Rodrigo Andrade Ramos e Romeu Reginatto, pela amizade, pelo fornecimento de orientações imprescindíveis ao desenvolvimento deste trabalho, e pelos exemplos de dedicação e profissionalismo.

À Itaipu Binacional, Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil – FPTI-BR, e ao Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos – LASSE, por todo apoio para a minha formação profissional. Aproveito para agradecer ao Eng. Jonas Roberto Pesente, a quem devo muito por me ajudar nos primeiros passos no âmbito de pesquisa, e ao Eng. Rodrigo Bueno Otto, por ter acreditado no meu potencial, e sempre ter se empenhado na viabilização de meu aprimoramento profissional.

Agradeço os meus colegas de São Carlos – SP, Edson, Geyverson, Jhonatan, Lucas, Marcelo, Moussa, Tatiane, Thales e William, por propiciar bons momentos durante minha estadia nessa cidade, os quais levarei como recordações para o resto da minha vida.

Destaco os colegas Edson Luiz Geraldi Junior e Jhonatan Andrade dos Santos, pelo companherismo, pela ajuda e pela troca de informações no desenvolvimento do trabalho, as quais foram de grande importância.

Agradeço os pesquisadores de trabalhos precursores, que através de seus esforços forneceram os subsídios técnicos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa. Também é justo estender os agradecimentos aos desenvolvedores das ferramentas computacionais utilizadas no decorrer do trabalho, as quais também foram imprescindíveis para o seu desenvolvimento.

Por fim, de um modo geral, agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José Martiniano de Alencar

Resumo

PIARDI, A. B. **Proposta de uma Estrutura Híbrida de Controle para Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos Distribuídos**. 197 p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.

Com o advento da geração distribuída foi permitido aos sistemas de distribuição a possibilidade de operação de forma ilhada dos sistemas interligados de grande porte. Apesar de suas vantagens, do ponto de vista técnico, ainda existe uma série de desafios que necessitam ser superados para a plena aplicação desse conceito. Um desses desafios é definido pela transição dos modos operativos dos geradores distribuídos durante o processo de ilhamento. Da forma em que é reportada na literatura, infere-se que tal transição é realizada de um modo inadequado, amplificando os transitórios observados nas grandezas do gerador distribuído – e por consequência, da rede em que o mesmo se conecta – durante o processo de ilhamento, o que não é desejável. No contexto apresentado, a principal contribuição desta pesquisa está em propor uma estrutura híbrida de controle a ser aplicada aos sistemas de excitação de geradores síncronos que operam em sistemas de distribuição que permitem a operação ilhada de determinadas porções de suas redes. A principal característica da estrutura proposta está em atenuar os transitórios das variáveis do gerador controlado durante o processo de ilhamento. Além disso, o arranjo da estrutura proposta estabelece um compromisso entre a potência reativa e a tensão terminal do gerador controlado, quando o mesmo opera em paralelo com os sistemas interligados de grande porte. Nessa condição, o sistema de controle mantém a potência reativa próxima da referência ajustada atendendo a uma faixa adequada de valores de tensão terminal.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Ilhamento; Gerador Síncrono Distribuído; Controle de Tensão; Controle de Potência Reativa; Estrutura Híbrida de Controle.

Abstract

PIARDI, A. B. **Proposal of a Hybrid Control Scheme for Excitation Systems of Distributed Synchronous Generators.** 197 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2017.

With the advent of distributed generation, the possibility of autonomous operation regarding the bulk power systems was allowed to the distribution systems. Despite its advantages, from the technical point of view, there are lots of challenges that need to be overcome for the full application of this concept. One of these challenges is the transition of distributed generators operating modes during the islanding process. Based in the literature survey, it is inferred that transition is performed in a wrong way, which amplifies the transients in controlled generator quantities – and consequently, of the network connected to it – during the islanding process, which is undesirable. In this context, the main contribution of this research is the proposal of a hybrid control structure to be applied to the excitation systems of synchronous generators that operate in distribution systems whose islanded operation of determined portions of its grids is permitted. The main characteristic of the proposed structure is the attenuation of transients of the controlled generator quantities during the islanding process. Furthermore, the design of this structure provides a compromise between the generator reactive power and terminal voltage when it operates in parallel with the bulk power systems. That way, the control system maintains the reactive power close to the adjusted reference attending an appropriate range of terminal voltage values.

Keywords: Distributed Generation; Islanding; Distributed Synchronous Generator; Voltage Control; Reactive Power Control; Hybrid Control Scheme.

Lista de ilustrações

Figura 2.1	Diagrama funcional de uma estrutura completa de SEs aplicado em MSs	51
Figura 2.2	Diagrama funcional da estrutura de controle comumente aplicada ao sistema de excitação de GSDs que operam em SDEEs que permitem ilhamento	55
Figura 3.1	SDEE hipotético com GD utilizado para distinguir a operação isolada da operação ilhada	60
Figura 3.2	Diagrama esquemático de classificação dos métodos de proteção anti-ilhamento aplicados em geradores distribuídos	67
Figura 4.1	Diagrama de blocos de um sistema de controle do tipo SISO em malha fechada com representação de saturação do atuador	81
Figura 4.2	Diagrama de blocos da compensação AW através do método SVC em um sistema de controle do tipo SISO	84
Figura 4.3	Transição via ação de chaveamento entre os modos manual e automático de operação em um sistema de controle em malha fechada do tipo SISO	85
Figura 4.4	Diagrama de blocos da compensação BT através do método SVC em um sistema de controle do tipo SISO	87
Figura 4.5	Generalização das compensações AW e BT por meio do método SVC em um sistema de controle do tipo SISO	88
Figura 4.6	Diagrama de blocos da EHC proposta	90
Figura 4.7	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA – controles CQ e EHC	96
Figura 4.8	Sinal ' α ' da EHC resultante da comparação entre os sinais de tensão terminal ' V_t ' limitado e não limitado frente a ocorrência da perturbação PA	96

Figura 4.9	Comportamento do sinal de saída do ramo I de compensação ‘ β ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}	97
Figura 4.10	Comportamento do sinal de entrada do integrador do controlador de potência reativa ‘ γ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}	97
Figura 4.11	Comportamento do sinal de saída do integrador da malha de controle de potência reativa ‘ ψ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}	98
Figura 4.12	Comportamento do sinal de saída da malha de controle de potência reativa ‘ V_{qe} ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}	98
Figura 4.13	Comportamento do sinal da referência equivalente do SE ‘ V_{refeq} ’ frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1} .	99
Figura 4.14	Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1} . .	100
Figura 4.15	Comportamento da potência reativa ‘ Q_e ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1} . .	100
Figura 4.16	Comportamento da frequência ‘ f ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}	101
Figura 4.17	Comportamento da frequência ‘ f ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1} – caso particular de carga coincidente	101
Figura 4.18	Comportamento do sinal de erro de controle do SE ‘ e_{SE} ’ frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1} – inexistência do ramo II de compensação	102
Figura 4.19	Comportamento da frequência ‘ f ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores para o ganho K_{C1} – inexistência do ramo II de compensação	103
Figura 4.20	Comportamento do sinal de saída do ramo II de compensação ‘ χ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2}	103
Figura 4.21	Comportamento do sinal de erro de controle do SE ‘ e_{SE} ’ frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2}	104
Figura 4.22	Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2} . .	105
Figura 4.23	Comportamento da potência reativa ‘ Q_e ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2} . .	105

Figura 4.24	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PB com os controles CQ e EHC	106
Figura 4.25	Sinal ' α ' da EHC resultante da comparação entre os sinais de tensão terminal ' V_t ' limitado e não limitado frente a ocorrência da perturbação PB	107
Figura 4.26	Comportamento do sinal de saída do ramo I de compensação ' β ' da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}	107
Figura 4.27	Comportamento do sinal de entrada do integrador da malha de controle de potência reativa ' γ ' da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}	108
Figura 4.28	Comportamento do sinal de saída do integrador da malha de controle de potência reativa ' ψ ' da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}	108
Figura 4.29	Comportamento do sinal de saída da malha de controle de potência reativa ' V_{qe} ' da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}	109
Figura 4.30	Comportamento do sinal da referência equivalente do SE ' V_{refeq} ' frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1} .	109
Figura 4.31	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}	110
Figura 4.32	Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}	110
Figura 4.33	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PB com ($K_{C2} = 10p.u./p.u.$) e sem ($K_{C2} = 0p.u./p.u.$) o ramo II de compensação	111
Figura 4.34	Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PB com ($K_{C2} = 10p.u./p.u.$) e sem ($K_{C2} = 0p.u./p.u.$) o ramo II de compensação	111
Figura 4.35	Comportamento do sinal de saída do ramo II de compensação ' χ ' da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}	112
Figura 4.36	Comportamento do sinal de erro de controle do SE ' e_{SE} ' frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}	112
Figura 4.37	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}	113
Figura 4.38	Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}	113

Figura 5.1	Diagrama unifilar do sistema teste utilizado para a obtenção dos resultados	119
Figura 5.2	Diagrama de blocos da equação de oscilação eletromecânica para GS de pólos lisos no ANATEM	122
Figura 5.3	Diagrama de blocos para as equações dinâmicas elétricas do eixo direto para GS de pólos lisos no ANATEM	123
Figura 5.4	Diagrama de blocos para as equações dinâmicas elétricas do eixo em quadratura para GS de pólos lisos no ANATEM	124
Figura 5.5	Diagrama de blocos do modelo dinâmico do SE IEEE ST1A – simplificado – aplicado ao GSD do sistema teste	126
Figura 5.6	Diagrama de blocos para as equações do compensador de carga e transdutor de tensão do SE aplicado ao GSD do sistema teste	127
Figura 5.7	Diagrama de blocos para as equações dinâmicas do controlador de potência reativa aplicado ao SE do GSD do sistema teste	129
Figura 5.8	Diagrama de blocos para as equações dinâmicas do sistema de regulação de velocidade aplicado ao GSD do sistema teste	131
Figura 5.9	Estágios das simulações para avaliação das perturbações que desencadeiam a ocorrência do ilhamento quando aplicada a ETC no GSD do sistema teste	135
Figura 5.10	Condições operativas do sistema teste para o primeiro e quarto estágios de simulação para a caracterização dos problemas da aplicação da ETC frente a perturbações que desencadeiam a ocorrência do ilhamento . . .	137
Figura 5.11	Comportamento do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt . . .	138
Figura 5.12	Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt	139
Figura 5.13	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD quando aplicada a ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt	140
Figura 5.14	Comportamento da frequência ' f ' do GSD quando aplicada a ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt	141
Figura 5.15	Comportamento do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT	142

Figura 5.16	Comportamento do sinal da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT	142
Figura 5.17	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT	143
Figura 5.18	Comportamento da frequência ' f ' do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT	143
Figura 5.19	Comparação entre os comportamentos do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt	146
Figura 5.20	Comparação entre os comportamentos do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT	147
Figura 5.21	Comparação entre os comportamentos da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt	147
Figura 5.22	Comparação entre os comportamentos da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT	148
Figura 5.23	Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt	148
Figura 5.24	Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT	149
Figura 5.25	Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt – ênfase para o período de formação do sistema ilhado	149
Figura 5.26	Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT – ênfase para o período de formação do sistema ilhado	150
Figura 5.27	Comparação entre os comportamentos da frequência ' f ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt	150

Figura 5.28	Comparação entre os comportamentos da frequência ‘ f ’ do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500\text{ms}$ – variação de FT	151
Figura 5.29	Exemplo da área caracterizada pela intersecção das curvas dos sinais de frequência do GSD durante o processo de ilhamento e da frequência nominal do sistema	152
Figura 5.30	Comportamento da métrica VMIT para diferentes perturbações e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcoss circulares) e a EHC (linha tracejada com marcoss quadrados) – $FT = 1,0$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4	155
Figura 5.31	Comportamento da métrica VMIT para diferentes perturbações e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcoss circulares) e a EHC (linha tracejada com marcoss quadrados) – $\Delta t = 500\text{ms}$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4	156
Figura 5.32	Comportamento da métrica AFN para diferentes perturbações e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcoss circulares) e a EHC (linha tracejada com marcoss quadrados) – $FT = 1,0$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4	157
Figura 5.33	Comportamento da métrica AFN para diferentes perturbações e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcoss circulares) e a EHC (linha tracejada com marcoss quadrados) – $\Delta t = 500\text{ms}$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4	158
Figura 5.34	Comportamento da métrica VMIT para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcoss circulares) e a EHC (linha tracejada com marcoss quadrados) – ajuste base do controlador de potência reativa e perturbação P1	159
Figura 5.35	Comportamento da métrica VMIT para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcoss circulares) e a EHC (linha tracejada com marcoss quadrados) – $\Delta t = 500\text{ms}$ e perturbação P1	160
Figura 5.38	Evolução cronológica dos estágios das simulações para eventos que desencadeiam a excursão terminal do GSD quando o mesmo opera em paralelo com a SD regulando a injeção de potência reativa no sistema .	160
Figura 5.36	Comportamento da métrica AFN para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcoss circulares) e a EHC (linha tracejada com marcoss quadrados) – ajuste base do controlador de potência reativa e perturbação P1	161

Figura 5.37	Comportamento da métrica AFN para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcos circulares) e a EHC (linha tracejada com marcos quadrados) – $\Delta t = 500\text{ms}$ e perturbação P1	162
Figura 5.39	Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD com o controle dessa variável (CQ) aplicado em seu SE frente ao aumento de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	163
Figura 5.40	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD com controle de potência reativa (CQ) aplicado em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	163
Figura 5.41	Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD com o controle de potência reativa (CQ) e a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – aplicados em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	164
Figura 5.42	Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD com o controle de potência reativa (CQ) e a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – aplicados em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	165
Figura 5.43	Comportamento do fator de potência ' FP ' do GSD com o controle de potência reativa (CQ) e a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – aplicados em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	166
Figura 5.44	Comportamento da tensão terminal do GSD ' V_t ' com a ETC – com a manipulação de chaves habilitada – e a EHC aplicadas em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	166
Figura 5.45	Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – e a EHC aplicadas em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	167
Figura 5.46	Comportamento do fator de potência de operação ' FP ' do GSD com a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – e a EHC aplicadas em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE	167
Figura A.1	Sistema de controle teste I com representação de saturação na variável de controle para caracterização do problema de <i>windup</i>	186
Figura A.2	Comportamento do sinal de saída do controlador ' u ' e do sinal de controle de entrada da planta ' $\hat{u}$ ' do sistema de controle teste I frente a aplicação de um degrau unitário na referência ' w ' do sistema de controle – caracterização do problema de <i>windup</i>	187

Figura A.3	Comportamento do sinal de erro de controle ‘ e ’ para o sistema de controle teste I com e sem a representação de saturação frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – caracterização do problema de <i>windup</i>	188
Figura A.4	Comportamento do sinal de saída do integrador ‘ i ’ para o sistema de controle teste I com e sem a representação de saturação frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – caracterização do problema de <i>windup</i>	188
Figura A.5	Comportamento do sinal da variável controlada ‘ y ’ para o sistema de controle teste I com e sem a representação de saturação frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – caracterização do problema de <i>windup</i>	189
Figura A.6	Comportamento do sinal de saída do integrador ‘ i ’ para o sistema de controle teste I frente a aplicação de um degrau unitário na referência da ‘ w ’ do sistema de controle – sem saturação e com saturação considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT – caracterização do problema de <i>windup</i>	190
Figura A.7	Comportamento do sinal da variável controlada ‘ y ’ para o sistema de controle teste I frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – sem saturação e com saturação considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT – caracterização do problema de <i>windup</i>	190
Figura A.8	Sistema de controle teste II com representação de mudança de modo de controle para caracterização do problema de <i>bumped transfer</i>	191
Figura A.9	Comportamento do sinal de saída do modo automático de controle ‘ u ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – caracterização do problema de <i>bumped transfer</i>	192
Figura A.10	Comportamento do sinal de controle de entrada da planta ‘ $\hat{u}$ ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – caracterização do problema de <i>bumped transfer</i>	192
Figura A.11	Comportamento do sinal da variável controlada ‘ y ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – caracterização do problema de <i>bumped transfer</i>	193
Figura A.12	Comportamento do sinal de saída do modo automático de controle ‘ u ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT	193

Figura A.13 Comportamento do sinal da entrada da planta ' $\hat{u}$ ' do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT	194
Figura A.14 Comportamento do sinal da variável controlada ' y ' do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT	194

Lista de tabelas

Tabela 1	Cenários de RP pré-pertubação para análise dos resultados de formação do sistema ilhado	133
Tabela 2	Perturbações aplicadas para análise dos resultados de formação do sistema ilhado	133
Tabela 3	Perturbações aplicadas para análise dos resultados de excursão de tensão terminal do GSD	158
Tabela 4	Ajustes do controladores PID dos sistemas de controle teste I e II . . .	187
Tabela 5	Valores utilizados para a representação da saturação na caracterização do problema de <i>windup</i>	187
Tabela 6	Impedâncias dos componentes de rede do sistema teste – base $100M_{VA}$	195
Tabela 7	Parâmetros do modelo dinâmico do GSD – base $30M_{VA}$	196
Tabela 8	Parâmetros do modelo dinâmico do SE	197
Tabela 9	Parâmetros do modelo dinâmico da malha de controle de potência reativa	197
Tabela 10	Parâmetros do modelo dinâmico da malha de controle de velocidade . .	197

Lista de siglas

AFN Área de Frequência Normalizada

ANATEM Análise de Transitórios Eletromecânicos

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

AW *Anti-Windup*

AWBT *Anti-Windup Bumpless Transfer*

BT *Bumpless Transfer*

CAG Controle Automático de Geração

CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CD Concessionária Distribuidora

CDU Controladores Definidos pelo Usuário

COROCOF *Comparison of Rate of Change of Frequency*

EHC Estrutura Híbrida de Controle

ETC Estrutura Típica de Controle

FACTS *Flexible Alternating Current Transmission System*

FP Fator de Potência

GD Geração Distribuída

GS Gerador Síncrono

GSD Gerador Síncrono Distribuído

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

MS Máquina Síncrona

OC Objetivo de Controle

OCPR Objetivo de Controle de Potência Reativa

OCT Objetivo de Controle de Tensão

ONS Operador Nacional do Sistema

PI Proporcional + Integral

PID Proporcional + Integral + Derivativo

PMU *Phasor Measurement Unit*

PRODIST Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PLCC *Power Line Carrier Communication*

PSS *Power System Stabilizer*

QEE Qualidade da Energia Elétrica

ROCOF *Rate of Change of Frequency*

RP Regime Permanente

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*

SD Subestação Distribuidora

SDEE Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SEP Sistema Elétrico de Potência

SE Sistema de Excitação

SIN Sistema Interligado Nacional

SISO *Single-Input Single-Output*

SVC Seguimento da Variável de Controle

VMIT Valor Mínimo de Tensão

VSR *Vector Surge Relay*

ZND Zona de Não Detecção

Sumário

1	Introdução	33
1.1	Objetivo Geral	42
1.2	Objetivos Específicos	43
1.3	Estrutura do Texto	43
2	Sistemas de Excitação de Máquinas Síncronas	47
2.1	Considerações Iniciais	47
2.2	Requisitos do Sistema de Excitação	48
2.3	Estrutura Geral de um Sistema de Excitação	49
2.4	Objetivos de Controle do Sistema de Excitação	52
2.5	Estrutura Típica de Controle de Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos Distribuídos	54
2.6	Considerações Finais	57
3	Formação e Esquemas de Detecção de Ilhamento com Geradores Síncronos	59
3.1	Considerações Iniciais	59
3.2	Aspectos Técnicos Associados a Formação de Sistemas Ilhados	60
3.3	Aspectos Regulatórios Associados a Sistemas Ilhados	64
3.4	Esquemas de Detecção de Ilhamento	66
3.4.1	Técnicas Remotas	67
3.4.2	Técnicas Locais	69
3.4.3	Discussões Adicionais	76
3.5	Considerações Finais	77
4	Proposta da Estrutura Híbrida de Controle de Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos Distribuídos	79
4.1	Considerações Iniciais	79

4.2	Caracterização dos Problemas de <i>Windup</i> e <i>Bumped Transfer</i> em Sistemas de Controle e Respectivas Compensações	80
4.2.1	Problema de <i>Windup</i>	80
4.2.2	Compensação <i>Anti-Windup</i>	83
4.2.3	Problema de <i>Bumped Transfer</i> em Sistemas de Controle	85
4.2.4	Compensação <i>Bumpless Transfer</i>	86
4.2.5	Discussões Adicionais	87
4.3	Estrutura Híbrida de Controle	89
4.3.1	Apresentação da Estrutura Híbrida de Controle	89
4.3.2	Apresentação de Exemplos Ilustrativos do Funcionamento da Estrutura Híbrida de Controle	93
4.4	Considerações Finais	115
5	Resultados da Pesquisa	117
5.1	Considerações Iniciais	117
5.2	Ferramenta de Análise Computacional	117
5.3	Sistema Teste	119
5.3.1	Representação do Carregamento do Sistema Teste	120
5.3.2	Modelo Dinâmico do Gerador Síncrono Distribuído	121
5.3.3	Modelo Dinâmico do Sistema de Excitação	125
5.3.4	Modelo do Controlador de Potência Reativa	128
5.3.5	Modelo Dinâmico do Sistema de Regulação de Velocidade	130
5.4	Resultados para Eventos que Desencadeiam na Ocorrência de Ilhamento .	132
5.4.1	Características Gerais das Simulações	132
5.4.2	Desempenho da Estrutura Típica de Controle frente a Classe de Perturbações Avaliada	134
5.4.3	Desempenho da Estrutura de Controle Proposta e sua Comparação com o Desempenho da Estrutura Típica de Controle frente a Classe de Perturbações Avaliada	144
5.5	Resultados para Outros Eventos que Desencadeiam na Excursão da Tensão Terminal	156
5.5.1	Características Gerais das Simulações	157
5.5.2	Desempenho da Estrutura Típica de Controle para a Classe de Perturbações Avaliada	162
5.5.3	Desempenho da Estrutura Proposta e sua Comparação com a Estrutura Típica para a Classe de Perturbações Avaliada	165
5.6	Considerações Finais	168
6	Conclusões e Perspectivas Futuras de Desenvolvimento	169
6.1	Conclusões da Pesquisa	169

6.2 Perspectivas Futuras de Desenvolvimento	172
Referências	175
Apêndices	183
APÊNDICE A Caracterização dos Problemas de <i>Windup</i> e <i>Bumped Transfer</i>	185
A.1 O Problema de <i>Windup</i> e sua Compensação	185
A.2 O problema de <i>Bumped Transfer</i> e sua Compensação	189
APÊNDICE B Parâmetros do Sistema Teste	195
B.1 Dados de Rede do Sistema Teste	195
B.2 Parâmetros do Gerador Síncrono Distribuído	196
B.3 Parâmetros do Sistema de Excitação	196
B.4 Malha de Controle de Potência Reativa	196
B.5 Parâmetros da Malha de Controle do Sistema de Velocidade	197

Introdução

Devido ao fato de ser possível realizar o seu transporte a longas distâncias, a uma alta taxa de eficiência e com custos associados economicamente viáveis, a energia elétrica assumiu o posto de um dos recursos energéticos de maior relevância no contexto da sociedade contemporânea (SAADAT, 1999). Dessa forma, além de sua disponibilidade estar diretamente relacionada ao próprio bem estar da sociedade, sua utilização está associada a praticamente todos os segmentos produtivos de economias industrializadas.

Dada a popularização do consumo de energia elétrica, os sistemas elétricos passaram por intensas modificações em sua estrutura e forma de operação ao longo de sua história. Essas foram decorrentes da necessidade constante de aumento da capacidade de demanda atendida, bem como do aumento dos níveis de confiabilidade de operação. No final do século XIX, os sistemas elétricos eram constituídos essencialmente por geradores de pequeno porte, os quais operavam de forma isolada, suprindo potência a cargas geograficamente próximas as suas localizações. Em fase posterior empreendimentos de maior porte foram estabelecidos, os quais eram constituídos por grandes centrais de geração. Esses empreendimentos, em sua generalidade, se concentravam distantes dos centros consumidores em consequência da distribuição geográfica das fontes primárias de energia, e eram então conectados a extensas linhas de transmissão de alta tensão, formando blocos de carga-geração isolados que não possuíam frequência padronizada. Por fim, na década de 1920, tais blocos de carga-geração isolados passaram por um processo de interligação, no qual foi estabelecida uma frequência elétrica padronizada de operação, estabelecendo Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) de grande porte (BORBELY; KRIEDER, 2001).

Além do aumento da confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, a operação interligada resultou em diversas vantagens econômicas e operacionais aos sistemas elétricos. Entre esses benefícios, tem-se a cooperação mútua entre as áreas do sistema – ou seja, áreas com escassez de geração podem ser atendidas por áreas com excedente, através de uma manobra de intercâmbio de potência no sistema de transmissão interligado – bem como o aumento da reserva energética do sistema em sua totalidade (KUNDUR, 1994). Resultante do processo de interligação, foi caracterizada uma estrutura padrão para as

redes dos SEPs, a qual é muitas vezes denominada na literatura como “típica”, sendo essa preponderante até os dias atuais. Essas redes foram concebidas com o principal objetivo de transportar energia elétrica de um número reduzido de blocos de geração com grande capacidade instalada, para uma quantidade elevada de consumidores dispersos ao longo do sistema. Do ponto de vista topológico, a estrutura típica dos SEPs assumiu um arranjo hierárquico composto por sistemas de geração, seguidos pelos sistemas de transmissão e subtransmissão, ambos operando em altos níveis de tensão e com característica malhada para fins de redundância operativa. Seguidos desses estão os sistemas primários e secundários de distribuição, patamares onde está alocada grande parcela dos consumidores finais. Esses patamares operam em média e baixa tensão, respectivamente, e possuem em sua predominância características radiais (JENKINS et al., 2000; DONDI et al., 2002).

Apesar de bem estabelecido, nas últimas décadas o modelo de geração imposto pela estrutura típica dos SEPs vem apresentando sinais claros de fragilidade. Em SEPs nos quais a matriz energética é baseada fundamentalmente no aproveitamento de recursos hídricos, são recorrentes problemas associados a sazonalidade das estações chuvosas. No caso do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, que possui essa característica, graves crises energéticas são oriundas desse problema. Pode-se citar, por exemplo, a crise ocorrida no ano de 2001, em que foi comum a ocorrência de políticas de racionamento de energia, os quais geraram grandes transtornos para a sociedade e perdas para a economia do país. Não muito distante, também pode ser citada a crise energética ocorrida no final do ano de 2014. Nessa crise, ao contrário da anterior, optou-se pelo constante despacho de usinas térmicas a fim de evitar políticas de racionamento de energia (PSR, 2015). Entretanto, devido ao fato de empreendimentos dessa natureza apresentarem altos custos de operação, tal opção causou prejuízos financeiros significativos para as empresas do setor elétrico, os quais incidiram diretamente sobre os consumidores finais com o aumento de tarifa da energia elétrica.

Em SEPs cuja matriz energética é fundamentalmente baseada em combustíveis fósseis, existe uma preocupação de cunho ambiental, a qual é sobretudo associada as intensas alterações climáticas verificadas nas últimas décadas. Essa preocupação se deve, em grande parte, à existência de uma pressão internacional sobre a necessidade de implantação de mecanismos produtivos que propiciem o desenvolvimento sustentável. O exemplo mais emblemático desse movimento é o Protocolo de Quioto. O mesmo configura um tratado internacional de cunho coercitivo entre países industrializados, que tem como objetivo estabelecer um compromisso de redução de emissões de gases que agravam o efeito estufa, com o objetivo de amenizar os impactos causados pelo aquecimento global. Outra preocupação desse modelo está na possibilidade do próprio esgotamento dos combustíveis fósseis a médio e longo prazo.

Já em SEPs que são fundamentados no aproveitamento nuclear, existem preocupações associadas a segurança operativa de suas plantas de geração de energia elétrica. Apesar da

tecnologia nuclear estar madura, ainda são recorrentes acidentes operativos em plantas de geração que se utilizam dessa fonte primária de energia, os quais geram impactos negativos de grandes proporções. O exemplo mais recente de ocorrência dessa natureza foi em Fukushima, no Japão, no ano de 2011. Além do aspecto de segurança, tem-se o problema com os resíduos provenientes dessa modalidade de geração de energia, sendo que ainda não existe uma solução tecnologicamente madura para o correto descarte desses. Devido aos problemas supracitados, países desenvolvidos e industrializados – como por exemplo, a Alemanha – passaram nas últimas décadas por um processo gradativo de desativação de suas plantas nucleares de geração de energia elétrica, dando preferência para fontes renováveis de energia.

Além dos problemas já elencados, o atual modelo de geração imposto pela estrutura típica dos SEPs impõe a construção de grandes empreendimentos de infraestrutura para a expansão da capacidade instalada. O mesmos possuem a característica predominante de ocupação de grandes áreas para as suas respectivas implantações, o que também acaba por acarretar em consideráveis impactos ambientais, e por consequência, em uma grande pressão popular contrária a construção dessas. Um exemplo desse acontecimento é a implantação da Usina de Belo Monte no SIN brasileiro. Desde o início de sua construção, muitas foram as revisões de projetos e pausas nas atividades nos canteiros de obra, decorrentes de movimentos contrários a sua implantação provenientes de vários segmentos da sociedade civil.

Percebe-se, então, uma necessidade em nível mundial da revisão dos modelos de geração atualmente implantados nos SEPs. Um dos pontos chave desse processo reside na diversificação da matriz energética desses sistemas, dando preferência a fontes de energia renováveis e sustentáveis. O cenário descrito, associado à desregulamentação dos mercados de energia elétrica ocorrida a partir do ano de 1990 – processo que permitiu o acesso de agentes de capital privado às redes elétricas – fez com que os sistemas interligados evoluíssem de forma a incluir geradores de pequeno porte próximos às cargas, iniciando o que vem a ser chamado de Geração Distribuída (GD) (DRIESEN; BELMANS, 2006). Devido a particularidade de cada região, não existe um consenso mundial para a definição de GD (JENKINS et al., 2000; DRIESEN; BELMANS, 2006). As definições existentes para GD usualmente seguem premissas de cunho técnico e político, e vários são os aspectos avaliados para a sua completa caracterização (ACKERMANN; ANDERSSON; SöDER, 2001). Entretanto, de modo geral, pode-se dizer que a GD está associada à geração de energia elétrica em níveis de subtransmissão e distribuição de energia elétrica,¹ sendo que, por ser normalmente de pequeno porte, não é centralmente despachada pelo operador da rede (SALIM, 2011). É importante citar que a definição de GD apresentada independe da fonte primária de energia utilizada para a geração de energia elétrica. Entretanto, é válido destacar que grande parte dos empreendimentos de GD se utilizam de fontes renováveis de

¹Este trabalho está direcionado na modalidade de GD aplicada nos sistemas de distribuição dos SEPs.

energia, os quais são principalmente baseados em aproveitamento do potencial hídrico de pequenos rios, fotovoltaico, eólico e da biomassa proveniente de atividades agropecuárias (JENKINS et al., 2000; ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

No que tange ao modo da conexão elétrica com a rede, as tecnologias aplicadas para geração de energia pela GD são classificadas em dois grandes grupos. O primeiro é composto por dispositivos que geram energia em frequência diversa da rede em que os mesmos estão conectados, ou em corrente contínua. As tecnologias pertencentes a esse grupo necessitam de uma interface baseada em eletrônica de potência para a padronização da energia gerada em formato adequado para a conexão com a rede elétrica. Por sua vez, o segundo grupo é composto por máquinas rotativas de corrente alternada, síncronas ou assíncronas de gaiola de esquilo, que permitem a conexão direta dos seus terminais com a rede elétrica. Em termos mundiais pode-se afirmar que a tendência de aplicação de GD está em dispositivos pertencentes ao primeiro grupo citado (EL-KHATTAM; SALAMA, 2004), devido a característica da energia primária utilizada para a geração de energia. No entanto, em muitos países o Gerador Síncrono (GS)² é utilizado para aplicações de GD (GRANVILLE et al., 2009; SHINJI; YOKOYAMA; HAYASHI, 2009; WANG; ZHONG, 2009; MOHAMAD; BAKAR; MOKHLIS, 2013).

Especificamente no caso brasileiro, verifica-se uma posição privilegiada no contexto mundial devido a sua enorme potencialidade de geração síncrona através do aproveitamento de recursos hídricos de pequenos rios (ANEEL, 2017a), os quais são abundantes em seu território, e da biomassa proveniente de sua extensa atividade agropecuária (GRANVILLE et al., 2009). Nesse caso, a não necessidade da aplicação de dispositivos de eletrônica de potência para a realização da interface gerador/rede implica em redução de custos de implantação do sistema de geração, melhorando a viabilidade econômica do empreendimento. Adicionalmente, quando comparado com a máquina de indução de gaiola de esquilo – a qual também pode ser conectada à rede sem a necessidade de interface de eletrônica de potência – o GS possibilita o controle do seu nível de excitação, o que é uma vantagem do ponto de vista operacional e de controle. Além de ser possível o ajuste mais preciso dos níveis de tensão ou da potência reativa injetada através de seus terminais, um melhor desempenho dinâmico da rede em que o mesmo se conecta pode ser alcançado.³

Devido a GD ser um conceito relativamente recente na história da operação dos SEPs, o planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs) típicos foi realizado sem a previsão de inserção de geração em sua infraestrutura. Em outros termos, foi previsto no momento de seu projeto um fluxo de potência unidirecional, sempre percorrendo o sentido da alta para a baixa tensão (JENKINS et al., 2000). Com a conexão de geradores distribuídos aos SDEEs, a característica predominantemente passiva dessas

²O desenvolvimento deste trabalho está direcionado para essa tecnologia de geração.

³Apesar de não ser comum a aplicação de controles suplementares à malha de corrente de campo de GSs aplicados nos patamares de distribuição dos SEPs, são conhecidos os seus efeitos benéficos no amortecimento de oscilações eletromecânicas nessas redes (KUIAVA et al., 2008).

redes não é mais válida, pois essas começam a apresentar características operativas de sistemas de grande porte mas, notoriamente, em menores proporções. Isso posto, com o advento da GD novas possibilidades operativas foram incorporadas tanto aos SDEEs quando aos GSs que estão conectados a esses sistemas.⁴

Dentre as novas possibilidades operativas conferidas aos SDEEs oriundas do advento da GD, está a possibilidade da operação ilhada⁵ desses sistemas. O ilhamento ocorre quando parte da rede elétrica do SDEE torna-se eletricamente isolada da Subestação Distribuidora (SD), e o subsistema isolado continua a ser energizado pelos geradores distribuídos conectados no interior do mesmo (IEEE, 2003b). O fenômeno que resulta no ilhamento de determinada porção do SDEE pode ser resultante de eventos planejados ou não planejados.⁶ Os eventos classificados como planejados são geralmente decorrentes de ações de manutenção em parte da rede elétrica do SDEE. Nesses casos, são realizados procedimentos quando se deseja viabilizar o ilhamento, visando uma transição suave do modo de operação da rede. Por outro lado, eventos não planejados são decorrentes de faltas ou de falhas de equipamentos que compõem a infraestrutura do SDEE. Nesses casos, as condições operativas do SDEE antes da ocorrência da perturbação podem ser as mais variadas possíveis, o que pode acarretar em transitórios severos no sistema quando da ocorrência do ilhamento. Inclusive, quando da formação decorrente de eventos não planejados, a operação estável do sistema ilhado não é garantida devido a possibilidade de falta de capacidade de geração para atender a carga do sistema ilhado recém-formado (KATIRAEI; IRAVANI; LEHN, 2005).

A plena utilização do conceito de operação de sistemas ilhados ainda esbarra em um grande número de problemas de cunho técnico (WALLING; MILLER, 2002; XU; MAUCH; MARTEL, 2004). Dentre esses problemas, merecem destaque àqueles relacionados a segurança e a complexidade operativa associada a operação dos sistemas ilhados – a qual requer dos SDEEs um nível de automatismo que os mesmos usualmente não possuem em sua infraestrutura. Além desses, uma das maiores ressalvas da aplicação do conceito de operação ilhada de SDEEs reside nos índices de Qualidade da Energia Elétrica (QEE)⁷ disponibilizados aos consumidores conectados nessas redes. Ainda não é um consenso que geradores distribuídos operando de forma ilhada sejam capazes de manter o mesmo nível de QEE provida pela Concessionária Distribuidora (CD). Devido aos geradores distri-

⁴A análise de GSs e suas respectivas malhas de controle quando conectados aos sistemas de transmissão de alta tensão, característica aderente ao arranjo típico dos SEPs, já está bem estabelecida na literatura. Exemplo de referências que abordam esse tema são Kundur (1994), Sauer e Pai (1998), Anderson e Fouad (2002) e Machowski, Bialek e Bumby (2008).

⁵Também é comumente utilizada a expressão “operação autônoma” para caracterizar o isolamento sustentado de parte da rede elétrica do SDEE do restante do sistema.

⁶Além desse, existe o processo de recomposição da porção ilhada do SDEE com o sistema de grande porte. No contexto deste trabalho, devido aos riscos operativos de sua execução, subentende-se que esse processo não é realizado indiscriminadamente. Portanto, ele sempre será classificado como planejado.

⁷Para um aprofundamento acerca dos índices de QEEs aplicados no contexto operativo dos SDEEs brasileiros, recomenda-se a leitura de ANEEL (2017b).

buidos serem geralmente de pequena capacidade nominal, variações em suas grandezas quando operando de forma ilhada – principalmente tensões e frequência – devido as constantes variações de carga são mais pronunciadas, acarretando em uma depreciação dos índices de QEE fornecidos aos consumidores atendidos pelos mesmos (DUGAN, 2002). Tal característica gera ressalvas por parte das CDs, visto que essas são responsáveis pela manutenção dos índices de QEE fornecidos aos seus clientes independentemente da condição operativa do SDEE (VIEIRA JR, 2006).

Contraditoriamente, a aplicação do conceito de operação de sistemas ilhados traz consigo benefícios claros para o ambiente de GD. Dentre esses, merece destaque o aumento dos índices de confiabilidade de fornecimento de energia aos usuários que estão conectados em SDEEs que permitem a aplicação dessa prática operativa. Essa é uma alternativa às técnicas comumente aplicadas, as quais se utilizam de conceitos de redundância através da instalação de circuitos paralelos, os quais evidentemente apresentam custos de implantação elevados (PILO; CELLI; MOCCI, 2004; COSTA; MATOS, 2009). Além dos consumidores, as melhorias oferecidas pela operação de sistemas ilhados são estendidas para outros agentes que participam do ambiente de GD (COSTA; MATOS, 2009). Para os autoprodutores podem ser providos aumentos de receitas a partir da injeção de energia extra na rede quando da formação do sistema ilhado. Já para as CDs, pelo aumento da confiabilidade de suas redes, existe a potencialidade da redução de multas pagas aos consumidores decorrente do não atendimento dos níveis mínimos dos indicadores de continuidade do serviço.⁸ A partir dos argumentos apresentados, a não utilização do conceito de operação de sistemas ilhados caracteriza um contrassenso, o qual impede a plena utilização dos benefícios oriundos do conceito de GD.⁹

Os argumentos provenientes dos entraves associados à operação ilhada de SDEEs estão sendo contrapostos pelos argumentos provenientes de seus benefícios, e verifica-se uma tendência de disseminação da aplicação desse conceito operativo. Entretanto, conforme já mencionado, a plena aplicação do conceito de operação de sistemas ilhados ainda carece de muitas análises do ponto de vista técnico. Além dos problemas já elencados, cabe citar àquele caracterizado pela notável diferença observada na operação dos geradores distribuídos quando operando em paralelo com a SD e quando operando de forma autônoma dessa (TRINDADE et al., 2010). Na primeira condição operativa citada, os geradores distribuídos comumente são ajustados para operar com valores pré-definidos de potência ativa e reativa injetados na rede. Já na segunda condição operativa, devido a ausência da conexão com o sistema de grande porte, os geradores distribuídos devem fornecer os suportes de tensão e frequência necessários para operação adequada do sistema ilhado (MOHAMAD et

⁸Para um aprofundamento acerca dos indicadores de continuidade do serviço de energia elétrica aplicadas no contexto operativo dos SDEEs brasileiros, recomenda-se a leitura de ANEEL (2017b).

⁹Tal argumento é válido partindo-se do princípio de que os geradores distribuídos que participam da formação de sistemas ilhados sejam capazes de atender as cargas com os valores de tensão, frequência e outros parâmetros de QEE em conformidade com os níveis regulamentados na localidade de sua operação.

al., 2011). A alteração do modo operativo dos geradores distribuídos durante o processo de ilhamento – especialmente quando esse é decorrente de eventos não planejados – é um fator que gera preocupação. Se realizada de forma inadequada, tal alteração possui a potencialidade de amplificar os transitórios observados na rede durante o processo de ilhamento, acarretando em severos desvios nas grandezas elétricas da mesma.

Os desvios nas grandezas elétricas da rede devem ser observados com cautela por dois principais motivos. O primeiro deriva do fato de ser justamente nos SDEEs onde se conecta a maior parcela dos consumidores finais dos SEPs. Portanto, desvios nas grandezas elétricas dessas redes podem gerar impactos significativos diretos sobre os consumidores, decorrente do não atendimento aos índices regulamentados de QEE. O segundo motivo está relacionado a empreendimentos de GD que se utilizam de GSs, os quais configuram o foco de análise deste trabalho e serão referenciados neste texto por Geradores Síncronos Distribuídos (GSDs). Os GSDs usualmente possuem relés de proteção que têm como função retirá-los de operação quando verificadas condições adversas de operação. Portanto, consideráveis excursões nas grandezas elétricas da rede podem desconectar os GSDs da mesma, inviabilizando o próprio processo de formação do sistema ilhado (TRINDADE et al., 2010). Dados os argumentos apresentados, é consenso entre os profissionais da área que se faz necessária uma transição suave dos modos de operação dos geradores distribuídos na ocorrência de ilhamento (KATIRAEI et al., 2008a), sendo que propostas para garantir essa característica ainda constituem um desafio no campo de pesquisa (OLIVARES et al., 2014). Tal desafio é válido independentemente da tecnologia aplicada para a geração, mas é potencializado na aplicação de GSDs. Devido a esses dispositivos apresentarem dinâmicas de natureza eletromecânica, as respostas desses frente a perturbações são lentas, principalmente quando comparadas as respostas obtidas com a aplicação de tecnologias que se utilizam de interface de eletrônica de potência (CALDON; ROSSETTO; TURRI, 2004). Por consequência, a aplicação de GSDs no âmbito da operação de sistemas ilhados constitui um desafio maior do ponto de vista de controle (BEST et al., 2007).

No contexto apresentado, é dado destaque para a malha de controle da corrente de campo do GSD, visto que é notável a sua influência sobre o comportamento dinâmico do gerador controlado, e por consequência, da rede em que o mesmo é conectado (ANDERSON; FOUAD, 2002). O controle da corrente de campo do GSD é desempenhado por um conjunto de elementos denominado Sistema de Excitação (SE). A principal função do SE é fornecer a corrente contínua necessária ao enrolamento de campo do GSD, de forma que o mesmo atenda a um determinado Objetivo de Controle (OC). Os OCs tipicamente aplicados nos sistemas de excitação de GSs, são: o Objetivo de Controle de Tensão (OCT) e o Objetivo de Controle de Potência Reativa (OCPR) (IEEE, 2016). O OCT é predominantemente aplicado em GSs conectados aos sistemas de transmissão de alta tensão, devido a capacidade dos mesmos em contribuir com a estabilidade transitória (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2002) e de tensão do sistema interligado (HURLEY; BIZE; MUM-

MERT, 2002). No contexto de sistemas ilhados, a aplicação desse OC é realizada quando da operação ilhada do GSD, devido a necessidade de fornecimento de suporte de tensão ao sistema. Por sua vez, o OCPR começou a apresentar maior aplicação em geradores síncronos após o advento da GD, sendo a sua utilização adequada quando o GSD opera em paralelo com o sistema de grande porte. Nesses casos a regulação de potência reativa, e por consequência do Fator de Potência (FP), além de prover vantagens financeiras ao autoprodutor pela maximização da capacidade nominal do gerador na produção de potência ativa, também propicia vantagens operativas a geradores de menor potência nominal (EBERLY; SCHAEFER, 2002), característica predominante em geradores conectados nos patamares de distribuição dos SEPs.

Apesar de suas vantagens técnicas no contexto de GD, evidencia-se que a aplicação do OCPR não é realizada de forma indiscriminada. Quando aplicado esse OC, do ponto de vista estático, a barra em que o GSD é conectado deixa de possuir características de barra de geração e passa a apresentar características de barra de carga. Em outros termos, o controle do fluxo de potência reativa vem em detrimento do controle de tensão. Quando o GSD é conectado em barras eletricamente fortes¹⁰ do SDEE isso não configura um problema. Entretanto, o mesmo não é válido quando o GSD é conectado a barras eletricamente fracas. Grande parcela de empreendimentos de GD são de baixa potência, o que não justifica a construção de um alimentador dedicado para a conexão direta do mesmo com a SD. Dessa forma, o empreendimento de GD é conectado a rede elétrica do SDEE existente¹¹ no qual usualmente não foi prevista a inserção de geração. Nessas redes, além de altos valores de impedância, não é incomum de serem verificadas baixas relações de impedância por resistência – denominadas por relações “ X/R ” (WALLACE; KIPRAKIS, 2002). Nessa condição, quando da aplicação do OCPR, os valores de tensão podem experimentar excursões significativas, fato que gera ressalvas por parte das distribuidoras, visto que essas – conforme já comentado – são as responsáveis pela manutenção das grandezas do SDEE em conformidade com os níveis regulamentados, independentemente da condição operativa da rede (VIEIRA JR, 2006).

A partir das informações apresentadas nos parágrafos anteriores, fica claro que durante o processo de formação de um sistema ilhado, ou na recomposição desse com o sistema de grande porte, fica caracterizada uma modificação no OC aplicado ao sistema de excitação do GSD. Se vista no formato de diagrama de blocos, essa transição representa uma modificação na estrutura do sistema de controle do SE. A literatura sugere que essa modificação geralmente é realizada através de ação de chaveamento (WALLACE; KIPRAKIS, 2002; MOHAMAD; BAKAR; MOKHLIS, 2013), a qual é comandada por um sis-

¹⁰No contexto deste trabalho, a força elétrica de uma barra é caracterizada pelos seus níveis de corrente de curto-circuito, no sentido de que quanto maiores esses níveis, mais forte é a barra. Em sistemas radiais, isso pode ser interpretado como a distância elétrica entre a barra avaliada e a fonte caracterizada pela SD.

¹¹Na indústria, a conexão de GD nessa modalidade é denominada como “conexão em pingo”.

tema responsável por detectar a ocorrência de ilhamento.¹² É de consenso geral que, se realizada de forma inadequada, a modificação de estruturas de sistemas de controle pode induzir transitórios severos em suas respectivas plantas, o que não é desejável.¹³

Na literatura são encontrados trabalhos que objetivam amenizar os transitórios observados quando da alteração do modo operativo dos geradores distribuídos no contexto operativo de sistemas ilhados. Entretanto, as técnicas observadas estão dirigidas essencialmente para geradores distribuídos que possuem interface de eletrônica de potência com a rede. Exemplos desses trabalhos são Tirumala, Mohan e Henze (2002), Gao e Iravani (2008), Chen et al. (2010), Yao, Xiao e Yan (2010), Mohamed e Radwan (2011), Gehrke, Souza e Lima (2015) e Das, Gurralla e Shenoy (2017). Alguns trabalhos contemplam a transição entre OCs do sistema de excitação de GSDs. Exemplos desses trabalhos são Wallace e Kiprakis (2002), Katiraei et al. (2008b), Trindade et al. (2010), Lima (2013) e Mohamad, Bakar e Mokhlis (2013). Entretanto, quando realizadas simulações dinâmicas considerando a formação de sistemas ilhados aplicando essa tecnologia de geração, o foco da análise está direcionado na sobrevivência do sistema ilhado após a desconexão com o sistema de grande porte. Aspectos do impacto dos transitórios gerados nas variáveis do gerador – e por consequência, da rede em que os mesmos se conectam – decorrente da modificação do OC do sistema de excitação através da alteração de sua estrutura de controle, bem como medidas para amenizar os mesmos, não são contemplados.

Também são reportadas na literatura medidas para evitar que a tensão do GSD excursionasse para além dos limites desejados quando o mesmo opera em paralelo com a SD e controla a injeção de potência reativa na rede (WALLACE; KIPRAKIS, 2002). Essas medidas são baseadas no monitoramento dos níveis de tensão terminal do GSD. Quando verificada a condição operativa inadequada, o OCT é estabelecido via ação de chaveamento para o manutenção da tensão terminal do GSD em níveis desejados, a qual possui similaridade com a solução aplicada quando da formação do sistema ilhado. Além da modificação de OC pela ação de chaveamento, o que não é desejável do ponto de vista de controle, a operação do GSD está direcionada para o atendimento dos níveis de tensão desejados, não sendo estabelecido um compromisso entre a sua tensão controlada e a injeção de potência reativa na rede. Essa característica pode implicar numa alta circulação de potência reativa através dos terminais do GSD controlado, ocasionando problemas de técnicos e econômicos ao mesmo (FARNHAM; SWARTHOUT, 1953; RIBEIRO, 1991; BERUBE; HAJAGOS; BEAULIEU, 1995; KUNDUR, 1994).

A partir dos parágrafos supracitados fica clara a necessidade da caracterização do impacto gerado pela modificação da estrutura de controle do sistema de excitação de GSDs,

¹²Esses sistemas são denominados na literatura por sistemas de proteção anti-ilhamento, os quais serão discutidos no Capítulo 3 deste texto.

¹³É importante citar que, sob a ótica deste trabalho, a severidade do transitório de uma determinada variável está diretamente relacionada a sua excursão durante o período dinâmico em relação aos seus valores observados na condição pré e pós-perturbação, no sentido de que quanto maior a excursão da variável durante esse período em relação a esses pontos, mais severo é o transitório observado.

da forma em que é tipicamente realizada, durante o processo de ilhamento e quando da extrapolação da tensão controlada para além de limites desejados. Com os impactos caracterizados, é desejável que seja proposta uma estrutura de controle de SE que possua a capacidade de ajustar a excitação do GSD controlado de acordo com a condição operativa do mesmo, sem a necessidade de sua modificação através da manipulação de chaves, caracterizando uma estrutura híbrida de controle de tensão e potência reativa. Devido a importância da malha de controle do SE sobre o comportamento dinâmico dos GSDs – e por consequência, da rede em que o mesmo se conecta – esperasse que essa estrutura amenize os transitórios observados no sistema durante o processo de ilhamento, aumentando a probabilidade da formação bem sucedida do sistema ilhado, além de diminuir os potenciais impactos negativos sobre os consumidores nele conectados. Adicionalmente, esperasse que a estrutura proposta estabeleça um compromisso entre os valores de potência reativa e tensão terminal do GSD controlado, quando da operação do mesmo em paralelo com a SD ditada pelo OCPR. Nessa condição, a estrutura proposta deverá manter em condições de Regime Permanente (RP) o valor de potência reativa de operação do gerador controlado o mais próximo da referência ajustada no sistema de controle, mantendo a tensão terminal desse equipamento dentro de uma faixa desejada. É exatamente no contexto apresentado que se enquadra a proposta de pesquisa deste trabalho, sendo que o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura do texto estão apresentados na sequência.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa consiste em propor uma estrutura híbrida de controle de tensão e potência reativa a ser aplicada em SEs de geradores síncronos conectados nos patamares de distribuição dos SEPs, denominados neste trabalho de GSDs. Além de apresentar independência operativa com relação a sistemas de proteção externos a malha de controle, o arranjo proposto não apresentará alteração de sua estrutura quando da mudança de modo operativo do SDEE, bem como quando da extrapolação dos níveis de tensão controlada para além de valores desejados, e será concebida a partir de arranjos de controle já bem conhecidos e aceitos pela indústria. Além das características elencadas, quando da operação em paralelo com a SD ditada pelo OCPR, a estrutura proposta deverá estabelecer um compromisso entre o valor de sua variável de controle e a tensão terminal do GSD controlado para condições de RP. Desse modo, a potência reativa deverá ser regulada para o valor mais próximo da referência ajustada no sistema de controle, sem que isso implique no não atendimento dos limites desejados para os valores de tensão terminal.

1.2 Objetivos Específicos

- ❑ Analisar aspectos associados a SEs de geradores síncronos, bem como os OCs usualmente aplicados aos mesmos, apontando a estrutura de controle tipicamente aplicada em GSDs que operam em SDEEs que admitem a operação ilhada de determinadas porções de suas redes. No contexto apresentado, deverá ser destacada a forma em que os OCs dessa estrutura são usualmente modificados, evidenciando a importância das técnicas de proteção anti-ilhamento nesse processo;
- ❑ Verificar aspectos técnicos e regulatórios associados a formação e operação de sistemas ilhados, destacando as vantagens de sua aplicação, bem como a tendência da aplicação desse conceito operativo em SDEEs que possuem geradores distribuídos em sua infraestrutura;
- ❑ Apontar as técnicas de proteção anti-ilhamento reportadas na literatura, destacando a tendência de aplicação por parte da indústria;
- ❑ Caracterizar os transitórios verificados quando da ocorrência de ilhamento em condições em que é aplicada a estrutura típica de controle no sistema de excitação dos GSDs, fazendo uma correlação entre a severidade desses com as técnicas de proteção anti-ilhamento usualmente aplicadas pela indústria;
- ❑ Caracterizar os impactos negativos da aplicação da estrutura de controle típica de controle sobre a operação do GSD controlado, quando verificada uma extrapolação de sua tensão terminal para além dos limites desejados;
- ❑ Propor uma estrutura híbrida de controle de tensão e potência reativa a ser aplicada aos sistemas de excitação de GSDs. Como premissa para a concepção desse arranjo, deverão ser utilizados elementos básicos da teoria clássica de controle – os quais possuem maior aceitação por parte da indústria – além da independência operativa de sistemas de proteção externos a malha de controle;
- ❑ Estabelecer uma comparação entre os desempenhos da estrutura de controle proposta e da estrutura de controle típica, evidenciando os ganhos da aplicação da primeira estrutura de controle citada.

1.3 Estrutura do Texto

O texto está organizado de forma que sejam apresentados os elementos necessários para a compreensão e a caracterização dos problemas apresentados neste capítulo de introdução, bem como as suas respectivas soluções através da estrutura híbrida de controle proposta – a qual configura o principal produto desta pesquisa.

Na sequência é realizada uma breve descrição dos capítulos que compõem este texto e os seus respectivos conteúdos:

- ❑ **Capítulo 2** – *Sistemas de Excitação de Máquinas Síncronas*: apresenta uma revisão bibliográfica acerca de SEs aplicados em Máquinas Síncronas (MSs), destacando os seus elementos constituintes, funções e OCs comumente aplicados em sua lógica de controle. Adicionalmente, é apresentada a estrutura de controle tipicamente aplicada em sistemas de excitação de GSDs que operam em SDEEs que permitem a prática de ilhamento;
- ❑ **Capítulo 3** – *Formação e Esquemas de Detecção de Ilhamento com Geradores Síncronos*: apresenta as principais vantagens e problemas relacionados a operação de sistemas ilhados, destacando a tendência da aplicação desse conceito operativo. Além disso, são apontados aspectos regulatórios nacionais acerca da operação ilhada de SDEEs. Neste capítulo, também são destacados os métodos aplicados em GSDs reportados na literatura para a detecção dessa condição operativa, destacando as suas principais características e a tendência de aplicação por parte da indústria;
- ❑ **Capítulo 4** – *Proposta da Estrutura Híbrida de Controle de Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos Distribuídos*: apresenta a estrutura híbrida de controle que atenderá aos objetivos elencados neste capítulo de introdução. Além de suas principais características, também são apresentados aspectos teóricos das técnicas de controle que forneceram subsídios para sua concepção, bem como aspectos de seu funcionamento através de simulações numéricas;
- ❑ **Capítulo 5** – *Resultados da Pesquisa*: apresenta os resultados obtidos com a aplicação da estrutura típica de controle e da estrutura híbrida de controle proposta por esta pesquisa, os quais são obtidos via solução numérica de equações que representam o comportamento dinâmico de um sistema teste com características representativas. A partir desses resultados é estabelecida uma comparação entre o comportamento do sistema teste quando operando com a estrutura típica de controle, e o comportamento do sistema quando aplicada a estrutura híbrida de controle proposta, frente a diferentes cenários operativos e perturbações. Através dessa comparação será evidenciado o desempenho superior da estrutura híbrida de controle proposta;
- ❑ **Capítulo 6** – *Conclusões e Perspectivas Futuras de Desenvolvimento*: apresenta as principais conclusões da pesquisa. Além disso, são elencadas as perspectivas futuras de desenvolvimento de trabalho decorrentes da estrutura híbrida de controle proposta;
- ❑ **Apêndice A** – *Caracterização dos Problemas de Windup e Bumped Transfer*: caracteriza os problemas de *windup* e *bumped transfer* presentes em sistemas de controle

através de simulações numéricas. Adicionalmente, são apresentadas as soluções comumente aplicadas para os problemas citados, as quais fundamentam a estrutura híbrida de controle proposta por esta pesquisa;

- **Apêndice B:** *Parâmetros do Sistema Teste* – apresenta os parâmetros de rede e dos modelos dinâmicos que compõem o sistema teste a partir do qual os resultados da pesquisa foram gerados.

Sistemas de Excitação de Máquinas Síncronas

2.1 Considerações Iniciais

O objetivo primário dos SEPs é prover tensões senoidais balanceadas, com magnitude e frequência dentro de níveis aceitáveis a seus consumidores (SAUER; PAI, 1998). Devido à MS ser o dispositivo predominantemente utilizado para a conversão eletromecânica de energia nos SEPs, essa deve ser capaz de contribuir significativamente para o objetivo supracitado ser alcançado. Tal função é realizada por intermédio da atuação de sistemas de controle que ajustam automaticamente grandezas da MS, de forma que requisitos demandados pelas condições operativas do sistema no qual a mesma se conecta sejam atendidos.

Os principais sistemas de controle da MS são constituídos pelas malhas de controle de corrente de campo e de velocidade. Em termos gerais, a malha de corrente de campo atua sobre a corrente contínua aplicada no enrolamento de campo da MS, impactando diretamente sobre sua tensão terminal ou sobre a potência reativa injetada no sistema.¹ Por sua vez, o controle de velocidade atua sobre o torque exercido sobre o eixo do rotor da MS através do ajuste do sistema de admissão da sua fonte primária de energia, impactando diretamente sobre sua frequência mecânica de rotação ou sobre a potência elétrica ativa injetada no sistema.¹

O foco deste capítulo está no controle de corrente de campo, o qual é desempenhado por um conjunto de elementos denominado SE.² De forma a descrever as características de SEs, o presente capítulo do texto está dividido como segue: em um primeiro momento serão apresentados os requisitos gerais atribuídos ao SE. Posteriormente, a estrutura geral

¹A grandeza controlada depende da topologia do sistema em que a MS é conectada, bem como do seu tamanho (em termos de potência nominal) perante o mesmo.

²Devido ao escopo do trabalho, no decorrer do texto o termo SE sempre irá se referir ao aplicado em MSs.

do SE será apresentada em formato de um diagrama funcional de blocos, destacando os seus principais elementos constituintes e respectivas funções. Na sequência, serão descritos os principais OCs aplicados ao SE. Por fim, será apresentada a estrutura de controle de SEs de geradores síncronos que operam em SDEEs que admitem a ocorrência de ilhamento.

2.2 Requisitos do Sistema de Excitação

Conforme já mencionado, o SE tem como principal função fornecer a corrente contínua necessária ao enrolamento de campo da MS, de modo que seu respectivo OC seja atendido. Tal sistema não deve, no entanto, estar limitado somente a essa função, pois certos requisitos devem ser observados e obrigatoriamente cumpridos para que tanto o desempenho da MS quanto o desempenho do sistema em que a mesma é conectada seja satisfatório (KUNDUR, 1994).³

Os valores limítrofes das grandezas da MS são determinados em termos de sua potência aparente operacional máxima, com valores de tensão terminal e FP especificados, os quais geralmente são os nominais apresentados nos dados de placa do equipamento. Tais valores definem a região geométrica denominada “diagrama de capacidade”, a qual delimita a região segura da operação da MS em regime permanente. As grandezas limitantes da operação da MS são a máxima corrente nos enrolamentos de armadura e os valores mínimo e máximo de corrente no enrolamento de campo. No contexto apresentado, o SE, além da função primordial de atender ao seu OC, tem por requisito ajustar a corrente de campo em valores adequados de forma a garantir a operação segura da MS em condições de RP.

É inevitável e eventualmente desejável, no entanto, que durante condições transitórias a MS opere momentaneamente fora da região delimitada pelo diagrama de capacidade. Assim, o SE incorpora também as capacidades de sobrecarga de curto prazo da MS, em que são permitidos valores mais elevados de suas grandezas elétricas por um tempo definido. Essas capacidades estão definidas pela mesma origem dos limites considerados na operação em RP, adicionando o limite de máxima tensão que pode ser aplicada ao enrolamento de campo, e o limite de sobreaquecimento devido ao excesso de fluxo magnético em seu núcleo.

Do ponto de vista sistêmico, o SE tem a capacidade de controlar as tensões de barramentos vizinhos à MS, contribuindo ativamente para o aprimoramento da estabilidade do sistema. Especificamente no cumprimento desse objetivo, o SE deve ser capaz de responder rapidamente às variações de tensão causadas por perturbações, de forma a aprimorar a estabilidade transitória do sistema. Além disso, o SE deve ser capaz de modular adequadamente a corrente aplicada em seu enrolamento de campo, a fim de melhorar a estabilidade do sistema a pequenas perturbações.

³Este capítulo do texto foi baseado, em grande parte, no que é descrito em Kundur (1994). Por simplicidade, em certos trechos do texto a omissão da citação deixa subentendido que mantém-se a consulta a tal material de referência.

De forma concisa, os requisitos que devem ser cumpridos pelo SE podem ser sintetizados nos seguintes tópicos:

- atender aos critérios de resposta e controle especificados;
- prover funções de limitação e de proteção para prevenir danos a si próprio, a MS e a outros equipamentos presentes no sistema elétrico;
- ser capaz de operar em condições distintas e, paralelamente, atender aos requerimentos especificados para cada condição;
- atender aos níveis de confiabilidade e disponibilidade desejados.

2.3 Estrutura Geral de um Sistema de Excitação

Ao longo de décadas, foi empregado um grande esforço por parte de projetistas na elaboração de SEs que fossem capazes de atender aos requisitos elencados na Seção 2.2 deste capítulo.

Decorrente disso, inúmeros foram os arranjos de SEs utilizados na indústria,⁴ os quais se diferenciam principalmente pela fonte de energia utilizada para sua alimentação – a qual é denominada de excitatriz.

Os primeiros arranjos de SEs eram compostos por excitatrizes de corrente contínua e sistemas de controle com atuadores eletromecânicos.

Os problemas associados às constantes manutenções das máquinas de corrente contínua e a atuação lenta dos dispositivos eletromecânicos, concomitantemente ao aumento das capacidades nominais das MSs controladas e a evolução da eletrônica de potência, culminaram no desenvolvimento de SEs com excitatrizes de corrente alternada com pontes retificadoras e atuadores eletrônicos. Com os avanços citados, além do aumento na velocidade de resposta desses SEs, houve uma redução na necessidade de manutenções e consequentes paradas das MSs controladas.

Apesar dos substanciais avanços, as excitatrizes ainda eram constituídas por elementos rotativos. Devido ao fato de serem de natureza mecânica, além de conferirem uma baixa confiabilidade, as excitatrizes rotativas conferiam dinâmicas eletromecânicas adicionais aos SEs, as quais resultavam em atrasos de tempo que vinham em detrimento da resposta dinâmica da MS controlada.

Através da contínua evolução no campo de eletrônica de potência, a qual culminou em dispositivos semicondutores de maior capacidade nominal, foi possível a concepção de SEs sem partes móveis, comumente referenciados como SEs estáticos, sendo essa topologia o estado da arte em termos de arranjos de SEs e a mais aplicada em geradores de alta potência nominal (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008). A concepção desse arranjo, o

⁴Para obter uma descrição completa acerca do histórico do desenvolvimento dos SEs aplicados na indústria, recomenda-se a leitura do sétimo capítulo de Anderson e Fouad (2002).

qual possui como característica principal a alimentação a partir dos próprios terminais da MS ou através de um sistema auxiliar, conferiu aos SEs grandes magnitudes de tensões máximas aplicadas ao enrolamento de campo – comumente referenciadas pelo jargão “tensão de teto” – e reduziu substancialmente a velocidade das respostas desses sistemas, resultando em constantes de tempo praticamente desprezíveis quando comparadas àquelas observadas no comportamento dinâmico da MS.

Os arranjos dos SEs modernos são caracterizados por vários elementos que, além da função primordial de controle, possuem funções de limitação e proteção, as quais seguem uma hierarquia definida de operação. As funções de controle regulam determinadas grandezas da MS, de forma que o requisito imposto pelo OC do sistema de excitação seja atendido. Por sua vez, as funções limitadoras possuem o objetivo de evitar que essas grandezas ultrapassem limites pré-definidos, de forma a garantir a operação segura tanto do SE quanto da MS controlada. As funções de proteção atuam em última instância, retirando determinados elementos do SE – e até mesmo em condições severas a própria MS controlada – de operação quando a atuação das funções limitadoras não é suficiente para garantir a segurança operativa desses dispositivos.

Dessa forma, os atuais SEs são caracterizados por uma estrutura complexa, que pode ser generalizada através do diagrama funcional apresentado na Figura 2.1.⁵ Na sequência, cada elemento apresentado nesse diagrama será brevemente descrito⁶:

- ❑ **Regulador:** nesse elemento é implementado o OC do sistema de excitação para que a MS controlada opere na condição desejada. Em condições normais operativas, seu funcionamento se baseia em comparar as grandezas atuais da MS com sua referência ajustável e, a partir disso, gerar uma ação de controle para eliminar o erro de controle observado;
- ❑ **Excitatriz:** elemento responsável por prover a potência elétrica necessária ao enrolamento de campo da MS controlada. Esse elemento constitui a principal característica para a classificação dos SEs. Essa classificação compreende excitatrizes rotativas, constituídas por máquinas de corrente contínua ou alternada (com respectivas fontes retificadoras), ou excitatrizes estáticas;
- ❑ **Circuitos de proteção do enrolamento de campo:** elementos responsáveis por evitar a indução de sobretensões no enrolamento de campo (decorrentes de eventos sistêmicos), as quais apresentam risco de danificar o isolamento dos condutores que compõem o mesmo;

⁵É importante ressaltar que o diagrama apresentado é genérico, e configura um caso de um SE completo. Dependendo de sua aplicação, do seu arranjo e de seu fabricante, um SE pode conter todos ou somente alguns dos elementos apresentados.

⁶Para um maior conhecimento acerca dos elementos que constituem um SE típico, recomenda-se a leitura de IEEE (2007) e Kundur (1994). A primeira referência apresenta definições gerais desses elementos, enquanto a segunda apresenta os seus aspectos operativos.

Figura 2.1 – Diagrama funcional de uma estrutura completa de SEs aplicado em MSs

Fonte: Adaptado de Kundur (1994)

- ❑ **Circuitos estabilizadores do SE:** possuem a função de diminuir o ganho do sistema de controle do SE – que geralmente é alto para atender requisitos operativos de RP – em regime transitório, melhorando o desempenho dinâmico da MS controlada (IEEE, 1981);
- ❑ **Limitador de sobre-excitação:** evita a circulação de altas correntes no enrolamento de campo da MS, por um período de tempo que seja capaz de causar danos em seu isolamento decorrentes de sobreaquecimento (IEEE, 2016);
- ❑ **Limitador de subexcitação:** limita a corrente de campo da MS em um valor mínimo (IEEE, 2016). São duas as principais razões para a aplicação desse dispositivo (RIBEIRO, 1991). A primeira é evitar que o torque sincronizante da MS atinja um nível no qual a mesma perca o sincronismo com a rede na qual está conectada (BERUBE; HAJAGOS; BEAULIEU, 1995). A segunda é evitar aumentos elevados de temperatura em determinados pontos da MS (FARNHAM; SWARTHOUT, 1953)⁷;
- ❑ **Limitador e proteção *Volts/Hertz*:** a ação do limitador *Volts/Hertz* impede que o quociente entre a tensão terminal e a frequência – o qual corresponde proporcional-

⁷Essa característica é observada principalmente em MSs com desenho antigo.

mente ao fluxo magnético presente no núcleo do estator da MS, e do transformador elevador de tensão que está conectado nos terminais da mesma – exceda um nível que tenha a potencialidade de causar danos a esses equipamentos, decorrente do estabelecimento de um sobrefluxo magnético (IEEE, 2007). Por sua vez, a proteção atua como retaguarda do limitador, desconectando a MS de operação quando a atuação do limitador for ineficiente em garantir a operação segura, tanto da MS controlada quanto do transformador elevador;

- **Estabilizador do SEP⁸:** adiciona sinais estabilizadores ao SE com o objetivo de produzir torques elétricos em fase com a velocidade do rotor da MS (ANDERSON; FOUAD, 2002), objetivando evitar o aparecimento de oscilações de potência mal amortecidas nos SEPs;
- **Transdutor:** é constituído por um conjunto de elementos que possui a função de prover os sinais de realimentação do SE. No caso do OCT, um compensador de carga⁹ pode ser adicionado ao ramo de transdução do SE. Além de permitir o controle de tensão em um ponto do sistema distinto do qual essa grandeza está sendo mensurada, pode ser realizado um compartilhamento adequado de potência reativa entre unidades geradoras que operam em paralelo.

2.4 Objetivos de Controle do Sistema de Excitação

O controle da corrente contínua necessária ao enrolamento de campo da MS – que constitui a função elementar do SE – objetiva atender ao requisito operativo imposto pelo OC programado em seu regulador.

Dois OCs são predominantes em aplicações de SEPs (IEEE, 2016). O primeiro é constituído pelo controle de tensão, o qual é denominado nesta pesquisa por OCT. Nesse OC, a corrente do enrolamento de campo da MS é ajustada de forma a manter a tensão em determinado ponto do sistema¹⁰ em um valor desejado. Por sua vez, o segundo é caracterizado pelo controle de potência reativa ou fator de potência de operação da MS, o qual é denominado nesta pesquisa de OCPR.¹¹ Nesse OC a corrente de campo é ajustada de forma a controlar a injeção de potência reativa no sistema, mediante a modificação da diferença de fase entre os sinais das tensões e correntes terminais da MS controlada.

⁸Elemento comumente referenciado pelo acrônimo PSS, proveniente da expressão em inglês “*Power System Stabilizer*”.

⁹Neste trabalho não foi considerada a presença de compensador de carga nos modelos dinâmicos que caracterizam os seus resultados. Devido a isso, neste texto a tensão controla pelo SE sempre irá se referir a tensão terminal do GSD controlado.

¹⁰Pela não consideração do compensador de carga, tal ponto será tomado neste trabalho como os terminais da MS controlada.

¹¹Apesar do acrônimo fazer menção a potência reativa, deve estar claro ao leitor que o mesmo também se estende ao controle de FP. De fato, o controle do FP impacta sobre a potência reativa, sendo válida também a afirmativa contrária.

Do ponto de vista de regulação de tensão, as MSs presentes em SEPs podem ser classificadas em dois grupos (HURLEY; BIZE; MUMMERT, 2002). O primeiro grupo é composto por MSs das quais se espera contribuição efetiva na regulação da tensão do sistema. As MSs pertencentes a esse grupo geralmente possuem potências nominais elevadas e são conectadas aos sistemas de transmissão de alta tensão. Para essas máquinas, é tipicamente aplicado o OCT. O segundo grupo é constituído por MSs em que não se espera a contribuição na regulação de tensão, mas sim, que as mesmas sigam variações das tensões do sistema nas quais estão conectadas. As MSs pertencentes a esse grupo geralmente possuem baixas potências nominais e são conectadas aos patamares primários e secundários dos SDEEs. Devido ao seu pequeno porte frente ao sistema, essas máquinas – em teoria – possuem pouca influência sobre a regulação de tensão do mesmo, sendo justificável nesse caso a aplicação do OCPR.

Devido ao histórico de formação dos SEPs, os quais se consolidaram como sistemas interligados compostos primordialmente por MSs de grande porte, o OCT é o que encontra maior aplicação. Além da função elementar da manutenção das tensões dos SEPs em níveis adequados – o que é imprescindível para a operação adequada dos mesmos – a adoção desse OC apresenta significativa contribuição para a estabilidade transitória (CONCORDIA, 1944; ANDERSON; FOUAD, 2002) e de tensão desses sistemas.¹²

Com o advento do conceito de GD, em que a conexão de pequenos geradores nos SDEEs se tornou uma prática comum, a aplicação do OCPR se tornou mais frequente. Essa aplicação ocorre principalmente em empreendimentos de GD cujo o objetivo é a comercialização ou compensação de energia. Geralmente nesses empreendimentos os autoprodutores não são recompensados por serviços ancilares, como por exemplo, o fornecimento de potência reativa ao SDEE, mas sim pela potência ativa injetada na rede. Além disso, frequentemente esses agentes são passíveis de multas caso não atendam aos níveis de FP estipulados pela CD no ponto de conexão da sua unidade consumidora com o SDEE. No contexto apresentado, além de evitar multas, o controle de potência reativa propicia um maior retorno financeiro ao autoprodutor, maximizando a capacidade nominal de suas MSs para a geração de potência ativa.¹³

Além das vantagens financeiras advindas de sua aplicação, o OCPR confere vantagens operativas para as MSs de pequeno porte, as quais comumente são utilizadas em aplicações de GD. Não é incomum a verificação de flutuação dos níveis de tensão das barras de SDEEs. Esse evento é decorrente das constantes variações de cargas observadas nesses sistemas, somando-se à característica radial com altas impedâncias das redes que os com-

¹²Nas discussões apresentadas no final de Hurley, Bize e Mummert (2002), é reportada uma experiência do sistema estadunidense com a aplicação do OCPR em MSs conectadas ao sistema de transmissão. A partir dessa experiência, obteve-se como conclusão que a adoção desse OC contribuiu para a instabilidade do sistema sob análise frente a ocorrência de uma perturbação.

¹³Esta afirmativa é válida quando a referência do OCPR é ajustada próxima ao valor nulo (FP unitário), sendo que a escolha do valor dessa referência dependente dos critérios operativos da CD no qual o autoprodutor se conecta, bem como das restrições operativas do sistema.

põem. Esse fenômeno é especialmente pronunciado em barras eletricamente distantes da SD, e que são atendidas por alimentadores carregados (EBERLY; SCHAEFER, 2002).

Na ocorrência de variações de tensão, quando operando com o OCT, a MS modifica a potência reativa injetada no sistema, na tentativa de corrigir a variação de tensão observada. Entretanto, do ponto de vista elétrico, em aplicações de GD geralmente a dimensão da MS é reduzida se comparada a da SD. Nessa condição, as excursões do nível de corrente de excitação tendem a ser elevadas, podendo levar a MS a operar em condições de subexcitação ou sobre-excitação, resultando primeiramente em atuação dos limitadores presentes no SE, ou em problemas de aquecimento ou perda de torque sincronizante caso os limitadores presentes no SE atuem de forma inadequada (FARNHAM; SWARTHOUT, 1953; RIBEIRO, 1991; BERUBE; HAJAGOS; BEAULIEU, 1995). Além disso, mesmo no caso de atuação adequada dos limitadores, essa configura uma condição operativa indesejada, haja vista que do ponto de vista de controle o SE não responde mais da forma esperada.

Do ponto de vista de formulação de fluxo de carga, a barra onde a MS que opera com o OCT se conecta possui características de barra de geração. Nessa condição, a MS opera com os valores de potência ativa injetada na rede e tensão terminal definidos. Por sua vez, a barra onde a MS que opera com o OCPR é conectada adquire características de barra de carga, onde os valores das potências ativa e reativa injetadas são definidos. Nessas condições, quando utilizado o OCPR, o controle de fluxo de potência reativa (ou FP) vem em detrimento do controle dos níveis de tensão terminal. No contexto apresentado, atenção especial tem que ser dada para MSs que operam conectadas diretamente a redes de distribuição (WALLACE; KIPRAKIS, 2002). Nessas redes, além da presença de valores de impedância relativamente altos, os seus alimentadores comumente apresentam baixas relações de reatância por resistência, também conhecidas por relação “ X/R ”. Nessa condição, as MSs podem experimentar excursões de tensão terminal quando operando com o OCPR. Se muito pronunciadas, essas excursões têm a potencialidade de retirar as MSs de operação decorrente da operação de sistemas de proteção de sub/sobretensão, e em situações mais críticas nas quais tais sistemas operam de forma insatisfatória, de gerar prejuízos aos consumidores e equipamentos conectados ao SDEE.

Apesar das vantagens operativas advindas de sua aplicação em empreendimentos de GD, a partir dos argumentos apresentados fica implícito que a adoção do OCPR gera ressalvas até mesmo nessas condições. Desse modo, fica caracterizada a necessidade da proposição de arranjos que mitiguem os problemas anteriormente caracterizados.

2.5 Estrutura Típica de Controle de Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos Distribuídos

Um GSD que opera em um SDEE que admite a ocorrência de ilhamento, pode apresentar no regulador de seu sistema de excitação ambos os OCs apontados na Seção 2.4

deste capítulo (TRINDADE et al., 2010).

Quando operando em paralelo com o sistema de grande porte, é conveniente que o GSD possua o controle de potência reativa injetada no sistema, a fim de se obter as vantagens operativas provenientes da aplicação do OCPR. Evidentemente, esta afirmação está diretamente associada às características da rede a qual o GSD está conectado, haja vista que as mesmas influenciam a factibilidade de operação do gerador nesse OC (WALLACE; KIPRAKIS, 2002). Já quando operando ilhado, devido à ausência da conexão com o sistema de grande porte, o GSD deve prover o suporte de tensão necessário para a operação adequada do sistema (MOHAMAD et al., 2011).

Uma estrutura de controle frequentemente reportada na literatura (WALLACE; KIPRAKIS, 2002; IEEE, 2016; MOHAMAD; BAKAR; MOKHLIS, 2013) que possui ambos os OCs contemplados em sua lógica de operação é representada pelo diagrama funcional apresentado na Figura 2.2, a qual possuirá no decorrer do texto a denominação de Estrutura Típica de Controle (ETC). A concepção da ETC parte da adição de um sinal suplementar à referência do controle de tensão, proveniente de um controlador do tipo Proporcional + Integral (PI), cujo sinal de entrada é o erro (e_1) proveniente da comparação entre o valor do sinal ‘X’ desejado (X_{ref}) e o valor do sinal ‘X’ mensurado (X_{men}). Da forma em que está arranjado, o controlador PI modula o sinal de referência do controle de tensão (V_{ref}) através do seu sinal de saída (V_{PI}) para que o GSD opere com a variável ‘X’ com o valor ajustado na referência. A soma dos sinais de referência de tensão e de saída do controlador PI é comparada com a tensão mensurada (V_{men}), gerando um segundo sinal de erro (e_2). O sinal ‘ e_2 ’ é então amplificado e fornecido para a excitatriz, onde é gerada a tensão necessária a ser aplicada no enrolamento de campo (E_{FD}) do GSD controlado para que o OC seja atendido.

O sinal ‘X’ pode ser caracterizado pelo FP ou pela potência reativa de operação do GSD. Apesar da variável de controle ser diferente, a lógica citada no parágrafo anterior é similar para ambas. Esta afirmativa decorre do fato dos valores de FP de operação e a potência reativa injetada no sistema pelo GSD estarem diretamente associadas.

Figura 2.2 – Diagrama funcional da estrutura de controle comumente aplicada ao sistema de excitação de GSDs que operam em SDEEs que permitem ilhamento

Fonte: Adaptado de IEEE (2016)

O ajuste dos parâmetros desse arranjo é realizado de tal forma que a resposta do controle de tensão possua uma resposta mais rápida que o controle de potência reativa (HURLEY; BIZE; MUMMERT, 2002). O objetivo desse ajuste é fazer com que, na ocorrência de perturbações, a malha de controle de tensão forneça o suporte de tensão necessário ao sistema, contribuindo efetivamente para a estabilidade do GSD. Por sua vez, o controlador PI assume a característica de controle de regime permanente, ajustando a excitação após a ocorrência da perturbação, de forma que o GSD injete a potência reativa desejada no sistema. A filosofia de parametrização citada estabelece uma hierarquia de operação entre os OCs, com o OCT assumindo uma característica de regulação primária, e o OCPR assumindo uma característica de regulação secundária.¹⁴

A literatura sugere que a mudança de OC da estrutura apresentada pela Figura 2.2 seja realizada através da manipulação da chave “A” (WALLACE; KIPRAKIS, 2002; MOHAMAD; BAKAR; MOKHLIS, 2013), a qual depende da sensibilização de um sistema de proteção externo (VIEIRA JR, 2006). Do ponto de vista da ocorrência do ilhamento, infere-se que o elemento responsável pela manipulação da chave “A” é constituído por um sistema de proteção anti-ilhamento. Essa suposição parte do princípio que sistemas de proteção anti-ilhamento são os mais efetivos na tarefa de identificar a operação ilhada do GSD, e portanto, os mais indicados em informar o SE sobre essa condição operativa.

Enquanto fechada, a chave “A” impõe o OCPR ao sistema de excitação do GSD controlado e, quando aberta, impõe o OCT. Devido as características operacionais dos sistemas de proteção anti-ilhamento aplicados na indústria, a mudança de estado da chave “A” pode não ser realizada no exato momento da ocorrência do ilhamento do GSD.¹⁵ Do exposto, quando da ocorrência do ilhamento, é verificada a seguinte sequência de eventos na estrutura apresentada pela Figura 2.2:

- o GSD atua com o OCPR nos primeiros instantes após a ocorrência do ilhamento;
- o sistema de detecção de ilhamento é sensibilizado;
- um comando de abertura é enviado para a chave “A”, retirando o PI da estrutura de controle do SE, e por consequência, impondo o OCT ao gerador controlado;
- concomitantemente, caso seja necessário e desejado, o valor da referência do controle de tensão (V_{ref}) pode ser reajustado para um valor adequado à operação do sistema ilhado.

¹⁴Uma analogia pode ser estabelecida com a malha de controle de velocidade aplicada em MSs centralmente despachadas. O controle de velocidade configura a malha de controle primária, atuando rapidamente em condições transitórias para o restabelecimento da potência mecânica aplicada ao eixo do gerador, enquanto o Controle Automático de Geração (CAG) atua após decorrido um período de tempo, anulando o erro de frequência do sistema ou outro OC desejado, como por exemplo, o intercâmbio de potência entre áreas de determinado sistema elétrico.

¹⁵As características dos sistemas de proteção anti-ilhamento tipicamente aplicados na indústria serão apresentadas em detalhes no Capítulo 3 deste texto.

Decorrente das características dos sistemas de detecção de ilhamento usualmente aplicados na indústria, nos primeiros instantes após a ocorrência do ilhamento – condição na qual o OCPR continua em operação – fica caracterizada uma operação instável ao GSD, com os valores de sua frequência e sua tensão terminal divergindo de seus valores observados na condição pré-perturbação. O período de operação nessa condição é definido pela latência de identificação do ilhamento pelo sistema dedicado a essa tarefa. O comportamento instável é justificado pelo fato da potência reativa demandada pela carga geralmente diferir da referência ajustada no controlador, fazendo com que o erro entre a potência reativa gerada e a ajustada na referência (e_1 na Figura 2.2) nunca seja anulada pela ação integral de controle. Tal comportamento não seria verificado apenas na condição em que a demanda de potência reativa pelo sistema ilhado possuísse exatamente o mesmo valor que o ajustado na referência do sistema de controle. Entretanto, do ponto de vista prático, essa condição operativa é inefetiva. Isso advém do fato das cargas presentes no SDEE variarem constantemente, tanto em valor quanto em característica.¹⁶

No que diz respeito ao tratamento de excursões de tensão terminal do GSD para além dos valores regulamentados, quando o mesmo opera conectado em paralelo com a SD controlando a potência reativa, a literatura sugere que a solução desse problema seja realizada de forma análoga ao que ocorre quando da ocorrência do ilhamento (WALLACE; KIPRAKIS, 2002), sendo válido para essa condição o diagrama funcional apresentado pela Figura 2.2, bem como a sua lógica de funcionamento. A única diferença em relação a situação de ocorrência de ilhamento consiste na substituição do sistema de proteção anti-ilhamento por sistemas de proteção de sub/sobretensão, sendo a manipulação da chave “A” desencadeada quando verificada uma excursão da tensão terminal para além dos limites desejados. Nessa condição um atraso de tempo proposital pode ser adicionado a atuação das funções de proteção de sub/sobretensão, objetivando evitar que afundamentos ou elevações momentâneas na tensão terminal do GSD controlado desencadeiem uma alteração indesejada na estrutura de controle de seu SE.

2.6 Considerações Finais

Neste capítulo do texto foram apresentados os aspectos de SEs de máquinas síncronas relevantes para a contextualização desta pesquisa. Dentre os aspectos apontados, é dado destaque para estrutura de controle tipicamente aplicada no SE de geradores síncronos que operam em SDEEs que admitem a formação de sistemas ilhados. Essa estrutura contempla ambos os OCs – controle de tensão terminal e controle de potência reativa (ou

¹⁶Discussões acerca da modelagem matemática de cargas elétricas nas análises de SEPs ainda são recorrentes, e por consequência, ainda não existe um consenso acerca do assunto (IEEE, 1993). Dentre os modelos consolidados na literatura está o polinomial (IEEE, 1993; KUNDUR, 1994), o qual confere parcelas de potência, corrente ou impedância constante ao modelo matemático da carga. No contexto apresentado, o termo “característica” se refere à composição da carga do sistema em relação a essas parcelas.

FP) – através do estabelecimento de uma hierarquia de operação entre os mesmos.

Apesar de sua relativa simplicidade, a estrutura sintetizada pela Figura 2.2 apresenta problemas de origem técnica. Tanto na ocorrência de ilhamento, quanto na condição em que o gerador controlado opera em níveis indesejados de tensão terminal quando conectado em paralelo com a SD controlando a potência reativa injetada no sistema, é realizada uma mudança na estrutura de controle através da ação de chaveamento – manipulação da chave “A” – a qual gera descontinuidades em variáveis internas do SE, o que constitui uma característica indesejável a partir da ótica da teoria de sistemas de controle.¹⁷ Além disso, do ponto de vista de ilhamento, tal manobra se não planejada e realizada de forma inadequada, tem a potencialidade de contribuir para a severidade dos transitórios observados no comportamento dinâmico do GSD, e por consequência, no SDEE no qual o mesmo é conectado quando da ocorrência desse evento.¹⁸ Já do ponto de vista da excursão da tensão terminal do gerador quando o mesmo opera em paralelo com a SD regulando a injeção de potência reativa no sistema, a ação de chaveamento implica na falta do estabelecimento de um compromisso entre a potência reativa injetada e a tensão terminal, o que pode culminar no estabelecimento de um baixo FP de operação ao GSD, o que por motivos técnicos e econômicos não é desejável.¹⁸

O próximo capítulo do texto apresenta uma revisão bibliográfica dos aspectos técnicos e regulatórios acerca da operação ilhada de SDEEs. Também será realizado um apanhado do princípio operativo das principais técnicas reportadas na literatura para detecção de ilhamento de GSDs – os quais são responsáveis pela manipulação da chave “A” da estrutura de controle apresentada pela Figura 2.2 no contexto de ocorrência de ilhamento – onde será evidenciada a tendência da aplicação das mesmas por parte da indústria.

¹⁷Descontinuidades impedem a aplicação de técnicas clássicas para a análise e ajuste dos parâmetros do sistema de controle, característica que adiciona considerável complexidade a essas tarefas.

¹⁸Essa característica ficará clara a partir dos resultados apresentados no Capítulo 5 deste texto.

Formação e Esquemas de Detecção de Ilhamento com Geradores Síncronos

3.1 Considerações Iniciais

O advento da GD trouxe consigo uma série de vantagens aos SEPs (JENKINS et al., 2000; DONDI et al., 2002), que abrangem desde o ponto de vista técnico até o ponto de vista econômico (EL-KHATTAM; SALAMA, 2004). Devido à GD ser um conceito relativamente recente no contexto operativo dos SEPs, grande parcela dos SDEEs não provisionaram na época de sua implantação recursos para a inserção de geração em sua infraestrutura. No atual estágio de desenvolvimento, a GD – além da potencialidade de impactar negativamente sobre as redes desses sistemas (DRIESEN; BELMANS, 2006) – criam novos desafios do ponto de vista operativo aos SDEEs (DONDI et al., 2002). No contexto apresentado, existe uma série de questões – tanto técnicas quanto regulatórias – que ainda carecem de análise e discussão para a plena expansão dessa modalidade de geração, bem como para o completo aproveitamento dos benefícios oriundos de sua aplicação.

Dentre os desafios impostos pelo advento da GD está a possibilidade da operação ilhada de parcela do SDEE (DONDI et al., 2002). O ilhamento é definido como uma condição na qual uma determinada porção do SDEE é energizada unicamente por um ou mais geradores distribuídos localizadas em seu interior (IEEE, 2003b), não havendo conexão com o sistema interligado de grande porte caracterizado pela SD.

Muitas divergências são recorrentes a aplicação do conceito de ilhamento. Se por um lado são visíveis os seus benefícios, por outro são claros e bem fundamentados os problemas provenientes de sua aplicação, os quais são especialmente relacionados à segurança operativa do SDEE ilhado e aos índices de QEE oferecida a seus respectivos consumidores.

No contexto apresentado, este capítulo está dedicado a descrever os aspectos técnicos e regulatórios associados à formação de sistemas ilhados, evidenciando os seus desafios e o atual panorama de aplicação. Adicionalmente, serão apresentados os esquemas de detecção de ilhamento aplicados em GSDs, os quais são imprescindíveis – por razões distintas

– tanto para o caso em que essa condição operativa é permitida quanto para o caso contrário. No primeiro caso, esses sistemas são responsáveis pela desenergização do sistema ilhado, através da desconexão dos geradores distribuídos da rede. Já no segundo caso, esses sistemas são responsáveis pelas mudanças nas estruturas de controle dos geradores distribuídos, objetivando a operação adequada do sistema ilhado (VIEIRA JR, 2006), com seus níveis de tensão e frequência atendendo a uma faixa de valores considerados adequados.

3.2 Aspectos Técnicos Associados a Formação de Sistemas Ilhados

A operação independente de GSDs do sistema de grande porte pode ser caracterizada por uma operação isolada ou por uma operação ilhada, sendo importante destacar a diferença entre as mesmas. Essa distinção será realizada com o auxílio do SDEE hipotético com presença de GD ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – SDEE hipotético com GD utilizado para distinguir a operação isolada da operação ilhada

Fonte: Adaptado de Motter (2014).

A operação isolada é caracterizada pela abertura do disjuntor “DJ2”. Nessa condição o gerador distribuído alimenta unicamente as cargas de sua própria instalação (L_3), onde não é estabelecida nenhuma relação com a rede da CD.¹ Já a operação ilhada é caracterizada pela abertura do “DJ1”. Nessa condição, além de suprir a carga de sua própria instalação, o gerador distribuído injeta potência no sistema sustentando as cargas de outros consumidores (L_1 e L_2) conectados a mesma rede (MOTTER, 2014).

A operação isolada é muito comum e amplamente difundida no contexto operativo de SDEEs, sendo comumente utilizada para alimentação de cargas em horário de ponta

¹Na aplicação de GSDs isolados, é realizada uma manobra de transferência de carga em rampa, objetivando evitar problemas de estabilidade angular com a tomada repentina de carga pelo mesmo. Nessa condição, o gerador distribuído isolado possui um paralelismo momentâneo com a rede. Devido ao curto espaço de tempo dessa operação é conveniente, até mesmo nesses casos, afirmar que o gerador isolado não possui relação com a CD.

ou para retaguarda de cargas críticas. Essa modalidade de operação não gera ressalvas, haja vista que as responsabilidades decorrentes de sua aplicação não são compartilhadas com a CD. Em posição oposta, a operação ilhada – a qual configura o foco de análise desta pesquisa – gera ressalvas devido aos problemas que serão descritos na sequência.²

Um dos benefícios mais claros e indiscutíveis provenientes da aplicação do conceito de operação de sistemas ilhados está no aumento dos índices de confiabilidade de fornecimento de energia aos consumidores conectados aos SDEEs que admitem essa prática (PILO; CELLI; MOCCI, 2004; COSTA; MATOS, 2009; IEEE, 2011). Tal afirmação é especialmente válida para consumidores atendidos por redes rurais, os quais geralmente possuem infraestrutura precária, e por consequência, são susceptíveis a uma maior ocorrência de falhas.³ O conceito de operação de sistemas ilhados surge também como uma alternativa às soluções comumente aplicadas no atendimento de cargas críticas, as quais são baseadas em redundância através da implementação de circuitos paralelos de alimentação, as quais possuem altos custos de implantação (PILO; CELLI; MOCCI, 2004).

Além dos consumidores, outros agentes participantes do ambiente de GD são beneficiados pela aplicação do conceito de operação de sistemas ilhados (COSTA; MATOS, 2009). Devido à possibilidade de gerar energia em condições nas quais a rede da CD não está presente, os autoprodutores de energia podem adquirir uma remuneração extra. Já a CD pode apresentar uma redução, ou até mesmo ser isenta, do pagamento de multas aos seus consumidores pelo não atendimento dos níveis mínimos regulamentados para os indicadores de continuidade do serviço.

Sob outra perspectiva, o conceito de operação de sistemas ilhados traz consigo uma série de problemas técnicos e de segurança aos SDEEs. As principais ressalvas são sumarizadas nos itens listados na sequência (WALLING; MILLER, 2002):

- **Qualidade da Energia Elétrica (QEE):** do ponto de vista elétrico, os geradores distribuídos são inerentemente fracos se comparados àqueles presentes no sistema de grande porte caracterizado pela SD (DUGAN, 2002). Essa característica, associada à constante variação de carga observada nos patamares de distribuição dos SEPs, pode fazer com que variações de tensão e frequência em relação aos seus valores nominais sejam mais pronunciadas em um sistema ilhado, depreciando a QEE fornecida aos consumidores conectados à mesma⁴;

²Do ponto de vista da melhoria do desempenho dinâmico do gerador distribuído através da proposição de técnicas de controle quando do seu isolamento do sistema interligado de grande porte, o qual é objeto de estudo desta pesquisa, não existe diferença entre o modo de operação isolado ou ilhado. Por questões de conveniência, será dado foco ao caso ilhado devido a essa apresentar maiores desafios do ponto de vista técnico.

³Em Katiraei et al. (2008b) e Ferreira, Mendonça e Pontes (2014) são apresentados exemplos de aplicação do conceito de operação ilhada em redes de distribuição rurais, onde são evidenciadas as vantagens desta prática.

⁴Em teoria, as CD poderiam ter o controle dos índices de QEE fornecidos aos consumidores de um sistema ilhado. Entretanto, tal prática demandaria um grau de automatismo que os SDEEs geralmente não possuem, sendo esta afirmativa especialmente válida para o cenário nacional. Inclusive, a carência

- **Segurança pessoal:** o estabelecimento de um sistema ilhado pode colocar em risco a vida de trabalhadores da CD, visto que linhas podem estar energizadas em situações de ausência do sistema de alimentação principal. Essa preocupação também se estende ao público em geral (XU; MAUCH; MARTEL, 2004);
- **Religamento automático em condições inadequadas:** o religamento automático é universalmente adotado pelas CDs como primeiro método para restabelecer o fornecimento de energia aos seus consumidores na ocorrência de faltas em suas redes (MOZINA, 2001). Seu funcionamento se baseia na prerrogativa de que considerável parcela das faltas observadas em SDEEs são decorrentes de eventos momentâneos. Tomando esta afirmativa como verdadeira, o religador automático suspende a alimentação do circuito pela SD, e após decorrido um período de tempo – considerado adequado para que o evento responsável pela falta seja eliminado – o mesmo realiza tentativas de religamento do circuito com a SD. Se decorrido um determinado número de tentativas não houver sucesso na manobra de religamento, é inferido que o evento responsável pela falta não é momentâneo. Então, o circuito é mantido desenergizado até a realização de manutenção adequada. Na situação em que é permitida a formação de sistemas ilhados, os geradores distribuídos podem estar com valores de frequência, tensão e fase distintos dos fornecidos pela SD no momento do religamento (XU; MAUCH; MARTEL, 2004; VIEIRA JR, 2006). Na eventualidade da execução de um religamento nessa condição, além do estabelecimento de altas correntes que eventualmente podem causar danos na infraestrutura do sistema elétrico e sensibilizar de forma indesejada os sistemas de proteção presentes na rede, em empreendimentos de GD que optam pelo emprego de máquinas rotativas para a realização da interface elétrica com a rede, pode ser verificada a ocorrência de severos danos mecânicos nesses elementos, a qual é decorrente do estabelecimento de altos valores de conjugado eletromecânico em seus respectivos eixos (VIEIRA JR, 2006). Desse modo, a operação de religadores automáticos, que figura uma manobra simples e efetiva para o restabelecimento das condições normais de operação de redes de distribuição, passa a se tornar uma operação complexa no contexto operativo de sistemas ilhados (MOZINA, 2001);
- **Coordenação do sistema de proteção:** em SDEEs com presença de GD as correntes de curto-circuito são compostas pelas contribuições dos próprios geradores distribuídos, de motores de porte considerável e da SD, sendo a última citada – devido ao seu elevado tamanho em termos elétricos quando comparado aos outros elementos citados – geralmente responsável pela maior parcela de contribuição. Assim sendo, devido a ausência da SD, os níveis de corrente de curto-circuito da rede quando operando de forma ilhada tipicamente são consideravelmente inferior-

apontada também pode ser vista como um fator impeditivo para uma aplicação mais frequente do conceito de operação de SDEEs de forma ilhada.

res. Como consequência, os sistemas de proteção existentes possuirão atuação mais lenta, ou até mesmo poderão não atuar como previsto em projeto (VIEIRA JR, 2006);

- **Aterramento inadequado:** a desconexão com a SD pode propiciar ao sistema ilhado e aos geradores distribuídos conectados ao mesmo um aterramento inadequado. O principal problema decorrente dessa característica são as baixas correntes observadas em faltas monofásicas – as quais, inclusive, são as mais comuns em sistemas elétricos. Como consequência disso, faltas dessa natureza dificilmente sensibilizam os sistemas de proteção existentes. Dessa forma, o sistema ilhado tem a potencialidade de operar continuamente de modo inadequado, uma vez que é tipicamente observada a ocorrência de sobretensões nessas condições (VIEIRA JR, 2006).

Outro aspecto que gera ressalvas está associado ao próprio processo de ilhamento. Isso decorre do fato dos geradores distribuídos geralmente possuírem modos distintos de operação quando operando em paralelo com a SD ou em um sistema ilhado. Na primeira condição, os geradores distribuídos tipicamente são ajustados para operar com valores pré-definidos de potência ativa e reativa injetados na rede. Já na segunda condição, devido a ausência da conexão com o sistema de grande porte figurado pela SD, os geradores distribuídos fornecem os suportes de tensão e frequência necessários para operação adequada da rede isolada (MOHAMAD et al., 2011).

Do exposto no parágrafo anterior, quando da ocorrência do ilhamento fica caracterizada uma transição de modo operativo dos geradores distribuídos. Essa transição quando realizada de forma inadequada e não planejada pode amplificar os transitórios do gerador distribuído controlado observados durante o processo de ilhamento, acarretando em desvios em suas grandezas, e por consequência, da rede em que o mesmo se conecta. Esses desvios devem ser observados com cautela por dois principais motivos. O primeiro deriva do fato de ser justamente nos SDEEs onde se conecta grande parcela dos consumidores finais dos SEP. Portanto, desvios nas grandezas elétricas dessas redes podem gerar impactos significativos diretos sobre os mesmos, principalmente pelo não atendimento aos índices regulamentados de QEE. O segundo motivo está relacionado a empreendimentos de GD que se utilizam de GSDs – o que constitui o foco de análise deste trabalho. Esses geradores tipicamente possuem relés de proteção que tem como função retirá-los de operação quando verificadas condições adversas de operação. Portanto, consideráveis excursões em suas grandezas elétricas podem retirá-los de operação, inviabilizando o próprio processo de formação do sistema ilhado (TRINDADE et al., 2010).

No atual estágio de desenvolvimento tecnológico, decorrente dos problemas provenientes da operação ilhada de SDEEs, a via de regra a prática da indústria está em desconectar todos os geradores distribuídos quando constatada essa condição operativa. Para alcançar esse objetivo, cada gerador distribuído deve ser capaz de identificar a operação ilhada e se desconectar automaticamente do sistema no qual o mesmo está conectado (XU; MAUCH;

MARTEL, 2004). Dessa forma, esses equipamentos são dotados de sistemas lógicos, de controle e de medição responsáveis por essa identificação. Os princípios operativos desses sistemas serão descritos nas seções subsequentes deste capítulo.

3.3 Aspectos Regulatórios Associados a Sistemas Ilhados

Conforme já mencionado, de um modo geral, a indústria adota uma postura conservadora no que se refere a operação de sistemas ilhados, onde os argumentos contrários a sua aplicação ainda exercem grande pressão sobre os argumentos favoráveis. Dentre todos os problemas citados na Seção 3.2, os que geram maiores ressalvas são figurados pela segurança operativa da rede isolada e pelos índices de QEE fornecidos aos consumidores conectados a mesma, conforme apresentado nas subseções antecedentes deste capítulo do texto.

Decorrente das preocupações inerentes à aplicação do conceito de operação de sistemas ilhados, versões iniciais de normas de abrangência internacional recomendam a desconexão mandatória dos geradores distribuídos quando verificada a falta de suprimento de energia pela SD. Em IEEE (2003b), primeira versão da norma tomada como referência em aspectos associados à conexão de geradores distribuídos nos SDEEs, é sugerido que na ocorrência de ilhamento os sistemas de interconexão das fontes de energia distribuídas deveriam, em até dois segundos, detectar essa condição operativa e eliminá-la.

Entretanto, nos últimos anos verifica-se um movimento internacional – mesmo que ainda discreto – favorável a aplicação da prática de ilhamento, onde os argumentos favoráveis dessa prática começam a se sobrepor aos argumentos contrários. Um exemplo claro disso está na publicação de IEEE (2011), o qual configura uma norma da mesma classe que a norma IEEE (2003b) anteriormente citada. Esse documento é direcionado a suprir a falta de informações relacionadas à formação de sistemas ilhados. Além de serem apresentados aspectos de planejamento e engenharia associados a sistemas que operam nessa condição, nesse documento são estabelecidas práticas de operação dos mesmos.

No cenário brasileiro, a regulação e fiscalização da produção, transmissão e distribuição de energia elétrica é realizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Com o objetivo de garantir que os SDEEs operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade, a ANEEL elaborou um conjunto de normativas denominado de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), o qual as concessionárias distribuidoras devem obrigatoriamente observar e cumprir (ANEEL, 2016).

Seguindo o movimento internacional, o PRODIST contempla a operação ilhada de SDEEs. O terceiro módulo (ANEEL, 2017c) desse conjunto de normativas estabelece que as distribuidoras, de comum acordo com as centrais geradoras de energia e o Operador Nacional do Sistema (ONS) – esse último, quando couber – podem estabelecer a operação

ilhada de parte do SDEE, observando os procedimentos operativos constantes no quarto módulo do mesmo conjunto de normativas (ANEEL, 2010).

De um modo geral, os procedimentos operativos citados presentes no quarto módulo do PRODIST são caracterizados por (ANEEL, 2010):

- ❑ elaboração de um acordo operativo entre a CD e a central geradora e/ou transmissora envolvida – quando for o caso – onde devem constar as condições em que a operação do empreendimento de forma ilhada é permitida;
- ❑ a distribuidora deve elaborar estudos, além de instruções operativas e de segurança específicos, para a operação do sistema ilhado;
- ❑ a central geradora responsável pelo controle de frequência da parcela eletricamente separada do SDEE deve ser dotada de Controle Automático de Geração (CAG), ou qualquer outra tecnologia equivalente que seja capaz de desempenhar a mesma função, caso a operação do sistema ilhado seja utilizada de forma permanente.

Em âmbito nacional é importante citar que as CDs possuem a liberdade de estipular suas próprias normas, desde que essas estejam em consonância com os critérios mínimos estipulados pelo PRODIST. Valendo-se do que é exposto no terceiro módulo do PRODIST (ANEEL, 2017c), o qual fornece de forma clara abertura às CDs para optar pela operação ilhada de suas redes, de um modo geral, é verificado que essas ainda resistem a adoção dessa condição operativa. Nessa condição, os acessantes de GD devem prover sistemas de proteção que sejam capazes de identificar a formação de sistemas ilhados, retirando os seus geradores de operação quando estabelecida essa condição operativa.

Apesar do exposto, até mesmo no cenário brasileiro já começam a ser observadas iniciativas para a aplicação do conceito de operação de sistemas ilhados. Por exemplo, SDEEs que não estão geograficamente isolados, e que portanto poderiam ser atendidos pelo SIN, já começam a operar ilhados com o consentimento da CD. Em Ferreira, Mendonca e Pontes (2014) é apresentado um caso real em que empreendimentos de GD são utilizados para suprir cidades conectadas a alimentadores rurais, em situação em que os mesmos estão desenergizados por parte da CD. Na experiência relatada, até o momento da publicação da referência, foram realizados dezesseis ilhamentos, onde foi constatado aumento nos valores dos indicadores de continuidade do serviço e, conseqüentemente, no nível de satisfação dos clientes atendidos.

3.4 Esquemas de Detecção de Ilhamento

Os requerimentos de proteção de geradores distribuídos geralmente são impostos por normas das CDs responsáveis pela operação das redes nas quais os mesmos se conectam. Um aspecto comum dessas normas, dispostas de forma implícita ou obtidas através de simples inferência, é a necessidade de retirar os geradores distribuídos de operação quando constatada a ocorrência de ilhamento (REDFERN; USTA; FIELDING, 1993). Decorrente desse requerimento, foram desenvolvidos sistemas de proteção cuja função é identificar a ocorrência do ilhamento e retirar os geradores de operação.

A principal filosofia de operação dos sistemas responsáveis pela detecção da ocorrência de ilhamento consiste em monitorar grandezas do gerador distribuído e/ou do SDEE, e decidir se houve a ocorrência do ilhamento a partir de mudanças nas mesmas (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008). De um modo geral, o sistema responsável pela detecção dessa condição operativa – comumente referenciado como sistema de proteção anti-ilhamento – deve possuir os requisitos básicos listados na sequência (XU; MAUCH; MARTEL, 2004):

- Entre o gerador distribuído e a SD podem haver múltiplos dispositivos de seccionamento cuja atuação pode acarretar na ocorrência de ilhamento. Assim, são várias as possibilidades de formação de sistemas ilhados contemplando diferentes combinações de topologia de rede, carga e geração. No contexto apresentado, a proteção anti-ilhamento deve ser capaz de operar adequadamente em todos os possíveis cenários;
- A identificação da ocorrência do ilhamento deve ser realizada em tempo hábil. Esse período de tempo geralmente é imposto pelos religadores automáticos presentes no SDEE. O gerador distribuído deve ser retirado de operação antes da execução de um religamento automático, objetivando evitar um fechamento em condições inadequadas que pode gerar os problemas apontados na Seção 3.2 deste capítulo.

De forma a serem atendidos os requisitos acima listados, muitas técnicas de proteção anti-ilhamento foram propostas na literatura. Usualmente, essas técnicas são divididas em duas classes principais, conforme apresentado na Figura 3.2. Nas próximas subseções do capítulo serão apresentados os esquemas de proteção anti-ilhamento seguindo essa classificação. Devido ao escopo deste trabalho, a discussão aqui apresentada é direcionada para as técnicas de proteção anti-ilhamento aplicadas em GSDs^{5,6,7}. Graças a sua alta

⁵O objetivo deste texto é fornecer os princípios básicos de operação das principais técnicas de proteção anti-ilhamento aplicadas em GSDs reportadas na literatura. Para a obtenção de mais informações acerca desses métodos, sugere-se a leitura das referências bibliográficas indicadas junto da descrição das técnicas. Além disso, para o conhecimento das principais técnicas de proteção anti-ilhamento aplicadas a geradores distribuídos que possuem interface de eletrônica de potência com a rede, recomenda-se a leitura de Xu, Mauch e Martel (2004) e Velasco et al. (2010).

⁶Dada esta afirmação, neste capítulo a partir deste ponto do texto o termo “gerador distribuído” sempre irá se referir ao GSD.

⁷Geradores assíncronos diretamente conectados ao SDEEs não são capazes de sustentar um sistema

capacidade de sustentar a operação do sistema ilhado, somada às possibilidades limitadas de controle oferecidas por essa tecnologia de geração com o propósito de facilitar a detecção da ocorrência do ilhamento – a exemplo do que ocorre com tecnologias de geração que se utilizam de eletrônica de potência para a realização de interface elétrica com a rede – as técnicas de proteção anti-ilhamento aplicadas em GSDs constituem um grande desafio do ponto de vista de engenharia (XU; MAUCH; MARTEL, 2004).

Figura 3.2 – Diagrama esquemático de classificação dos métodos de proteção anti-ilhamento aplicados em geradores distribuídos

Fonte: Adaptado de Motter (2014).

3.4.1 Técnicas Remotas

As técnicas remotas de detecção de ocorrência de ilhamento têm a sua operação fundamentada na comunicação entre a CD e os geradores distribuídos. Como principal vantagem das técnicas pertencentes a essa classe, usualmente não é verificada a existência de Zona de Não Detecção (ZND),⁸ sendo por isso altamente confiáveis para a detecção da

ilhado devido a demanda de potência reativa pela mesma. Assim, a formação de sistemas ilhados utilizando essa tecnologia de geração não constitui uma alternativa factível, e são poucos os trabalhos que abordam técnicas de detecção de ocorrência de ilhamento para essas condições. Na revisão bibliográfica realizada, alguns desses métodos são brevemente citados em Mozina (2001) e Funabashi, Koyanagi e Yokoyama (2003).

⁸O conceito de Zona de Não Detecção (ZND) implica na existência de uma região, ou zona, no plano de desbalanço de potência reativa (ΔQ) por desbalanço de potência ativa (ΔP) em que um determinado sistema de proteção anti-ilhamento é ineficaz em sua função. Portanto, infere-se que quanto menor for essa região mais eficiente é o esquema de proteção avaliado (VIEIRA JR, 2006).

formação do sistema ilhado. No entanto, essas técnicas exigem uma infraestrutura de comunicação no SDEE que tende a tornar os respectivos custos de implementação elevados, tornando o empreendimento de GD menos viável do ponto de vista econômico – sendo esta afirmativa especialmente válida para empreendimentos de GD de pequena capacidade nominal – o que faz com as mesmas sejam pouco atraentes (YIN; CHANG; DIDUCH, 2004; MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008).

Abaixo são apresentadas algumas das principais técnicas remotas para detecção de ilhamento reportadas na literatura:

□ ***Supervisory Control and Data Aquisition (SCADA)*** – (POWELL, 1988; REDFERN; USTA; FIELDING, 1993; XU; MAUCH; MARTEL, 2004)

A ideia básica dessa técnica consiste em monitorar os contatos auxiliares de todos os dispositivos de seccionamento e manobra presentes na infraestrutura do SDEE. Quando verificada a abertura de um desses elementos, somada a informação da disposição geográfica dos geradores distribuídos na rede, um sistema de monitoramento e controle com inteligência embarcada – comumente constituído por um sistema SCADA – determina as áreas com formação de sistemas ilhados, e envia comandos de abertura aos disjuntores dos geradores distribuídos que propiciam essa condição operativa.

□ ***Power Line Carrier Communication (PLCC)*** – (ROPP et al., 2000; XU; MAUCH; MARTEL, 2004)

A técnica PLCC consiste na utilização dos condutores do SDEE como meio de comunicação, a exemplo do que é realizado em linhas de transmissão de sistemas de alta tensão. Um transmissor é instalado no enrolamento secundário do transformador rebaixador da SD, enquanto outros receptores são instalados nos terminais dos geradores distribuídos. Na ocorrência de falha de recebimento do sinal emitido pelo transmissor por parte dos receptores, subentende-se que houve uma interrupção da conexão elétrica entre os geradores distribuídos e a SD. Essa condição é interpretada como uma ocorrência de ilhamento, e os geradores distribuídos cujos receptores não acusaram o recebimento do sinal proveniente da SD são retirados de operação.

□ ***Comparison of Rate of Change of Frequency (COROCOF)*** – (BRIGHT, 2001)

Através de um sistema de comunicação entre a SD e os geradores distribuídos, as taxas de variação de frequência dos sinais de tensão desses extremos são comparadas. O gerador distribuído cuja taxa de variação apresentar diferença em relação a taxa de variação da SD é retirado de operação, por ser interpretada a ocorrência de ilhamento.⁹

⁹O parâmetro utilizado para comparação é o mesmo que o utilizado pela técnica denominada *Rate of*

□ *Phasor Measurement Unit* (PMU) – (ISHIBASHI et al., 2004)

Essa técnica requer a instalação de unidades de medição fasorial na SD e nos geradores distribuídos, bem como o estabelecimento de um sistema de comunicação entre os mesmos. Valendo-se da prerrogativa de que na ocorrência de um ilhamento ocorrerá um desbalanço de potência ativa gerada e consumida no sistema ilhado, haverá uma consequente mudança no valor do ângulo da tensão terminal dos geradores distribuídos. O gerador distribuído cuja tensão terminal apresentar diferença angular, em relação a tensão da SD, superior a um valor determinado em ajuste é retirado de operação por ser interpretada a sua operação ilhada.

3.4.2 Técnicas Locais

As técnicas locais são baseadas nas informações disponíveis no ponto de interconexão do gerador distribuído com o SDEE. Geralmente, essa informação já está disponível como parte do controle do gerador distribuído, sendo que sensores e componentes adicionais não são requeridos para a implementação das mesmas (YIN; CHANG; DIDUCH, 2004). Essas técnicas são divididas em passivas, ativas e híbridas (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008). Essas subdivisões serão descritas na sequência.

3.4.2.1 Técnicas Locais Passivas

O princípio operativo das técnicas locais passivas está baseado unicamente em medidas das grandezas locais do gerador distribuído, sendo por isso consideradas as técnicas mais simples da classificação apresentada pela Figura 3.2, e por consequência, as que possuem o menor custo de implantação. As técnicas locais passivas assumem como prerrogativa que na ocorrência de ilhamento haverá desbalanço entre carga e geração na ilha formada, e por consequência, as grandezas do gerador distribuído sofrerão variações capazes de sensibilizar os sistemas de proteção anti-ilhamento.

As técnicas locais são relativamente rápidas – se ajustadas de forma adequada – e possuem a vantagem de não injetar perturbações no SDEE (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008). Entretanto, essas técnicas apresentam ZND, a qual é especialmente caracterizada na condição de equilíbrio entre carga e geração na ilha elétrica no momento de sua formação. Portanto, além de estar diretamente associada aos ajustes adotados em seus parâmetros, a eficiência desses métodos está diretamente relacionada a condição da carga e geração antes da ocorrência do ilhamento (YIN; CHANG; DIDUCH, 2004). Especial cuidado deve ser tomado na realização dos ajustes dos parâmetros dessas técnicas, de modo que o evento de ilhamento seja diferenciado de outros eventos comumente verificados em SDEEs que podem acarretar em variações nas grandezas dos geradores distribuídos, como

Change of Frequency (ROCOF). Essa constitui uma técnica local passiva e será apresentada na sequência. Além dessa, outras técnicas locais de detecção de ilhamento podem ser utilizadas na lógica apresentada (BRIGHT, 2001; VIEIRA JR, 2006).

por exemplo, o chaveamento de cargas de porte considerável (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008).

Na sequência são apresentadas algumas das principais técnicas locais passivas reportadas na literatura:

□ **Sub/sobrefrequência e sub/sobretensão – (MOZINA, 2001; CHOWDHURY et al., 2008)**

Essas configuram as técnicas locais passivas mais básicas para a detecção da ocorrência de ilhamento. Nessas técnicas são estabelecidas faixas de valores de frequência e tensão, nas quais é permitido o gerador distribuído operar em condições normais de RP. Na ocorrência de ilhamento subentende-se que tanto a frequência quanto a tensão se distanciarão rapidamente da janela caracterizada pelas faixas especificadas, sensibilizando os sistemas de detecção anti-ilhamento caracterizadas pelas funções de sub/sobrefrequência e sub/sobretensão. Essas afirmações são especialmente válidas quando o gerador distribuído é de pequeno porte, condição em que sua potência nominal é consideravelmente menor que a carga total do alimentador em que o mesmo é conectado. Nessas circunstâncias, o gerador distribuído não é capaz de sustentar as cargas do sistema ilhado com valores de tensão e frequência considerados adequados.

□ ***Rate of Change of Frequency (ROCOF)* – (REDFERN; USTA; FIELDING, 1993; VIEIRA JR, 2006)**

Essa técnica é fundamentada na equação de oscilação eletromecânica¹⁰ do gerador distribuído.¹¹ Durante o processo de ilhamento, subentende-se que ocorrerão variações na frequência elétrica do sistema. O valor da taxa de variação da frequência em relação ao tempo (df/dt) é verificado através do sinal de tensão terminal do gerador distribuído, sendo o mesmo retirado de operação quando verificada uma extrapolação do módulo dessa grandeza para além de um valor ajustado, durante um determinado período de tempo. Essa técnica se mostra superior na ocorrência de variações lentas de frequência – verificada em condições de desbalanço de potência ativa pouco significativo no sistema ilhado logo após a sua formação – situação que culminaria em uma atuação lenta das técnicas básicas de proteção anti-ilhamento caracterizadas pelos relés de sub/sobrefrequência.

□ ***Vector Surge Relay (VSR)* – (FREITAS et al., 2007)**

Essa técnica parte do princípio que no processo de ilhamento a corrente terminal do gerador distribuído se modificará. Devido a reatância interna do gerador, a diferença angular entre as suas tensões terminal e interna aumentará ou diminuirá subitamente

¹⁰Comumente referenciada na literatura como equação de *swing*.

¹¹Ressalta-se que este texto trata de GSDs.

– sendo isso determinado pelo sentido do desbalanço de potência observado – com o fasor de tensão terminal modificando sua direção, culminando numa variação angular. Se a variação angular da tensão terminal exceder um valor dado em ajuste, é interpretada a formação do sistema ilhado.

❑ **Taxa da variação da potência ativa terminal em função do tempo – (RED-FERN; USTA; FIELDING, 1993)**

Essa técnica se baseia na premissa de que a variação de potência ativa terminal do gerador distribuído em relação ao tempo é muito mais pronunciada quando o mesmo opera ilhado. Assim sendo, o valor de dP/dt constitui uma grandeza adequada para a verificação da ocorrência do ilhamento. Se o valor dessa grandeza extrapolar um valor dado em ajuste, é interpretada a formação do sistema ilhado.

❑ **Taxa da variação da frequência em função da potência ativa terminal – (PAI; HUANG, 2001)**

Essa técnica parte do pressuposto que o valor da variação da frequência em função da potência ativa terminal do gerador distribuído (df/dP) difere consideravelmente entre os cenários de operação em paralelo com a SD e ilhado dessa, o que configura essa grandeza como um bom indicador da ocorrência do ilhamento. Se o valor de df/dP extrapolar um valor dado em ajuste, é interpretada a formação do sistema ilhado.

❑ **Variação da potência reativa – (XU; MAUCH; MARTEL, 2004)**

Essa técnica configura um complemento as técnicas de sub/sobretensão. Em alguns sistemas é necessária uma mudança significativa na potência reativa de saída do gerador distribuído, para que seja verificada uma mudança no seu valor de tensão terminal a ponto de sensibilizar atuação dos esquemas de sub/sobretensão anteriormente descritos. Fundamentado neste argumento, sugere-se que o monitoramento da potência reativa caracteriza uma técnica mais sensível para a verificação da ocorrência de ilhamento do que as técnicas baseadas em medição de tensão.

❑ **Variação da tensão terminal em função do tempo e variação do fator de potência – (SALMAN; KING; WELLER, 2001)**

Através de simulações computacionais verificou-se que, sob determinadas condições, o valor da variação de tensão terminal do gerador distribuído em função do tempo (dV/dt) foi adequado para determinar a ocorrência de ilhamento. Já para outras condições, essa determinação se apresentou mais adequada a partir da variação do valor de FP (Δ_{FP}). Assim, propõe-se um arranjo em que dV/dt e Δ_{FP} são utilizados paralelamente para a identificação da operação ilhada de geradores distribuídos.

❑ Desbalanço de tensão – (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008)

Considerável parcela das cargas de um SDEE típico não são trifásicas, e os alimentadores que compõem a sua rede – quando trifásicos – usualmente são assimétricos (KERSTING, 2002). Uma vez ocorrido o ilhamento, os geradores distribuídos que compõem o sistema ilhado devem assumir a demanda de potência da rede desequilibrada em sua totalidade. Baseado nessa prerrogativa, infere-se que o desbalanço de tensão verificado nos terminais do gerador distribuído será maior quando operando em um sistema ilhado, sendo esse, portanto, um parâmetro adequado para a verificação dessa condição operativa. É importante citar que o desequilíbrio de tensão é recorrente a característica das cargas, bem como dos alimentadores que compõem a rede do SDEE. Portanto, a aplicação dessa técnica soa como adequada até mesmo em condições nas quais o desbalanço entre carga e geração no sistema ilhado após sua formação não é pronunciado.

❑ Abordagem utilizando a técnica de trajetórias elípticas – (SALMAN, 1997)

Parte-se do princípio que na ocorrência do ilhamento, as tensões e correntes do gerador distribuído quando dispostas uma em função da outra num plano bidimensional geram trajetórias elípticas com padrões determinados. Então, a identificação desses padrões configuraria um método adequado para a identificação da operação ilhada do gerador distribuído.

3.4.2.2 Técnicas Locais Ativas

As técnicas locais ativas interagem diretamente com o SDEE, introduzindo perturbações nesse sistema e monitorando a respectiva resposta frente a essas. De modo geral, o princípio operativo dessas técnicas se baseia na prerrogativa de que em um sistema ilhado, a aplicação de uma pequena perturbação acarretará em mudanças significativas nas grandezas monitoradas. Já no caso contrário, em situação na qual a SD está presente, as mudanças verificadas nas grandezas do sistema a partir da aplicação da pequena perturbação serão insignificantes.

A formação de sistemas ilhados pode ser detectada a partir de técnicas locais ativas mesmo quando existe equilíbrio entre carga e geração na rede no momento de sua ocorrência, o que implica em uma ZND nula. Apesar dessa importante vantagem em relação aos sistemas locais passivos, índices de QEE e a margem de estabilidade do SDEE podem ser depreciados pela constante inserção de perturbações no sistema (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008). Além disso, podem ser induzidas oscilações no rotor de geradores distribuídos compostos por máquinas rotativas (XU; MAUCH; MARTEL, 2004).

É válido destacar que as técnicas locais ativas podem ser inefetivas em sistemas com múltiplos geradores distribuídos (YIN; CHANG; DIDUCH, 2004), haja vista que a inserção de perturbações em diversos pontos do sistema, principalmente quando aplicadas numa

mesma direção, pode desencadear na atuação indevida da proteção anti-ilhamento, visto que é adicionada complexidade na determinação da real resposta do sistema frente às perturbações aplicadas (XU; MAUCH; MARTEL, 2004). Outro ponto negativo a ser destacado é que o processo completo de identificação da ocorrência do ilhamento é composto por dois sub-processos, a saber: i) aplicação da perturbação; e ii) verificação da resposta do sistema frente a essa. Portanto, o tempo de operação despendido por essas técnicas tende a ser maior (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008).

Abaixo são apresentadas algumas das principais técnicas locais ativas reportadas na literatura:

❑ **Medição da impedância do sistema – (O’KANE; FOX, 1997; SUMNER et al., 2002)**

Essa técnica se baseia no fato da impedância mensurada a partir dos terminais do gerador distribuído se alterar com a ocorrência do ilhamento, sendo essa grandeza consideravelmente maior a partir da ocorrência no ilhamento. Na literatura são reportados pelo menos dois métodos para o levantamento dessa grandeza. Ambos os métodos são baseados na inserção de uma perturbação controlada de tensão no SDEE e, com base na resposta do sistema, é realizada a obtenção do valor de impedância a partir dos terminais do gerador distribuído. Se verificado um aumento pronunciado nessa grandeza é interpretada a operação ilhada do gerador distribuído.

❑ **Variação da potência reativa do gerador distribuído e o impacto em sua frequência – (MOTOHASHI et al., 1999)**

Um sinal de perturbação de tensão é periodicamente aplicado ao gerador distribuído, enquanto sua frequência é constantemente monitorada. Partindo-se do pressuposto que a perturbação é pequena, a frequência do gerador distribuído não é significativamente afetada com a aplicação da mesma quando da operação em paralelo com a SD. Em situação contrária, a frequência do gerador varia em quantidade suficiente para sensibilizar a identificação da ocorrência do ilhamento. A literatura sugere dois métodos de aplicação dessa perturbação. O primeiro consiste na aplicação direta de perturbações na referência de controle do SE do gerador distribuído. O segundo consiste na instalação de um filtro ativo no mesmo barramento em que o gerador distribuído é conectado. No último caso, as perturbações são aplicadas na referência de potência reativa desse filtro. Independentemente do método aplicado para a inserção da perturbação, o conceito aplicado para a verificação da condição de ilhamento é essencialmente o mesmo.

❑ **Variação da tensão terminal do gerador e da potência reativa entregue à rede – (KIM; HWANG, 2000)**

Variações de pequena amplitude são aplicadas na referência do SE do gerador distribuído, enquanto são monitorados os valores de tensão terminal e potência reativa injetada no sistema. Quando operando em paralelo com a SD, o valor de potência reativa injetada pelo gerador distribuído se altera. Já quando operando em um sistema ilhado, partindo-se do princípio de que a demanda de potência reativa demandada pela carga é constante durante a aplicação do degrau, verifica-se uma mudança no valor da sua tensão terminal. Quando da ocorrência da última condição citada é interpretada a operação ilhada do gerador distribuído.

❑ **Injeção de inter-harmônicas – (FUNABASHI; KOYANAGI; YOKOYAMA, 2003)**

Parte-se do princípio que a resposta do SDEE frente a injeção de harmônicas de ordem não múltiplas inteiras da fundamental se alteram com a ocorrência do ilhamento. Assim, sinais com essas características são injetados no sistema, e quando verificada uma mudança na resposta do SDEE frente a esses é interpretada a formação do sistema ilhado.

❑ **Adição de amortecimento negativo nas malhas de tensão e velocidade do gerador distribuído – (DU; NELSON; YE, 2005)**

A técnica se baseia na inserção de ramos de realimentação positiva nas malhas de controle de tensão e de velocidade do gerador distribuído. Proveniente do conceito de realimentação positiva, na ocorrência de variação na frequência ou na tensão do gerador distribuído, as respostas desses ramos irão amplificar essas perturbações. Os parâmetros desses ramos são ajustados de modo a amortecerem perturbações no gerador distribuído quando o mesmo opera em paralelo com a SD, e desestabilizá-lo quando operando ilhado, retirando-o de operação através de esquemas de proteção suplementares, como por exemplo, relés de sub/sobrefrequência e sub/sobretensão.

❑ **Método da flutuação da potência reativa – (FUNABASHI; KOYANAGI; YOKOYAMA, 2003; XU; MAUCH; MARTEL, 2004)**

A referência do SE do gerador distribuído é modificada periodicamente através de um sinal de frequência fixa ou variável. Quando caracterizada a ocorrência de ilhamento, a perturbação aplicada alterará o comportamento da frequência sensibilizando as técnicas de detecção de ilhamento baseadas na medição dessa grandeza, as quais indicarão a ocorrência do ilhamento.¹²

¹²Essa técnica parte do pressuposto que no gerador distribuído existem técnicas locais passivas baseadas em medições de frequência para a detecção do ilhamento. Portanto, a sua aplicação se mostra adequada para diminuir a ZND das mesmas (XU; MAUCH; MARTEL, 2004).

❑ **Detecção de erro na potência reativa exportada - (REDFERN; USTA; FIELDING, 1993; YIN; CHANG; DIDUCH, 2004)**

O sistema de detecção da ocorrência de ilhamento realiza uma interface com o sistema de controle do gerador distribuído, forçando-o a estabelecer um determinado nível de fluxo de potência reativa no ponto de conexão com a CD. Esse fluxo de potência reativa só pode ser mantido quando o gerador opera em paralelo com a SD. Quando verificada, por um determinado período de tempo, a permanência de um erro entre o ajuste e o valor de potência reativa exportado, o gerador distribuído é tomado como operando em um sistema ilhado.

❑ **Monitoramento do nível de corrente de falta – (O’KANE; FOX, 1997; REDFERN; USTA; FIELDING, 1993)**

O método proposto baseia-se na aplicação periódica de curto-circuitos de baixa severidade no barramento do gerador distribuído, a partir de um banco de reatores tiristorizado. Quando o gerador distribuído opera em paralelo com a SD, os níveis de curto-circuito são consideravelmente maiores do que quando operando ilhado. Assim, quando verificada uma diminuição nos níveis de corrente do curto-circuito aplicado pelo banco de reatores é inferida a operação ilhada do gerador distribuído.

3.4.2.3 Técnicas Locais Híbridas

As técnicas locais híbridas empregam paralelamente as técnicas locais ativas e passivas. A técnica local passiva monitora constantemente determinadas grandezas do gerador distribuído. Quando verificada uma condição anormal de funcionamento, a qual gera suspeitas de operação em um sistema ilhado, a técnica local ativa é aplicada para a real constatação dessa condição. Essas técnicas possuem uma ZND pequena, e a perturbação é aplicada no SDEE apenas quando existe suspeita da ocorrência do ilhamento. No entanto, o tempo de atuação é maior devido a necessidade de sensibilização coordenada das técnicas locais ativa e passiva (MAHAT; CHEN; BAK-JENSEN, 2008).

Abaixo é apresentada a principal técnica local híbrida para GSDs reportada na literatura:

❑ **Método da realimentação positiva e desbalanço de tensão – (MENON; NEHRIR, 2007)**

As tensões trifásicas do gerador distribuído são constantemente monitoradas para verificação do valor de desequilíbrio, o qual é determinado pelo quociente da tensão de sequência negativa (V_2) pela tensão de sequência positiva (V_1). Quando o valor de desequilíbrio extrapola um determinado valor dado em ajuste, é inferida uma provável ocorrência de ilhamento, caracterizando assim a atuação do método passivo. Para validar a hipótese levantada, a referência do regulador de velocidade é

modificada durante um determinado intervalo de tempo. Caso a frequência do gerador distribuído se altere significativamente, o mesmo é desconectado por apresentar indícios suficientes de que está operando em um sistema ilhado. Do contrário, a referência do regulador de velocidade é reajustada para o seu valor antes da aplicação da perturbação, o que faz com que o gerador distribuído retorne ao seu regime normal de operação.

3.4.3 Discussões Adicionais

Tipicamente a operação de sistemas ilhados não é permitida pelas CDs, sendo recente a verificação de um movimento sensível as vantagens provenientes da aplicação desse conceito. Devido a isso, os sistemas de proteção anti-ilhamento foram em sua essência desenvolvidos para evitar o estabelecimento de sistemas ilhados, retirando os geradores distribuídos de operação quando verificada a ocorrência dessa condição.

Em situação na qual a operação ilhada é permitida, e partindo do princípio de que os geradores distribuídos possuem diferentes características operativas entre os modos conectado e ilhado, durante o processo de ilhamento as lógicas de controle desses dispositivos devem ser alteradas, de forma que os valores de tensão e frequência da porção ilhada do SDEE se mantenham dentro de uma faixa aceitável de valores (TRINDADE et al., 2010). A literatura indica que essa modificação é realizada através de alterações nas estruturas de controle do gerador distribuído (WALLACE; KIPRAKIS, 2002; MOHAMAD; BAKAR; MOKHLIS, 2013).

Os sistemas de proteção anti-ilhamento são os elementos disponíveis na indústria mais adequados para a identificação da ocorrência de ilhamento. Logo, infere-se que esses dispositivos são os responsáveis por desencadear as mudanças nos sistemas de controle dos geradores distribuídos quando da mudança do estado operativo da rede. Dessa forma, no atual estado da arte, as técnicas de proteção anti-ilhamento apontadas neste capítulo também são imprescindíveis no contexto operativo de SDEEs que permitem a pratica de ilhamento (VIEIRA JR, 2006).

Neste texto foram apresentadas algumas das principais técnicas de proteção anti-ilhamento referenciadas na literatura. É importante frisar que considerável parcela dessas técnicas são de cunho acadêmico, sendo muito improvável a aplicação dessas em campo. Essa afirmação advém do fato de técnicas locais passivas já estarem bem estabelecidas na indústria, e de forma alguma visa desqualificar as técnicas propostas no âmbito acadêmico.

Dentre as técnicas locais passivas, as baseadas em medição de frequência são notoriamente reconhecidas pela indústria como a melhor opção. Exemplos representativos dessa classe são as técnicas ROCOF e VSR¹³ (FREITAS et al., 2007). Além de possuírem um

¹³As funções de sub/sobrefrequência são comumente referenciadas na literatura como técnicas utilizadas para a proteção anti-ilhamento. Entretanto, essa não é dedicada especificamente para esse fim, sendo a sua aplicação comumente direcionada a proteção do grupo gerador – bem como da rede em que o mesmo

baixo custo de implantação e simplicidade operativa, as técnicas citadas são efetivas para quase todas as condições operativas em que um SDEE é submetido. Além disso, quando se realiza comparações na esfera de outras técnicas locais passivas – as quais também apresentariam baixo custo de implantação e simplicidade operativa – não existem evidências de que técnicas baseadas em outros índices possam fornecer melhor desempenho do que as técnicas baseadas em medição de frequência (XU; MAUCH; MARTEL, 2004).

Apesar das vantagens citadas, deve ser tomado cuidado com relação aos ajustes adotados para as técnicas de proteção anti-ilhamento baseadas em medição de frequência. Essa cautela deriva do fato de que as mesmas possuem uma ZND, a qual é especialmente caracterizada quando o desbalanço entre a carga e a geração no sistema ilhado não é significativo no momento de formação deste. Baseando-se em senso comum, a primeira solução vislumbrada para a eliminação da ZND seria a adoção de um ajuste sensível e conservador, de forma que um mínimo desbalanço entre a carga e a geração no sistema ilhado culminasse na sensibilização do sistema de proteção quando da sua formação. Entretanto, quando analisada com uma maior atenção, conclui-se que essa opção implica na interpretação equivocada da formação de sistemas ilhados quando da ocorrência de eventos corriqueiros em SDEEs que impliquem em variações no valor de frequência do gerador distribuído – como por exemplo, tomada ou rejeição de blocos de carga consideráveis. A outra possibilidade, menos conservadora, seria adotar um ajuste pouco sensível baseado na prerrogativa de que mesmo havendo falha na detecção da condição de ilhamento, qualquer modificação de carga no sistema ilhado sensibilizaria esses sistemas de proteção (REDFERN; USTA; FIELDING, 1993; SALMAN; KING, 1999). Este argumento é válido, embora venha em detrimento do tempo requerido para a identificação da ocorrência de ilhamento em condições nas quais a ZND é caracterizada.

Do exposto no parágrafo anterior, fica caracterizado um compromisso de ajuste para as técnicas de proteção anti-ilhamento baseadas em medição de frequência. Tal característica torna a parametrização dessas funções uma tarefa não trivial, visto que é complexo estabelecer um critério totalmente confiável para os ajustes de seus parâmetros (XU; MAUCH; MARTEL, 2004; VIEIRA JR, 2006). A partir dos argumentos expostos, é razoável supor que essas funções apresentam atrasos de tempo na identificação da ocorrência de ilhamento, característica que irá compor os cenários de teste apresentados no Capítulo 5 deste texto.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo do texto foram apresentados aspectos técnicos e regulatórios associados à prática de operação de SDEEs ilhados. Devido a esse conceito ser relativamente recente

se conecta – contra danos advindos de condições operativas adversas (XU; MAUCH; MARTEL, 2004). Isso posto, essas funções são efetivas como retaguarda das funções de proteção especialmente dedicadas para detectar a ocorrência de ilhamento (YIN; CHANG; DIDUCH, 2004).

no histórico dos SEPs, ainda são verificados muitos desafios do ponto de vista técnico que necessitam ser sobrepostos para a sua plena aplicação.

Dentre os desafios que necessitam ser sobrepostos, neste trabalho é dada ênfase aos transitórios observados no sistema durante a ocorrência do ilhamento, os quais são influenciados – dentro de um conjunto de outros fatores – por modificações nos sistemas de controle dos geradores distribuídos. É consenso entre os profissionais da área que se faz necessária uma transição suave da rede entre a operação em paralelo com a SD e a operação ilhada (KATIRAEI et al., 2008a), sendo que propostas para garantir essa característica ainda constituem um desafio no campo da pesquisa (OLIVARES et al., 2014). O presente trabalho se enquadra justamente no contexto apresentado, buscando contribuir especificamente com a elaboração de mecanismos de controle a serem aplicados aos sistemas de excitação de GSDs, que propiciem uma menor excursão das variáveis desses geradores durante o processo de ilhamento, acarretando – sobre a ótica adotada por este trabalho – numa menor severidade dos transitórios observados nas grandezas tanto do gerador controlado quanto da rede em que o mesmo se conecta.

No contexto operativo de sistemas ilhados, adota-se como premissa que o sistema de proteção anti-ilhamento é o responsável por desencadear as mudanças necessárias nos sistemas de controle do gerador distribuído face a sua nova realidade operativa. Dessa forma, subentende-se que o tempo decorrido para essa identificação constitui um fator crítico ao tema que este trabalho se propõe a analisar. Quanto maior o tempo decorrido para a identificação da ocorrência de ilhamento, maior será a distância do ponto operativo do gerador distribuído em relação ao seu novo ponto de equilíbrio caracterizado pela operação ilhada, haja vista que a sua operação com um OC em seu sistema de excitação inadequado a sua nova condição operativa pode resultar em um comportamento dinâmico instável.

Do exposto no último parágrafo, subentende-se que a atuação inadequada¹⁴ do sistema de proteção anti-ilhamento possui efeito direto na severidade dos transitórios observados no GSD quando da ocorrência do ilhamento. Tomando como princípio que existe uma alta complexidade na tarefa de estabelecer um critério para os ajustes que conferem uma operação adequada aos sistemas de proteção anti-ilhamento usualmente aplicados pela indústria, conclui-se que uma das características da estrutura de controle que este trabalho propõe é a mínima dependência operativa em relação aos mesmos.

¹⁴Leia-se, com atraso de tempo significativo.

Proposta da Estrutura Híbrida de Controle de Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos Distribuídos

4.1 Considerações Iniciais

Conforme evidenciado no Capítulo 3 deste texto, ainda são grandes os desafios de natureza técnica que necessitam ser superados para a plena aplicação do conceito de operação de SDEEs ilhados. Dentre esses desafios, destaca-se aquele associado à atenuação dos transitórios da rede observados durante o processo de ilhamento. Tais transitórios são decorrentes de uma série de eventos, dentre os quais estão as modificações nas malhas de controle dos geradores distribuídos quando da alteração do modo operativo da rede em que os mesmos se conectam. Se realizadas de forma inadequada, tais modificações podem contribuir significativamente para a severidade dos transitórios citados.

Partindo de um ponto de vista mais geral do contexto de GD, existe uma preocupação por parte das CDs associada a excursão dos níveis de tensão terminal dos geradores distribuídos para além de valores desejados, em situação em que os mesmos operam em paralelo com a SD regulando a potência reativa injetada na rede.¹

Com o objetivo de solucionar os problemas elencados nos parágrafos supracitados, este capítulo do texto apresenta uma estrutura híbrida de controle a ser aplicada ao SE de GSDs que operam em sistemas de distribuição que permitem a prática de operação ilhada, a qual possui os objetivos de: i) contribuir positivamente para a diminuição da severidade dos transitórios observados no comportamento dinâmico do GSD controlado – e por consequência, da rede em que o mesmo se conecta – durante o processo de ilhamento; e ii) manter em condições de RP a tensão terminal do GSD controlado dentro de uma faixa classificada como adequada, através do estabelecimento de um compromisso entre

¹Ou fator de potência.

essa grandeza e a respectiva potência reativa injetada no sistema.

Para atender aos seus objetivos, este capítulo do texto será estruturado como segue: em um primeiro momento serão apresentados os problemas de *windup* e *bumped transfer* recorrentes em sistemas de controle, sendo apresentadas as alternativas comumente utilizadas para solucioná-los – as quais fundamentam a estrutura híbrida de controle proposta por este trabalho. Num segundo momento será apresentada a estrutura de híbrida de controle proposta, sendo realizada em conjunto uma avaliação – através de simulações numéricas – do seu funcionamento e dos efeitos de diferentes valores atribuídos aos seus principais parâmetros de ajuste. A partir dos resultados dessa avaliação será proposto um conjunto de ajustes que serão utilizados nas simulações que irão compor o capítulo de resultados deste texto.

4.2 Caracterização dos Problemas de *Windup* e *Bumped Transfer* em Sistemas de Controle e Respectivas Compensações

Esta seção do capítulo apresentará os problemas de *windup* e *bumped transfer*, os quais são recorrentes em sistemas de controle em malha fechada. Num primeiro momento esses problemas serão caracterizados. Na sequência, serão apresentadas as técnicas de compensação *Anti-Windup* (AW) e *Bumpless Transfer* (BT) que forneceram subsídios para a concepção da estrutura híbrida de controle proposta por este trabalho. Por fim, serão apresentadas algumas considerações finais acerca das compensações AW e BT, as quais fundamentam a concepção da estrutura de controle proposta.

4.2.1 Problema de *Windup*

Sistemas de controle em malha fechada, em sua maioria, são projetados e parametrizados sob a ótica da teoria linear de controle. Tal aproximação é adequada para regulação próxima da referência desejada, situação em que pequenas excursões de suas variáveis são observadas. Entretanto, em sistemas de controle com uma ampla faixa de operação, comportamentos não lineares devem ser considerados durante a sua fase de projeto (ASTROM; RUNDQWIST, 1989).

Um tipo de não linearidade muito presente em sistemas de controle está associada aos seus atuadores, os quais geralmente possuem limitações associadas a sua faixa operativa. Por exemplo, um motor possui uma limitação de velocidade, enquanto uma válvula não pode abrir mais que seu limite superior ou adquirir um estado menor que o caracterizado pela condição de totalmente fechada. Portanto, em um sistema de controle com uma ampla faixa de condições operativas, pode acontecer da variável de controle alcançar os

limites do atuador. Esse efeito pode ser encarado como uma saturação do sinal de controle (ASTROM; HAGGLUND, 1995).

A Figura 4.1 apresenta um sistema de controle do tipo *Single-Input Single-Output* (SISO), no qual está presente uma não linearidade no atuador. Na condição de saturação do atuador, o sinal de controle inserido na planta ' $\hat{u}$ ' é diferente do sinal da saída do controlador ' u '.

Figura 4.1 – Diagrama de blocos de um sistema de controle do tipo SISO em malha fechada com representação de saturação do atuador

Fonte: Adaptado de Bohn e Atherton (1995)

Em referência a Figura 4.1:

- $w(t)$ é a referência do sistema de controle, em *p.u.*;
- $y(t)$ é a variável controlada ou de saída, em *p.u.*;
- $u(t)$ é o sinal de saída do controlador, em *p.u.*;
- $\hat{u}(t)$ é o sinal de entrada da planta controlada, em *p.u.*;
- $e(t)$ é o erro de controle, formado através da diferença entre a referência do sistema de controle e a variável controlada, em *p.u.*;
- $G_C(s)$ é a função de transferência do controlador;
- $G_P(s)$ é a função de transferência da planta controlada.

As limitações do saturador comumente consideradas podem ser descritas pelas relações (4.1) e (4.2), originalmente apresentadas em Peng, Vrancic e Hanus (1996). A relação (4.1) modela os valores mínimo e máximo em que a variável de controle pode excursionar.² Por sua vez, a relação (4.2) modela os valores mínimo e máximo que a taxa da variação da variável de controle em relação ao tempo pode assumir.³ Ambos os limites são dados pelo modelo matemático do atuador.

²Tais limitações são referenciadas na teoria de controle como “*hard limits*”.

³O ponto sobre a variável indica a sua derivada em relação ao tempo.

$$\hat{u}(t) = \begin{cases} u^{max} & \text{se } u(t) \geq u^{max} \\ u(t) & \text{se } u^{min} < u(t) < u^{max} \\ u^{min} & \text{se } u(t) \leq u^{min} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\dot{\hat{u}}(t) = \begin{cases} \dot{u}(t)^{max} & \text{se } \dot{u}(t) \geq \dot{u}(t)^{max} \\ \dot{u}(t) & \text{se } \dot{u}(t)^{min} < \dot{u}(t) < \dot{u}(t)^{max} \\ \dot{u}(t)^{min} & \text{se } \dot{u}(t) \leq \dot{u}(t)^{min} \end{cases} \quad (4.2)$$

Em referências as expressões (4.1) e (4.2):

- u^{min} e u^{max} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da faixa de valores em que a variável de controle pode excursionar;
- $\dot{u}(t)^{min}$ e $\dot{u}(t)^{max}$ são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da faixa de valores que taxa de variação da variável de controle em relação ao tempo pode excursionar.

As não linearidades inerentes ao atuador depreciam a performance do controlador, tendo a potencialidade de ocasionar a ocorrência de *windup*, instabilidade e ciclos limites no processo controlado (RUNDQWIST, 1991).

No contexto deste trabalho evidencia-se o *windup*. Esse fenômeno é explicado qualitativamente em Peng, Vrancic e Hanus (1996). Considere que o sistema em malha fechada apresentado na Figura 4.1 possua um controlador do tipo Proporcional + Integral (PI) ou Proporcional + Integral + Derivativo (PID). Suponha ainda que tanto o controlador quanto o processo controlado estejam em regime permanente com seus respectivos estados nulos, e subitamente é aplicado um degrau na referência ' $w(t)$ ' do controlador. Tal ação gera um salto no sinal de controle ' $u(t)$ ', fazendo com que seja atingindo o seu valor máximo ' u^{max} '. Nessa condição o valor de ' $\hat{u}(t)$ ' passa a ser menor que o valor de ' $u(t)$ ', e um incremento na variável de controle não levará a uma resposta mais rápida do processo controlado (BOHN; ATHERTON, 1995). Por consequência, o comportamento do sinal da variável controlada ' $y(t)$ ' passa a ser mais lento que o caso não limitado – ou seja, linear. Devido à resposta lenta do sinal ' $y(t)$ ', o sinal de erro ' $e(t)$ ' diminui a uma taxa mais lenta. Desse modo, a ação integral do controlador possui um sinal de saída mais elevado do que o observado no caso não limitado. Na condição em que o sinal da variável controlada ' $y(t)$ ' se aproxima da referência ' $w(t)$ ' ajustada, o sinal de controle $u(t)$ permanece saturado ou próximo à saturação devido ao valor elevado do sinal de saída do integrador. O valor do sinal de controle ' $u(t)$ ' começa a diminuir apenas quando o sinal de erro ' $e(t)$ ' possuir um

valor negativo durante um tempo suficientemente longo. No Apêndice A deste texto os fenômenos descritos neste parágrafo são apresentados a partir de um exemplo numérico.

Os fenômenos citados no parágrafo anterior possuem um efeito prático de adicionar um sobressinal e um tempo elevado de acomodação à variável controlada (PENG; VRANCIC; HANUS, 1996). Além disso, em alguns casos pode ser observada a indução de oscilações nessa mesma variável (ASTROM; RUNDQWIST, 1989).

Os problemas de *windup* usualmente ocorrem quando grandes alterações na referência do controlador são realizadas, ou na ocorrência de grandes distúrbios na planta ou mal funcionamento de algum equipamento que compõe o sistema de controle (ASTROM; HAGGLUND, 1995). Tais problemas são usualmente encontrados em sistemas que possuem controladores do tipo PI ou PID, os quais estão associados a grande parcela dos sistemas de controle encontrados em aplicações industriais (PENG; VRANCIC; HANUS, 1996). Entretanto, foi reconhecido que o *windup* do integrador é um caso especial de um problema mais geral. Qualquer controlador com modos relativamente lentos ou instáveis, em condição na qual o atuador do sistema de controle possua limitações operativas, vai experimentar *windup* (KOTHARE et al., 1994).

4.2.2 Compensação *Anti-Windup*

Em condições de saturação o atuador permanecerá em seus limites operativos independentemente do valor da variável controlada do processo $y(t)$. Nessa condição, a malha de realimentação é interrompida (ASTROM; HAGGLUND, 1995). Além disso, como a saída do controlador não conduz o comportamento dinâmico da planta, os estados do controlador são atualizados de forma errada, ocasionando a ocorrência do *windup*. Sob outra perspectiva, esse fenômeno pode ser interpretado como a inconsistência entre o sinal de entrada da planta e os estados do controlador (KOTHARE et al., 1994).

Uma das formas mais usuais de evitar o fenômeno do *windup* é adicionar um ramo de compensação extra ao controlador. Esse ramo é denominado de ramo de compensação *Anti-Windup* (AW), cujo principal objetivo é fazer com que os estados do controlador sejam atualizados corretamente de forma que os mesmos possuam valores adequados durante a saturação (RUNDQWIST, 1991; VRANCIC, 1997). Nos casos em que os controladores são do tipo PI ou PID esse esforço é realizado via redução do termo integral (VRANCIC, 1997).

Muitas técnicas de compensação AW são apresentadas na literatura.⁴ Dentre essas é dado destaque ao método conhecido como Seguimento da Variável de Controle (SVC),⁵ o qual constitui um método clássico de compensação AW (BOHN; ATHERTON, 1995) e é apresentado na Figura 4.2.

⁴Sugere-se a leitura das referências Kothare et al. (1994), Bohn e Atherton (1995) e Vrancic (1997) para o conhecimento das técnicas de compensação AW usualmente referenciadas na literatura.

⁵Método também referenciado na literatura como *tracking*, *back-calculation* ou *anti-reset*.

Figura 4.2 – Diagrama de blocos da compensação AW através do método SVC em um sistema de controle do tipo SISO

Fonte: Adaptado de Bohn e Atherton (1995)

Em referência a Figura 4.2:

- K_P é o ganho proporcional do controlador PI do sistema de controle, em $p.u./p.u.$;
- K_I é o ganho integral do controlador PI do sistema de controle, em $p.u./p.u.$;
- $F(s)$ é a função de transferência do ramo de compensação AW.

Na compensação AW pelo método SVC um caminho extra de realimentação é provido ao controlador, o qual é adicionado na entrada do integrador. Esse caminho é caracterizado pelo erro entre os sinais de saída do controlador ‘ $u(t)$ ’ e de entrada da planta ‘ $\hat{u}(t)$ ’, o qual é submetido a uma dinâmica determinada pela função de transferência ‘ $F(s)$ ’. Em grande parcela das aplicações a função de transferência ‘ $F(s)$ ’ é dada por um ganho do tipo “ $1/\tau$ ”, em que ‘ τ ’ é denominado como constante de tempo da compensação AW.⁶ No arranjo apresentado o caminho de realimentação recalcula o termo integral para que a saída do controlador esteja exatamente nos limites de saturação (RUNDQWIST, 1991; KOTHARE et al., 1994; ASTROM; HAGGLUND, 1995), diminuindo desse modo o efeito de *windup*.

Sobre uma outra ótica, o método de SVC pode ser visto como um caso especial da generalização do problema de compensação AW pela aproximação de observador de estados, em que os modos instáveis são estabilizados pela realimentação durante a saturação, enquanto os estados estáveis são mantidos inalterados (RUNDQWIST, 1991).

Destaca-se que nesse arranjo, o ramo de compensação AW se torna ativo na dinâmica do sistema de controle apenas quando constatada uma inconsistência entre os sinais de

⁶Julga-se conveniente não realizar o processo de atualização dos estados do controlador de forma abrupta, mas sim de forma suave. Isso justifica a ponderação do sinal de erro entre ‘ $u(t)$ ’ e ‘ $\hat{u}(t)$ ’ pela constante de tempo ‘ τ ’ (RUNDQWIST, 1991).

saída do controlador ' $u(t)$ ' e o sinal de entrada da planta controlada ' $\hat{u}(t)$ '. Isso implica que quando o atuador está em sua região linear de operação, o controlador possui seu desempenho de acordo com seus critérios lineares de projeto (ASTROM; HAGGLUND, 1995).

No Apêndice A deste texto é apresentado o efeito da compensação AW a partir de um exemplo numérico.

4.2.3 Problema de *Bumped Transfer* em Sistemas de Controle

Muitos processos industriais se deparam com a necessidade de seus controladores possuírem duas ou mais lógicas de controle implementadas em seus algoritmos. Isso é evidenciado pelo fato de praticamente todos os controladores apresentarem a possibilidade de operar nos modos manual e automático (VRANCIC, 1997), conforme exemplificado na Figura 4.3.⁷

Figura 4.3 – Transição via ação de chaveamento entre os modos manual e automático de operação em um sistema de controle em malha fechada do tipo SISO

Fonte: Adaptado de Peng, Vrancic e Hanus (1996)

Em referência a Figura 4.3:

- $\hat{u}^m(t)$ é o sinal de controle proveniente do modo manual de operação. Geralmente o seu valor é constante em relação ao tempo.

Do modo em que os algoritmos de controle são implementados, tipicamente a transferência entre modos de controle é realizada de forma abrupta. Se vista no formato de diagrama de blocos, esse processo de transição pode ser interpretado como uma ação de chaveamento – conforme apresentado na Figura 4.3 – a qual gera uma descontinuidade no sinal de controle aplicado na planta. Se realizada de forma não planejada, a ação de chaveamento tem a potencialidade de induzir transitórios na planta (ZACCARIAN; TEEL, 2004), o que não é desejável pela depreciação na resposta dinâmica da mesma, e até mesmo em

⁷Devido ao fato do controlador possuir apenas dois modos de operação, o exemplo citado é um caso especial de um problema geral em que o mesmo possui inúmeros modos de controle. Apesar de sua simplicidade, o caso com dois modos de operação caracteriza bem o problema de *bumped transfer*.

casos mais severos, pela indução de comportamento dinâmico instável no sistema. Esse problema é referenciado na literatura como *bumped transfer* (VRANCIC, 1997).

De modo análogo ao *windup*, o problema de *bumped transfer* é bem caracterizado em controladores do tipo PI ou PID, nos quais estão presentes a ação integral de controle (PENG; VRANCIC; HANUS, 1996). Quando em modo automático a ação integral atua com o objetivo de tornar nulo o sinal de erro ' $e(t)$ ', o qual é formado pela comparação entre a referência ajustada ' $w(t)$ ' e a variável controlada ' $y(t)$ '. Caso o controlador seja chaveado para o modo manual, o erro poderá possuir valores espúrios que serão integrados pelo controlador PI caso o mesmo continue em operação,⁸ fazendo com que o algoritmo de controle do modo automático produza um sinal diferente daquele gerado pelo modo manual (ASTROM; HAGGLUND, 1995). Assim, num eventual retorno para o modo automático, podem ser induzidos transitórios indesejados na planta controlada. Tais transitórios, que são iniciados a partir da ação de chaveamento que implica em uma descontinuidade no sinal de controle, são caracterizados pela necessidade do controlador adequar o seu sinal de saída à condição operativa de malha fechada.

Caso o sistema não se desestabilize, além da indução dos transitórios, existe a potencialidade do *bumped transfer* conferir um tempo de acomodação elevado ao comportamento dinâmico da variável controlada ' $y(t)$ '. Isso decorre do fato do sinal de saída do integrador diminuir o seu valor apenas quando o sinal de erro de controle ' $e(t)$ ' possuir um sinal oposto do sinal de controle ' $\hat{u}(t)$ ' por um tempo suficientemente longo (VRANCIC, 1997), a exemplo do que ocorre no problema de *windup*. No Apêndice A os fenômenos descritos nos parágrafos anteriores são apresentados a partir de um exemplo numérico.

4.2.4 Compensação *Bumpless Transfer*

Quando em operação manual, o problema de *bumped transfer* é evitado se o modo automático de controle for corretamente inicializado quando da transferência entre os mesmos. Portanto, o problema de *bumped transfer* pode ser encarado como um problema de condição inicial para o controlador (ZACCARIAN; TEEL, 2004).

Esse problema é solucionado fazendo com que no momento do chaveamento o sinal de controle do modo automático ' $u(t)$ ' coincida com o sinal de controle do modo manual ' $u^m(t)$ ', garantindo uma transição suave entre os mesmos (ASTROM; HAGGLUND, 1995). Essa transferência é denominada na literatura por *Bumpless Transfer* (BT) (ASTROM; HAGGLUND, 1995; VRANCIC, 1997). Um método eficiente para a aplicação do BT é a utilização do método SVC, conforme apresentado na Figura 4.4 (PENG; VRANCIC; HANUS, 1996). O caminho de realimentação extra adicionado compensa o termo integral, de modo que o sinal de controle do modo automático ' $u(t)$ ' se aproxime do modo manual ' $u^m(t)$ '

⁸Em um primeiro momento, o modo automático poderia ser desabilitado quando da operação do modo manual para a solução do problema de *bumped transfer*. Essa solução seria restrita, pelo fato do problema ser eliminado apenas quando o valor de saída do controlador no modo automático em condição de regime permanente com a entrada nula ser igual ao valor do controlador no modo manual.

(ASTROM; HAGGLUND, 1995). No Apêndice A deste texto é apresentado o efeito da compensação BT a partir de um exemplo numérico.

Figura 4.4 – Diagrama de blocos da compensação BT através do método SVC em um sistema de controle do tipo SISO

Fonte: Adaptado de Peng, Vrancic e Hanus (1996)

4.2.5 Discussões Adicionais

É notável a semelhança entre as soluções para os problemas de *windup* e *bumpless transfer*, as quais são apresentadas respectivamente pela Figura 4.2 e Figura 4.4. Um método AW é usualmente aplicado como uma técnica BT, o qual diminuirá o salto na entrada da planta durante o chaveamento (PENG; VRANCIC; HANUS, 1996). Desse modo, na literatura o problema de *bumped transfer* é comumente tratado em conjunto com o problema de *windup*. A associação entre esses problemas é fundamentada pelos argumentos apresentados abaixo (ZACCARIAN; TEEL, 2004):

- ❑ O problema de *bumped transfer* pode ser visto como um problema de substituição do sinal de controle aplicado na planta. Por sua vez, o problema de *windup* trabalha com a saturação desse mesmo sinal. Em ambos os casos, por qualquer razão que seja, o tipo de fenômeno tratado implica na diferença entre o valor do sinal de controle aplicado na planta e o sinal de saída do controlador;
- ❑ Com bastante frequência soluções para o problema de *windup* acabaram se tornando muito úteis como um ponto de partida para o problema de *bumped transfer*.

Do exposto, os problemas de análise e síntese de sistemas de controle sujeitos a limitações e substituições de entrada podem ser relacionados (GRAEBE; AHLEN, 1996). Desse modo, os mesmos são unificados na literatura numa única teoria denominada de

Anti-Windup Bumpless Transfer (AWBT) (KOTHARE et al., 1994). A partir da unificação citada é possível fazer uma generalização das compensações AW e BT utilizando o método SVC, conforme apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Generalização das compensações AW e BT por meio do método SVC em um sistema de controle do tipo SISO

Fonte: Adaptado de Peng, Vrancic e Hanus (1996)

Em referência a Figura 4.5:

- $AWBT(s)$ é a função de transferência do ramo de compensação AWBT.

Na compensação pelo método SVC é assegurada a convergência entre os sinais de saída do controlador e de entrada da planta. Se a não linearidade presente for uma saturação, essa estratégia evita o *windup* do integrador. Se for considerada uma saturação variante no tempo, no qual os limites superior e inferior são ajustados para o valor corrente do controle manual (ou outro alternativo) o BT é alcançado (GRAEBE; AHLEN, 1996).

No contexto apresentado, a estrutura híbrida de controle proposta por este trabalho será inspirada no método SVC. Como esse método unifica a teoria de AW e BT, objetiva-se alcançar com a sua aplicação a diminuição da excursão das variáveis do GSD controlado, e por consequência, da rede em que o mesmo se conecta quando da ocorrência do ilhamento – suavizando os transitórios observados nesse processo, além do atendimento dos níveis desejados de tensão quando operando em paralelo com a SD regulando a potência reativa injetada no sistema, estabelecendo um compromisso entre essas variáveis.

Cabe destacar que em Gehrke, Souza e Lima (2015) e Das, Gurrula e Shenoy (2017) são encontradas aplicações de técnicas BT em sistemas de controle de geradores distribuídos, objetivando suavizar os transitórios observados nesses dispositivos no momento da ocorrência do ilhamento. No entanto, essas aplicações são direcionadas para geradores distribuídos que possuem interface de eletrônica de potência com a rede. De qualquer forma, essas literaturas indicam que a abordagem adotada por esta pesquisa vem sendo utilizada para a suavização dos transitórios de variáveis do SDEE no momento do ilhamento.

4.3 Estrutura Híbrida de Controle

Esta seção do capítulo apresenta a Estrutura Híbrida de Controle (EHC) a ser aplicada em sistemas de excitação de GSDs que operam em SDEEs que permitem a prática de ilhamento.

A apresentação da EHC será realizada em duas etapas. Em um primeiro momento, o diagrama de blocos da estrutura será apresentado, oportunidade em que será realizada uma discussão qualitativa acerca de suas características, pontuando os critérios adotados para sua concepção. Na sequência, serão apresentados os comportamentos⁹ das variáveis internas da EHC proposta e seus efeitos no comportamento dinâmico do GSD controlado frente algumas perturbações, considerando diferentes valores para seus principais parâmetros de ajuste. O principal objetivo desse esforço é apresentar a lógica de operação da estrutura proposta – complementado a sua descrição qualitativa previamente realizada – bem como o efeito de seus principais parâmetros de ajuste sobre o comportamento dinâmico do GSD controlado. A partir dessa análise, serão argumentadas as escolhas dos parâmetros citados que irão compor o capítulo de resultados desta pesquisa.

No atual estágio do texto é importante deixar claro o uso do termo “híbrido” para caracterização da estrutura de controle proposta. Na teoria de sistemas de controle, o termo híbrido pode se referir a: i) sistemas de controle que consideram em uma mesma estrutura dinâmicas contínuas e discretas; e ii) sistemas que são efeito da combinação de estruturas de controle que possuem OCs distintos. No contexto deste trabalho, o termo híbrido faz referência a capacidade da estrutura de controle proposta em atender concomitantemente mais de um OC, ajustando a excitação do GSD em função da condição operativa do sistema em que o mesmo se encontra.

4.3.1 Apresentação da Estrutura Híbrida de Controle

A Figura 4.6 apresenta a EHC, a qual constitui a principal contribuição deste trabalho.

Em referência a Figura 4.6:

- Q_{ref} é a referência do controlador de potência reativa,¹⁰ em *p.u.*;
- Q_e é a potência reativa injetada no sistema pelo GSD, em *p.u.*;
- V_{qe} é o sinal de saída do controlador de potência reativa, em *p.u.*;

⁹Os comportamentos das variáveis internas da estrutura de controle proposta são obtidos via integração numérica de modelo matemático de um sistema teste em aplicativo dedicado para a análise de transitórios eletromecânicos em SEPs. As descrições da ferramenta de análise computacional, bem como dos modelos dinâmicos e de rede que compõem o sistema teste, serão apresentados no Capítulo 5 deste texto.

¹⁰Para a obtenção dos resultados desta pesquisa, utilizou-se o controle de potência reativa ao contrário do controle de FP. Os argumentos que sustentam essa escolha serão apresentados no Capítulo 5 deste texto.

Figura 4.6 – Diagrama de blocos da EHC proposta

- V_{ref} é o sinal de referência do SE, em $p.u.$;
- V_{refeq} é o sinal de referência equivalente do SE, em $p.u.$;
- e_Q é o sinal de erro da malha de controle de potência reativa, em $p.u.$;
- e_{SE} é o sinal de erro do SE, em $p.u.$;
- α é o sinal resultante da comparação entre os sinais de tensão terminal limitado e não limitado, em $p.u.$;
- β é o sinal de saída do ramo I de compensação, o qual compõe a entrada do integrador presente na malha de controle de potência reativa, em $p.u.$;
- γ é o sinal de entrada do integrador presente na malha de controle de potência reativa, em $p.u.$;
- ψ é o sinal de saída do integrador presente na malha de controle de potência reativa, em $p.u.$;
- χ é o sinal de saída do ramo II de compensação, o qual é adicionado ao ponto de soma do SE compondo o seu respectivo sinal de erro, em $p.u.$;
- V_c é o sinal de tensão terminal após o processo de filtragem aplicado pelo transdutor de tensão,¹¹ em $p.u.$;

¹¹O processo de medição de tensão terminal do gerador controlado passa por um processo de filtragem,

- V_t^{MIN} e V_t^{MAX} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da faixa de valores em que se deseja que a tensão terminal do GSD opere em condições de RP, em $p.u.$;
- K_P^P e K_P^S são, respectivamente, os ganhos proporcionais dos controladores PI da malha de controle de potência reativa e do módulo de compensação, em $p.u./p.u.$;
- K_I^P e K_I^S são, respectivamente, os ganhos integrais dos controladores PI da malha de controle de potência reativa e do módulo de compensação, em $p.u./p.u.$;
- K_{C1} é o ganho do ramo I de compensação, em $p.u./p.u.$;
- K_{C2} é o ganho do ramo II de compensação, em $p.u./p.u.$

Devido a lógica de funcionamento da malha de controle de potência reativa, a qual é fundamentada na modulação do sinal de referência do SE do GSD controlado para que o mesmo injete um valor desejado de potência reativa na rede, é adequado estabelecer um sinal de referência equivalente ao SE ' V_{refeq} '. Esse sinal compreende a soma dos sinais de saída da malha de controle de potência reativa ' V_{qe} ' e de referência do SE ' V_{ref} ', conforme verificado na Figura 4.6 e formalizado pela expressão (4.3). Sob outro ponto de vista, tomando como base a lógica operativa da malha de controle de potência reativa, a variável ' V_{refeq} ' representa de fato a referência do SE.

$$V_{refeq} = V_{ref} + V_{qe} \quad (4.3)$$

A EHC é caracterizada pela adição de um módulo de compensação na malha de controle de potência reativa tipicamente aplicada aos SEs de GSDs, conforme destacado pelo quadrado de linhas pontilhadas na Figura 4.6.

O principal elemento do módulo de compensação é constituído por um controlador PI que possui como sinal de entrada o resultado do erro ' α ' decorrente da comparação realizada entre os sinais de tensão terminal limitado e não limitado do GSD. O sinal de saída do controlador PI deriva em dois ramos de compensação. O ramo I de compensação é caracterizado pelo ganho K_{C1} , e seu sinal de saída ' β ' é adicionado na entrada do integrador da malha de controle de potência reativa. Já o ramo de compensação II é caracterizado pelo ganho K_{C2} , e o seu sinal de saída ' χ ' é adicionado ao ponto de soma do SE, compondo o seu sinal de erro de controle ' e_{SE} '.

O módulo de compensação é sensibilizado quando o sinal ' α ' possui um valor diferente de zero. Em condições normais de operação, como por exemplo, quando o valor de tensão terminal encontra-se na faixa delimitada pelos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} , o módulo de compensação não apresenta nenhum efeito sobre a dinâmica do sistema, fazendo com que

decorrente da transformação de um sinal senoidal para um sinal contínuo, o qual é adequado para a manipulação do sistema de controle. Esse processo é modelado matematicamente por um filtro passa-baixas. Maiores informações serão apresentadas no Capítulo 5 deste texto.

a estrutura de controle seja caracterizada por uma típica estrutura de controle de potência reativa com o desempenho previsto em projeto inalterado.

Na ocorrência de um ilhamento,¹² ou na eventualidade da regulação de potência reativa não ser factível do ponto de vista de atendimento dos níveis desejados de tensão terminal, a atuação do módulo de compensação é sensibilizada. Nessa condição, o controlador PI do ramo de compensação atua no sentido de zerar em condições de RP o sinal ‘ α ’ através da manipulação do sinal de entrada do integrador da malha de controle de potência reativa por meio do sinal ‘ β ’, bem como da modulação do erro ‘ e_{SE} ’ através da inserção do sinal ‘ χ ’ no ponto de soma do SE. A anulação do sinal ‘ α ’ tem o efeito prático de fazer com que a tensão terminal permaneça em condições de RP em algum dos extremos da faixa determinada pelos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} .

O efeito prático da sensibilização do módulo de compensação da EHC é a modificação do OC do sistema de excitação de forma espontânea sem a necessidade de manipulação de chaves e respectivos elementos de sensibilização, os quais são constituídos por relés de proteção anti-ilhamento ou de tensão. A composição dessas características implica em uma menor excursão das variáveis de interesse do GSD controlado – e por consequência da rede em que o mesmo se conecta – quando da formação do sistema ilhado, bem como na garantia da manutenção de sua tensão terminal em níveis adequados quando operando em paralelo com a SD regulando a injeção de potência reativa no sistema.

Da forma em que foi concebido, o módulo de compensação destacado na Figura 4.6 se assemelha a um ramo de compensação AWBT pelo método SVC, com função de transferência $F(s)$ caracterizada por um controlador PI. Nessa condição, além de configurar um esquema BT, o método de compensação SVC faz com que o sinal de saída da malha de controle de potência reativa ‘ V_{qe} ’ seja recalculado de forma que a variável de controle adquira o valor ditado pelos limites de saturação do atuador (RUNDQWIST, 1991; KOTHARE et al., 1994; ASTROM; HAGGLUND, 1995). Em outras palavras, o método de compensação SVC contribui para o manutenção da tensão terminal do GSD controlado dentro da faixa de valores desejada – a qual é determinada pelos ajustes dos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} . É importante deixar claro que durante o processo de elaboração da estrutura apresentada pela Figura 4.6, em um primeiro momento o ramo de compensação foi caracterizado apenas por um ganho puro. Entretanto, verificou-se que a adição de um integrador contribuiu – até mesmo de uma forma mais efetiva que a própria compensação SVC – para que a tensão terminal se mantivesse em condições de RP exatamente na faixa de valores determinada pelos ajustes dos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} .

É importante destacar que a EHC proposta faz uma extensão ao método de compensação SVC. Esta afirmação se deve a dois fatores. O primeiro reside no fato da compensação ser realizada a partir de uma variável externa ao sistema de controle, sendo que a litera-

¹²A operação do OCPR em um sistema ilhado é instável. Isso faz com que a tensão terminal do GSD divirja indefinidamente do seu valor pré-perturbação, sensibilizando a atuação do módulo de compensação da EHC.

tura indica que esse método usualmente faz a compensação a partir da variável de saída do controlador. O segundo consiste no fato da limitação ser inserida propositalmente na estrutura de controle, valendo-se do fato do método SVC recalcular o valor de saída do integrador de modo que os limites impostos sejam atendidos, contribuindo para a estrutura proposta atender aos seus objetivos. Portanto, nessa abordagem existe uma quebra de paradigma, em que a saturação no sistema de controle deixa de ser um problema, sendo inserida propositalmente para constituir uma solução.

Do exposto, fica claro que o módulo de compensação que caracteriza a EHC não pode ser considerado como uma compensação AWBT, conforme aquela sintetizada pela Figura 4.5. Mas sim, pode ser considerada como uma compensação que foi inspirada em seus conceitos.

4.3.2 Apresentação de Exemplos Ilustrativos do Funcionamento da Estrutura Híbrida de Controle

Objetivando compreender a EHC, esta seção do texto apresenta os princípios de seu funcionamento frente à ocorrência de perturbações específicas, quando a mesma é aplicada em um sistema teste com características representativas. O sistema teste bem como os modelos matemáticos que descrevem os seus elementos estão apresentados no Capítulo 5 deste texto.

Objetivando apresentar o funcionamento da EHC para o atendimento de seus principais objetivos, as seguintes perturbações foram simuladas no sistema teste:

- **PA:** ocorrência de ilhamento de forma espontânea com a saída da SD do sistema – a qual é representada no modelo por um barramento infinito – sendo o GSD a única fonte responsável por atender às cargas da ilha recém-formada;
- **PB:** mudança da demanda de potência reativa da carga local, com o GSD operando em paralelo com a SD regulando a potência reativa injetada no sistema através de seus terminais.

Além de apresentar os princípios de funcionamento da EHC, esta seção do texto também apresenta o efeito da alteração dos seus principais parâmetros de ajuste na resposta dinâmica do GSD, e por consequência, do sistema em que o mesmo se conecta. O principal objetivo desse esforço é chegar em um conjunto de ajustes que serão utilizados para a obtenção dos resultados apresentados no Capítulo 5 deste texto.

Remetendo-se ao modelo dinâmico da EHC, os parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} compõem dados de entrada para a definição dos seus outros ajustes, e variam de acordo com a regulamentação da rede em que o GSD controlado irá operar.

A partir do exposto no parágrafo anterior, ficam a ser definidos os ganhos dos dois controladores PI presentes na estrutura de controle sob análise, bem como os ganhos dos

ramos de compensação K_{C1} e K_{C2} . Objetivando evitar uma explosão combinatorial de possíveis conjuntos de ajuste e diminuir a complexidade de análise, as seguintes premissas foram adotadas para os ajustes dos ganhos dos controladores PI que compõem a EHC:

- Valendo-se do fato do módulo de compensação não apresentar efeito sobre o controle do SE em condições normais de operação – como por exemplo, tensão terminal dentro faixa ajustada pelos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} – a EHC fica caracterizada por uma malha de controle de potência reativa típica. Desse modo, os valores de K_P^P e K_I^P são previamente definidos para que seja alcançada uma boa regulação da potência reativa do GSD quando o mesmo opera em paralelo com a SD, sendo os outros parâmetros da EHC definidos em função dos mesmos;
- O ganho proporcional do controlador PI do módulo de compensação (K_P^S) é ajustado no valor unitário, de forma que sua ação proporcional nos ramos de compensação I e II sejam ponderados, respectivamente, apenas pelos ganhos K_{C1} e K_{C2} ;
- O principal objetivo da inserção da ação integral de controle no módulo de compensação é o de manter a tensão terminal do GSD dentro da faixa ajustada em condições de RP. Desse modo, o seu ganho (K_I^S) é ajustado num valor adequado para que esse objetivo seja alcançado, sem que a resposta do sistema se torne oscilatória ou apresente um tempo de acomodação demasiadamente elevado.

A partir das premissas acima apresentadas, estabelece-se que os ganhos dos controladores PI também são dados de entrada das análises realizadas nas próximas subseções, sendo os parâmetros K_{C1} e K_{C2} – os quais são, por esse motivo, classificados como os principais ganhos da estrutura de controle proposta – ajustados em função desses.

Quando não citados os valores dos ganhos K_{C1} e/ou K_{C2} durante a apresentação dos gráficos, subentende-se que esses assumem os valores adotados nos ajustes. Cabe ainda destacar que as curvas apresentadas neste capítulo não compõem os resultados do trabalho, mas sim, servem de subsídio para apresentar os ajustes que serão utilizados para gerá-los.

4.3.2.1 Comportamento da Estrutura Híbrida de Controle frente a Ocorrência de Ilhamento – Perturbação PA

Para a análise do comportamento da EHC frente a ocorrência da perturbação PA, a condição pré-perturbação do sistema teste é caracterizada pelo GSD operando em FP unitário suprindo toda a demanda de potência ativa do sistema, além de exportar o seu excedente de geração para o sistema de subtransmissão, o qual é representado pela barra de alta tensão da SD. Nessa condição operativa fica estabelecido um intercâmbio de potência entre a futura ilha e o restante do sistema, com a SD fornecendo potência reativa e consumindo potência ativa.

No momento da ocorrência do ilhamento o GSD assume instantaneamente a demanda de potência reativa da ilha recém-formada, que no caso simulado é de característica indutiva. A Figura 4.7 apresenta o comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD para o evento simulado para duas configurações distintas do sistema de controle aplicado ao seu SE. Uma das configurações é caracterizada por um controle de potência reativa típico (CQ), que corresponde a ETC com a manipulação de suas chaves desabilitada. A outra é caracterizada pela EHC, cujo diagrama de blocos é apresentado pela Figura 4.6. Além disso, estão evidenciados os limites da faixa de tensão terminal na qual se deseja que o GSD opere em condições de RP. Os limites de tensão de RP adotados neste trabalho corresponde a $0,95p.u.$ para o limite mínimo e a $1,05p.u.$ para o limite máximo.

A operação com o controle de potência reativa típico é caracterizada por um afundamento de tensão, decorrente da ação dessa malha em diminuir a excitação do GSD controlado – e por consequência, a potência reativa injetada no sistema – de forma que o mesmo opere em FP unitário. Quando operando com a EHC, o afundamento de tensão faz com que o sinal ' α ' proveniente da comparação entre os sinais de tensão terminal ' V_t ' limitado e não limitado possua um valor não nulo, conforme apresentado pela Figura 4.8, ativando a dinâmica do módulo de compensação.

Remetendo-se a Figura 4.7, com os ajustes adotados para os ganhos K_{C1} e K_{C2} , verifica-se que o módulo de compensação faz com que a tensão se recomponha rapidamente. Quando a tensão terminal atinge o limite superior, o módulo de compensação atua em sentido contrário até que a tensão se acomode no limite inferior após o período dinâmico. A acomodação no limite inferior é decorrente da característica indutiva da carga, em que a EHC – até mesmo quando da formação do sistema ilhado – procurará trabalhar com a potência reativa o mais próxima da referência ajustada atendendo aos limites de tensão dados em ajuste.

O sinal ' α ' constitui a entrada do PI do módulo de compensação, cujo sinal de saída é multiplicado pelos ganhos K_{C1} e K_{C2} , dando origem aos ramos I e II de compensação.

A Figura 4.9 apresenta o sinal de saída do PI do módulo de compensação multiplicado por diferentes valores de ganho K_{C1} – o que caracteriza o sinal ' β '. Este último sinal compõe o sinal de entrada do integrador do PI da malha de controle de potência reativa – sinal ' γ ' – o qual é apresentado pela Figura 4.10 para diferentes valores de K_{C1} .

A partir da Figura 4.10 verifica-se que quanto maior o valor de K_{C1} , maior é o valor alcançado e maior é a taxa de variação em relação ao tempo do sinal ' γ '. Devido ao integrador ser um elemento linear, o comportamento do sinal ' γ ' tem efeito direto sobre o seu sinal de saída ' ψ '. Seguindo a tendência apontada, quanto maior o valor do ganho K_{C1} maior é a taxa de variação do sinal ' ψ ' durante o mesmo período. Esse efeito é evidenciado na Figura 4.11.

O comportamento do sinal ' ψ ' tem efeito direto sobre o comportamento do sinal de saída da malha de controle de potência reativa ' V_{ge} ', e por consequência, sobre o sinal

Figura 4.7 – Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA – controles CQ e EHC

Figura 4.8 – Sinal ‘ α ’ da EHC resultante da comparação entre os sinais de tensão terminal ‘ V_t ’ limitado e não limitado frente a ocorrência da perturbação PA

de referência equivalente do SE ‘ V_{refeq} ’, conforme apresentado, respectivamente, pelas Figuras 4.12 e 4.13.

No momento da ocorrência do ilhamento o sinal ‘ V_{refeq} ’ apresenta uma descontinuidade que diminui o seu valor, impactando diretamente sobre o comportamento dinâmico do GSD controlado. Essa descontinuidade é decorrente do estabelecimento instantâneo de um erro entre a potência reativa gerada e a referência ajustada, o qual tem efeito direto sobre o sinal ‘ V_{refeq} ’ através do ganho proporcional do PI da malha de controle de potência reativa (K_P^P). Instantes após a ocorrência da descontinuidade verifica-se o efeito da atuação do ramo I de compensação, o qual eleva o valor de referência equivalente até um nível

Figura 4.9 – Comportamento do sinal de saída do ramo I de compensação ‘ β ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

Figura 4.10 – Comportamento do sinal de entrada do integrador do controlador de potência reativa ‘ γ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

adequado para o atendimento da tensão terminal na faixa delimitada pelos ajustes dos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} . Por ser relacionado com o valor de saída do integrador do controlador de potência reativa, verifica-se no sinal ‘ V_{refeq} ’ a mesma tendência de comportamento observada no sinal ‘ ψ ’, em que quanto maior o valor do ganho K_{C1} maior será a sua taxa de variação momentos após a ocorrência do ilhamento.

O comportamento do sinal de referência equivalente do regulador de tensão tem impacto direto sobre a tensão terminal, bem como sobre a potência reativa, do GSD controlado. Desse modo, quanto maior a taxa de variação da resposta do sinal de ‘ V_{refeq} ’ após a

Figura 4.11 – Comportamento do sinal de saída do integrador da malha de controle de potência reativa ‘ ψ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

Figura 4.12 – Comportamento do sinal de saída da malha de controle de potência reativa ‘ V_{ge} ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

ocorrência do ilhamento, maior será a taxa de variação da tensão terminal e da potência reativa do GSD. Esse comportamento é evidenciado na Figura 4.14 e na Figura 4.15, em que são apresentados, respectivamente, os comportamentos dinâmicos da tensão terminal e da potência reativa do GSD controlado para diferentes valores do ganho K_{C1} .

Nos primeiros instantes após a ocorrência do ilhamento verifica-se uma depreciação nos níveis de tensão terminal do GSD, a qual é decorrente da atuação da malha de controle de potência reativa. Como os modelos das cargas do sistema apresentam dependência com a tensão aplicada em seus terminais, e tomando como premissa que o GSD constitui

Figura 4.13 – Comportamento do sinal da referência equivalente do SE ‘ V_{refeq} ’ frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

a única fonte de potência do sistema após a ocorrência do ilhamento, infere-se que a potência ativa demandada pelo sistema decai com a diminuição da tensão terminal do GSD. Como o sistema de regulação de potência mecânica não consegue modificar a sua saída na mesma taxa em que a potência elétrica diminui, fica caracterizado o aparecimento de uma potência acelerante no rotor do GSD, o que causa impacto direto em sua frequência. Desse modo, uma maior taxa de variação dos níveis de tensão terminal do GSD – por diminuir o desbalanço entre a potência elétrica e mecânica de uma forma mais rápida – contribui positivamente para uma diminuição na excursão do sinal de sua frequência, amenizando o seu transitório para a perturbação simulada. Esse comportamento é verificado na Figura 4.14, o qual apresenta o comportamento da frequência do GSD controlado para diferentes valores do ganho K_{C1} .

Do apresentado até então, conclui-se que valores altos de K_{C1} são benéficos para a diminuição das excursões dos valores de tensão e frequência do GSD. Isso implica, a partir da ótica adotada por este trabalho, em uma suavização dos transitórios tanto do GSD controlado quanto da rede em que o mesmo se conecta durante o processo de ilhamento. Através de simulações verificou-se que para valores de K_{C1} superiores a $100,0 p.u./p.u.$, o impacto sobre o comportamento dinâmico da frequência é pouco perceptível comparando-se com àquele obtido com o valor de ganho citado.

Devido a planta e o sistema de controle possuírem não linearidades, as condições pré e pós-operação influenciam significativamente sobre o ajuste dos parâmetros da EHC. Isso é evidenciado na Figura 4.17, em que foi considerado intercâmbio nulo de potência ativa entre a SD e a porção do sistema teste que passará a ser alimentada de forma ilhada pelo GSD. Essa condição operativa por ser muito específica recebe a denominação na literatura

Figura 4.14 – Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

Figura 4.15 – Comportamento da potência reativa ‘ Q_e ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

de “condição de carga coincidente”. Para esses casos todas as análises realizadas através dos gráficos anteriores é válida. Entretanto, a frequência do GSD se comporta de modo diferente com relação ao aumento do ganho K_{C1} , onde o melhor desempenho dinâmico é alcançado com o menor valor de K_{C1} simulado.

Decorrente da presença de não linearidades, os ajustes dos parâmetros dos ramos de compensação do tipo AWBT dependem das condições operativas do sistema. Portanto, é praticamente inviável encontrar uma compensação ótima para todos os possíveis casos em que o sistema será submetido (VRANCIC, 1997). Por ser inspirada na teoria de AWBT,

Figura 4.16 – Comportamento da frequência ‘ f ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1}

esse comportamento também é verificado na EHC proposta. No contexto apresentado, neste trabalho o ajuste foi realizado objetivando alcançar o melhor desempenho dinâmico do GSD para o caso em que a geração é maior que a carga da futura ilha. Esse configura um cenário mais realista, haja vista que a condição de coincidência de carga é um caso específico e de baixa probabilidade de ocorrência quando comparada a possibilidade considerada na adoção dos ajustes.

Figura 4.17 – Comportamento da frequência ‘ f ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1} – caso particular de carga coincidente

Os gráficos anteriormente apresentados destacaram que a adoção de maiores valores ao ganho K_{C1} traz o benefício da obtenção de uma menor excursão da frequência do GSD

controlado em relação ao seu valor nominal, o que caracteriza do ponto de vista deste trabalho um transitório menos severo para a rede quando da ocorrência do ilhamento. Entretanto, a adoção de altos valores para K_{C1} possui um inconveniente. Esse efeito negativo compreende o estabelecimento de um alto valor de erro de controle ao SE ‘ e_{SE} ’ por um tempo suficientemente longo momentos após a ocorrência do ilhamento. Esse comportamento é apresentado na Figura 4.18 considerando a inexistência do ramo II de compensação ($K_{C2} = 0$).

O comportamento descrito no parágrafo anterior tem a potencialidade de tornar o GSD controlado instável conforme o valor de K_{C1} se eleva, em situação na qual não seja provida o ramo II de compensação. Isso é evidenciado pela Figura 4.19, na qual é apresentado o comportamento da frequência do GSD controlado para diferentes valores de K_{C1} , onde também foi considerada a inexistência do ramo II de compensação ($K_{C2} = 0$).

Figura 4.18 – Comportamento do sinal de erro de controle do SE ‘ e_{SE} ’ frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C1} – inexistência do ramo II de compensação

Devido ao estabelecimento de altos valores ao sinal de erro do SE, adiciona-se o ramo II de compensação na EHC, cujo sinal de saída compreende a saída do PI do módulo de compensação multiplicado pelo ganho K_{C2} . A Figura 4.20 apresenta o comportamento dinâmico do sinal de saída do ramo II de compensação ‘ χ ’ para o evento simulado considerando diferentes valores de K_{C2} .

A inserção do ramo II de compensação faz com que o valor do erro de controle do SE durante o processo de formação do sistema ilhado seja reduzido após a ocorrência do ilhamento. A Figura 4.21 apresenta o comportamento do sinal de erro de controle do SE (e_{SE}) para distintos valores de K_{C2} , onde fica evidenciada a tendência citada neste parágrafo.

Figura 4.19 – Comportamento da frequência ‘ f ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores para o ganho K_{C1} – inexistência do ramo II de compensação

Figura 4.20 – Comportamento do sinal de saída do ramo II de compensação ‘ χ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2}

Além da indução de comportamento dinâmico instável ao GSD, outra característica negativa associada a adoção de altos valores ao parâmetro K_{C1} está na ocorrência de sobretensões nos terminais do GSD controlado durante o processo de ilhamento. Esse comportamento é indesejável devido a potencialidade da ocorrência de avarias nas cargas do sistema ilhado recém-formado, e está diretamente relacionado ao estabelecimento dos altos valores ao sinal de erro do SE ‘ e_{SE} ’. Assim, a diminuição do erro provida pelo ramo II de compensação, além de contribuir para o comportamento estável do sistema, contribui para a diminuição das sobretensões citadas, conforme evidenciado na Figura 4.22.

Figura 4.21 – Comportamento do sinal de erro de controle do SE ‘ e_{SE} ’ frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2}

O comportamento citado no parágrafo anterior também é verificado na potência reativa injetada pelo GSD, em que quanto maior o valor do ganho K_{C2} menor se torna o valor de pico dessa variável durante o processo ilhamento. Esse comportamento é evidenciado na Figura 4.23.

Através das simulações verificou-se que a adoção de valores de K_{C2} superiores a $30p.u./p.u.$ implicam em mudanças pouco significativas no comportamento da tensão terminal do GSD, quando comparado com àquele obtido com o ganho citado. Além disso, verificou-se que para a faixa de valores de K_{C1} ajustado, mudanças do valor de K_{C2} – desde que o mesmo não seja nulo ou possua valores muito baixos – tem efeito pouco significativo sobre o comportamento dinâmico da frequência do GSD controlado.

4.3.2.2 Comportamento da EHC frente a Extrapolação da Tensão Terminal em Relação aos Limites Desejados – Perturbação PB

Para a obtenção dos resultados apresentados nesta subseção, as condições pré-perturbação do sistema foram as mesmas adotadas para a caracterização do comportamento da EHC para a perturbação PA. Como o GSD opera com a referência de potência reativa igual a zero durante todo o período de simulação – ou seja, FP unitário – devido as restrições algébricas impostas pela formulação de fluxo de carga, o aumento da demanda de potência reativa por parte da carga implica na modificação do valor de sua tensão terminal. Para as condições simuladas, o aumento de demanda de potência reativa é realizado de tal forma que a tensão terminal do GSD extrapole o limite dado pelo ajuste do parâmetro V_t^{MIN} .

Figura 4.22 – Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2}

Figura 4.23 – Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PA para diferentes valores de ganho K_{C2}

A Figura 4.24 apresenta o comportamento de tensão terminal ' V_t ' do GSD frente ao evento simulado para duas configurações distintas do sistema de controle aplicado ao seu SE. Uma das configurações é caracterizada por um controle de potência reativa típico (CQ), que corresponde a ETC com a manipulação de suas chaves desabilitada. A outra é caracterizada pela EHC, cujo diagrama de blocos é apresentado pela Figura 4.6. Além disso, na Figura 4.24 estão evidenciados os limites que definem a faixa de tensão terminal na qual se deseja que o GSD opere em condições de RP, onde é verificado que a tensão terminal extrapola o valor dado por V_t^{MIN} frente a perturbação aplicada.

Quando operando com a EHC, o afundamento de tensão faz com que o sinal ‘ α ’ proveniente da comparação entre os sinais de tensão terminal limitado e não limitado possua um valor não nulo, conforme apresentado pela Figura 4.25, ativando a dinâmica do módulo de compensação dessa estrutura. Através da Figura 4.24 verifica-se que o módulo de compensação faz com que a tensão terminal do GSD alcance o limite inferior de tensão dado em ajuste, e permaneça nessa condição até o fim da simulação. A acomodação no limite inferior se deve ao fato do controlador manter o valor de potência reativa o mais próximo da referência ajustada mantendo a sua tensão terminal dentro da faixa desejada, estabelecendo um compromisso entre essas variáveis.

Figura 4.24 – Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PB com os controles CQ e EHC

A Figura 4.26 apresenta o sinal de saída do PI do módulo de compensação ‘ β ’ para diferentes valores de ganho K_{C1} . Tal valor compõem o sinal de entrada do integrador do PI da malha de controle de potência reativa ‘ γ ’, o qual é apresentado pela Figura 4.27 para diferentes valores de K_{C1} .

A partir da Figura 4.27 verifica-se que quanto maior o valor de K_{C1} , maior é o valor e a taxa de variação em relação ao tempo da entrada aplicada ao integrador do PI da malha de controle de potência reativa. O mesmo comportamento é verificado no sinal de saída do integrador ‘ ψ ’, conforme verificado na Figura 4.28.

O comportamento do sinal ‘ ψ ’ tem efeito direto sobre o comportamento do sinal de saída da malha de controle de potência reativa ‘ V_{qe} ’, e por consequência, sobre o sinal de referência equivalente do SE ‘ V_{refeq} ’, conforme apresentado, respectivamente, pelas Figuras 4.29 e 4.30.

Figura 4.25 – Sinal ‘ α ’ da EHC resultante da comparação entre os sinais de tensão terminal ‘ V_t ’ limitado e não limitado frente a ocorrência da perturbação PB

Figura 4.26 – Comportamento do sinal de saída do ramo I de compensação ‘ β ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}

Remetendo-se ao comportamento do sinal de referência equivalente do SE ‘ V_{refeq} ’, quando da ocorrência da extrapolação da tensão terminal do GSD para além dos limites ajustados, o ramo I de compensação atua no sentido de recalculer a saída do controlador de potência reativa. Essa ação implica num reajuste do valor de referência equivalente do SE, de forma que a tensão terminal do GSD atenda em condições de RP ao limite da faixa delimitada pelos ajustes dos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} . Por estar diretamente associado com o valor de saída do integrador da malha de controle de potência reativa, verifica-se no sinal de referência equivalente do SE ‘ V_{refeq} ’ a mesma tendência de comportamento observada no sinal ‘ ψ ’ para mudanças no valor do ganho K_{C1} .

Figura 4.27 – Comportamento do sinal de entrada do integrador da malha de controle de potência reativa ‘ γ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}

Figura 4.28 – Comportamento do sinal de saída do integrador da malha de controle de potência reativa ‘ ψ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}

A Figura 4.31 apresenta o comportamento da tensão terminal do GSD controlado para diferentes valores do ganho K_{C1} . Decorrente do comportamento do sinal de ‘ V_{refeq} ’, verifica-se que a adoção de altos valores ao ganho K_{C1} confere à tensão terminal do GSD um sobressinal em relação ao limite inferior da faixa de tensão ajustada, além de um tempo de acomodação elevado. Por ambos os efeitos serem indesejáveis, infere-se que a adoção de altos valores ao ganho K_{C1} deve ser evitada. Além disso, verifica-se que o valor de $K_{C1} = 150,0 p.u./p.u.$ é o mais adequado, haja vista que a sua adoção implicou na acomodação da tensão terminal de modo mais rápido ao valor ajustado em V_t^{MIN} .

Figura 4.29 – Comportamento do sinal de saída da malha de controle de potência reativa ' V_{qe} ' da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}

Figura 4.30 – Comportamento do sinal da referência equivalente do SE ' V_{refeq} ' frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}

A Figura 4.32 apresenta o comportamento da potência reativa do GSD controlado para diferentes valores de ganho K_{C1} . Decorrente do comportamento do sinal de referência equivalente do SE, e seguindo o comportamento descrito para a tensão terminal, verifica-se que a adoção de altos valores do ganho K_{C1} implicam no estabelecimento de maiores valores de pico, bem como um maior tempo de acomodação, para essa variável.

O ramo II de compensação também tem efeito direto sobre o comportamento dinâmico da tensão terminal do GSD controlado quando da ocorrência da perturbação PB. Por permitir o acesso direto do PI do módulo de compensação ao ponto de soma do SE, o ramo

Figura 4.31 – Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}

Figura 4.32 – Comportamento da potência reativa ‘ Q_e ’ do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C1}

II de compensação contribui para uma melhor regulação da tensão terminal. Em outros termos, o sobressinal e o tempo de acomodação dessa variável no valor determinado pelo ajuste V_t^{MIN} se tornam substancialmente menores. Esse comportamento é evidenciado na Figura 4.33 quando observado o comportamento da tensão terminal frente a ocorrência da perturbação PB com o ganho K_{C2} nulo – ou seja, sem o ramo II de compensação – e com o ganho K_{C2} com um valor diferente de zero. Um maior valor de pico e um tempo de acomodação elevado também são verificados para a potência reativa do GSD controlado, conforme apresentado na Figura 4.34. A partir da Figura 4.33 evidencia-se a

característica da tensão terminal em acomodar em condições de RP exatamente no valor do ajuste do parâmetro V_t^{MIN} . Esse comportamento é decorrente da adição do integrador no módulo de compensação, o qual possui exatamente essa finalidade.

Figura 4.33 – Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PB com ($K_{C2} = 10p.u./p.u.$) e sem ($K_{C2} = 0p.u./p.u.$) o ramo II de compensação

Figura 4.34 – Comportamento da potência reativa ‘ Q_e ’ do GSD controlado frente a ocorrência da perturbação PB com ($K_{C2} = 10p.u./p.u.$) e sem ($K_{C2} = 0p.u./p.u.$) o ramo II de compensação

A Figura 4.35 apresenta o comportamento do sinal de saída do ramo II de compensação ‘ χ ’ para diferentes valores do ganho K_{C2} . A tendência de comportamento do sinal ‘ χ ’ influi diretamente sobre o sinal de erro de controle do SE ‘ e_{SE} ’, em que quanto maior o valor de K_{C2} maior é a excursão do valor de ‘ e_{SE} ’, conforme verificado na Figura 4.36. Tal

comportamento tem impacto direto sobre a tensão terminal e potência reativa do GSD controlado, conforme verificado nas Figuras 4.37 e 4.38, respectivamente.

Figura 4.35 – Comportamento do sinal de saída do ramo II de compensação ‘ χ ’ da EHC frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}

Figura 4.36 – Comportamento do sinal de erro de controle do SE ‘ e_{SE} ’ frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}

Devido ao comportamento de ‘ e_{SE} ’, quanto maior for o valor de K_{C2} menor será o afundamento da tensão terminal do GSD durante a ocorrência da perturbação. No entanto, verifica-se que a adoção de altos valores a esse parâmetro acarreta em sobressinal da tensão terminal em relação ao valor ajustado em V_t^{MIN} . A partir dos resultados obtidos via simulação verificou-se que, a adoção do valor de $70 p.u./p.u.$ para K_{C2} atende

Figura 4.37 – Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}

Figura 4.38 – Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD frente a ocorrência da perturbação PB para diferentes valores de ganho K_{C2}

ao compromisso de propiciar um menor afundamento de tensão no momento da ocorrência da perturbação, sem que sobressinais em relação ao valor dado no ajuste de V_t^{MIN} sejam induzidos no comportamento dessa variável.

4.3.2.3 Discussões Adicionais

O principal objetivo dessa subseção é de sumarizar, a partir dos resultados apresentados nas Subseções 4.3.2.1 e 4.3.2.2, as principais características da EHC e definir os ajustes dos parâmetros K_{C1} e K_{C2} , os quais irão compor os resultados apresentados no Capítulo 5 deste texto.

Das simulações realizadas para a ocorrência do ilhamento – perturbação PA – verificou-se que:

- ❑ O ramo I de compensação, o qual é figurado pelo ganho K_{C1} , atua no sentido de restabelecer de forma rápida a tensão terminal do GSD em níveis adequados. Destaca-se que além de evitar que a tensão terminal excursione demasiadamente de seus valores pré-ilhamento – implicando, sob a ótica adotada por esse trabalho, em uma menor severidade do transitório dessa variável – a velocidade da recomposição é imprescindível para um menor estabelecimento de desbalanço de potência no eixo do GSD controlado – tanto em termos de módulo quanto em termos de tempo – e por consequência, para a amenização do transitório de sua frequência;
- ❑ Para o sistema teste verificou-se que a adoção de valores de ganho a partir de $100p.u./p.u.$ para o parâmetro K_{C1} implicam em mudanças pouco significativas no comportamento dinâmico das variáveis de interesse do GSD controlado, especialmente tensão terminal e frequência, em relação àquele obtido com a aplicação do valor de ganho citado;
- ❑ O ramo II de compensação, cuja atuação é sintetizada pelo ganho K_{C2} , possui as funções de permitir a operação estável do GSD para altos valores de K_{C1} , e evitar a ocorrência de sobretensões na barra terminal do gerador durante o processo de ilhamento;
- ❑ Para a operação estável do GSD baixos valores de K_{C2} são suficientes. Do ponto de vista de supressão das sobretensões observadas durante o processo de ilhamento, para o sistema teste verificou-se que a adoção de valores de ganho a partir de $30p.u./p.u.$ para o parâmetro K_{C2} implicam em mudanças pouco significativas no comportamento dinâmico da tensão terminal em relação àquele obtido com a aplicação do valor de ganho citado.

Já do ponto de vista da excursão da tensão terminal para além da faixa dada em ajuste – perturbação PB – verificou-se que:

- ❑ O ramo I de compensação atua no sentido de recalcular o termo integral do controle de potência reativa, de forma que a excitação do GSD seja reajustada para que a sua tensão terminal atenda em condições de RP a faixa de valores dada através do ajuste dos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} ;

- Verificou-se que a adoção de baixos valores para o parâmetro K_{C1} faz com que a tensão atinja o extremo da faixa ajustada com um alto tempo de acomodação. Por outro lado, valores elevados de K_{C1} fazem com que seja observada a ocorrência de um sobressinal em relação a esse mesmo extremo. Desse modo, deve ser adotado um ajuste que confira baixo sobressinal e um tempo de acomodação adequado ao comportamento dinâmico da tensão terminal. Para o sistema teste o valor de $150p.u./p.u.$ para K_{C1} se mostrou adequado em atender ao compromisso citado;
- O ramo II de compensação fornece um caminho direto do PI do módulo de compensação ao ponto de soma do SE, tornando mais efetiva a regulação de tensão quando verificada a sua extrapolação em relação a faixa ajustada;
- Conforme maior é o valor adotado ao parâmetro K_{C2} , menor é o valor de afundamento de tensão terminal durante a perturbação simulada. Entretanto, altos valores de K_{C2} conferem um sobressinal ao valor de tensão terminal em relação ao extremo da faixa ajustada durante a sua regulação. Desse modo, deve ser adotado um ajuste que confira baixo sobressinal e um tempo de acomodação adequado ao comportamento dinâmico da tensão terminal. Para o sistema teste o valor de $70p.u./p.u.$ para K_{C2} se mostrou adequado em atender ao compromisso citado.

Do exposto, buscando um compromisso entre os objetivos da EHC, define-se os seguintes ajustes para os parâmetros de K_{C1} e K_{C2} :

- $K_{C1} = 150p.u./p.u.$;
- $K_{C2} = 70p.u./p.u.$

É importante destacar que os ajustes apresentados são particulares para o sistema teste avaliado, cuja descrição completa encontra-se no Capítulo 5 deste texto. Para outros sistemas com características diversas do sistema analisado, uma análise semelhante a apresentada por este capítulo deverá ser realizada para a definição dos valores dos parâmetros da EHC.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo do texto foi proposta uma estrutura híbrida de controle, cuja finalidade é a aplicação em sistemas de excitação de GSDs que operam em SDEEs que permitem a operação ilhada de determinadas porções de sua rede. Dentre as características da estrutura proposta merecem destaque os fatos de: i) ser concebida a partir de blocos elementares provenientes da teoria clássica de controle; ii) possuir independência operativa de sistemas de proteção caracterizados por relés de proteção anti-ilhamento e sub/sobretensão.

Para os objetivos que este trabalho se propõe a solucionar, merece menção a forma em que os problemas de AW e BT são analisados na literatura. É fato que a literatura reporta abordagens formais do problema de AW e BT. Entretanto, tais abordagens são direcionadas para plantas com comportamento linear (TEEL; KAPOOR, 1997; ZACCARIAN; TEEL, 2004), sendo que mesmo nessa condição já é verificada uma alta complexidade de análise. Decorrente disso, é prático e eficiente utilizar métodos baseados em simulação numérica para a análise dos problemas de AW e BT em sistemas de controle que apresentem não linearidades (ASTROM; WITTENMARK, 1996).

No contexto apresentado no último paragrafo, simulações numéricas computacionais formam uma parte essencial do procedimento de análise desses sistemas (BOHN; ATHERTON, 1995), abordagem que foi adotada neste trabalho.

O próximo capítulo do texto avaliará a eficiência da estrutura de controle proposta neste capítulo em atender aos seus principais objetivos, estabelecendo uma comparação com os resultados obtidos quando aplicada a ETC apresentada no Capítulo 2 deste texto.

Resultados da Pesquisa

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo do texto apresenta os principais resultados da pesquisa, onde serão evidenciados os benefícios da aplicação da EHC proposta no Capítulo 4 deste texto, bem como a sua capacidade de atender aos objetivos pela qual a mesma foi concebida. Tais resultados são essencialmente caracterizados pela comparação entre os comportamentos dinâmicos de um sistema teste obtidos com a aplicação da EHC e da ETC, frente a um mesmo conjunto de perturbações e condições operativas de RP pré-perturbação.

Objetivando apresentar os resultados de forma estruturada, este capítulo está organizado como segue: em um primeiro momento serão apresentadas as características da ferramenta de simulação computacional utilizada para a obtenção dos resultados. Na sequência, serão apresentadas as características da rede e da carga do sistema teste, além dos modelos dinâmicos que o compõem. Posteriormente, serão apresentados os resultados para perturbações que desencadeiam na ocorrência de ilhamento. Seguidos desses, serão apresentados os resultados relacionados a perturbações que desencadeiam na excursão da tensão terminal do GSD controlado para valores considerados inadequados, quando o mesmo opera em paralelo com a SD regulando a potência reativa injetada no sistema. Por fim, serão realizadas algumas considerações finais acerca dos resultados obtidos.

5.2 Ferramenta de Análise Computacional

O aplicativo Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) (CEPEL, 2016) foi a ferramenta de análise computacional adotada para a realização das análises propostas neste trabalho. Esse aplicativo foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), empresa pertencente ao grupo Eletrobras, tendo seu foco dirigido para simulação no domínio do tempo de transitórios de natureza eletromecânica – ou seja, transitórios lentos – presentes em SEPs.

Atualmente, o ANATEM é amplamente utilizado pelo setor elétrico brasileiro em estudos envolvendo dinâmicas e transitórios eletromecânicos de usinas elétricas conectadas ao SIN. Esse aplicativo foi adotado pelo ONS em seus procedimentos de rede como ferramenta oficial para estudos de estabilidade, sendo solicitado a todos os agentes que o adotem, permitindo assim uma comunicação entre os mesmos em linguagem única. Afim de atender aos requisitos demandados por esses estudos, o ANATEM possui a capacidade de representação dos principais componentes dinâmicos do sistema elétrico, tais como geradores síncronos, dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), elos de corrente contínua, motores de indução, cargas estáticas e dinâmicas, usinas eólicas e sistemas de controle de uma forma geral.

Existem algumas simplificações associadas ao seu algoritmo, adequadas para simulação de transitórios lentos em SEPs de grande porte, os quais otimizam o seu processo de solução. Um exemplo dessas simplificações é a representação do sistema por seu circuito de sequência positiva¹ com parâmetros invariantes com a frequência, sendo as linhas de transmissão e os transformadores representados, respectivamente, pelos seus circuitos equivalentes “ π ” e série.

Decorrente de suas considerações para a representação do modelo do sistema elétrico sob análise, a solução do ANATEM é equacionada sob um sistema de equações algébrico-diferenciais, ilustrado de forma geral pelas relações (5.1) e (5.2) (SANTOS et al., 2012).

$$\dot{x} = f(x, z) \quad (5.1)$$

$$0 = g(x, z) \quad (5.2)$$

Nas relações (5.1) e (5.2), x é o vetor de variáveis de estado do sistema sob análise, enquanto z é vetor de variáveis algébricas desse mesmo sistema. O conjunto de equações (5.2) descreve as restrições de fluxo de potência, as quais são atendidas a cada passo de integração utilizado para a solução do conjunto de equações dinâmicas (5.1).

Os sistemas de controle associados aos elementos do sistema elétrico sob análise podem ser representados por modelos pré-definidos ou através de Controladores Definidos pelo Usuário (CDU). Esses últimos conferem ao ANATEM uma flexibilidade de modelagem e precisão de resultados, decorrente da grande variedade de blocos e funções lógicas e matemáticas disponíveis para a construção dos sistemas de controle. Para a representação dos sistemas de controle analisados por este trabalho, dispôs-se dessa ferramenta.

¹É de conhecimento geral que os SDEEs apresentam redes assimétricas e desequilíbrio de carga entre as suas fases (SALIM, 2011). No entanto, em um primeiro momento pretende-se analisar o SDEE em condições simétricas e equilibradas. Portanto, o nível de detalhamento da rede disponibilizado pelo ANATEM é adequado ao escopo que a presente pesquisa se propõe a desenvolver.

5.3 Sistema Teste

O SDEE utilizado para a obtenção dos resultados apresentados neste capítulo – denominado por “Sistema Teste” – é ilustrado na Figura 5.1. O mesmo compreende uma adaptação do sistema apresentado em Jenkins et al. (2000), cujos dados dinâmicos do GSD foram obtidos de Freitas et al. (2006).

Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema teste utilizado para a obtenção dos resultados

Fonte: Adaptado de Jenkins et al. (2000).

O sistema teste possui conexão com um sistema de subtransmissão com valores nominais de tensão e frequência de $132kV$ e $60Hz$, respectivamente. A SD, a qual é responsável por reduzir o nível de tensão a um valor adequado para distribuição, é representada por dois transformadores de dois enrolamentos (identificados por TR1 e TR2 na Figura 5.1), cujos valores nominais de tensão do lado de alta e do lado de baixa correspondem, respectivamente, a 132 e $33kV$. O valor de potência de curto-circuito simétrico no ponto de conexão do sistema de subtransmissão é de $1500MVA$, que por fins de simplicidade de representação não possui componente resistiva. As barras 1 e a equivalente do sistema de subtransmissão (barramento infinito) possuem tensão nominal de $132kV$, enquanto a barra 6 possui tensão nominal de $6,9kV$. As barras restantes – 2 à 5 – possuem tensão nominal de $33kV$.

O sistema teste possui em sua infraestrutura, 1 disjuntor (DJ), 7 barras, 4 seções de linha de distribuição, 3 transformadores e um GSD. O disjuntor “DJ” é responsável por isolar o SDEE do sistema de subtransmissão, caracterizando a ocorrência de ilhamento. As linhas de distribuição, por serem consideradas curtas, foram representadas por seus equivalentes RL série. Devido a faixa de frequências de análise que este trabalho se propõe a analisar, a mesma representação foi aplicada aos transformadores. Ressalta-se que, devido às características da ferramenta de análise computacional, as linhas de distribuição e os transformadores foram representados apenas por seus componentes de sequência positiva.

A geração distribuída é caracterizada por uma máquina térmica acoplada a um GSD com potência nominal de $30M_{VA}$. A potência nominal do GSD equivale a aproximadamente 2% do valor de potência de curto-circuito simétrico no ponto de conexão com o sistema de subtransmissão. Dessa forma, esse ponto de conexão é representado por um barramento infinito² em série com uma impedância – caracterizada pelo valor de curto-circuito simétrico – o que constitui uma boa aproximação para a simulação dinâmica.

Os valores dos parâmetros associados aos modelos dos elementos que compõem a rede do SDEE, os quais foram utilizados para gerar os resultados desta pesquisa, estão apresentados no Apêndice B deste texto.

Nas próximas subseções serão apresentados os modelos dinâmicos do GSD e dos seus sistemas de controle, bem como o modelo das cargas adotado nas simulações.

5.3.1 Representação do Carregamento do Sistema Teste

A representação de cargas em simulações dinâmicas de SEPs constitui um problema complexo (IEEE, 1993), e ainda são recorrentes pesquisas nessa temática. Essa complexidade deriva de diversos fatores. Dentre esses merecem destaque a grande diversidade de cargas presentes num sistema elétrico – como por exemplo, lâmpadas, dispositivos eletrônicos, motores e resistências – e a consequente falta de informação precisa acerca dessa composição (KUNDUR, 1994), bem como as incertezas referentes à resposta das cargas frente a variações de módulo e frequência do sinal de tensão aplicado em seus terminais (IEEE, 1993).

Até mesmo num caso hipotético, no qual se conheça exatamente a composição das cargas, seria impraticável a representação de cada elemento de forma isolada, especialmente quando o sistema elétrico analisado é de grandes proporções. Portanto, a representação de cargas é geralmente acompanhada de consideráveis simplificações (KUNDUR, 1994). Fundamentando-se nos argumentos anteriormente apresentados, nas simulações realizadas neste trabalho foram consideradas cargas estáticas, em que a parcela ativa possui uma dependência linear com o módulo da tensão aplicada em seus terminais,³ enquanto a parcela reativa possui uma dependência quadrática⁴ com a mesma grandeza citada. Essas relações estão formalmente apresentadas nas expressões (5.3) e (5.4) (CEPEL, 2016). É válido destacar que essa aproximação é citada como comum em IEEE (1993) quando não se tem conhecimentos precisos acerca das características de carregamento do sistema sob análise.

²Do ponto de vista de formulação de fluxo de potência, o barramento infinito que representa o sistema de subtransmissão foi considerado como sendo a referência angular do sistema, com módulo de tensão igual a $1,0p.u.$.

³Carga de corrente constante.

⁴Carga de impedância constante.

$$P_L = P_0 \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right) \quad (5.3)$$

$$Q_L = Q_0 \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^2 \quad (5.4)$$

Em referência as expressões (5.3) e (5.4):

- P_L e Q_L correspondem, respectivamente, a potência ativa e reativa demandada pela carga L , em MW e M_{VAR} ;
- P_0 e Q_0 correspondem, respectivamente, a potência ativa e reativa demandada pela carga L no início da simulação. Tais valores são obtidos via solução de fluxo de carga, cujos valores são dados em MW e M_{VAR} ⁵;
- $|V|$ é o módulo da tensão terminal da carga, em $p.u.$;
- $|V_0|$ é módulo da tensão terminal inicial da carga obtida via solução de fluxo de carga, em $p.u.$ ⁶

Por fins de simplicidade de análise, o carregamento do sistema teste foi representado em uma única barra, a qual é identificada pelo número 4. Os valores de carga adotados dependem da análise considerada e serão apresentados em conjunto com os resultados.

5.3.2 Modelo Dinâmico do Gerador Síncrono Distribuído

Por se tratar de uma máquina térmica, para a representação do GSD foi utilizado o modelo de máquina de pólos lisos presente na biblioteca do ANATEM, o qual possui correspondência com o que é apresentado em IEEE (2003a). Esse modelo considera um enrolamento de campo e três enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e dois no eixo em quadratura.

Na Figura 5.2 é apresentado o diagrama de blocos para a equação de oscilação eletromecânica desse modelo. Ao contrário do que ocorre com os elementos da rede, o ANATEM permite a correção das equações dinâmicas do gerador síncrono com a frequência. Com o intuito de tornar o modelo mais aderente a realidade, nos resultados apresentados neste capítulo foi considerada essa correção. Na condição em que esta correção não é aplicada, tanto na equação de oscilação eletromecânica, quanto nas equações elétricas – as quais serão apresentadas na sequência através de diagramas de blocos – o sinal de frequência angular ' ω ' é mantido constante durante a simulação com valor igual a $1,0p.u.$

⁵Essa é uma realidade da ferramenta de análise computacional ANATEM. Em outros aplicativos essas variáveis podem estar relacionadas aos valores de demanda da carga modelada para condições nominais de tensão.

⁶Essa é uma realidade da ferramenta de análise computacional ANATEM. Em outros aplicativos essa variável pode estar relacionada ao valor de tensão nominal.

Figura 5.2 – Diagrama de blocos da equação de oscilação eletromecânica para GS de pólos lisos no ANATEM

Fonte: (CEPEL, 2016)

Em referência a Figura 5.2:

- P_e é a potência elétrica ativa gerada pelo GS, em $p.u.$ na base do gerador;
- ω é a velocidade angular do GS, em $p.u.$;
- T_e é o torque elétrico do GS, em $p.u.$ na base do gerador;
- T_m é o torque mecânico aplicado ao eixo do GS, em $p.u.$ na base do gerador;
- T_a é o torque acelerante resultante no eixo do GS, em $p.u.$ na base do gerador;
- $\Delta\omega$ é o desvio da velocidade angular do GS, em $p.u.$;
- δ é o ângulo do eixo em quadratura do GS, em rad ;
- H é a constante de inércia do GS, em segundos;
- D é a constante de amortecimento do GS, em $p.u./p.u.$;
- ω_s é a velocidade angular síncrona do GS, em rad/s ;
- s é o operador de Laplace.

Nas Figuras 5.3 e 5.4 são apresentados, respectivamente, os diagramas de blocos das equações elétricas de eixo direto e de eixo em quadratura do modelo dinâmico de GS de pólos lisos implementado no ANATEM. Nesse equacionamento a saliência subtransitória é desprezada. Apesar de ser representado no diagrama, o bloco de saturação não foi utilizado para a obtenção dos resultados apresentados nas seções subsequentes deste capítulo.

Em referência as Figuras 5.3 e 5.4:

- E_{FD} é a tensão de campo do GS, em $p.u.$;
- E_q é a tensão proporcional à corrente de campo do GS, em $p.u.$;
- E'_d é a tensão transitória do GS projetada no eixo direto, em $p.u.$;

Figura 5.3 – Diagrama de blocos para as equações dinâmicas elétricas do eixo direto para GS de pólos lisos no ANATEM

Fonte: (CEPEL, 2016)

- E'_q é a tensão transitória do GS projetada no eixo em quadratura, em *p.u.*;
- E''_d é a tensão subtransitória do GS projetada no eixo direto, em *p.u.*;
- E''_q é a tensão subtransitória do GS projetada no eixo em quadratura, em *p.u.*;
- $|E''|$ é o módulo da tensão subtransitória do GS, em *p.u.*;
- λ''_d é o fluxo magnético subtransitário concatenado do GS projetado no eixo direto, em *p.u.*;
- λ''_q é o fluxo magnético subtransitário concatenado do GS projetado no eixo em quadratura, em *p.u.*;
- I_d é a corrente de armadura do GS projetada no eixo direto, em *p.u.*;
- I_q é a corrente de armadura do GS projetada no eixo em quadratura, em *p.u.*;
- I_{FD} é a corrente de campo do GS, em *p.u.*;

- τ'_{q0} é a constante de tempo transitória de eixo em quadratura do GS em circuito aberto, em segundos;
- τ''_{d0} é a constante de tempo subtransitória de eixo direto do GS em circuito aberto, em segundos;
- τ''_{q0} é a constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura do GS em circuito aberto, em segundos.

Os valores dos parâmetros associados aos modelos dinâmicos do GS – os quais foram anteriormente apresentados – utilizados para gerar os resultados desta pesquisa estão apresentados no Apêndice B deste texto.

5.3.3 Modelo Dinâmico do Sistema de Excitação

O modelo dinâmico de SE utilizado no sistema teste é o IEEE ST1A, o qual é originalmente apresentado em IEEE (2016).⁷ A Figura 5.5^{8,9} apresenta o seu diagrama de blocos. Esse modelo compreende um SE alimentado por uma fonte de potencial, caracterizada nesse modelo por um transformador auxiliar alocado nos terminais do GSD controlado,¹⁰ e regulado através de um retificador controlado.

Devido à característica de sua excitatriz, a máxima tensão disponível de saída do SE está diretamente relacionada aos níveis de tensão terminal do GSD. O modelo apresentado contempla a operação de pontes retificadoras completas (que permitem a aplicação de tensões negativas no enrolamento de campo) ou meia ponte (situação na qual o limite mínimo de saída do modelo seria igual a zero). Neste trabalho considerou-se a aplicação de pontes retificadoras completas.

Todas as fontes alternadas que alimentam circuitos retificadores possuem uma impedância interna de característica predominantemente indutiva. O efeito dessa impedância altera o processo de comutação da ponte retificadora, acarretando em uma diminuição da tensão média de saída do retificador. Esse efeito é mais pronunciado quanto maior for a corrente de campo do GSD, a qual compreende a corrente que circula pelo circuito retificador. No modelo IEEE ST1A, o efeito de falha de comutação é representado através da constante K_C no limite superior do limitador do tipo *hard limit* dinâmico presente no modelo. No limite inferior esse efeito é omitido, pois quando o GSD opera nessa região

⁷Esta subseção foi baseada no que é descrito em IEEE (2016). Por simplicidade, em certos trechos do texto a omissão da citação deixa subentendido que mantém-se a consulta a tal material de referência.

⁸O diagrama de blocos ilustrado na Figura 5.5 compreende uma simplificação do que é apresentado em IEEE (2016). Essa simplificação consiste na não representação dos limitadores de sobreexcitação e subexcitação, bem como dos respectivos *gates* de entrada dos sinais provenientes desses elementos. Além disso, todos os limitadores do tipo *hard limit* foram representados por um único limitador de mesma natureza presente no sinal de saída do modelo dinâmico.

⁹Por não compreender o escopo deste trabalho, não foi prevista a adição de sinais estabilizadores junto ao modelo do SE.

¹⁰Outra opção possível para a alimentação do SE representado pelo modelo IEEE ST1A, seria através de um sistema auxiliar dedicado unicamente a essa função.

a sua corrente de campo geralmente é baixa, e por consequência, esse efeito é pouco pronunciado.

O ganho do regulador e as suas respectivas constantes de tempo são representados, respectivamente, por K_A e T_A . Nesse tipo de SE as constantes de tempo geralmente são pequenas e a estabilização do sistema pode ser não requerida. Entretanto, pode ser desejável reduzir o ganho do SE – o qual geralmente é alto para atender requisitos de RP – em condições transitórias, visando o aprimoramento da resposta dinâmica do gerador controlado. Essa função é realizada por um bloco do tipo *lead-lag* presente na malha de alimentação direta do modelo dinâmico do SE, ou por um bloco do tipo *washout* presente na malha realimentação deste mesmo modelo.

Figura 5.5 – Diagrama de blocos do modelo dinâmico do SE IEEE ST1A – simplificado – aplicado ao GSD do sistema teste

Fonte: Adaptado de IEEE (2016)

Em referência a Figura 5.5:

- V_{ref} é o sinal da referência do SE, em *p.u.*;
- V_{ge} é o sinal de saída da malha de controle de potência reativa, em *p.u.*;
- V_{refeq} é o sinal da referência equivalente do SE, em *p.u.*;
- I_{FD} é a corrente de campo do GSD, em *p.u.*;
- V_c é o sinal de tensão terminal proveniente do compensador de carga, em *p.u.*;
- T_C e T_B são as constantes de tempo do bloco *lead-lag* presente na malha de alimentação direta do modelo dinâmico do SE, em segundos;
- K_F é o ganho do bloco *washout* presente no ramo de realimentação do SE, em *p.u./p.u.*;
- T_F é a constante de tempo do bloco *washout* presente no ramo de realimentação do SE, em segundos;
- K_A é o ganho de malha direta de RP do SE, em *p.u./p.u.*;

- T_A é a constante de tempo do SE, em segundos;
- V_{RMIN} e V_{RMAX} são as constantes dos limites máximos e mínimos do limitador tipo *hard limit* dinâmico presente no modelo do SE, ambas *p.u./p.u.*;
- K_C é a constante que relaciona a corrente de campo do gerador com a falha de comutação da ponte retificadora do SE, em *p.u./p.u.*

O sinal de realimentação V_c do modelo de SE corresponde ao sinal de saída do compensador de carga, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 5.6. O modelo apresentado leva em conta que todos os atrasos de tempo provenientes do circuito de transdução e de compensação estão representados por uma única constante de tempo T_R .

Nos resultados apresentados neste capítulo não foi aplicado o conceito de compensação de carga. Para esse caso particular, o diagrama de blocos da Figura 5.6 se reduz a uma simples função de primeira ordem representando um filtro passa baixas,¹¹ em que a constante de tempo T_R está associada aos processos de retificação e filtragem do sinal de tensão terminal para a posterior manipulação pelo sistema de controle do SE.

Figura 5.6 – Diagrama de blocos para as equações do compensador de carga e transdutor de tensão do SE aplicado ao GSD do sistema teste

Fonte: (IEEE, 2016)

Em referência a Figura 5.6:

- $\vec{V}_t$ é o fasor de tensão terminal do GSD controlado, em *p.u.*;
- $\vec{I}_t$ é o fasor corrente terminal do GSD controlado, em *p.u.*;
- V_{C1} é o valor de tensão terminal do GSD controlado compensado, em *p.u.*;
- R_C é a parcela resistiva da impedância de compensação, em *p.u.*;
- X_C é a parcela reativa da impedância de compensação, em *p.u.*;
- T_R é a constante de tempo do transdutor de tensão terminal, em segundos.

Os valores dos parâmetros associados ao modelo dinâmico do SE, bem como do compensador de carga, utilizados para gerar os resultados desta pesquisa estão apresentados no Apêndice B deste texto.

¹¹A não aplicação de compensação da carga torna desnecessária a utilização do valor de corrente terminal. Além disso, para esse caso específico, apenas o valor do módulo da tensão terminal é suficiente.

5.3.4 Modelo do Controlador de Potência Reativa

O diagrama de blocos do controlador de potência reativa aplicado neste trabalho é apresentado na Figura 5.7, o qual é dividido em dois módulos. O primeiro módulo é caracterizado por um bloco de cálculo de potência reativa de referência, o qual possui como entrada o valor de FP de referência, a informação se o mesmo é adiantado ou atrasado e a potência ativa instantânea injetada no sistema pelo GSD. O segundo módulo constitui um controlador do tipo PI, o qual possui a função de zerar em condições de RP o erro entre a potência reativa de referência e a potência reativa injetada no sistema pelo GSD. É possível realizar o controle pelo sinal de FP, entretanto esse sinal não permite identificar o sentido do fluxo de potência reativa nos terminais do GSD. Devido a essa característica optou-se pela utilização do sinal de potência reativa para realização do controle. É importante destacar que devido a correspondência entre os valores de FP e de potência reativa gerada, independentemente da variável utilizada, a lógica de controle é essencialmente a mesma.

O controlador apresentado é um PI de ação contínua adicionado diretamente ao ponto de soma do modelo do SE, o que constitui uma estrutura de controle de duas malhas. A malha externa é constituída pelo controlador de potência reativa, a qual tipicamente possui uma ação lenta. Por sua vez, a malha interna é constituída pelo próprio modelo dinâmico do SE, o qual tipicamente possui ação rápida.

Não são aplicadas bandas mortas ou constantes de tempo no controlador de potência reativa, sendo que da forma em que foi concebido, o GSD controlado atinge a injeção de potência reativa no sistema desejada de forma suave.¹² Os limitadores do tipo *hard limit* são aplicados com o objetivo de limitar o sinal de saída do controlador ' V_{qe} ' e são apresentados para manter coerência com o modelo apresentado em IEEE (2016). Para a obtenção dos resultados apresentados neste trabalho esses limites foram desconsiderados.

Verifica-se nesse modelo a presença de duas chaves, as quais são comandadas por um sinal auxiliar ' TR '. Neste trabalho, a chave na entrada do integrador é utilizada para evitar a saturação do mesmo em caso de ocorrência de ilhamento.¹³ Já a chave na saída do controlador é utilizada para modificar o OC do sistema de excitação (WALLACE; KIPRAKIS, 2002; MOHAMAD; BAKAR; MOKHLIS, 2013), sendo que a posição I corresponde ao OCPR e a posição II corresponde ao OCT.

Neste trabalho, a fonte emissora do sinal TR depende do tipo de análise realizada. Quando aplicadas perturbações que desencadeiam na formação do sistema ilhado, o sinal TR é proveniente de um sistema de proteção anti-ilhamento. Por sua vez, quando aplicadas perturbações que desencadeiam na excursão da tensão controlada para além dos

¹²Essa afirmação é válida desde que os parâmetros da malha de controle de potência reativa sejam adequadamente ajustados para tal finalidade.

¹³Essa chave também pode ser utilizada em condições de subexcitação ou sobreexcitação, de forma a desabilitar a ação integral para permitir a correta atuação dos limitadores responsáveis pela eliminação dessas condições operativas (IEEE, 2016).

limites desejados, em condições na qual o GSD permanece conectado com o sistema de grande porte e controla o fluxo de potência reativa através de seus terminais, o sinal TR é proveniente de um sistema de proteção de sub/sobretensão.

Figura 5.7 – Diagrama de blocos para as equações dinâmicas do controlador de potência reativa aplicado ao SE do GSD do sistema teste

Fonte: Adaptado de IEEE (2016)

Em referência a Figura 5.7:

- FP_{REF} é o FP de referência do controlador;
- Q_e é a potência elétrica reativa gerada pelo GSD, em $p.u.$;
- CFP é a característica do FP, podendo ser adiantado ou atrasado;
- Q_{REF} é a potência elétrica reativa de referência, em $p.u.$;
- e_{PI} é o sinal de erro do controlador PI, em $p.u.$;
- TR é o sinal de *trip* proveniente do sistema de proteção responsável pela modificação da posição das chaves apresentadas no modelo dinâmico da malha de controle de potência reativa;
- K_P^P é o ganho proporcional do controlador PI, em $p.u./p.u.$;
- K_I^P é o ganho integral do controlador PI, em $p.u./p.u.$;
- V_{CLMT} é o valor de extremo dos limitadores do tipo *hard limit* do modelo dinâmico da malha de controle de potência reativa, em $p.u.$

É válido destacar que a composição das Figuras 5.5 e 5.7 dá origem a estrutura tipicamente aplicada aos SEs de GSDs – a qual é denominada por ETC neste trabalho. Também é importante destacar que a EHC apresentada pela Figura 4.6 nada mais é que

o controlador apresentado pela Figura 5.7 acrescido do módulo de compensação, desconsiderando a presença de chaves e respectivos sinais provenientes de elementos periféricos para a alteração de seus estados.

Os valores dos parâmetros associados ao modelo dinâmico do controlador de potência reativa utilizados para gerar os resultados desta pesquisa estão apresentados no Apêndice B deste texto.

5.3.5 Modelo Dinâmico do Sistema de Regulação de Velocidade

O diagrama de blocos do sistema de regulação de velocidade utilizado no sistema teste é apresentado na Figura 5.8. Da mesma forma que a ETC, o modelo dinâmico do sistema de regulação de velocidade possui uma chave sensibilizada pelo sinal TR . Em sua essência, o diagrama apresentado corresponde ao modelo dinâmico TGOV1, no qual é representada a queda de velocidade (dada pelo estatismo R), a dinâmica da válvula principal de vapor, um estágio de reaquecimento e um fator de amortecimento (POURBEIK et al., 2013). O TGOV1 corresponde ao modelo dinâmico mais simples para representação de um sistema de regulação de velocidade para uma turbina a vapor (SIEMENS PTI, 2009; POURBEIK et al., 2013). Essa abordagem é adequada a esta pesquisa, visto que o seu foco está na análise de elementos de controle do sistema de excitação do GSD.

Quando na posição I o controle apresenta característica de queda, o qual é adequado quando o GSD opera em paralelo com o SD. Já quando na posição II, a chave insere um controlador do tipo PI ao sistema de regulação de velocidade, impondo o modo isócrono de controle ao sistema de regulação de velocidade. Esse modo de controle é adequado quando o GSD opera isolado do sistema de grande porte, condição em que o erro de regime permanente da frequência em relação ao valor nominal, em uma condição operativa ideal, deve ser nulo.

A chave que modifica o modo de operação do sistema de controle de regulação de velocidade é sensibilizada apenas na ocorrência de ilhamento. Portanto, para essa malha de controle o sinal TR é proveniente apenas do sistema de proteção dedicado para identificação da operação ilhada do GSD. É válido destacar a presença de uma chave na entrada da ação integral do controlador PI da malha de regulação de velocidade, a qual tem a função de evitar que a saída do integrador adquira valores arbitrários quando o modo isócrono está desabilitado.

Figura 5.8 – Diagrama de blocos para as equações dinâmicas do sistema de regulação de velocidade aplicado ao GSD do sistema teste

Fontes: (SIEMENS PTI, 2009; POURBEIK et al., 2013)

Em referência a Figura 5.8:

- RV_{ref} é a referência do sistema de regulação de velocidade, em $p.u.$;
- P_{MEC} é a potência mecânica de saída aplicada ao eixo do GSD, em $p.u.$;
- R representa a característica de RP da carga versus velocidade do conjunto formado pela turbina e GSD, em $p.u./p.u.$;
- T_1 é a constante de tempo da válvula principal de admissão de vapor da turbina, em segundos;
- P_{MIN} e P_{MAX} são os limites mínimo e máximo, respectivamente, de abertura da válvula principal de admissão de vapor da turbina, em $p.u./p.u.$;
- T_2 e T_3 são as constantes de tempo¹⁴ que representam a dinâmica do vapor nos estágios de turbina e de reaquecimento, em segundos;
- D_T é o fator de amortecimento da turbina, em $p.u./p.u.$;

Os valores dos parâmetros associados ao modelo dinâmico do sistema de regulação de velocidade utilizados para gerar os resultados desta pesquisa estão apresentados no Apêndice B deste texto.

¹⁴A relação de T_2/T_3 representa a fração de potência da turbina que é desenvolvida pelo estágio de alta pressão da mesma, enquanto T_3 representa a constante de tempo do estágio de reaquecimento (POURBEIK et al., 2013).

5.4 Resultados para Eventos que Desencadeiam na Ocorrência de Ilhamento

O principal objetivo desta seção do texto é apresentar o desempenho dinâmico superior do sistema teste quando aplicada a EHC, frente a perturbações que desencadeiam na ocorrência de ilhamento. Para tanto, também serão gerados resultados para o mesmo conjunto de perturbações quando aplicada a ETC, sendo estabelecida uma comparação entre as estruturas de controle citadas.

Esta seção do texto será dividida em três partes. Em um primeiro momento serão apresentadas as características gerais das simulações. Na sequência serão caracterizados os problemas provenientes da aplicação da ETC do ponto de vista de ilhamento. Por fim, serão apresentados resultados quando da aplicação da EHC, onde será estabelecida uma comparação com os resultados obtidos com a ETC e serão destacados os ganhos de sua aplicação.

5.4.1 Características Gerais das Simulações

Para a caracterização dos resultados para a formação do sistema ilhado, o desempenho dinâmico do sistema teste foi avaliado frente a diferentes perturbações que desencadeiam nessa condição operativa, considerando distintos cenários de RP pré-perturbação.

No contexto de GD, ainda não é verificada uma política de remuneração financeira aos autoprodutores de energia pelo fornecimento de serviços ancilares ao SDEE – como por exemplo, fornecimento de suporte de potência reativa – sendo os mesmos apenas reembolsados pela potência ativa injetada no sistema. Devido a essa característica, os autoprodutores tendem a maximizar a capacidade nominal de seus geradores na busca de maiores retornos financeiros. Um dos meios dessa condição operativa ser alcançada é através da regulação do FP de operação de suas unidades geradoras em seu valor unitário – ou próximo deste – condição na qual a capacidade nominal desses equipamentos é maximizada para produção de potência ativa.

Buscando uma representação mais realista da condição operativa do sistema de GD, em todos os casos de RP pré-perturbação considerados na análise, o GSD do sistema teste opera em sua capacidade nominal injetando apenas potência ativa na rede. Por sua vez, o carregamento do sistema é alterado conforme apresentado na Tabela 1. A consideração de diferentes carregamentos busca verificar o comportamento dinâmico do sistema teste frente a diferentes desbalanços entre carga e geração no momento da ocorrência do ilhamento.

É válido destacar que em nenhum caso de RP pré-perturbação o carregamento do sistema teste é maior que a capacidade nominal do GSD. Em condição contrária, o sistema ilhado não seria formado devido ao fato do GSD não possuir capacidade de atender

a demanda do sistema. Além disso, em todos os cenários considerados o FP da carga é de 0,92, o que corresponde ao limite inferior de operação dessa grandeza imposto em ANEEL (2017b). Além disso, em todas as análises a carga possui característica indutiva.

Tabela 1 – Cenários de RP pré-perturbação para análise dos resultados de formação do sistema ilhado

Caso RP	P_G (MW)	FP do GSD	P_L (MW)	FP da Carga
RP1	30,0	1,00	27,6	0,92 IND
RP2	30,0	1,00	25,0	0,92 IND
RP3	30,0	1,00	23,0	0,92 IND
RP4	30,0	1,00	20,0	0,92 IND

As perturbações que caracterizam a formação do sistema ilhado são divididas em duas classes. A primeira classe – perturbação P1 – é constituída pela abertura espontânea do disjuntor DJ sem a ocorrência de nenhuma falta no sistema. Essa perturbação emula a abertura accidental do circuito que conecta a SD ao sistema de subtransmissão, ou até mesmo a falha de algum elemento que compõe esse circuito. Por sua vez, a segunda classe – perturbações P2-P4 – é constituída pela abertura do DJ após a ocorrência de um curto-circuito no barramento de alta tensão¹⁵ da SD, simulando a atuação de um eventual sistema de proteção presente na SD – como por exemplo, uma proteção de sobrecorrente. Nas últimas perturbações citadas foram variadas as impedâncias de falta enquanto o tempo de sua eliminação, por questões de simplicidade de análise, foi mantido constante. Em todas as perturbações a abertura do disjuntor DJ, ação que desencadeia a formação do sistema ilhado, é realizada quando decorrido 1,0 segundo do tempo de simulação. Para as perturbações P2 à P4, a aplicação do curto-circuito se dá em 0,9 segundos do tempo de simulação.

Do exposto no parágrafo anterior, as perturbações simuladas para a formação do sistema ilhado seguem a classificação apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Perturbações aplicadas para análise dos resultados de formação do sistema ilhado

Perturbação	Tipo da Falta	Duração da Falta (ms)	Barra de Falta	Resistência de Falta (Ω)
P1	Abertura Espontânea	–	–	–
P2	Atuação de Proteção	100	1	174,24
P3	Atuação de Proteção	100	1	17,42
P4	Atuação de Proteção	100	1	13,94

Conforme apontado no Capítulo 3 deste texto, por motivos técnicos e econômicos, é prática comum da indústria aplicar técnicas locais passivas aos sistemas de proteção responsáveis pela detecção do ilhamento, sendo essas predominantemente baseadas em medidas de frequência. É de conhecimento geral que essa classe de sistemas de proteção

¹⁵Barra 1.

é passível de atrasos de tempo em sua atuação. Essa característica é decorrente da não trivialidade dos ajustes de seus parâmetros, sendo que a mesma é especialmente verificada em condições nas quais o desbalanço entre a potência ativa gerada pelos geradores distribuídos, e a potência ativa consumida pela porção candidata do SDEE a se tornar um sistema ilhado, não é significativo.

Nos resultados aqui apresentados objetivou-se caracterizar os efeitos do atraso de tempo da técnica de detecção da ocorrência do ilhamento sobre o comportamento dinâmico do GSD frente as perturbações simuladas. Portanto, a proteção anti-ilhamento não foi modelada nos cenários teste, sendo que os tempos de sua atuação foram atribuídos de forma determinística. Tomando isso como premissa, para as condições simuladas o limite superior dos tempos de atuação corresponde a 500 milissegundos. A escolha desse valor se deve ao fato do mesmo compreender, no contexto operativo nacional, o tempo mais restritivo comumente aplicado na atuação de religadores automáticos presentes em SDEEs. Em tese, os sistemas de detecção da ocorrência do ilhamento devem atuar antes desses dispositivos afim de evitar um problema de fechamento de sistemas fora de fase, evento que tem a potencialidade de causar sérias avarias a infraestrutura do SDEE e, principalmente, ao GSD (VIEIRA JR, 2006). É importante destacar que o tempo máximo de detecção utilizado atende ao que está apresentado em IEEE (2003b), em que é recomendado que a identificação do sistema ilhado e a sua completa desenergização¹⁶ devem ser realizadas em até 2,0 segundos após a sua formação.

5.4.2 Desempenho da Estrutura Típica de Controle frente a Classe de Perturbações Avaliada

As simulações do comportamento dinâmico do sistema teste em situação na qual o GSD opera com a ETC, frente a perturbações que desencadeiam a ocorrência do ilhamento, pode ser dividida em quatro estágios, conforme ilustrado na Figura 5.9.¹⁷

¹⁶O tempo apontado em IEEE (2003b) é composto pelo período de tempo de identificação do ilhamento, somado ao período de tempo de atuação do disjuntor responsável pela desenergização da mesma. No contexto deste trabalho, considera-se que o referido tempo é composto unicamente pelo período de identificação da ocorrência do ilhamento, haja vista que nos casos analisados o GSD não é retirado de operação.

¹⁷A Figura 5.9 é de cunho ilustrativo. A proporcionalidade em que os estágios de simulação estão representados não estabelece nenhuma relação com as suas respectivas durações nas simulações realizadas para a obtenção dos resultados apresentados neste capítulo.

Figura 5.9 – Estágios das simulações para avaliação das perturbações que desencadeiam a ocorrência do ilhamento quando aplicada a ETC no GSD do sistema teste

Em referência a Figura 5.9:

- t_0 é o tempo inicial da simulação, em segundos;
- t_{DJ} é o tempo de abertura do disjuntor DJ presente no sistema teste, ação que estabelece a ocorrência do ilhamento, em segundos;
- Δt é o tempo de detecção de ilhamento pelo sistema de proteção dedicado a essa tarefa, o qual gera o sinal TR para as mudanças dos sistemas de controle do GSD, em segundos;
- t_{RP} é o tempo em que o sistema ilhado alcança a condição de regime permanente com o OCT aplicado ao SE, em segundos;
- t_f é o tempo final da simulação, em segundos.

O primeiro estágio de simulação é caracterizado pela operação do GSD em paralelo com a SD. Nessa condição, o GSD opera em sua capacidade nominal injetando apenas potência ativa ' P_e ' na rede, a qual alimenta o carregamento ' P_L ' e as perdas ' P_{LOSS} ' do sistema teste e compõe o excedente ' P_{EX} ' injetado no sistema de subtransmissão. Em todos os casos simulados, o sistema de subtransmissão fornece a potência reativa ' Q_L ' total demandada pela carga, somada às perdas reativas ' Q_{LOSS} ' do SDEE. Durante o primeiro estágio das simulações não são observados transitórios quando avaliada a resposta do sistema teste frente a perturbação P1, sendo mantidas as condições iniciais estabelecidas a partir da solução do fluxo de carga. Já quando aplicadas as perturbações P2-P4, transitórios são observados apenas a partir do momento da aplicação do curto-circuito.

O início do segundo estágio de simulação ocorre com a abertura do disjuntor DJ ilustrado na Figura 5.1, ação que estabelece a ocorrência do ilhamento. Esse estágio de simulação é caracterizado pela tomada da potência reativa demandada pela carga do

sistema teste pelo GSD, enquanto o SE desse dispositivo ainda é ditado pelo OCPR. Essa condição operativa confere um comportamento dinâmico instável ao GSD, haja vista que por restrições impostas pelo modelo matemático da carga, o sinal de erro da malha de controle de potência reativa do SE não é anulado através da ação da mesma. O período de tempo do segundo estágio de simulação é dado pelo tempo de atuação Δt do sistema de proteção responsável por detectar o ilhamento.

O terceiro estágio de simulação é iniciado pela detecção do ilhamento pelo sistema de proteção dedicado a essa tarefa, com o consequente estabelecimento do OCT no sistema de excitação e a ativação do modo isócrono de controle no sistema de regulação de velocidade. Essa nova condição operativa é alcançada através da alteração da posição das chaves – passando da posição I para a posição II – presentes nos modelos dinâmicos do controlador de potência reativa e de regulação de velocidade, os quais são apresentados pelas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente. É importante citar que para a obtenção dos resultados aqui apresentados, a referência do sistema de excitação ' V_{ref} ' não é reajustada no momento da identificação do ilhamento, sendo o seu valor mantido o mesmo que o estabelecido no processo de inicialização dos controladores aplicado pela ferramenta de análise computacional ANATEM.

Por fim, é alcançado o quarto estágio de simulação, no qual o GSD opera em RP fornecendo os suportes de tensão e frequência necessários para a operação adequada do sistema ilhado recém-formado.

As condições operativas do SDEE para o primeiro e quarto estágios de simulação – os quais caracterizam, respectivamente, o início e o fim das simulações realizadas – são sumarizadas pela Figura 5.10. A faixa de interesse desta análise se concentra no período constituído pelos segundo e terceiro estágios de simulação. Nesses estágios os transitórios do comportamento dinâmico do GSD quando aplicada a ETC durante o processo de formação do sistema ilhado são caracterizados. O comportamento dinâmico do segundo estágio de simulação é definido pela divergência das grandezas do sistema teste em relação ao seu ponto de equilíbrio pré-perturbação. Esse comportamento dinâmico é instável, haja vista que o sistema ilhado com o GSD controlando a potência reativa injetada no sistema não possui ponto de equilíbrio. Já o comportamento dinâmico do terceiro estágio de simulação é definido pelos transitórios das grandezas do sistema teste para atingir o ponto de equilíbrio pós-perturbação, o qual é ditado pelo OCT.

Figura 5.10 – Condições operativas do sistema teste para o primeiro e quarto estágios de simulação para a caracterização dos problemas da aplicação da ETC frente a perturbações que desencadeiam a ocorrência do ilhamento

Em referência a Figura 5.10:

- P_e é a potência elétrica ativa gerada pelo GSD, em *p.u.*;
- Q_e é a potência elétrica reativa gerada pelo GSD, em *p.u.*;
- P_{EX} é a potência elétrica ativa excedente injetada no sistema de subtransmissão, em *p.u.*;
- Q_{INJ} é a potência reativa fornecida pelo sistema de subtransmissão, em *p.u.*;
- P_L e Q_L correspondem, respectivamente, aos carregamentos de potência ativa e reativa do sistema teste, em *p.u.*;
- P_{LOSS} e Q_{LOSS} correspondem, respectivamente, as perdas de potência ativa e reativa do sistema teste, em *p.u.*.

A Figura 5.11 apresenta o comportamento do sinal ' V_{refeq} ' quando aplicada a ETC, considerando o caso de regime permanente RP4 e a ocorrência da perturbação P1, para diferentes tempos de atuação do sistema de proteção anti-ilhamento. Verifica-se que o valor de ' V_{refeq} ' tende a diminuir com a atuação da malha de controle de potência reativa durante o segundo estágio de simulação, sendo que quanto maior o tempo de detecção do ilhamento – após decorrida uma dinâmica – menor tende a ser o valor do sinal ' V_{refeq} '. Isso decorre do fato da malha de controle de potência reativa atuar no sentido de diminuir a referência equivalente do SE – a qual é formalizada pela expressão (4.3) – de forma que o GSD diminua a sua excitação, e por consequência, a potência reativa injetada no sistema buscando atender a sua referência de ajuste, conforme verificado na Figura 5.12. Destaca-se que o tempo de 1,0 segundo, apesar de não compreender o tempo máximo de detecção do ilhamento adotado neste trabalho, foi representado para reforçar a tendência apontada neste parágrafo. Tal afirmativa também é válida para os gráficos subsequentes.

A Figura 5.11 indica a presença de duas discontinuidades nos valores de ' V_{refeq} ', o que não é desejável do ponto de vista de controle.¹⁸ A primeira discontinuidade é decorrente da presença do ganho proporcional na malha de controle de potência reativa, o qual adiciona o erro de potência reativa estabelecido no momento da ocorrência do ilhamento diretamente ao ponto de soma do SE. Por sua vez, a segunda discontinuidade é decorrente da ação de chaveamento que desencadeia a alteração do OC do sistema de excitação.

Para a caracterização da Figura 5.11, bem como das figuras restantes desta subseção em que o tempo de detecção do ilhamento é variado, os valores dos parâmetros adotados ao regulador de potência reativa são os apresentados no Apêndice B deste texto. Esse conjunto de ajustes será definido neste trabalho como conjunto de “ajustes base”. Na sequência do texto a adoção desta nomenclatura se tornará clara.

Figura 5.11 – Comportamento do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt

As curvas apresentadas na Figura 5.11 indicam a tendência de que, quanto maior o tempo decorrido para a detecção do ilhamento menor se torna o valor de ' V_{refeq} ' durante o segundo estágio de simulação. Isso decorre do fato de que maior será o período de tempo de atuação do OCPR com o propósito de anular a circulação de potência reativa através dos terminais do GSD. É importante citar que essa operação é instável, o que justifica caracterizá-la como inadequada, haja vista que a injeção de potência reativa no sistema não será anulada. O modelo matemático aplicado a carga, somado à forma na qual os casos foram construídos, implica no fornecimento de potência reativa pelo GSD quando o mesmo apresenta tensão em seus terminais. Levando-se em conta ao que está definido

¹⁸Essa afirmação decorre do fato de discontinuidades não permitirem a aplicação de técnicas clássicas de ajuste dos parâmetros do sistema de controle.

Figura 5.12 – Comportamento da potência reativa ‘ Q_e ’ do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt

em (5.4), é adequado estabelecer que a existência de tensão terminal no GSD implica em fornecimento de potência reativa pelo mesmo quando operando isolado da SD, haja vista que esse compõe a única fonte de potência do sistema ilhado recém-formado.

O efeito da redução da referência do SE apresenta impacto direto sobre o comportamento dinâmico da tensão terminal do GSD. A Figura 5.13 apresenta o comportamento dinâmico da tensão terminal do GSD ‘ V_t ’ quando aplicada a ETC, considerando o caso de regime permanente RP4 e a ocorrência da perturbação P1. Nesta figura estão evidenciados os limites de tensão considerados como adequados neste trabalho por linhas pontilhadas na cor vermelha. Verifica-se que a atuação da malha de controle de potência reativa durante o segundo estágio de simulação implica numa alteração gradativa do valor de ‘ V_t ’, em que quanto maior o tempo decorrido para a detecção do ilhamento, menor será o valor de tensão terminal observado durante o processo de ilhamento. Esse comportamento decorre diretamente da tendência de comportamento do sinal ‘ V_{refeq} ’. Decorrido o tempo de identificação do ilhamento, as chaves presentes no modelo dinâmico da ETC são modificadas de posição, sendo caracterizado um transitório que resulta no estabelecimento de um valor adequado a tensão terminal do GSD, o qual é mantido até o final do período simulado.

Figura 5.13 – Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD quando aplicada a ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt

A Figura 5.14 apresenta o comportamento dinâmico da frequência ' f ' do GSD, para as mesmas condições que as utilizadas na obtenção das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13. Como o modelo da carga adotado estabelece uma dependência de sua demanda com o módulo da tensão aplicada em seus terminais, durante o segundo estágio de simulação o valor de potência ativa ' P_L ' da carga segue a mesma tendência de diminuição observada no comportamento da tensão terminal ' V_t '. Como as constantes de tempo da malha de controle de velocidade são elevadas, a taxa de variação do torque mecânico de saída da turbina térmica não acompanha a taxa de variação do torque elétrico estabelecido pela carga. No contexto apresentado, fica caracterizado um torque acelerante no eixo mecânico do GSD, o que resulta num aumento do valor de frequência. Com a identificação do ilhamento é caracterizado outro transitório, o qual implica no retorno da frequência ao seu valor nominal devido as modificações nos sistemas de controle de tensão e velocidade do GSD controlado, condição mantida até o final do período simulado.

O tempo de detecção do ilhamento atua de duas formas sobre a severidade do transitório observado no comportamento dinâmico da frequência do GSD. Além de induzir um maior valor de torque acelerante no eixo do rotor do GSD, devido a dependência do modelo matemático da carga do sistema com o módulo da tensão aplicado em seus terminais, um maior tempo de detecção faz com que a própria existência do torque acelerante perdure por mais tempo no eixo mecânico do GSD. Logo, decorrente da relação matemática entre a velocidade e o torque acelerante do gerador – a qual é apresentada pela Figura 5.2 – maior será o desvio do valor de frequência em relação ao seu valor pré-perturbação.

Figura 5.14 – Comportamento da frequência ‘ f ’ do GSD quando aplicada a ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e ajustes base do controlador de potência reativa – variação de Δt

Além do tempo de detecção da ocorrência do ilhamento, outro fator que impacta na severidade do comportamento dinâmico do GSD frente a formação do sistema ilhado, em situação na qual é aplicada a ETC ao seu SE, é o ajuste dos parâmetros do PI da malha de controle de potência reativa. Com a finalidade de verificar esse efeito, os valores dos ganhos K_P^P e K_I^P originalmente utilizados – os quais receberam a denominação de “ajustes base” durante a apresentação dos gráficos em que o tempo de detecção é variado – foram multiplicados por diferentes fatores, os quais serão denominados neste texto por FT . Do modo em que foi estabelecido, um FT maior implica em maiores valores aos ganhos do PI da malha de controle de potência reativa, o que acarreta numa maior velocidade de resposta a mesma.

As Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam, respectivamente, o comportamento dinâmico da referência equivalente do SE, potência reativa, tensão terminal e frequência do GSD controlado quando aplicada a ETC para diferentes valores de FT . Para a obtenção das figuras mencionadas foi simulada a perturbação P1, com o sistema operando no caso de regime permanente pré-perturbação RP4, considerando o tempo de detecção do ilhamento igual a $500ms$.

Na condição em que o FT possui um valor mais elevado – o que confere maiores valores de ganho, e por consequência, uma resposta mais rápida a malha de controle de potência reativa – mais pronunciada será a variação do valor do sinal de referência equivalente do SE durante o segundo estágio de simulação, fazendo com que a potência reativa alcance um valor mais próximo da referência ajustada no controlador, desencadeando os comportamentos dinâmicos já mencionados para a tensão terminal e frequência do GSD controlado.

Figura 5.15 – Comportamento do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT

Figura 5.16 – Comportamento do sinal da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT

Do ponto de vista de ilhamento, o principal problema da ETC está na necessidade de uma mudança estrutural quando da modificação da condição operativa do sistema, a qual infere-se que seja desencadeada pela sensibilização de um sistema de proteção externo responsável pela detecção do ilhamento. É de conhecimento que a tendência da indústria, por motivos técnicos e econômicos, está em aplicar sistemas de proteção de detecção anti-ilhamento fundamentados em técnicas locais passivas, os quais podem apresentar atrasos de tempo em sua atuações.

Figura 5.17 – Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT

Figura 5.18 – Comportamento da frequência ' f ' do GSD com a aplicação da ETC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT

Através dos resultados apresentados, se mostrou evidente que quanto maior o período de tempo decorrido para a detecção do ilhamento, maior é o período de tempo em que fica conferido um comportamento dinâmico instável ao GSD recentemente ilhado. Isso implica em uma maior excursão do ponto de operação do GSD em relação ao verificado na condição pré-perturbação (ditado pelo OCPR), bem como do verificado na condição pós-perturbação (ditado pelo OCT). Sob a ótica deste trabalho, uma maior trajetória do ponto de operação do GSD percorrida durante o período dinâmico, implica numa maior severidade dos transitórios observados em suas grandezas durante o processo de ilhamento.

Os resultados até então apresentados também evidenciaram que o ajuste fornecido ao PI da malha de controle de potência reativa, configura outro fator que impacta sobre a severidade dos transitórios nas grandezas do GSD controlado – e por consequência, do sistema em que o mesmo se conecta – durante o processo de ilhamento. Quanto maiores forem os valores atribuídos aos seus ganhos, maiores serão os esforços de controle em atender a referência ajustada momentos após a ocorrência do ilhamento. Portanto, mais rápido o ponto de operação do GSD irá se divergir daqueles observados nas condições de RP pré e pós-perturbação.

Do exposto nos parágrafos anteriores, fica estabelecido que a pior condição do ponto de vista da severidade dos transitórios presentes no comportamento dinâmico do GSD controlado – e por consequência, do sistema em que o mesmo se conecta – aplicando a ETC frente a formação do sistema ilhado, é caracterizada para altos valores dos ganhos do controle de potência reativa e dos tempos de detecção de ilhamento.

Cabe destacar que para os cenários representados nas simulações, a aplicação da ETC implicou em excursões pronunciadas nos valores de tensão e frequência no sistema ilhado recém-formado. Esse comportamento merece atenção pois no sistema em que o GSD se conecta podem estar presentes cargas sensíveis às variações desses parâmetros – com por exemplo, cargas eletrônicas – as quais podem ser retiradas de operação de modo não programado através da atuação de um sistema de proteção, ou até mesmo em casos mais críticos, sofrerem avarias devido a sua operação estar fora de suas condições nominais.

Outro aspecto a ser observado é a própria sobrevivência do sistema ilhado que possui GSDs em sua infraestrutura. Esses dispositivos usualmente possuem sistemas de proteção de sub/sobretensão e sub/sobrefrequência, que possuem como função retirá-los de operação quando verificadas condições inadequadas de operação objetivando a proteção da integridade física do equipamento. É válido destacar que, em teoria, os ajustes dessas proteções poderiam prever a não atuação na ocorrência de ilhamento. Entretanto, a imprevisibilidade do comportamento dinâmico do GSD – a qual é adicionada pelo desconhecimento do tempo de detecção do ilhamento e das condições da rede na condição pré-perturbação – adiciona considerável complexidade a essa tarefa.

5.4.3 Desempenho da Estrutura de Controle Proposta e sua Comparação com o Desempenho da Estrutura Típica de Controle frente a Classe de Perturbações Avaliada

Esta subseção do texto será segmentada em duas partes. Em um primeiro momento, será apresentada a comparação entre os desempenhos da EHC e da ETC para uma única perturbação e um único caso de RP pré-perturbação. Os resultados serão apresentados de forma gráfica, objetivando caracterizar o desempenho dinâmico superior da EHC de uma forma mais detalhada.

Num segundo momento, serão considerados os conjuntos de cenários de RP pré-perturbação e perturbações apresentados pelas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Nesta análise, devido a quantidade de cenários avaliados e com objetivo de tornar a interpretação dos resultados mais clara, métricas de desempenho das estruturas de controle avaliadas serão propostas e aplicadas.

5.4.3.1 Resultados para um Exemplo Ilustrativo

Para a análise da EHC a Figura 5.10 permanece válida, onde o período de interesse de análise se concentra entre o primeiro e o quarto estágios de simulação. No entanto, devido ao princípio de funcionamento da EHC ser independente da atuação de um sistema de proteção anti-ilhamento, do ponto de vista de controle do sistema de excitação do GSD o período de simulação que caracteriza os transitórios de formação do sistema ilhado não pode mais ser segmentado em dois estágios distintos de simulação. Por outro lado, do ponto de vista do sistema de regulação de velocidade essa divisão ainda pode ser realizada. Isso decorre do fato dessa malha de controle ainda depender da sensibilização do sistema de proteção anti-ilhamento para a modificação de seu modo de operação.

Na sequência serão apresentadas as curvas de variáveis de interesse do sistema teste com a aplicação da ETC e da EHC, considerando as mesmas condições cujos resultados apresentados na Subseção 5.4.2 foram obtidos. O objetivo desse esforço é comparar os desempenhos das estruturas de controle citadas, evidenciando o desempenho dinâmico superior da EHC.

Nos resultados obtidos com a aplicação da EHC, o tempo de detecção adotado para a mudança do modo de operação da malha de velocidade foi de $500ms$. Através de simulações verificou-se que para a faixa de tempos de detecção de ocorrência de ilhamento que este trabalho aplicou, o instante de tempo da modificação de modo operativo dessa malha de controle possui impacto pouco significativo sobre o comportamento dinâmico do GSD.

Conforme verificado nas Figuras 5.13 e 5.17, a operação instável do GSD após a abertura do disjuntor DJ – decorrente da atuação do OCPR – faz com a tensão terminal do GSD extrapole a faixa delimitada pelos valores mínimo e máximo de tensão desejados, os quais correspondem a $0,95p.u.$ e $1,05p.u.$, respectivamente. É importante destacar que esses valores constituem ajustes da EHC, através dos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} .

Com a extrapolação da tensão terminal para além dos limites desejados, a atuação do módulo de compensação da EHC é sensibilizada. Essa sensibilização, somada aos altos ganhos presentes em seus ramos de compensação, tem efeito direto sobre a referência equivalente do SE – que para a EHC também é definida pela expressão (4.3) – fazendo com que o seu valor se eleve rapidamente momentos após o ilhamento. A Figura 5.19 apresenta o comportamento da referência equivalente do SE quando aplicada a ETC – considerando diferentes tempos de detecção da formação do sistema ilhado – e a EHC.

Já a Figura 5.20 apresenta o comportamento da mesma variável para as duas estruturas de controle citadas, considerando diferentes ajustes dos ganhos do PI responsável pelo controle de potência reativa.

Quando aplicada a ETC são observadas duas descontinuidades no sinal de ' V_{refeq} ' durante o processo de ilhamento. A primeira descontinuidade é consequência do estabelecimento instantâneo de um erro na malha de controle de potência reativa quando da abertura do disjuntor DJ, o qual é transferido diretamente ao ponto de soma do SE. Por sua vez, a segunda descontinuidade é decorrente da ação de chaveamento para a mudança do OC do SE. A partir das Figuras 5.19 e 5.20, devido a ausência de chaves em seu modelo, verifica-se que a aplicação da EHC elimina a segunda descontinuidade observada no sinal de ' V_{refeq} ', sendo que esse fato já caracteriza um benefício de sua aplicação. A primeira descontinuidade ainda é presente, devido ao fato da mesma ser decorrente de um evento sistêmico, não sendo consequência da estrutura de controle aplicada.

Figura 5.19 – Comparação entre os comportamentos do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt

A Figura 5.21 apresenta o comportamento da potência reativa do GSD controlado quando aplicada a ETC – considerando diferentes tempos de detecção da formação do sistema ilhado – e a EHC. Por sua vez, a Figura 5.22 apresenta o comportamento da mesma variável para as duas estruturas de controle citadas, considerando diferentes ajustes do PI responsável pelo controle de potência reativa. Através das figuras citadas, verifica-se que a potência reativa do GSD apresenta a mesma tendência de comportamento do sinal de referência equivalente do SE.

A Figura 5.23 apresenta o comportamento da tensão terminal do GSD quando aplicada a ETC – considerando diferentes tempos de detecção da formação do sistema ilhado – e a EHC. Por sua vez, a Figura 5.24 apresenta o comportamento da mesma variável

Figura 5.20 – Comparação entre os comportamentos do sinal da referência equivalente ' V_{refeq} ' do SE com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT

Figura 5.21 – Comparação entre os comportamentos da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt

para as duas estruturas de controle citadas, considerando diferentes ajustes dos ganhos do PI responsável pelo controle de potência reativa. Nestas figuras também estão evidenciados os limites máximo e mínimo da faixa de tensão considerada como adequada neste trabalho. Através das Figuras 5.23 e 5.24, verifica-se que após a tensão excursionar para além do limite inferior ajustado, a EHC faz com que o seu valor se eleve rapidamente alcançando o valor do limite superior ajustado. Tal comportamento é uma consequência do comportamento verificado no sinal da referência equivalente do SE. Após decorrida

Figura 5.22 – Comparação entre os comportamentos da potência reativa ' Q_e ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT

a dinâmica da malha de controle da EHC, devido a característica indutiva da carga do sistema teste, a tensão terminal retorna lentamente ao valor do limite inferior ajustado, permanecendo assim até o fim do período simulado.

Figura 5.23 – Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt

Destaca-se a característica da aplicação da EHC ocasionar um menor afundamento de tensão terminal do GSD durante o ilhamento, o que configura outra vantagem de sua aplicação. Tal comportamento é evidenciado nas Figuras 5.25 e 5.26, as quais configuram uma ampliação das Figuras 5.23 e 5.24 durante o período de formação do sistema ilhado.

Figura 5.24 – Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT

Figura 5.25 – Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt – ênfase para o período de formação do sistema ilhado

Um menor afundamento da tensão terminal, somada a característica de sua rápida recomposição, faz com que a carga do sistema ilhado recém-formado apresente uma menor variação em sua demanda de potência ativa durante um menor período de tempo. Decorrente desse efeito, um menor torque acelerante durante um período menor de tempo é estabelecido no eixo mecânico do GSD. O efeito prático desse fenômeno é a atenuação das excursões da frequência do GSD. A Figura 5.27 apresenta o comportamento da frequência do GSD quando aplicada a ETC – considerando diferentes tempos de detecção

Figura 5.26 – Comparação entre os comportamentos da tensão terminal ' V_t ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500ms$ – variação de FT – ênfase para o período de formação do sistema ilhado

da formação do sistema ilhado – e a EHC. Já a Figura 5.28 apresenta o comportamento da mesma variável para as duas estruturas de controle citadas, para diferentes ajustes dos ganhos do PI responsável pelo controle de potência reativa. Através destas figuras fica evidenciada a tendência de comportamento indicada.

Figura 5.27 – Comparação entre os comportamentos da frequência ' f ' do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $FT = 1.0$ – variação de Δt

Figura 5.28 – Comparação entre os comportamentos da frequência ‘ f ’ do GSD com a aplicação da ETC e da EHC – caso de regime permanente RP4, perturbação P1 e $\Delta t = 500\text{ms}$ – variação de FT

5.4.3.2 Resultados para os Cenários Considerados na Análise

Os resultados apresentados na subseção anterior constaram de simulações de apenas um tipo de perturbação para uma mesma condição de RP pré-perturbação. O objetivo da consideração de um único cenário foi o evidenciar de modo gráfico – e por consequência, de modo mais detalhado – o desempenho superior da EHC em relação ao da ETC. A fim de estabelecer uma comparação mais ampla entre os desempenhos das estruturas avaliadas, foram realizadas simulações variando o cenário de RP pré-perturbação e o tipo de perturbação, os quais são apresentados pelas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Nesta subseção do texto serão comparados os comportamentos da tensão terminal e da frequência do GSD obtidos com a aplicação da ETC e da EHC, frente ao conjunto de cenários caracterizados pelas Tabelas 1 e 2. A escolha dessas variáveis se deve ao fato das mesmas impactarem diretamente sobre as cargas do sistema durante o processo de ilhamento. Se realizada de uma forma gráfica, conforme apresentado na Subsubseção 5.4.3.1 deste texto, a apresentação dos resultados se tornaria extensa e de difícil interpretação devido a grande quantidade de casos, tornando complexa a identificação de uma tendência de comportamento. Dessa forma, este trabalho propõe algumas métricas do comportamento dinâmico da tensão terminal e da frequência do GSD para a análise comparativa entre os desempenhos das estruturas de controle.

Devido a aplicação do modo isócrono de controle ao sistema de regulação de velocidade, e tomando como premissa que o sistema teste possui comportamento dinâmico estável para as condições simuladas, é adequado estabelecer que o sinal de frequência do GSD antes e após a formação do sistema ilhado possuirá o valor nominal do sistema. A partir

dessa premissa supõe-se que a área da curva do comportamento dinâmico da frequência em relação ao valor nominal do sistema constitui um boa métrica de desempenho da estrutura de controle aplicada. A partir da utilização dessa métrica, infere-se que um menor valor de área implica num transitório mais suave para o sinal de frequência. A Figura 5.29 apresenta um exemplo da área caracterizada pela intersecção das curvas dos sinais de frequência do GSD durante o processo de ilhamento e da frequência nominal do sistema.

Figura 5.29 – Exemplo da área caracterizada pela intersecção das curvas dos sinais de frequência do GSD durante o processo de ilhamento e da frequência nominal do sistema

Com o objetivo de estabelecer uma mesma base de comparação, para uma dada perturbação ou condição de RP pré-perturbação, todas as áreas obtidas variando Δt ou FT e a estrutura de controle, são normalizadas pela maior área pertencente a esse mesmo conjunto.¹⁹ Neste trabalho, essa métrica será denominada de Área de Frequência Normalizada (AFN) e será adimensional.

A partir dos resultados do comportamento da tensão terminal do GSD para a formação do sistema ilhado, observa-se que os valores pré e pós-perturbação não são os mesmos para as duas estruturas de controle citadas, sendo essa diferença especialmente verificada quando da aplicação da EHC. Do exposto, infere-se que a utilização do conceito de área – ao contrário do que ocorre com o sinal de frequência – não caracteriza uma boa métrica de comparação do desempenho das estruturas de controle avaliadas. Portanto, para essa grandeza será computado o menor valor obtido durante o processo de ilhamento. Julga-se que essa informação constitui uma boa métrica do desempenho da estrutura de controle analisada, haja vista que afundamentos de tensão representam um problema de QEE para as cargas conectadas na rede de distribuição (ANEEL, 2017b), especialmente quando

¹⁹Suponha que fora realizada uma bateria de simulações para um dado tipo de perturbação, variando-se o valor de Δt para ambas estruturas de controle consideradas na análise. A maior área obtida a partir do conjunto simulado irá normalizar todas as áreas pertencentes a esse mesmo conjunto.

as mesmas apresentam sensibilidade a ocorrência desse fenômeno – como por exemplo, cargas eletrônicas. Neste trabalho essa métrica será denominada de Valor Mínimo de Tensão (VMIT) e sua unidade será dada em $p.u.$ ²⁰

Na sequência, as métricas AFN e VMIT são formalizadas, respectivamente, pelas expressões (5.5) e (5.6).

$$AFN_{EC}^{X \rightarrow Y} = \frac{Af_{EC}^{X \rightarrow Y}}{\Lambda} \quad \text{em que,} \quad (5.5)$$

$$\Lambda = \max(Af_{ETC}^{X1 \rightarrow Y}, \dots, Af_{ETC}^{XN \rightarrow Y}, Af_{EHC}^{X1 \rightarrow Y}, \dots, Af_{EHC}^{XN \rightarrow Y})$$

$$VMIT_{EC}^{X \rightarrow Y} = \min(\bar{V}_{tEC}^{X \rightarrow Y}) \quad (5.6)$$

Em referência as expressões (5.5) e (5.6):

- Af é a área da curva do sinal de frequência do GSD em relação ao seu valor nominal para a qual a métrica AFN está sendo calculada, dado em $Hz.s$;
- Λ é a máxima área de frequência obtida entre os valores de Δt ou FT simulados, considerando as duas estruturas de controle avaliadas para uma mesma perturbação ou cenário de RP pré-perturbação;
- $\bar{V}_t$ é o vetor de valores de tensão terminal obtido via simulação numérica para o qual a métrica VMIT está sendo calculada, dado em $p.u.$;
- EC é a estrutura de controle para a qual as métricas AFN e VMIT estão sendo calculadas, variando entre ETC ou EHC;
- X é o Δt ou FT para qual as métricas AFN e VMIT estão sendo calculadas, variando de 1 até N;
- Y é o caso de RP pré-perturbação ou a perturbação para qual as métricas AFN e VMIT estão sendo calculadas.

Da forma em que está formalizada, a métrica $AFN_{ETC}^{\Delta t1 \rightarrow RP1}$ representa a área de frequência normalizada obtida quando aplicada a ETC, frente ao tempo de detecção número 1 e o caso de RP pré-perturbação RP1. Por sua vez, a métrica $VMIT_{ETC}^{\Delta t1 \rightarrow RP1}$ representa o valor mínimo da tensão terminal obtido durante o evento simulado, considerando as mesmas condições citadas neste parágrafo.

²⁰Devido a característica indutiva da carga do sistema teste, durante o processo de ilhamento é verificado um afundamento na tensão terminal do GSD controlado. Além disso, devido a forma que a estrutura proposta foi concebida, não foram verificadas excursões da tensão terminal do GSD controlado para valores significativamente maiores que $1,05p.u.$ – o que corresponde ao ajuste do parâmetro V_t^{MAX} . Devido a esses argumentos, não foi proposta uma métrica de desempenho que se utiliza do valor máximo de tensão terminal do GSD observado durante o processo de ilhamento.

Se for estabelecida uma comparação entre as métricas AFN e VMIT, pode ser buscada uma justificativa pela não aplicação do conceito do valor mínimo/máximo para a frequência, haja vista a simplicidade de sua aplicação e interpretação. Através da análise dos resultados obtidos via simulação, verificou-se que em alguns casos a excursão máxima e/ou mínima do valor de frequência estaria mais associada ao desbalanço de carga e geração no momento da formação do sistema ilhado, bem como do tipo de perturbação aplicada, do que da estrutura de controle avaliada. Desse modo, a utilização dessa métrica para estabelecer uma comparação dos desempenhos obtidos com a ETC e a EHC não é adequada, haja vista que os valores retornariam muito próximos para as duas estruturas de controle. Outra característica observada durante as simulações é o fato da EHC ser efetiva em imprimir um comportamento dinâmico mais amortecido para a frequência do GSD. Esse comportamento está bem caracterizado na Figura 5.27, quando comparada a atuação da ETC para $\Delta t = 100ms$ e a atuação da EHC. Este argumento também reforça o motivo da aplicação da área do sinal frequência em relação ao seu valor nominal para a caracterização do desempenho das estruturas de controle.

A Figura 5.30 apresenta o comportamento da métrica VMIT para diferentes perturbações, considerando distintos valores de tempo de detecção da ocorrência do ilhamento. Para a construção deste gráfico manteve-se o ajuste base dos parâmetros da malha de controle de potência reativa ($FT = 1,0$), e foi considerado o caso de regime permanente pré-perturbação RP4. Já a Figura 5.31 apresenta o comportamento da métrica VMIT para diferentes perturbações, considerando distintos valores de FT . Para a construção deste gráfico considerou-se o caso de regime permanente pré-perturbação RP4 e o tempo de detecção da ocorrência do ilhamento igual a $500ms$. Através dos gráficos representados pelas Figuras 5.30 e 5.31, verifica-se que perante a métrica adotada o desempenho da EHC foi superior ao da ETC. Tal afirmativa decorre do fato de que independentemente da perturbação aplicada, o afundamento de tensão verificado foi menos pronunciado quando da aplicação da primeira estrutura citada.

A Figura 5.32 apresenta o comportamento da métrica AFN para diferentes perturbações, considerando distintos valores de tempo de detecção da ocorrência do ilhamento. Para a construção deste gráfico manteve-se o ajuste base dos parâmetros da malha de controle de potência reativa ($FT = 1,0$), e foi considerado o caso de regime permanente pré-perturbação RP4. Já a Figura 5.33 apresenta o comportamento da métrica AFN para diferentes perturbações, considerando distintos valores de FT . Para a construção deste gráfico considerou-se o caso de regime permanente pré-perturbação RP4 e o tempo de detecção da ocorrência de ilhamento igual a $500ms$. Através dos gráficos representados pelas Figuras 5.32 e 5.33, verifica-se que perante a métrica adotada o desempenho da EHC foi superior ao da ETC. Tal afirmativa decorre do fato de que independentemente da perturbação aplicada, os valores de área de frequência normalizada obtidos com a primeira estrutura citada foram inferiores.

Figura 5.30 – Comportamento da métrica VMIT para diferentes perturbações e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcadores circulares) e a EHC (linha tracejada com marcadores quadrados) – $FT = 1,0$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4

A Figura 5.34 apresenta o comportamento da métrica VMIT para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação, considerando distintos valores de tempo de detecção da ocorrência do ilhamento. Para a construção deste gráfico manteve-se o ajuste base dos parâmetros da malha de controle de potência reativa ($FT = 1,0$), e foi aplicada a perturbação P1. Já a Figura 5.35 apresenta o comportamento da métrica VMIT para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação, considerando distintos valores de FT . Para a construção deste gráfico considerou-se a aplicação da perturbação P1 e o tempo de detecção da ocorrência de ilhamento igual a 500ms . Através dos gráficos representados pelas Figuras 5.34 e 5.35, verifica-se que perante a métrica adotada o desempenho da EHC foi superior ao da ETC. Tal afirmativa decorre do fato de que independentemente da perturbação aplicada, o afundamento de tensão verificado foi menos pronunciado quando da aplicação da primeira estrutura citada.

A Figura 5.36 apresenta o comportamento da métrica AFN para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação, considerando distintos valores de tempo de detecção da ocorrência do ilhamento. Para a construção deste gráfico manteve-se o ajuste base dos parâmetros da malha de controle de potência reativa ($FT = 1,0$), e foi aplicada a perturbação P1. Já a Figura 5.37 apresenta o comportamento da métrica AFN para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação, considerando distintos valores de FT . Para

Figura 5.31 – Comportamento da métrica VMIT para diferentes perturbações e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcadores circulares) e a EHC (linha tracejada com marcadores quadrados) – $\Delta t = 500ms$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4

a construção deste gráfico considerou-se a aplicação da perturbação P1 e o tempo de detecção da ocorrência de ilhamento igual a $500ms$. Através dos gráficos representados pelas Figuras 5.36 e 5.37, verifica-se que perante a métrica adotada o desempenho da EHC foi superior ao da ETC. Tal afirmativa decorre do fato de que independentemente da perturbação aplicada, os valores de área de frequência normalizada obtidos com a primeira estrutura citada foram inferiores.

5.5 Resultados para Outros Eventos que Desencadeiam na Excursão da Tensão Terminal

O objetivo desta subseção do texto é apresentar o desempenho superior da EHC frente a ocorrência de eventos que desencadeiam na excursão da tensão terminal do GSD controlado para além de limites desejados, em condição na qual o mesmo opera em paralelo com a SD regulando a injeção de potência reativa no sistema.

A literatura indica que quando aplicada a ETC, em condição inadequada de operação em termos de tensão terminal, as chaves presentes em seu modelo dinâmico devem ser manipuladas para o estabelecimento do OCT (WALLACE; KIPRAKIS, 2002). Neste trabalho,

Figura 5.32 – Comportamento da métrica AFN para diferentes perturbações e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcadores circulares) e a EHC (linha tracejada com marcadores quadrados) – $FT = 1,0$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4

toma-se como premissa que essa manipulação é sensibilizada por relés de sub/sobretensão.

A apresentação dos resultados desta subseção do texto será dividida em três partes, conforme realizado na análise de perturbações que desencadeiam a formação do sistema ilhado. Em um primeiro momento serão apresentadas as características gerais das simulações. Na sequência, serão caracterizados os problemas provenientes da aplicação da ETC perante a classe de perturbações avaliada. Por fim, serão apresentados os benefícios da aplicação da EHC, onde será estabelecida uma comparação com o desempenho obtido quando da aplicação da ETC.

5.5.1 Características Gerais das Simulações

Para a caracterização dos resultados apresentados nesta subseção do texto, o desempenho dinâmico do sistema teste foi avaliado para um único cenário de RP pré-perturbação e dois tipos de perturbação. A consideração de um único caso de RP pré-perturbação e duas perturbações busca simplificar o processo de apresentação e análise dos resultados obtidos. Cabe destacar que essas considerações não vêm em detrimento da generalidade dos resultados obtidos.

O cenário de RP pré-perturbação utilizado corresponde ao identificado por 'RP4' na Tabela 1. Por sua vez, as perturbações que caracterizam os resultados apresentados nesta

Figura 5.33 – Comportamento da métrica AFN para diferentes perturbações e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcros circulares) e a EHC (linha tracejada com marcros quadrados) – $\Delta t = 500ms$ e caso de regime permanente pré-perturbação RP4

subseção do texto são constituídas pela modificação da potência reativa demandada pela carga do sistema teste. Essa mudança é realizada de tal forma que a tensão terminal do GSD extrapole os limites desejados, que neste trabalho possuem os valores máximo e mínimo de $0,95p.u.$ e $1,05p.u.$, respectivamente.

As características das perturbações aplicadas são apresentadas na Tabela 3. Nesta tabela, os valores de tensão terminal ' V_t ' do GSD pós-perturbação, são referentes aos valores obtidos para essa variável quando o controle de potência reativa permanece ativo durante todo período simulado. Ou seja, a ETC é aplicada e suas chaves não são manipuladas quando em operação inadequada para o estabelecimento do controle de tensão por parte do SE.

Tabela 3 – Perturbações aplicadas para análise dos resultados de excursão de tensão terminal do GSD

Perturbação	Valor de Alteração de Q (M_{VAR})	Barra da Perturbação	V_t Pós-perturbação ($p.u.$)
IND	80	4	0,90
CAP	-57	4	1,10

As simulações que abordam a excursão da tensão terminal do GSD são divididas em três estágios que evoluem no tempo, conforme apresentado na Figura 5.38.²¹ Durante os

²¹ A Figura 5.38 é de cunho ilustrativo. A proporcionalidade em que os estágios estão representados não

Figura 5.34 – Comportamento da métrica VMIT para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcros circulares) e a EHC (linha tracejada com marcros quadrados) – ajuste base do controlador de potência reativa e perturbação P1

três estágios de simulação o GSD permanece conectado em paralelo com a SD, e o seu regulador de velocidade opera no modo queda.

O primeiro estágio de simulação é caracterizado pela operação do sistema teste na condição de RP estabelecida pela solução do fluxo de carga, com o GSD regulando a potência reativa injetada no sistema. Nessa condição, a referência do OCPR possui valor nulo (FP unitário). O início do segundo estágio de simulação é dado pela modificação da demanda de potência reativa por parte da carga do sistema teste, e perdura até o momento em que a tensão terminal do GSD extrapola os limites desejados. No segundo estágio de simulação o GSD ainda permanece regulando a potência reativa injetada no sistema. O início do terceiro estágio de simulação é marcado pela modificação do OC do sistema de excitação quando aplicada a ETC, ou pela sensibilização do módulo de compensação quando aplicada a EHC, ações que desencadeiam o estabelecimento de valores adequados na tensão terminal do GSD controlado.

estabelece nenhuma relação com as suas respectivas durações nas simulações realizadas para a obtenção dos resultados apresentados neste capítulo.

Figura 5.35 – Comportamento da métrica VMIT para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcros circulares) e a EHC (linha tracejada com marcros quadrados) – $\Delta t = 500\text{ms}$ e perturbação P1

Figura 5.38 – Evolução cronológica dos estágios das simulações para eventos que desencadeiam a excursão terminal do GSD quando o mesmo opera em paralelo com a SD regulando a injeção de potência reativa no sistema

Em referência a Figura 5.38:

- t_0 é o tempo inicial da simulação, em segundos;
- t_Q é o tempo no qual a demanda de potência reativa da carga do sistema teste é alterada, em segundos;
- t_{EX} é o tempo no qual a tensão terminal do GSD excede os limites desejados, em segundos. Nesse instante de tempo, dependendo da estrutura de controle aplicada,

Figura 5.36 – Comportamento da métrica AFN para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de Δt – comparação entre a ETC (linha contínua com marcadores circulares) e a EHC (linha tracejada com marcadores quadrados) – ajuste base do controlador de potência reativa e perturbação P1

as chaves da ETC são manipuladas ou o módulo de compensação da EHC é sensibilizado;

– t_f é o tempo final da simulação, em segundos.

Quando da aplicação da ETC, toma-se como premissa que o elemento responsável pela alteração dos estados das chaves presentes em seu modelo – o que implica no estabelecimento do OCT – são relés de sub/sobretensão. Em tese, para essa aplicação, esses relés devem apresentar um atraso proposital de tempo de atuação, objetivando evitar que eventos espúrios que desencadeiem em elevações ou afundamentos momentâneos da tensão terminal do GSD desabilitem a malha de controle de potência reativa de modo indesejado. No entanto, por fins de simplicidade, neste trabalho as chaves presentes na ETC serão manipuladas de forma instantânea. Ou seja, o OCT será estabelecido imediatamente após a constatação da operação inadequada do GSD em termos de tensão terminal. Através de simulações, verificou-se que a consideração desse atraso de tempo possui um impacto pouco significativo sobre o comportamento dinâmico do sistema teste frente a classe de perturbações analisada.

Figura 5.37 – Comportamento da métrica AFN para diferentes casos de regime permanente pré-perturbação e valores de FT – comparação entre a ETC (linha contínua com marcadores circulares) e a EHC (linha tracejada com marcadores quadrados) – $\Delta t = 500\text{ms}$ e perturbação P1

5.5.2 Desempenho da Estrutura Típica de Controle para a Classe de Perturbações Avaliada

A Figura 5.39 apresenta o comportamento dinâmico da potência reativa do GSD frente a ocorrência das perturbações descritas na Tabela 3, quando aplicada a ETC com a manipulação das chaves presentes em seu modelo desabilitada, caso que será identificado por “CQ”. Verifica-se que para esse arranjo, momentos após a aplicação das perturbações, o GSD fornece ou consome potência reativa para atender a nova condição operativa do sistema. Entretanto, devido a ação do controlador PI, o valor dessa grandeza começa a decrescer com o tempo até se tornar nulo, atendendo em condições de RP a referência ajustada no sistema de controle. Decorrente da nova condição operativa do sistema e do arranjo de controle aplicado ao SE, a tensão terminal do GSD altera seu valor excedendo a faixa desejada, conforme apresentado na Figura 5.40.

Quando aplicada a ETC com a manipulação de suas chaves habilitadas, na condição supracitada o OCT é aplicado ao sistema de excitação do GSD quando verificada a extrapolção da tensão terminal em relação aos limites desejados. A Figura 5.41 estabelece uma comparação entre os comportamentos dinâmicos da tensão terminal do GSD quando aplicado apenas o controle de potência reativa (CQ) e quando aplicada a ETC com a manipulação de chaves habilitada.

Figura 5.39 – Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD com o controle dessa variável (CQ) aplicado em seu SE frente ao aumento de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

Figura 5.40 – Comportamento da tensão terminal ' V_t ' do GSD com controle de potência reativa (CQ) aplicado em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

Através da Figura 5.41 é possível inferir que face aos problemas de excursão da tensão terminal, a solução dada através da manipulação das chaves da ETC é adequada. Entretanto, para manter o nível de tensão imposto pela referência ajustada no OCT, o GSD deve regular o seu sistema de excitação de tal forma a, dependendo das características do sistema e da perturbação aplicada, consumir ou gerar elevados valores de potência reativa. A Figura 5.42 apresenta o comportamento dinâmico da potência reativa do GSD frente as perturbações consideradas na análise, quando aplicado o controle de potência reativa (CQ) e a ETC com a manipulação de suas chaves habilitada ao seu sistema de excitação.

Figura 5.41 – Comportamento da tensão terminal ‘ V_t ’ do GSD com o controle de potência reativa (CQ) e a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – aplicados em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

Tanto o consumo quanto o fornecimento de altos valores de potência reativa por parte do GSD implicam em um baixo fator de potência de operação, conforme evidenciado pela Figura 5.43. Problemas são recorrentes a essa condição operativa. Um desses problemas deriva do fato do GSD não mais operar com sua capacidade nominal na geração de potência ativa, implicando na diminuição de lucros por parte do autoprodutor. Além disso, a unidade consumidora em que o GSD se conecta fica exposta ao risco de pagamento de multas, o qual é decorrente do não atendimento dos níveis de operação estabelecidos com a SD em acordo operativo.

Além dos problemas de origem econômica, o estabelecimento de uma alta circulação de potência reativa através dos terminais do GSD pode desencadear em problemas de origem técnica ao mesmo (RIBEIRO, 1991). Tais problemas estão estritamente relacionados ao não atendimento dos limites impostos pelo seu diagrama de capacidade (KUNDUR, 1994). Conforme o GSD diminui a sua excitação para o consumo de potência reativa da rede, o seu torque sincronizante também tende a diminuir (BERUBE; HAJAGOS; BEAULIEU, 1995). Dessa forma, existe um valor crítico de corrente de excitação que faz com que o torque sincronizante atinja um valor limite, condição em que o GSD perde o sincronismo com a rede no qual está conectado. Além disso, nessa mesma condição operativa, existe um aumento do fluxo de dispersão nos extremos do núcleo magnético do estator. Esse excesso de fluxo faz com que sejam induzidas correntes parasitas que aumentam significativamente a temperatura nessa região, podendo causar sérios danos ao gerador²² (FARNHAM; SWARTHOUT, 1953). Por outro lado, conforme o GSD aumenta

²²É importante destacar que esse problema é recorrente em máquinas de desenho antigo. Novos projetos contemplam providências para evitá-lo.

a sua excitação para o fornecimento de potência reativa ao sistema, danos podem ser ocasionados no rotor do gerador pelo estabelecimento de altas correntes de campo para o atendimento dessa condição (KUNDUR, 1994).

É válido destacar que, em tese, o sistema de excitação do GSD possui funções de limitação que possuem o objetivo de evitar que as condições descritas no parágrafo anterior ocorram. Entretanto, até mesmo a atuação correta desses elementos caracteriza uma condição operativa indesejada, haja vista que o SE deixa de atender ao seu OC.

Figura 5.42 – Comportamento da potência reativa ' Q_e ' do GSD com o controle de potência reativa (CQ) e a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – aplicados em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

5.5.3 Desempenho da Estrutura Proposta e sua Comparação com a Estrutura Típica para a Classe de Perturbações Avaliada

Com a excursão da tensão terminal do GSD para além dos limites desejados, o módulo de compensação da EHC é sensibilizado. A ação desse módulo faz com que a tensão terminal do GSD atinja os extremos dos limites da faixa de operação desejada, os quais são dados pelos ajustes dos parâmetros V_t^{MIN} e V_t^{MAX} . Esse comportamento é apresentado na Figura 5.44, onde além dos limites ajustados, também está apresentado o comportamento obtido com a aplicação da ETC com a manipulação de suas chaves habilitadas.

A Figura 5.45 apresenta o comportamento da potência reativa do GSD frente as perturbações simuladas, quando aplicadas a ETC – com a manipulação de chaves habilitada – e a EHC ao seu sistema de excitação. Verifica-se que em condições de RP pós-perturbação, a circulação de potência reativa através dos terminais do GSD com a aplicação da EHC é menor que a obtida com a aplicação da ETC. Tal comportamento tem impacto direto

Figura 5.43 – Comportamento do fator de potência ‘ FP ’ do GSD com o controle de potência reativa (CQ) e a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – aplicados em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

Figura 5.44 – Comportamento da tensão terminal do GSD ‘ V_t ’ com a ETC – com a manipulação de chaves habilitada – e a EHC aplicadas em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

sobre o seu FP de operação, conforme apresentado pela Figura 5.46, o qual adquire valores de pós-operação mais elevados do que os obtidos com a aplicação da ETC.

Através dos resultados apresentados verifica-se que, além de contribuir para a segurança operativa do GSD, por assegurar que sua tensão terminal permanecerá em valores adequados em condições de RP quando operando em paralelo com SD e regulando a potência reativa injetada no sistema, a aplicação da EHC adiciona uma maior flexibilidade operativa ao mesmo. Da forma em que a EHC foi concebida, a referência da malha de

Figura 5.45 – Comportamento da potência reativa ‘ Q_e ’ do GSD com a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – e a EHC aplicadas em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

Figura 5.46 – Comportamento do fator de potência de operação ‘ FP ’ do GSD com a ETC – com a manipulação de suas chaves habilitada – e a EHC aplicadas em seu SE frente a alteração de demanda de potência reativa pela carga do SDEE

controle de potência reativa é atendida desde que o valor de tensão terminal do GSD atenda a faixa de valores desejados. Em situação contrária, a tensão terminal é mantida em algum dos extremos da faixa desejada – sendo isso definido pela natureza da perturbação aplicada – e o valor de potência reativa deixa de ser regulado. Essa característica estabelece um compromisso entre a tensão terminal e a potência reativa de operação do GSD controlado, fazendo com que em condições de RP o valor da última grandeza citada fique o mais próximo possível da referência do sistema controle atendendo a faixa de valores de tensão desejada.

5.6 Considerações Finais

Neste capítulo do trabalho foram apresentados os resultados da pesquisa, os quais foram obtidos a partir da solução numérica de equações de um sistema teste com características representativas, através da utilização de aplicativo adequado para a análise de transitórios de origem eletromecânica em SEPs.

Duas classes de perturbações foram objeto deste estudo: as que desencadeiam a formação do sistema ilhado; e as que desencadeiam na excursão da tensão terminal do GSD controlado para além de limites desejados, em situação na qual o mesmo opera em paralelo com a SD regulando a potência reativa injetada no sistema.

De forma geral, os resultados apresentados por este capítulo apontaram os principais problemas recorrentes a estrutura de controle tipicamente aplicada em GSDs que operam em SDEEs que permitem a ocorrência de ilhamento. Além disso, deixaram evidente o desempenho superior da estrutura proposta – em relação ao obtido com a estrutura típica reportada na literatura – frente aos cenários e perturbações avaliadas.

Na próxima seção do texto são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, além das perspectivas futuras de desenvolvimento decorrentes da estrutura de controle proposta.

Conclusões e Perspectivas Futuras de Desenvolvimento

6.1 Conclusões da Pesquisa

O advento da GD trouxe novas possibilidades operativas aos SDEEs. Dentre essas, no contexto deste trabalho, é dado destaque a possibilidade desses sistemas operarem de forma autônoma do sistema de grande porte – o qual é tipicamente caracterizado pela SD. Nessa condição, suas cargas são supridas unicamente através dos geradores distribuídos alocados em suas infraestruturas, dando origem ao conceito de operação de sistemas ilhados.

Apesar de claros os benefícios da aplicação do conceito de operação de sistemas ilhados, especialmente no que diz respeito ao aumento dos níveis de confiabilidade das redes que adotam essa prática, ainda existe um conjunto de desafios do ponto de vista técnico que necessita ser superado para a sua plena aplicação. Dentre esses desafios encontra-se aquele associado a transição do modo operativo da rede – de conectado para ilhado ou o contrário – a qual indubitavelmente implica em mudanças nos sistemas de controle dos geradores distribuídos presentes no sistema.

Usualmente as mudanças nos sistemas de controle dos geradores distribuídos são realizadas de forma inadequada, característica que contribui positivamente para a severidade dos transitórios observados na rede quando da mudança de sua característica operativa. Esse fenômeno é especialmente pronunciado quando da transição da rede do modo conectado para ilhado, a qual comumente é decorrente de eventos sistêmicos não planejados. Nessa condição, além da potencialidade de causar impactos negativos sobre os consumidores conectados a rede, grandes excursões nas variáveis do gerador controlado podem ocasionar o seu desligamento pela atuação de sistemas de proteção, inviabilizando o próprio processo de formação do sistema ilhado.

Outro problema não recorrente unicamente em redes que permitem a operação de sistemas ilhados, mas de um modo geral em redes que possuem geração distribuída, está

na filosofia de controle adotada aos geradores distribuídos quando os mesmos operam em paralelo com a SD. Por motivos técnicos e, especialmente econômicos, nessa condição operativa os geradores distribuídos são configurados de forma a operar com valores pré-definidos de potência ativa e reativa injetados na rede. Nessa condição, a tensão terminal do gerador controlado pode experimentar excursões que podem levá-la a atingir valores indesejados.

Com o objetivo de contribuir com os problemas contextualizados nos parágrafos anteriores, esta pesquisa propôs uma estrutura híbrida de controle a ser aplicada em SEs – a qual foi identificada por Estrutura Híbrida de Controle (EHC) – de geradores síncronos que operam em SDEEs que permitem a ocorrência de ilhamento. Em termos gerais, a EHC constitui uma extensão do método de compensação AWBT pelo método Seguimento da Variável de Controle, o qual é aplicado na solução dos problemas de *windup* e *bumped transfer*, os quais são de comum recorrência em sistemas automáticos de controle.

Da forma em que foi concebida, a EHC possui como principais características:

1. concepção a partir de elementos básicos da teoria de sistemas de controle;
2. independência operativa de sistemas de proteção externos a malha de controle do SE, retirando a possibilidade de adequação retardatária desse sistema de controle frente a nova condição operativa do GSD;
3. manutenção das características originais do controle do SE do GSD controlado quando o mesmo se encontra em condições normais de operação, haja vista que o seu módulo de compensação não tem influência alguma sobre a dinâmica do sistema nessas circunstâncias.

Através de simulações numéricas em um sistema teste com características representativas, verificou-se que a EHC apresentou um desempenho superior a estrutura tipicamente reportada na literatura – a qual foi identificada no texto por ETC – frente a ocorrência de um conjunto de perturbações que desencadeiam na ocorrência de ilhamento, ou na excursão da tensão terminal do GSD, em situação em que o mesmo opera em paralelo com a SD controlando o fluxo de potência reativa através de seus terminais. O grande diferencial da EHC está em propiciar uma transição entre o controle de potência reativa e tensão terminal de modo automático, sem a ação de chaveamento desencadeada pela sensibilização de um elemento de proteção externo, através do estabelecimento de um compromisso entre a potência reativa injetada na rede e a tensão terminal do gerador controlado.

Do ponto de vista de perturbações que desencadeiam na ocorrência de ilhamento, a sensibilização do módulo de compensação da EHC de forma independente de um sistema de proteção anti-ilhamento, somado a característica de ajuste dos ganhos de seus ramos de compensação que conferem uma resposta rápida a sua atuação, fazem com que a

tensão terminal do GSD controlado apresente um menor afundamento e se recomponha rapidamente, alcançando um valor de RP aderente a uma faixa desejada, a qual é dada pelo ajuste dos parâmetros pertencentes a EHC. O comportamento citado tem efeito direto sobre a atenuação dos transitórios observados no comportamento da frequência do GSD controlado, efeito que é decorrente do menor desequilíbrio – tanto em termos de módulo quanto em termos de sua duração em relação ao tempo – entre as potências gerada e consumida no sistema ilhado durante o seu processo de formação. O efeito prático das características citadas é a obtenção de uma menor excursão nas variáveis do GSD controlado, e por consequência, nas variáveis da rede em que o mesmo se conecta, o que do ponto de vista deste trabalho implica numa atenuação da severidade dos transitórios do sistema observados durante o processo de ilhamento. Tal comportamento propicia um aumento da probabilidade de formação bem-sucedida do sistema ilhado, bem como uma menor exposição dos seus consumidores aos efeitos negativos decorrentes de excursões significativas nos valores de módulo e frequência da tensão fornecida aos mesmos.

Do ponto de vista das perturbações que desencadeiam na excursão da tensão terminal do GSD controlado, em condição na qual o mesmo opera em paralelo com SD regulando a potência reativa injetada na rede, decorrente do princípio operativo da EHC, é permitido ao gerador operar com a potência reativa o mais próxima da referência ajustada nas condições operativas em que a rede se encontra, atendendo às limitações de tensão impostas. Do ponto de vista apresentado, é conveniente afirmar que a estrutura proposta garante uma operação segura ao gerador controlado – por manter em condições de RP a sua tensão terminal em faixa tomada como adequada – maximizando a sua capacidade nominal na produção de potência ativa, diminuindo a probabilidade de ocorrência de problemas de cunho técnico e econômico correlatos a operação do gerador na condição de alta circulação de potência reativa através dos seus terminais.

É importante destacar que a estrutura de controle proposta por este trabalho foi concebida para atuar em momentos críticos da operação do sistema, cuja função é estabelecer um novo ponto de operação ao GSD controlado frente a ocorrência de perturbações de classes análogas às analisadas por este trabalho. Uma eventual recomposição de um ponto operativo desejado após a atuação da estrutura de controle proposta – pode-se citar, como exemplo, o manutenção da tensão terminal do GSD controlado em $1.0p.u.$ após a ocorrência do ilhamento – não constitui o escopo deste trabalho, sendo que estratégias para essa recomposição compõe uma proposta de desenvolvimento de trabalho futuro.

6.2 Perspectivas Futuras de Desenvolvimento

A partir da EHC proposta por esta pesquisa, vislumbram-se as seguintes propostas de desenvolvimento de trabalhos futuros:

- ❑ Verificar o desempenho da EHC em sistemas de GD considerando a presença de ruídos no valor da carga do sistema, com e sem condições trifásicas desbalanceadas. O objetivo dessa análise é verificar o desempenho da estrutura proposta frente a condições operativas mais próximas do contexto operativo de SDEEs, como por exemplo, a constante variação do valor de carga, presença de redes assimétricas e o desbalanço de potência entre as fases;
- ❑ Estender os conceitos utilizados na elaboração da EHC em sistemas de GD que possuem interface de eletrônica de potência com a rede, atendendo aos mesmos objetivos que esta pesquisa se propôs a resolver;
- ❑ Verificar o desempenho da EHC proposta em SDEEs que possuem mais de um gerador distribuído em um mesmo ramal;
- ❑ Verificar a interação da EHC com elementos de controle de tensão comumente aplicados em SDEEs, como por exemplo, transformadores de *tap* variável e bancos automáticos de capacitores;
desempenho da EHC proposta em SDEEs que possuem mais de um gerador distribuído em um mesmo ramal;
- ❑ Realizar um estudo analítico da estabilidade da estrutura de controle proposta, por meio do uso de ferramentas provenientes da teoria de sistemas de controle. O principal objetivo desse esforço é a obtenção de uma prova formal da estabilidade do arranjo proposto. Além disso, decorrente da realização dessa formulação, espera-se a obtenção de relações formais entre os principais parâmetros de controle da EHC e o comportamento dinâmico do sistema em que o GSD controlado se conecta, de forma que roteiros de ajuste dos parâmetros da estrutura proposta também sejam estabelecidos;
- ❑ No desenvolvimento deste trabalho os tempos de detecção de ilhamento foram atribuídos de forma determinística, haja vista que o principal objetivo das análises realizadas era o de verificar o impacto de diferentes tempos de detecção sobre a atuação da ETC, sendo que a representação de sistemas de proteção anti-ilhamento fugiam do escopo deste trabalho. Em desenvolvimentos futuros, propõe-se a representação nos cenários teste desses sistemas de proteção com características locais passivas fundamentadas em medições de frequência – métodos VSR e ROCOF – de forma a gerar uma base comparativa mais adequada entre o desempenho da estrutura citada com a estrutura tipicamente aplicada;

- ❑ Propor estratégias de restabelecimento do GSD em um ponto operativo desejado após a atuação da EHC, objetivando atender casos em que essa manobra operativa é necessária;
- ❑ Testar o arranjo proposto, o qual é baseado na técnica SVC, em outros sistemas de controle que possuam como requisitos de projeto: i) a atenuação dos transitórios de suas variáveis quando da alteração de modo operativo da planta controlada; e ii) o manutenção de variáveis controladas em uma faixa desejada em condições de RP.

Referências

- ABREU, L. V. L. de. **Análise do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos Conectados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed Generation: A Definition. **Electric Power Systems Research**, 2001. Lausanne, CH, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power System Control and Stability**. 2. ed. Piscataway, US: Wiley-IEEE Press, 2002.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição – Revisão 1**. Brasília, DF, 2010.
- _____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 1 – Introdução – Revisão 9**. Brasília, DF, 2016.
- _____. **BIG – Banco de Informações de Geração**. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.
- _____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica – Revisão 8**. Brasília, DF, 2017.
- _____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição – Revisão 7**. Brasília, DF, 2017.
- ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. 2. ed. Durham, NC: ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1995.
- ASTROM, K. J.; RUNDQWIST, L. Integrator Windup and How to Avoid It. In: **1989 American Control Conference**. Piscataway, US: IEEE, 1989. p. 1693–1698.
- ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. **Computer-Controlled Systems: Theory and Design**. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1996.

- BERUBE, G.; HAJAGOS, L.; BEAULIEU, R. A Utility Perspective on Under-excitation Limiters. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 1995. Piscataway, US, v. 10, n. 3, p. 532–537, 1995.
- BEST, R. et al. Synchronous Islanded Operation of a Diesel Generator. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2007. Piscataway, US, v. 22, n. 4, p. 2170–2176, 2007.
- BOHN, C.; ATHERTON, D. P. An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies. **IEEE Control Systems**, 1995. Piscataway, US, v. 15, n. 2, p. 34–40, 1995.
- BORBELY, A. M.; KRIEDER, J. F. **Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium**. 1. ed. Boca Ratón, US: CRC Press, 2001.
- BRIGHT, C. COROCOF: Comparison of Rate of Change of Frequency Protection. A Solution to the Detection of Loss of Mains. In: **Seventh International Conference on Developments in Power System Protection**. [S.l.]: IEE, 2001. p. 70–73.
- CALDON, R.; ROSSETTO, F.; TURRI, R. Temporary Islanded Operation of Dispersed Generation on Distribution Networks. In: **39th International Universities Power Engineering Conference, 2004**. Piscataway, US: IEEE, 2004. v. 2, p. 987–991.
- CEPEL. **Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos: Manual do Usuário – V11.01.00**. [S.l.], 2016.
- CHEN, C. L. et al. Design of Parallel Inverters for Smooth Mode Transfer Microgrid Applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2010. Piscataway, US, v. 25, n. 1, p. 6–15, 2010.
- CHOWDHURY, S. et al. Islanding Protection of Distribution Systems with Distributed Generators – A Comprehensive Survey Report. In: **2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. Piscataway, US: IEEE, 2008. p. 1–8.
- CONCORDIA, C. Steady-State Stability of Synchronous Machines as Affected by Voltage-Regulator Characteristics. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, 1944. Piscataway, US, v. 63, n. 5, p. 215–220, 1944.
- COSTA, P. M.; MATOS, M. A. Assessing the Contribution of Microgrids to the Reliability of Distribution Networks. **Electric Power Systems Research**, 2009. Lausanne, CH, v. 79, n. 2, p. 382–389, 2009.
- DAS, D.; GURRALA, G.; SHENOY, U. J. Linear Quadratic Regulator Based Bumpless Transfer in Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2017. Piscataway, US, PP, n. 99, p. 1–10, 2017.
- DONDI, P. et al. Network Integration of Distributed Power Generation. **Journal of Power Sources**, 2002. Amsterdam, NL, v. 106, n. 1-2, p. 1–9, 2002.
- DRIESEN, J.; BELMANS, R. Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions. In: **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 2006. p. 1–8.

- DU, P.; NELSON, J.; YE, Z. Comparison of Digital Simulation and Field Test Results of Islanding Detection System for Synchronous Generators. In: **IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution**. [S.l.]: IEE, 2005. v. 152, n. 5, p. 597–606.
- DUGAN, R. Distributed Resources and Reliability of Distribution Systems. In: **2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 2002. v. 1, p. 106–108.
- EBERLY, T.; SCHAEFER, R. Voltage Versus VAR/Power-Factor Regulation on Synchronous Generators. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2002. v. 38, n. 6, p. 1682–1687, 2002.
- EL-KHATTAM, W.; SALAMA, M. Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits. **Electric Power Systems Research**, 2004. Lausanne, CH, v. 71, n. 2, p. 119–128, 2004.
- FARNHAM, S.; SWARTHOUT, R. Field Excitation in Relation to Machine and System Operation. **Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, 1953. New York, US, v. 72, n. 2, 1953.
- FERREIRA, P. M. B.; MENDONÇA, L. P.; PONTES, C. E. V. Operação Ilhada Voluntária de Pequena Central Hidrelétrica Alimentando Três Subestações Rurais. In: **XXI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI 2014**. [S.l.: s.n.], 2014.
- FREITAS, W. et al. Comparative Analysis Between Synchronous and Induction Machines for Distributed Generation Applications. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006. Piscataway, US, v. 21, n. 1, p. 301–311, 2006.
- _____. Characteristics of Vector Surge Relays for Distributed Synchronous Generator Protection. **Electric Power Systems Research**, 2007. Lausanne, CH, v. 77, n. 2, p. 170–180, 2007.
- FUNABASHI, T.; KOYANAGI, K.; YOKOYAMA, R. A Review of Islanding Detection Methods for Distributed Resources. In: **2003 IEEE Bologna PowerTech Conference**. Piscataway, US: IEEE, 2003. v. 2, p. 1–6.
- GAO, F.; IRAVANI, M. R. A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid-Connected and Autonomous Modes of Operation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2008. Piscataway, US, v. 23, n. 2, p. 850–859, 2008.
- GEHRKE, C. S.; SOUZA, P.; LIMA, A. M. N. Photovoltaic System with Bumpless Transfer Between Grid-Connected and Stand-Alone Modes. In: **2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)**. Piscataway, US: IEEE, 2015. p. 1–6.
- GRAEBE, S. F.; AHLEN, A. L. B. Dynamic Transfer Among Alternative Controllers and Its Relation to Antiwindup Controller Design. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 1996. Piscataway, US, v. 4, n. 1, p. 92–99, 1996.
- GRANVILLE, S. et al. Recent Advances of Sugarcane Biomass Cogeneration in Brazil. In: **2009 Power Energy Society General Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 2009. p. 1–5.

HURLEY, J.; BIZE, L.; MUMMERT, C. The Adverse Effects of Excitation System VAR and Power Factor Controllers. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2002. Piscataway, US, v. 14, n. 4, p. 1636–1645, 2002.

IEEE. Excitation System Models for Power System Stability Studies. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1981. Piscataway, US, PAS-100, n. 2, p. 494–509, 1981.

_____. IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance: Load Representation for Dynamic Performance Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1993. Piscataway, US, v. 8, n. 2, p. 472–482, 1993.

_____. **IEEE Std 1110-2002**: IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. Piscataway, US, 2003.

_____. **IEEE Std 1547-2003**: IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. Piscataway, US, 2003.

_____. **IEEE Standard 421.1-2007**: IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines. Piscataway, US, 2007.

_____. **IEEE Std 1547.4-2011**: IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. Piscataway, US, 2011.

_____. **IEEE Standard 421.5-2016**: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. Piscataway, US, 2016.

ISHIBASHI, A. et al. New Type of Islanding Detection System for Distributed Generation Based on Voltage Angle Difference Between Utility Network and Distributed Generation Site. In: **Eighth International Conference on Developments in Power System Protection**. [S.l.]: IEE, 2004. v. 2, p. 542–545.

JENKINS, N. et al. **Embedded Generation**. 1. ed. Londres, GB: The Institution of Engineering and Technology, 2000.

KATIRAEI, F.; IRAVANI, M.; LEHN, P. Micro-grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2005. Piscataway, US, v. 20, n. 1, p. 248–257, 2005.

KATIRAEI, F. et al. Microgrids Management. **IEEE Power and Energy Magazine**, 2008. Piscataway, US, v. 6, n. 3, p. 54–65, 2008.

_____. Planned Islanding on Rural Feeders – Utility Perspective. In: **2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. Piscataway, US: IEEE, 2008. p. 1–6.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. 1. ed. Boca Ratón, US: CRC Press, 2002.

KIM, J.; HWANG, J. Islanding Detection Method of Distributed Generation Units Connected to Power Distribution System. In: **International Conference on Power System Technology**. Piscataway, US: IEEE, 2000. v. 2, p. 643–647.

- KOTHARE, M. V. et al. A Unified Framework for the Study of Anti-Windup Designs. **Automatica**, 1994. v. 30, n. 12, p. 1869–1883, 1994.
- KUIAVA, R. et al. An Analysis of the Potential Impacts of Electromechanical Oscillations on the Stability and Power Quality of Distributed Generation Systems. In: **2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. Piscataway, US: IEEE, 2008. p. 1–7.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. 1. ed. New York, US: McGraw-Hill, 1994.
- LIMA, R. L. **Análise de Requisitos Técnicos para Ilhamento Intencional de Geradores Síncronos Distribuídos**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- MACHOWSKI, J.; BIALEK, J.; BUMBY, J. **Power System Dynamics: Stability and Control**. 2. ed. Chichester, GB: Wiley, 2008.
- MAHAT, P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B. Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation. In: **DRPT 2008 – Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**. Piscataway, US: IEEE, 2008. p. 2743–2748.
- MATHWORKS. **Simulink® User's Guide**. [S.l.], 2017.
- MENON, V.; NEHRIR, M. A Hybrid Islanding Detection Technique Using Voltage Unbalance and Frequency Set Point. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2007. Piscataway, US, v. 22, n. 1, p. 442–448, 2007.
- MOHAMAD, H.; BAKAR, A.; MOKHLIS, H. Islanding Control Strategy for a Distribution Network. In: **2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)**. Piscataway, US: IEEE, 2013. p. 472–477.
- MOHAMAD, H. et al. A Review on Islanding Operation and Control for Distribution Network Connected with Small Hydro Power Plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011. Oxford, GB, v. 15, n. 8, p. 3952–3962, 2011.
- MOHAMED, Y. A. R. I.; RADWAN, A. A. Hierarchical Control System for Robust Microgrid Operation and Seamless Mode Transfer in Active Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2011. Piscataway, US, v. 2, n. 2, p. 352–362, 2011.
- MOTOHASHI, J. et al. Comparison of Digital Simulation and Field Test Results of Islanding Detection System for Synchronous Generators. In: **1999 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 1999. v. 2, p. 931–936.
- MOTTER, D. **Modelagem Computacional de Funções de Proteção Baseadas em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- MOZINA, C. Interconnection Protection of IPP Generators at Commercial/Industrial Facilities. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2001. Piscataway, US, v. 37, n. 3, p. 681–688, 2001.

O'KANE, P.; FOX, B. Loss of Mains Detection for Embedded Generation by System Impedance Monitoring. In: **Sixth International Conference on Developments in Power System Protection**. [S.l.]: IEE, 1997. p. 95–98.

OLIVARES, D. et al. Trends in Microgrid Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2014. Piscataway, US, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014.

PAI, F.; HUANG, S. A Detection Algorithm for Islanding-Prevention of Dispersed Consumer-Owned Storage and Generating Units. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2001. Piscataway, US, v. 16, n. 4, p. 346–351, 2001.

PENG, Y.; VRANCIC, D.; HANUS, R. Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers. **IEEE Control Systems**, 1996. Piscataway, US, v. 16, n. 4, p. 48–57, 1996.

PILO, F.; CELLI, G.; MOCCI, S. Improvement of Reliability in Active Networks with Intentional Islanding. In: **2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies**. Piscataway, US: IEEE, 2004. v. 2, p. 474–479.

POURBEIK, P. et al. **Task Force on Turbine-Governor Modeling: Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies**. [S.l.], 2013. 117 p.

POWELL, L. An Industrial View of Utility Cogeneration Protection Requirements. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1988. Piscataway, US, v. 24, n. 1, p. 75–81, 1988.

PSR. Tarifaço de Energia: Ainda Não Chegamos ao Fundo do Poço. **Energy Report**, 2015. v. 99, 2015.

REDFERN, M.; USTA, O.; FIELDING, G. Protection Against Loss of Utility Grid Supply for a Dispersed Storage and Generation Unit. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1993. Piscataway, US, v. 8, n. 3, p. 948–954, 1993.

RIBEIRO, J. Minimum Excitation Limiter Effects on Generator Response to System Disturbances. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 1991. Piscataway, US, v. 6, n. 1, p. 29–38, 1991.

ROPP, M. et al. Using Power Line Carrier Communications to Prevent Islanding [of PV Power Systems]. In: **Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. Piscataway, US: IEEE, 2000. p. 1675–1678.

RUNDQWIST, L. **Anti-Reset Windup for PID Controllers**. Tese (Doutorado) — Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, 1991.

SAADAT, H. **Power System Analysis**. 1. ed. New York, US: McGraw-Hill, 1999.

SALIM, R. H. **Uma Nova Abordagem Para a Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

- SALMAN, S. Detection of Embedded Generator Islanding Condition Using Elliptical Trajectory Technique. In: **Sixth International Conference on Developments in Power System Protection**. [S.l.]: IEE, 1997. p. 103–106.
- SALMAN, S.; KING, D. Monitoring Changes in System Variables Due to Islanding Condition and Those Due to Disturbances at the Utilities' Network. In: **1999 IEEE Transmission and Distribution Conference**. Piscataway, US: IEEE, 1999. v. 2, p. 460–465.
- SALMAN, S.; KING, D.; WELLER, G. New Loss of Mains Detection Algorithm for Embedded Generation Using Rate of Change of Voltage and Changes in Power Factors. In: **Seventh International Conference on Developments in Power System Protection**. [S.l.]: IEE, 2001. p. 82–85.
- SANTOS, J. et al. A Comparative Analysis Between Two Approaches for the Simulation of Power System Electromechanical Transients. In: **2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)**. Piscataway, US: IEEE, 2012. p. 1–6.
- SAUER, P. W.; PAI, A. **Power System Dynamics and Stability**. New Jersey, NJ: Prentice Hall, 1998.
- SHINJI, T.; YOKOYAMA, A.; HAYASHI, Y. Distributed Generation in Japan. In: **2009 Power Energy Society General Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 2009. p. 1–5.
- SIEMENS PTI. **PSS/E 32.0**: User's Manual. [S.l.], 2009.
- SUMNER, M. et al. A Technique for Power Supply Harmonic Impedance Estimation Using a Controlled Voltage Disturbance. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2002. Piscataway, US, v. 17, n. 2, p. 207–215, 2002.
- TEEL, A. R.; KAPOOR, N. The L2 (12) Anti-Windup Problem: Its Definition and Solution. In: **1997 European Control Conference (ECC)**. Piscataway, US: IEEE, 1997. p. 1897–1902.
- TIRUMALA, R.; MOHAN, N.; HENZE, C. Seamless Transfer of Grid-Connected PWM Inverters Between Utility-Interactive and Stand-Alone Modes. In: **Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. Piscataway, US: IEEE, 2002. p. 1–6.
- TRINDADE, F. et al. Control Systems Analysis of Industrial Plants with Synchronous Generators During Islanded Operation. In: **2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 2010. p. 1–8.
- VELASCO, D. et al. Review of Anti-Islanding Techniques in Distributed Generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010. Oxford, GB, v. 14, n. 6, p. 1608–1614, 2010.
- VIEIRA JR, J. C. de M. **Metodologias para Ajuste e Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

- VRANCIC, D. **Design of Anti-Windup and Bumpless Transfer Protection**. Tese (Doutorado) — Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana, 1997.
- WALLACE, A.; KIPRAKIS, A. Reduction of Voltage Violations from Embedded Generators Connected to the Distribution Network by Intelligent Reactive Power Control. In: **Fifth International Conference on Power System Management and Control**. Piscataway, US: IEEE, 2002. p. 210–215.
- WALLING, R.; MILLER, N. Distributed Generation Islanding – Implications on Power System Dynamic Performance. In: **2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 2002. v. 1, p. 92–96.
- WANG, M.; ZHONG, J. Development of Distributed Generation in China. In: **2009 Power Energy Society General Meeting**. Piscataway, US: IEEE, 2009. p. 1–7.
- XU, W.; MAUCH, K.; MARTEL, S. **An Assessment of DG Islanding Detection Methods and Issues for Canada**. [S.l.], 2004. 53 p.
- YAO, Z.; XIAO, L.; YAN, Y. Seamless Transfer of Single-Phase Grid-Interactive Inverters Between Grid-Connected and Stand-Alone Modes. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2010. Piscataway, US, v. 25, n. 6, p. 1597–1603, 2010.
- YIN, J.; CHANG, L.; DIDUCH, C. Recent Developments in Islanding Detection for Distributed Power Generation. In: **LESCOPE-04 – Large Engineering Systems Conference on Power Engineering**. Piscataway, US: IEEE, 2004. p. 124–128.
- ZACCARIAN, L.; TEEL, A. R. The L2 (12) Bumpless Transfer Problem: Its Definition and Solution. In: **2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)**. Piscataway, US: IEEE, 2004. v. 5, p. 5505–5510.

Apêndices

Caracterização dos Problemas de *Windup* e *Bumped Transfer*

Este apêndice do texto possui como objetivo caracterizar os problemas de *windup* e *bumped transfer*, os quais são recorrentes em sistemas de controle. Além disso, serão apresentadas as compensações AWBT¹ – através do método SVC – para a solução dos problemas citados.

Os resultados apresentados nesta seção do texto foram obtidos via integração numérica das equações que formulam sistemas de controle teste através da ferramenta MATLAB®/Simulink® (MATHWORKS, 2017). Os sistemas de controle teste utilizados para a obtenção dos resultados foram inspirados nos sistemas de controle originalmente apresentados em Vrancic (1997).

A.1 O Problema de *Windup* e sua Compensação

A Figura A.1 apresenta o sistema de controle teste I utilizado para gerar os resultados da caracterização do problema de *windup*. O comportamento dinâmico do mesmo é regido por um controlador do tipo PID com representação de saturação em sua variável de controle.

¹Sabe-se que uma compensação AW contribui positivamente para a solução do problema de *bumped transfer*. De modo análogo, uma compensação BT contribui positivamente para a solução do problema de *windup* (KOTHARE et al., 1994). Portanto, os ramos de compensação nesta seção do texto não serão classificadas em AW ou BT, mas sim, classificadas de forma geral por AWBT, independentemente do problema analisado.

Figura A.1 – Sistema de controle teste I com representação de saturação na variável de controle para caracterização do problema de *windup*

Fonte: Adaptado de Vrancic (1997)

Em referência a Figura A.1:

- $w(t)$ é o sinal de referência do sistema de controle, em $p.u.$;
- $e(t)$ é o sinal de erro de controle, em $p.u.$;
- $i(t)$ é o sinal de saída da ação integral de controle, em $p.u.$;
- $u(t)$ é o sinal de saída do controlador PID, em $p.u.$;
- $\hat{u}(t)$ é o sinal de entrada da planta controlada, em $p.u.$;
- K é o ganho do controlador, em $p.u./p.u.$;
- T_d é a constante de tempo da ação derivativa de controle, em segundos;
- T_f é a constante de tempo do filtro da ação derivativa de controle, em segundos;
- T_i é a constante de tempo da ação integral de controle, em segundos;
- τ é a constante de tempo do ramo de compensação AWBT, em segundos.

Para a caracterização do problema de *windup*, a saturação da variável de controle foi modelada com limites mínimo e máximo de excursão (u^{min} e u^{max} , respectivamente) e da taxa de variação em relação ao tempo ($\dot{u}(t)^{min}$ e $\dot{u}(t)^{max}$, respectivamente). A Tabela 5 apresenta os parâmetros da representação das não linearidades, enquanto a Tabela 4 apresenta os parâmetros do controlador PID.

Para a caracterização do problema de *windup* suponha que no tempo $t = 0^-s$ o sistema de controle teste I se encontra na condição de entrada e estado nulos, e o ramo de

Tabela 4 – Ajustes dos controladores PID dos sistemas de controle teste I e II

Parâmetro	Ajuste	Unidade
K	20,0	$p.u./p.u.$
T_i	30,0	$p.u./p.u.$
T_d	0,95	$p.u./p.u.$
T_f	0,095	$p.u./p.u.$

Tabela 5 – Valores utilizados para a representação da saturação na caracterização do problema de *windup*

Parâmetro	Ajuste	Unidade
u^{min}	0,0	$p.u.$
u^{max}	2,0	$p.u.$
$\dot{u}(t)^{min}$	-2,0	s^{-1}
$\dot{u}(t)^{max}$	2,0	s^{-1}

compensação AWBT não esteja habilitado ($\tau = \infty s$). No tempo de simulação $t = 0s$ um degrau de $1,0p.u.$ de amplitude é aplicado na referência ' w '. Devido a grande excursão das variáveis do sistema de controle, as não linearidades representadas no modelo de seu atuador são sensibilizadas. Nessa condição, o sinal de entrada da planta ' $\hat{u}$ ' será menor que o sinal de saída do controlador ' u ', conforme apresentado na Figura A.2.

Figura A.2 – Comportamento do sinal de saída do controlador ' u ' e do sinal de controle de entrada da planta ' $\hat{u}$ ' do sistema de controle teste I frente a aplicação de um degrau unitário na referência ' w ' do sistema de controle – caracterização do problema de *windup*

A condição de saturação é caracterizada pela quebra do laço de realimentação do laço de controle, em que um acréscimo no valor da variável de saída do controlador não resultará numa resposta mais rápida da variável controlada. Esse comportamento implica num estabelecimento de um erro de controle ' e ' por um maior período de tempo. A Figura A.3 apresenta o comportamento do sinal de erro de controle ' e ' para o caso com e sem a saturação, onde fica evidente a característica citada. Como o sinal de erro de controle ' e ' constitui a entrada do integrador do controlador PID, o sinal resultante da

operação de integração ‘ i ’ será maior para o caso com saturação, conforme apresentado na Figura A.4.

Figura A.3 – Comportamento do sinal de erro de controle ‘ e ’ para o sistema de controle teste I com e sem a representação de saturação frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – caracterização do problema de *windup*

Figura A.4 – Comportamento do sinal de saída do integrador ‘ i ’ para o sistema de controle teste I com e sem a representação de saturação frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – caracterização do problema de *windup*

O sinal de saída da ação integral ‘ i ’ com um maior módulo implica na necessidade do erro de controle assumir um sinal negativo por um maior período de tempo, de forma que o termo integral seja atenuado, conforme evidenciado na Figura A.3 para o caso saturado. Essa característica implica diretamente sobre a performance do sistema de controle, imprimindo na variável controlada um sobressinal em relação ao seu valor dado na referência, além de um tempo de acomodação elevado. Esses comportamentos são verificados na Figura A.5.

Figura A.5 – Comportamento do sinal da variável controlada ‘ y ’ para o sistema de controle teste I com e sem a representação de saturação frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – caracterização do problema de *windup*

O fenômeno apresentado nos parágrafos anteriores, o qual está associado a presença de saturação no sistema de controle, é conhecido como *windup*. O efeito prático do *windup* é fazer com que a performance do sistema de controle não seja a mesma que a esperada durante a sua fase de projeto.

Com o objetivo de contornar o problema de *windup*, um ramo de compensação extra é adicionado ao sistema de controle. A Figura A.1 apresenta a implementação de um ramo de compensação AWBT através do método SVC. O efeito prático da inserção do ramo de compensação é a diminuição do sinal de entrada do integrador – e por consequência, de sua saída – quando os limites de saturação são atingidos. Esse efeito é apresentado na Figura A.6, em que foi considerado um $\tau = 20s$. Decorrente da redução do termo integral, a variável de saída apresenta uma redução no seu sobressinal e no tempo de acomodação, diminuindo o efeito de *windup* no comportamento dinâmico do sistema de controle. Esse fenômeno é apresentado na Figura A.7.

A.2 O problema de *Bumped Transfer* e sua Compensação

A Figura A.8 apresenta o sistema de controle teste II utilizado para gerar os resultados da caracterização do problema de *bumped transfer*. O comportamento dinâmico do mesmo é regido por um controlador do tipo PID com representação de mudança entre modos de controle – automático e manual.

Figura A.6 – Comportamento do sinal de saída do integrador ‘ i ’ para o sistema de controle teste I frente a aplicação de um degrau unitário na referência da ‘ w ’ do sistema de controle – sem saturação e com saturação considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT – caracterização do problema de *windup*

Figura A.7 – Comportamento do sinal da variável controlada ‘ y ’ para o sistema de controle teste I frente a aplicação de um degrau unitário na referência ‘ w ’ do sistema de controle – sem saturação e com saturação considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT – caracterização do problema de *windup*

Em referência a Figura A.8:

- $u(t)$ é o sinal de saída do controlador PID, em $p.u.$ No contexto do problema de *bumped transfer*, esse corresponde ao sinal de saída do modo automático de controle;
- $u^m(t)$ é o sinal de saída do modo manual de controle, o qual é geralmente caracterizado por uma constante, em $p.u.$

Figura A.8 – Sistema de controle teste II com representação de mudança de modo de controle para caracterização do problema de *bumped transfer*

Fonte: Adaptado de Vrancic (1997)

O sistema de controle apresentado pela Figura A.1 possui similaridade com o sistema de controle apresentado pela Figura A.8, sendo a única diferença dada pela origem da diferença entre os sinais do modo automático de controle e de entrada da planta controlada. No caso da Figura A.1, a origem dessa diferença é a presença de um atuador com não linearidades. Já para o caso representado pela Figura A.8, a origem da diferença é constituída por uma chave que possui a função de alterar os modos de controle que atuam sobre a planta do sistema.

Para as simulações que caracterizam o problema *bumped transfer*, os valores dos parâmetros do controlador são os mesmos que os utilizados para a caracterização do problema de *windup*, os quais são apresentados na Tabela 4.

Para a caracterização do problema de *bumped transfer*, suponha que no tempo $t = 0^-s$ o sistema de controle teste II se encontra na condição de entrada e estado nulos, e o ramo de compensação AWBT não esteja habilitado ($\tau = \infty s$). No tempo $t = 0s$ um degrau de $1,0p.u.$ de amplitude é aplicado na referência ' w ' do sistema de controle. Após decorrido o período dinâmico, a variável controlada atinge a referência ajustada. Nessa condição, a chave responsável por modificar os modos de controle é manipulada ($t = 30s$) e o sistema passa a operar no modo manual, que para o caso simulado possui uma amplitude de $0,5p.u.$ Com a alteração de posição da chave fica estabelecido um sinal de erro de controle no controlador PID, o qual passa a ser integrado. O sinal de erro integrado faz com que a saída do modo automático de controle divirja indefinidamente em relação ao sinal do modo manual. Após decorrido um período de operação no modo manual, a chave é retornada ao seu estado inicial ($t = 60s$), restaurando o modo automático de controle.

A Figura A.9 ilustra o comportamento do sinal de saída do modo automático de controle durante o processo citado no parágrafo anterior. No momento do retorno do modo manual para o modo automático, fica estabelecida uma descontinuidade no sinal de controle aplicado na entrada da planta controlada, conforme apresentado na Figura A.10. A descontinuidade citada possui efeito direto no comportamento dinâmico da planta, conforme apresentado na Figura A.11. Esse fenômeno é conhecido como *bumped transfer*, e recebe essa denominação devido ao salto observado no comportamento dinâmico da variável controlada.

Figura A.9 – Comportamento do sinal de saída do modo automático de controle ‘ u ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – caracterização do problema de *bumped transfer*

Figura A.10 – Comportamento do sinal de controle de entrada da planta ‘ $\hat{u}$ ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – caracterização do problema de *bumped transfer*

Figura A.11 – Comportamento do sinal da variável controlada ‘ y ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – caracterização do problema de *bumped transfer*

Uma forma de contornar o problema de *bumped transfer* é aplicar um ramo de compensação AWBT por meio do método SVC. Nesse arranjo, o sinal de entrada é constituído pela diferença entre a saída do modo automático de controle e pelo sinal de controle aplicado na planta. Da forma em que o ramo de compensação é implementado, devido a ação integral presente no controlador PID, o sinal de saída do controle automático será forçado a operar com um valor muito próximo do sinal proveniente do modo manual. A Figura A.12 ilustra o comportamento do sinal de saída do modo automático de controle considerando o módulo de compensação AWBT ($\tau = 3s$) e o desconsiderando, onde fica evidente o comportamento citado.

Figura A.12 – Comportamento do sinal de saída do modo automático de controle ‘ u ’ do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT

Decorrente da aplicação do ramo de compensação AWBT, a descontinuidade do sinal de controle de entrada da planta é minimizada quando do retorno do modo manual para o modo automático de controle, conforme apresentado pela Figura A.13. A eliminação da descontinuidade do sinal de controle tem efeito direto sobre o comportamento dinâmico da variável controlada, no qual são verificados transitórios menos severos diminuindo o efeito de *bumped transfer*, conforme verificado na Figura A.14.

Figura A.13 – Comportamento do sinal da entrada da planta ' $\hat{u}$ ' do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT

Figura A.14 – Comportamento do sinal da variável controlada ' y ' do sistema de controle teste II frente ao conjunto de perturbações aplicado – considerando e desconsiderando o ramo de compensação AWBT

Parâmetros do Sistema Teste

Neste apêndice são apresentados os dados de rede e parâmetros dos modelos dinâmicos que compõem o sistema teste utilizado para caracterizar os resultados desta pesquisa. A descrição completa do sistema teste é realizada no início do Capítulo 5 deste texto.

B.1 Dados de Rede do Sistema Teste

Na Tabela 6 estão apresentados os valores de impedância dos elementos que compõem o diagrama unifilar apresentado na Figura 5.1. Todos os valores apresentados são referentes aos componentes de sequência positiva dos mesmos, sendo todos representados na base de potência de $100M_{VA}$. Os valores apresentados constituem uma adaptação dos apresentados em Jenkins et al. (2000).

Para a identificação das impedâncias dos alimentadores será adotada a seguinte nomenclatura: Z_{ij} , em que i e j representam o número das barras que configuram os extremos do alimentador cujo valor de impedância é apresentado. Para a impedância de curto-circuito será adotado o símbolo Z_{SUB} , enquanto para os transformadores da SD será utilizado o próprio nome do elemento apresentado no diagrama unifilar representado na Figura 5.1.

Tabela 6 – Impedâncias dos componentes de rede do sistema teste – base $100M_{VA}$

Parâmetro	Valor	Unidade
Z_{23}	$0,0134 + j0,0575$	<i>p.u.</i>
Z_{34}	$0,0716 + j0,1246$	<i>p.u.</i>
Z_{24}	$0,0645 + j0,1028$	<i>p.u.</i>
Z_{45}	$0,0358 + j0,0623$	<i>p.u.</i>
Z_{SUB}	$j0,0666$	<i>p.u.</i>
Z_{TR1}	$0,0100 + j0,0400$	<i>p.u.</i>
Z_{TR2}	$0,0092 + j0,0400$	<i>p.u.</i>
Z_{TRG}	$0,0328 + j0,1312$	<i>p.u.</i>

Fonte: Adaptado de Jenkins et al. (2000)

B.2 Parâmetros do Gerador Síncrono Distribuído

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros do modelo do gerador síncrono implementado na biblioteca do ANATEM (CEPEL, 2016), o qual é representado pelos diagramas de blocos ilustrados nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4. Todos os valores estão na base de $30M_{VA}$, o que corresponde a potência nominal do GSD, e foram obtidos de (FREITAS et al., 2006).

Tabela 7 – Parâmetros do modelo dinâmico do GSD – base $30M_{VA}$

Parâmetro	Valor	Unidade
R_a	0,0014	$p.u.$
L_l	0,050	$p.u.$
L_d	1,400	$p.u.$
L_q	1,372	$p.u.$
L'_d	0,231	$p.u.$
L'_q	0,800	$p.u.$
L''_d	0,118	$p.u.$
τ'_{d0}	5,50	s
τ'_{q0}	1,25	s
τ''_{d0}	0,05	s
τ''_{q0}	0,19	s
D	0,0	$p.u./p.u.$
H	1,5	s

Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2006)

B.3 Parâmetros do Sistema de Excitação

Os valores dos parâmetros dos modelos do SE e do compensador de carga – apresentados, respectivamente, pelas Figuras 5.5 e 5.6 – foram obtidos de IEEE (2016), e são apresentados na Tabela 8.

B.4 Malha de Controle de Potência Reativa

Os valores dos parâmetros do modelo do controle de potência reativa são apresentados na Tabela 9. Tais valores compõem os “ajustes base” utilizados na apresentação dos resultados, e foram aplicados tanto no modelo dinâmico da EHC quanto no modelo dinâmico da ETC – representados, respectivamente, pelas Figuras 4.6 e 5.7.

Tabela 8 – Parâmetros do modelo dinâmico do SE

Parâmetro	Valor	Unidade
T_R	0,02	s
R_C	0,0	$p.u.$
X_C	0,0	$p.u.$
T_B	1,0	s
T_C	1,0	s
K_A	210,0	$p.u./p.u.$
T_A	0,0	s
K_F	0,0	$p.u./p.u.$
T_F	0,0	s
V_{RMAX}	6,43	$p.u./p.u.$
V_{RMIN}	-6,00	$p.u./p.u.$
K_C	0,038	$p.u./p.u.$

Fonte: Adaptado de IEEE (2016)

Tabela 9 – Parâmetros do modelo dinâmico da malha de controle de potência reativa

Parâmetro	Valor	Unidade
K_P^P	1,0	$p.u./p.u.$
K_I^P	0,5	$p.u./p.u.$
V_{CLMT}	∞	$p.u.$

B.5 Parâmetros da Malha de Controle do Sistema de Velocidade

Os parâmetros do modelo dinâmico de regulador de velocidade TGOV1 apresentado na Figura 5.8 foram adaptados de Abreu (2005) – excetuando-se os parâmetros do PI que impõe o modo isócrono de operação ao GSD – e são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros do modelo dinâmico da malha de controle de velocidade

Parâmetro	Valor	Unidade
R	0,05	$p.u./p.u.$
T_1	0,05	s
T_2	1,5	s
T_3	5,0	s
D_T	0,0	$p.u./p.u.$
P_{MIN}	0,1	$p.u.$
P_{MAX}	1,1	$p.u.$

Fonte: Adaptado de Abreu (2005)