Cassius Rossi de Aguiar

**Estudo e Análise de Algoritmos de
Detecção de Ilhamento em Sistemas de
Geração Distribuída Conectados à Rede
de Distribuição**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

**São Carlos
2013**

Trata-se da versão corrigida da dissertação. 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.

A282e Aguiar, Cassius Rossi
 Estudo e Análise de Algoritmos de Detecção de
 Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída Conectados
 à Rede de Distribuição / Cassius Rossi Aguiar;
 orientador Ricardo Quadros Machado. São Carlos, 2013.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
 Sistemas Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

 1. Detecção de ilhamento. 2. Geração distribuída.
 3. Fontes alternativas. 4. Conversor CC-CA. 5. Sistemas
 fuzzy. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CASSIUS ROSSI DE AGUIAR.**

Título da dissertação: "Estudo e análise de algoritmos de detecção de ilhamento em sistemas de geração distribuída conectados à rede de distribuição".

Data da defesa: 11/10/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **José Roberto Boffino de Almeida Monteiro (Orientador substituto)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Rafael Cardoso**
(Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Campus Pato Branco)

APROVADO

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

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Agradecimentos

Gostaria de agradecer e expressar minha gratidão às pessoas que colaboraram de uma forma ou de outra para que esse trabalho de mestrado pudesse hoje estar finalizado.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e incentivaram minhas decisões, especialmente a minha mãe Rejane pelas palavras de carinho e aos meus irmãos Anderson e Etiene pela confiança e apoio.

Um agradecimento especial a minha esposa Kelen que sempre esteve ao meu lado para me incentivar nas horas em que mais precisei de estímulo para continuar. Obrigado pela paciência e amizade.

Ao meu professor orientador, Dr. Ricardo Quadros pela orientação técnica e científica, amizade e credibilidade dada ao trabalho.

A professora Dr. Vilma Alves de Oliveira pela colaboração e suporte.

Aos colegas do LAC: Rodolpho, Giann e Michele por terem me recebido nos primeiros meses de trabalho, pela amizade, pelas ideias, discussões e sugestões dadas ao trabalho.

Aos colegas do LAFAPE: Amilcar, Giovani e Renan pela amizade e suporte no desenvolvimento do protótipo experimental.

E, finalmente, à Escola de Engenharia de São Carlos pelo suporte fornecido ao desenvolvimento deste trabalho e à FAPESP pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado que me foi concedida.

Sumário

Sumário.....	1
Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas.....	11
Lista de Acrônimos.....	13
Resumo	15
Abstract.....	17
Capítulo 1	19
Introdução, Objetivos do Trabalho e Organização da Dissertação	19
1.1 Introdução.....	19
1.2 Objetivos do Trabalho	21
1.3 Organização do Texto	21
1.4 Publicações Decorrentes do Trabalho	22
Capítulo 2	23
Estratégia de Controle.....	23
2.1 Configuração do Sistema de Geração Distribuída Utilizado em Simulação... 23	
2.2 Operação no Modo Conectado.....	24
2.3 Operação no Modo Ilhado	25
2.4 Algoritmo de Sincronização	26
2.5 Considerações Finais.....	28
Capítulo 3	29
Análise em Frequência do Sistema de Geração Distribuída.....	29
3.1 Operação no Modo Conectado.....	29
3.2 Operação no Modo Ilhado	31
3.3 Algoritmo de Sincronização	34
3.4 Resultados de Simulação	38
3.5 Considerações Finais.....	40
Capítulo 4	41

Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída	41
4.1 Sandia Frequency Shift - SFS	44
4.2 General Electric Frequency Scheme - GEFS	44
4.3 General Electric Voltage Scheme - GEVS	46
4.4 Procedimentos de Ensaio de Técnicas Antiilhamento Padrão IEEE 1547.1 e IEEE 929	47
4.5 Resultados de Simulação	49
4.5.1 Sandia Frequency Shift	49
4.5.2 General Electric Frequency Scheme	53
4.5.3 General Electric Voltage Scheme	56
4.5.4 Quadro Comparativo	58
4.6 Considerações Finais	59
Capítulo 5	61
Identificadores Fuzzy Utilizados para a Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída	61
5.1 Realimentação Positiva Fuzzy em Frequência	61
5.2 Realimentação Positiva Fuzzy Híbrida	64
5.3 Projeto das Técnicas Fuzzy	66
5.4 Resultados de Simulação	70
5.4.1 Realimentação Positiva Fuzzy em Frequência	70
5.4.2 Realimentação Positiva Fuzzy Híbrida	73
5.4.3 Quadro Comparativo	76
5.5 Considerações Finais	78
Capítulo 6	79
Protótipo Experimental do Sistema de Geração Distribuída	79
6.1 Objetivos do Protótipo Experimental	79
6.2 Descrição do Protótipo Experimental	79
6.3 Operação Conectada - Protótipo Experimental	82
6.4 Operação Ilhada - Protótipo Experimental	83
6.5 Técnicas Antiilhamento Fuzzy - Algoritmo	85
6.6 Filtro de saída	86
6.7 Resultados Experimentais – Operação da GD	86
6.7.1 Operação Ilhada	87
6.7.2 Sincronização com a Rede de Distribuição	89

6.7.3	Conexão com a Rede de Distribuição.....	91
6.7.4	Fluxo de potência entre GD e Rede de Distribuição.....	92
6.8	Resultados Experimentais – Detecção de ilhamento.....	94
6.8.1	Sandia Frequency Shift - SFS.....	97
6.8.2	General Electric Frequency Scheme - GEFS.....	99
6.8.3	General Electric Voltage Scheme - GEVS.....	101
6.8.4	Realimentação Positiva Fuzzy em Frequência.....	103
6.8.5	Realimentação Positiva Fuzzy Híbrida.....	104
6.8.6	Quadro Comparativo.....	105
6.9	Conclusões Finais.....	106
Capítulo 7		107
Conclusões Gerais		107
7.1	Trabalhos Futuros.....	108
Referências Bibliográficas		109
Apêndice		113
Conversor de Potência		113
DSP TMS320F28335		114
Condicionamento de Sinais		116

Lista de Figuras

Figura 1.1: Fontes energéticas exploradas no Brasil 2012.	19
Figura 2.1: Configuração do sistema de geração distribuída.....	24
Figura 2.2: Diagrama do controle em corrente para o sistema de GD conectado.	25
Figura 2.3: Diagrama do controle em tensão para o sistema de GD operando ilhado.	26
Figura 2.4: Algoritmo de sincronização PLL.	27
Figura 2.5: Senóides baseadas em 1 ϕ -PLL.	28
Figura 3.1: Controle em corrente para o sistema conectado.....	29
Figura 3.2: Resposta em frequência do controle em corrente em malha fechada.	30
Figura 3.3: Controle em tensão para o sistema ilhado.....	31
Figura 3.4: Controle ressonante.....	32
Figura 3.5: Resposta em frequência para o sistema no modo ilhado. Em cinza resposta sem o controlador ressonante e em preto com controlador ressonante.....	33
Figura 3.6: Diagrama de bloco PLL.	34
Figura 3.7: Saturador dinâmico.	35
Figura 3.8: Resposta em frequência do PLL com saturação dinâmica (a) e resposta ao degrau do PLL com (cinza) e sem (preto) Saturação dinâmica (b).	36
Figura 3.9: Tempo de detecção vs frequência de corte do PLL para o método GEFS.....	37
Figura 3.10: Tempo de detecção vs frequência de corte do PLL para o método SFS.....	38
Figura 3.11: Sincronização da GD com a rede de distribuição.	39
Figura 3.12: Tensão no PAC no momento de chaveamento de controle.	39
Figura 3.13: Detalhe do chaveamento do controle. (a) ilhamento e (b) reconexão.....	40
Figura 4.1: Forma de onda da corrente injetada pelo inversor com a técnica AFD.	43
Figura 4.2: Esquema da técnica SFS.	44
Figura 4.3: Diagrama da técnica GEFS.	45
Figura 4.4: Esquema da técnica GEVS.	46
Figura 4.5: Configuração do circuito para teste de ilhamento (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000).	49
Figura 4.6: Frequência no PAC no momento do ilhamento $Q_f = 1$	50

Figura 4.7: Injeção de distúrbios no sistema de controle da GD. (a) Eixo direto e (b) Eixo em quadratura.....	51
Figura 4.8: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $k_{SFS} = 0,1$ e $Q_f = 2,5$	52
Figura 4.9: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $k_{SFS} = 0,1$ e $Q_f = 2,5$ e PLL com saturador dinâmico.	53
Figura 4.10: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 1$	54
Figura 4.11: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$	54
Figura 4.12: Injeção de distúrbios na referência de corrente em quadratura.	55
Figura 4.13: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$ e PLL com saturador dinâmico.	55
Figura 4.14: Tensão no PAC no instante do ilhamento para $k_{GEVS} = 5$	56
Figura 4.15: Tensão no PAC no instante do ilhamento para $k_{GEVS} = 8$	57
Figura 4.16: Injeção de distúrbios para a técnica GEVS.	57
Figura 5.1: Esquema da técnica de detecção em frequência fuzzy.	62
Figura 5.2: Resposta da realimentação positiva tradicional com variação de frequência.....	62
Figura 5.3: Resposta hipotética da realimentação positiva fuzzy com variação de frequência.	63
Figura 5.4: Resposta da realimentação positiva fuzzy com a ocorrência de ilhamento.....	63
Figura 5.5: Esquema da técnica fuzzy híbrida.	64
Figura 5.6: Resposta hipotética da realimentação positiva tradicional com variação de tensão no eixo direto.	65
Figura 5.7: Resposta da realimentação positiva fuzzy híbrida.....	65
Figura 5.8: Função de pertinência para a saída da técnica fuzzy.	67
Figura 5.9: Função de pertinência para a tensão no eixo direto (a) e derivada da frequência (b).	67
Figura 5.10: Superfície da técnica fuzzy híbrida.	68
Figura 5.11: Função de pertinência para técnica em frequência (a) e derivada da frequência (b).	69
Figura 5.12: Superfície da técnica em frequência fuzzy.	69
Figura 5.13: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 1$	70
Figura 5.14: Injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy para $Q_f = 1$	71
Figura 5.15: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy $Q_f = 1$	71
Figura 5.16: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$	72
Figura 5.17: Detalhe da frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$	72

Figura 5.18: Injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy $Q_f = 2,5$.	73
Figura 5.19: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy $Q_f = 2,5$.	73
Figura 5.20: Tensão no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 1$.	74
Figura 5.21: Injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 1$.	74
Figura 5.22: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 1$.	75
Figura 5.23: Tensão no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$.	75
Figura 5.24: Injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 2,5$.	76
Figura 5.25: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 2,5$.	76
Figura 6.1: Algoritmo utilizado para o chaveamento da operação do sistema de GD.	80
Figura 6.2: Descrição do protótipo experimental.	81
Figura 6.3: Visão geral do protótipo construído.	82
Figura 6.4: Matriz de saída das técnicas fuzzy utilizada no DSP.	85
Figura 6.5: Tensões e correntes produzidas pela GD. Laranja: tensão da fase “a” (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).	87
Figura 6.6: Entrada e saída de carga no PAC. Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).	88
Figura 6.7: Entrada de carga no PAC. Laranja: tensão da fase “a” (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).	88
Figura 6.8: Desconexão de carga no PAC. Laranja: tensão da fase “a” (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).	89
Figura 6.9: Sincronização da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).	90
Figura 6.10: Detalhe da sincronização da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).	90
Figura 6.11: Conexão da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).	91

Figura 6.12: Momento da conexão da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).	92
Figura 6.13: Fluxo de potência da GD com a rede de distribuição. Verde: tensão da fase “a” da rede (100V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (10A/div).	93
Figura 6.14: Fluxo de potência da GD com a rede de distribuição (Injeção de corrente da GD). Verde: tensão da fase “a” da rede (80V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (20A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (20A/div).	93
Figura 6.15: Fluxo de potência da GD com a rede de distribuição (Injeção de corrente da rede de distribuição). Verde: tensão da fase “a” da rede (80V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (20A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (20A/div).	94
Figura 6.16: Detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede. Verde: tensão da fase “a” da rede (70V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “ <i>Chave antiilhamento</i> ” (20V/div).	95
Figura 6.17: Detalhe da detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “ <i>Chave antiilhamento</i> ” (20V/div).	95
Figura 6.18: Detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede próximo a zero. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “ <i>Chave antiilhamento</i> ” (20V/div).	96
Figura 6.19: Detalhe da detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede próximo a zero. Verde: tensão da fase “a” da rede (70V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “ <i>Chave antiilhamento</i> ” (20V/div).	97
Figura 6.20: Detecção de ilhamento SFS – $k_{SFS} = 0,2$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “ <i>Chave antiilhamento</i> ” (20V/div).	98
Figura 6.21: Detecção de ilhamento SFS – $k_{SFS} = 0,02$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “ <i>Chave antiilhamento</i> ” (20V/div).	98

Figura 6.22: Detecção de ilhamento com aumento da frequência de corte em 40% do PLL SFS – $k_{SFS} = 0,02$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	99
Figura 6.23: Detecção de ilhamento GEFS – $k_{GEFS} = 0,5$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	100
Figura 6.24: Detecção de ilhamento GEFS – $k_{GEFS} = 0,05$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	100
Figura 6.25: Detecção de ilhamento com aumento da frequência de corte em 40% do PLL GEFS – $k_{GEFS} = 0,05$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	101
Figura 6.26: Detecção de ilhamento GEVS – $k_{GEVS} = 1,8$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	102
Figura 6.27: Detecção de ilhamento GEVS – $k_{GEVS} = 2,0$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	102
Figura 6.28: Detecção de ilhamento fuzzy em frequência sem aumento da frequência de corte do PLL. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	103
Figura 6.29: Detecção de ilhamento fuzzy em frequência com aumento da frequência de corte do PLL. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	104
Figura 6.30: Detecção de ilhamento fuzzy híbrida. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).	105

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Parâmetros do sistema simulado – PI corrente.....	30
Tabela 3.2: Parâmetros do sistema simulado – P tensão e ressonante.	33
Tabela 3.3: Parâmetros do PLL.	35
Tabela 4.1: Tempo de detecção para IEEE Std 1547.	47
Tabela 4.2: Tempo de detecção para IEEE Std 929.	48
Tabela 4.3: Parâmetros de simulação para diferentes Q_f	49
Tabela 4.4: Parâmetros de simulação para manobras de carga.	51
Tabela 4.5: Quadro comparativo em relação ao tempo de detecção.	58
Tabela 4.6: Quadro comparativo em relação a injeção de distúrbios.....	58
Tabela 4.7: Quadro comparativo em relação ao impacto do algoritmo de sincronização no tempo de detecção.	59
Tabela 5.1: Regras fuzzy para técnica híbrida.....	68
Tabela 5.2: Quadro comparativo em relação ao tempo de detecção.	77
Tabela 5.3: Quadro comparativo em relação a injeção de distúrbios.....	77
Tabela 6.1: Parâmetros do sistema experimental: variáveis.....	81
Tabela 6.2: Parâmetros do sistema experimental: componentes.	82
Tabela 6.3: Parâmetros do sistema experimental – PI corrente.....	83
Tabela 6.4: Parâmetros do sistema experimental – P + R de tensão.	83
Tabela 6.5: Quadro comparativo em relação ao tempo de detecção.	106
Tabela 6.6: Impacto do algoritmo de sincronização no tempo de detecção.	106

Lista de Acrônimos

AFD	<i>Active Frequency Drift;</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
CA	Corrente Alternada;
CC	Corrente Contínua;
DSP	<i>Digital Signal Processor;</i>
GD	Geração Distribuída;
GEFS	<i>General Electric Frequency Scheme;</i>
GEVS	<i>General Electric Voltage Scheme;</i>
NDZ	<i>Non-Detecton Zone;</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum;
PI	Proporcional Integral;
PLC	<i>Power Line Carrier;</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop;</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation;</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition;</i>
SFS	<i>Sandia Frequency Shift;</i>

Resumo

AGUIAR, C. R. (2013). *Estudo e Análise de Algoritmos de detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída Conectados à Rede de Distribuição*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2013.

Este trabalho aborda a detecção da condição de ilhamento e de seus impactos em redes de distribuição e em gerações distribuídas que empregam conversores CC-CA. Na literatura são encontradas dois grupos de técnicas para este tipo de aplicação. As técnicas passivas, que identificam a condição de ilhamento através do ajuste dos limites de variação dos relés de proteção, e as técnicas ativas, que inserem um sinal de realimentação positiva de forma a tornar o sistema instável no momento da desconexão. As técnicas ativas, por apresentarem um menor tempo de detecção e simples implementação em hardware, são preferencialmente utilizadas, apesar da injeção de distúrbios no sistema de controle da geração distribuída. O estado-da-arte em termos de detecção de ilhamento consiste em desenvolver uma técnica que possua alta capacidade de detecção, porém sem injeção de distúrbios no sistema de geração distribuída quando conectado à rede de distribuição. Neste trabalho, são abordadas duas formas para a redução da injeção de distúrbios e do tempo de detecção. Em uma primeira abordagem é proposto um projeto ótimo para o algoritmo de sincronização PLL (phase-locked loop), o qual permite a redução do ganho de realimentação positiva para técnicas em frequência e, conseqüentemente, a redução da injeção de distúrbios. Em uma segunda abordagem é utilizada a metodologia fuzzy de forma a garantir a detecção da condição de ilhamento sem nenhuma injeção de distúrbios no sistema de controle. Resultados de simulação e experimentais, obtidos por meio de uma bancada experimental controlada por DSP, são apresentados para validar as propostas presentes nesta dissertação.

Palavras-Chave: Detecção de Ilhamento, Geração Distribuída, Fontes alternativas, Conversor CC-CA e Sistemas Fuzzy.

Abstract

AGUIAR, C. R. (2013). *Study and Analysis of Anti-Islanding Algorithms Used in Distributed Generation Systems Connected to the Grid*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2013.

This thesis deals with the islanding detection and its impact on distribution networks when distributed generation systems are driven by DC-AC converters. Two groups of techniques are found in the literature. The passive techniques in which adjusting the variation limits of protective relays identify the islanding condition, and the active techniques that insert a positive feedback signal in order to make the system unstable when the contingency is on progress. The active techniques present a reduced detection time and simple hardware implementation. They are preferably used in despite of the injection of disturbances in the control system. In this thesis two ways to reduce injection of disturbances and detection time are proposed. In a first approach is shown an optimal design for the synchronization algorithm PLL (Phase-Locked Loop) which allows to reduce the positive feedback gain in frequency techniques in order to decrease the injection of disturbances. In a second approach a fuzzy methodology is used to ensure the islanding detection with the aforementioned requirements. Simulation analysis and experimental results are presented to validate the proposed approach.

Keywords: Islanding Detection, Distributed Generation, Renewable Energy Sources, AC-DC Converters, and Fuzzy Systems.

Capítulo 1

Introdução, Objetivos do Trabalho e Organização da Dissertação

1.1 Introdução

O interesse na investigação de estruturas que possibilitem a utilização de fontes alternativas de energia como forma de geração tem sido incentivado por órgãos reguladores e pelo Ministério de Minas e Energia com o intuito de minimizar os efeitos da demanda de energia no país. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL reforçam a concentração de fontes hídricas na matriz energética Brasileira. Contudo, quando analisado na linha do tempo, as formas de geração que obtiveram crescimento considerável, a partir de 2009, foram às fontes renováveis, com acréscimo de 57%. Por outro lado, as fontes térmicas com crescimento de apenas 5% mostram o incentivo e a importância das fontes renováveis e da geração distribuída (GD) no cenário energético atual brasileiro (ANEEL, 2012). A Figura 1.1 apresenta a distribuição das fontes energéticas no Brasil.

Figura 1.1: Fontes energéticas exploradas no Brasil 2012.

Desta forma, a conexão de sistemas de geração distribuída (GD) que utilizam conversores CC-CA está sendo alvo de intensas pesquisas com a finalidade de promover soluções para os problemas de instabilidade e detecção de contingências do tipo ilhamento quando conectados em redes de distribuição.

Neste sentido, um requisito de fundamental importância para a integração de sistemas de GD, em redes de distribuição, está associado à capacidade do sistema em detectar a condição de ilhamento. Esse fenômeno ocorre quando o sistema de GD continua a entregar potência à rede de distribuição mesmo quando o fluxo de potência da rede principal é interrompido, tal situação pode causar riscos às equipes de manutenção que realizam algum tipo de reparo, aos equipamentos da unidade de GD e à própria carga que se encontra no sistema ilhado (YE, DAME e KROPOSKI, 2005).

De forma geral, métodos antiilhamento têm sido amplamente estudados com o intuito de reduzir os efeitos da não detecção. Dessa forma, é possível classificá-los em dois modos, os quais são: os passivos e os ativos. Métodos passivos monitoram os parâmetros do sistema continuamente, tal como frequência, magnitude da tensão, distorção harmônica, entre outros. São formas usuais de detectar ilhamento e necessitam somente do ajuste do relé de proteção. A fim de que, ajustando limites de variação aos parâmetros, é possível diferenciar quando a GD está conectada à rede de distribuição ou sob ilhamento (YE, WALLING, *et al.*, 2004).

Já os métodos ativos são projetados no sentido de desestabilizar a GD no momento em que a condição de ilhamento estiver estabelecida. Esses métodos inserem um sinal de realimentação positiva na estrutura de controle da GD de modo a tornar a sua operação instável no momento de desconexão (KIM, JEON, *et al.*, 2011; YE, WALLING, *et al.*, 2004). A principal vantagem está associada a sua pequena região de não detecção, do inglês *Non-Detection Zone* (NDZ), quando comparada aos métodos passivos. Contudo, métodos ativos injetam continuamente distúrbios no sistema de GD degradando a qualidade de energia fornecida pelo conversor eletrônico (ESTÉBANEZ, MORENO, *et al.*, 2011).

Uma vez detectada a contingência pela técnica antiilhamento, o sistema de GD é projetado para ser capaz de operar ilhado em relação à rede de distribuição. Geralmente, quando a GD opera conectada a rede de distribuição, o sistema trabalha com controle em potência/corrente constante no ponto de acoplamento comum (PAC). Entretanto, quando a condição de ilhamento for detectada e a rede for desconectada, o sistema de GD passa a operar no modo ilhado com controle da tensão no PAC.

Neste contexto, a mudança no modo de operação da GD, no momento em que o ilhamento for detectado, é motivo de transitórios e distúrbios no sistema de GD e da rede de distribuição (GONÇALVES, 2010). Com isso, a busca por uma estratégia de controle que minimize tal impacto é motivação de pesquisas no âmbito acadêmico (GONÇALVES, 2010; BALAGUER, LEI, *et al.*, 2011), assim como neste trabalho, que trata deste problema de forma a minimizar tais transitórios no momento da alteração no modo de operação.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho apresenta como objetivo geral a análise de técnicas de detecção antiilhamento em sistemas de GD. Além disso, as estruturas do controle associadas à operação nos modos ilhado e conectado, principalmente no instante do chaveamento do controle, são objetos de estudo deste trabalho.

Os objetivos específicos estão listados abaixo:

- ✓ Analisar a estrutura de controle para o sistema de GD no modo de operação conectado e desconectado (ilhado) em relação à rede de distribuição;
- ✓ Analisar, no domínio da frequência, os modos de operação da GD;
- ✓ Examinar o impacto de algoritmos de sincronização em técnicas de detecção de ilhamento baseadas em realimentação positiva em frequência;
- ✓ Estudar técnicas de detecção de ilhamento ativas baseadas em realimentação positiva e avaliar seu desempenho em relação ao tempo de detecção e à injeção de distúrbios no sistema de controle da GD;
- ✓ Propor e/ou melhorar técnicas de detecção de ilhamento no sentido de minimizar a injeção de distúrbios, bem como reduzir o tempo de detecção.

1.3 Organização do Texto

Ao longo do texto, o trabalho é apresentado da seguinte forma:

- ✓ O Capítulo 2 apresenta a estratégia de controle para ambos os modos de operação (conectado e ilhado) e a estrutura do algoritmo de sincronização utilizada;
- ✓ O Capítulo 3 descreve a análise do controle do sistema de GD no domínio da frequência, bem como a configuração ótima do controlador do algoritmo de sincronização para aplicação em técnicas antiilhamento;
- ✓ O Capítulo 4 discute as principais técnicas ativas de detecção de ilhamento que utilizam realimentação positiva para detecção do ilhamento;
- ✓ O Capítulo 5 apresenta a proposta de detecção de ilhamento formulada neste trabalho;
- ✓ O Capítulo 6 descreve o funcionamento e operação do protótipo experimental desenvolvido;
- ✓ O Capítulo 7 apresenta as conclusões e considerações finais deste trabalho.

1.4 Publicações Decorrentes do Trabalho

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram publicados trabalhos em congressos nacionais e internacionais.

AGUIAR, C. R.; NEVES, R. V. A.; REIS, G. B.; BASTOS, R. F.; MACHADO, R. Q. Controle e Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída Conectados em Redes de Distribuição. In: XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012, 2012. p. 366-372.

AGUIAR, C. R.; NEVES, R. V. A.; REIS, G. B.; BASTOS, R. F.; MACHADO, R. Q. Impacto de Algoritmos de Sincronização em Técnicas de Detecção de Ilhamento Baseadas em Realimentação Positiva em Frequência. In: 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012, Fortaleza. INDUSCON 2012, 2012.

AGUIAR, C. R.; GONCALVES, A. F. Q.; BASTOS, R. F.; POZZEBON, G. G.; MACHADO, R. Q.; MONEIRO, J. R. B. A. Reduction of Positive Feedback Gain on Anti-Islanding Method Based on Frequency 2013. IEEE Industrial Electronics Society - IECON 2013.

Capítulo 2

Estratégia de Controle

Neste capítulo, são apresentadas as estruturas de controle e a configuração do sistema de GD utilizada. Como o projeto tem como objetivo operar conectado e ilhado em relação à rede de distribuição, duas estruturas de controle são discutidas. O controle no modo conectado é descrito no referencial síncrono, sendo o controle no modo ilhado descrito no referencial estacionário. Ainda neste capítulo, é analisado o algoritmo de sincronização que permite a conexão do sistema de GD na rede de distribuição da concessionária.

2.1 Configuração do Sistema de Geração Distribuída Utilizado em Simulação

O sistema de GD desenvolvido em simulação e que é discutido nos primeiros capítulos deste trabalho, é composto por um conversor trifásico PWM operando com frequência de 10 kHz e tensão nominal de fase de 220 V nos terminais de saída. Este sistema opera conectado ao alimentador padrão IEEE Std 399-1997 (IEEE STD 399, 1997) através de um transformador de distribuição 0,38 kV/69 kV.

Ao analisar contingências do tipo ilhamento, uma chave lógica, comandada pela técnica antiilhamento, é inserida entre as duas estruturas de controle da GD com o objetivo de alterar o modo de operação, o qual indica se o sistema está ou não sob ilhamento.

As validações das estruturas de controle utilizadas são realizadas com cargas do tipo RLC seguindo os padrões estabelecidos para teste em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000). Da mesma forma, o fluxo de potência entre a GD e a rede de distribuição, nos testes realizados, é aproximadamente zero como sugerido em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000). O teste com fluxo de potência próximo de zero entre a GD e a rede de distribuição é relevante para a validação das técnicas de detecção, pois a mesma se apresenta como um dos cenários de maior dificuldade para a detecção das contingências. Além disso, é

um cenário factível, como por exemplo, em um sistema de GD que utilize como fonte primária painéis fotovoltaicos e que a falta de incidência solar leva a uma interrupção de transferência de potência à rede. Neste cenário, o fluxo de potência entre a GD e a rede é próximo de zero e se configura como uma condição crítica para a detecção.

A Figura 2.1 ilustra, de maneira geral, a GD e a rede de distribuição com seus respectivos modos de controle na operação conectada e ilhada. Além disso, a chave que altera o controle da GD, bem como a posição dos filtros e carga são ilustradas.

Figura 2.1: Configuração do sistema de geração distribuída.

2.2 Operação no Modo Conectado

O diagrama do controle em corrente para o sistema de GD conectado a rede de distribuição está representado na Figura 2.2. Neste modo, o controlador apresentado é projetado de forma a fornecer corrente constante no PAC. No diagrama, i_a, i_b e i_c são as

correntes de saída do conversor de potência, i_d e i_q são as correntes descritas no referencial síncrono e foram obtidas através da transformação de Park (2.1) enquanto que, o algoritmo de sincronização PLL (phase-locked loop) é usado para determinar a frequência e o ângulo de referência no PAC (MARAFÃO, 2004).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} -\cos(\theta) & -\cos(\theta + 2\pi/3) & -\cos(\theta - 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

As correntes de saída do conversor de potência i_d e i_q são comparadas com as correntes de referência i_{d_ref} e i_{q_ref} , respectivamente. Esta comparação gera um erro de corrente no qual é regulado por um controlador do tipo proporcional-integral (PI) que associado ao produto cruzado das correntes fornece os índices de modulação ao inversor.

Já os índices de modulação no referencial síncrono u_d e u_q são transformados em coordenadas abc pela transformada inversa de Park e são utilizadas para comandar o conversor eletrônico (BALAGUER, LEI, *et al.*, 2011).

Figura 2.2: Diagrama do controle em corrente para o sistema de GD conectado.

2.3 Operação no Modo Ilhado

O controle em tensão para a operação da GD no modo ilhado é exibido na Figura 2.3. Considerando que o objetivo no modo conectado é controlar a corrente no PAC, o objetivo do controle no modo ilhado é controlar a tensão terminal do conversor. Para isso, o controlador é representado em coordenadas $\alpha\beta 0$. A conversão abc para coordenadas $\alpha\beta 0$ é realizada por meio da transformação linear $T_{\alpha\beta 0}$ ilustrada em (2.2).

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Figura 2.3: Diagrama do controle em tensão para o sistema de GD operando ilhado.

Devido à estrutura do controle utilizada, a frequência de corte do controlador de tensão é projetada uma década abaixo do controlador de corrente e, como consequência, o controlador de tensão apresentará uma reduzida banda passante. A fim de solucionar esta deficiência, o controlador ressonante é posicionado em paralelo com o controlador proporcional (P) de tensão convencional para reduzir a impedância do conversor e compensar a componente fundamental e as não linearidades (MATTAVELLI, 2001; TEODORESCU, BLAABJERG, *et al.*, 2006).

A ideia básica do controlador ressonante é introduzir um ganho infinito na frequência de ressonância desejada, de forma a eliminar o erro de regime permanente (TEODORESCU, BLAABJERG, *et al.*, 2006).

2.4 Algoritmo de Sincronização

Além da estrutura de controle, para operar conectado a rede de distribuição, é necessária a utilização de um algoritmo de sincronização para que seja possível a conexão do sistema de GD na rede de distribuição. A sincronização é realizada através do algoritmo PLL, que sintetiza a partir das variáveis internas do PLL (θ , ω) uma senóide de amplitude unitária ($u \perp$), a qual em condições de regime permanente, para este caso, deve ser ortogonal em

relação à fundamental da tensão medida (v_m) (MARAFÃO, 2004; PADUA, DECKMANN, *et al.*, 2007). Desta forma, o valor médio do produto escalar entre a tensão medida e a senóide gerada digitalmente, deve convergir para zero. O sinal θ_{pll} , que define o argumento utilizado para sintetizar a senóide unitária $u \perp$, é obtido integrando a variável de saída do controlador PI, ou seja, a frequência da rede (ω_{pll}) dada em rad/s (MARAFÃO, 2004; PADUA, DECKMANN, *et al.*, 2007). A descrição acima é representada na Figura 2.4.

Neste modelo, o sinal de tensão v_m é amostrado a partir da rede de distribuição e um sinal ortogonal $u \perp$ é gerado pelo algoritmo PLL quando a sincronização é alcançada. A média do produto escalar (dp) é calculada e comparada a um sinal de referência nulo (condição de ortogonalidade), sendo que a diferença destes dois sinais gera um erro que é introduzido ao controlador PI. A saída do controlador PI somada à frequência fundamental da rede ($\omega_r = 2\pi 60$) resulta na frequência angular de ajuste ω_{pll} utilizada como *feedforward* com o intuito de dar maior velocidade ao algoritmo de sincronismo. Esta frequência é integrada de forma a se obter a função $\theta_{pll} = \omega_{pll}t$ do sinal ortogonal sintetizado.

Considerando um sistema discreto, é necessário adicionar o atraso associado à discretização.

Figura 2.4: Algoritmo de sincronização PLL.

Dessa forma, a frequência e a fase gerada pelo algoritmo de sincronização são usadas para sintetizar o sinal (2.3), o qual é proporcional (em fase) ao sinal de tensão fundamental da rede de distribuição.

A estrutura monofásica discutida pode ser generalizada a uma estrutura trifásica como representada na Figura 2.5. Conforme (MARAFÃO, 2004; PADUA, DECKMANN, *et al.*, 2007) a estrutura do controle trifásico para as funções de transferência de malha aberta e fechada são idênticas ao modelo monofásico.

$$u_a = \sin(\theta_{pll} + 90^\circ) = \sin(\phi) \quad (2.3)$$

Figura 2.5: Senóides baseadas em 1 ϕ -PLL.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo, verificou-se a estrutura para os dois modos de operação da GD. Assim como, o algoritmo de sincronização utilizado juntamente com a descrição do seu funcionamento. Além disso, observou-se a necessidade do emprego do controlador ressonante na malha de controle em tensão devido a sua reduzida banda passante. Da mesma forma, utiliza-se uma estrutura monofásica para o algoritmo de sincronização generalizando-o para uma aplicação em um sistema trifásico.

Capítulo 3

Análise em Frequência do Sistema de Geração Distribuída

Neste capítulo é realizada a análise em frequência das estruturas de controle discutidas no capítulo 2. A fim de minimizar os problemas gerados no momento da desconexão do sistema de GD, são enfatizadas as estruturas e soluções que reduzam os distúrbios em tais manobras.

Além disso, é avaliado o impacto do projeto do algoritmo de sincronização nas técnicas antiilhamento que utilizam realimentação positiva em frequência, de modo a reduzir a injeção de distúrbios no sistema de controle da GD.

3.1 Operação no Modo Conectado

O controle da operação no modo conectado é representado pelo diagrama de blocos da Figura 3.1. Sendo a indutância do filtro do conversor o termo que relaciona a tensão dos seus terminais com a corrente do próprio conversor. Além disso, H_i representa o ganho do sensor de corrente, sendo o ganho do conversor, para a modulação senoidal, representado pela metade da tensão do barramento CC (MACHADO, 2005; MACHADO, BUSO e POMILIO, 2006).

Figura 3.1: Controle em corrente para o sistema conectado.

Para a obtenção das constantes do controlador do tipo PI é necessário definir a margem de fase (mfi), a frequência de corte em malha fechada (F_{CLi}) e o ganho em malha aberta (3.1) da malha em corrente (MACHADO, 2005).

$$G_{OLi} = \frac{V_{CC}}{2} H_i \frac{1}{L_{conv}} \quad (3.1)$$

O ganho proporcional (K_{p_i}) e o integral (K_{i_i}) do controlador PI são definidos conforme as equações (3.2) e (3.3), respectivamente (BUSO e MATTARELLI, 2006).

$$K_{p_i} = \frac{2\pi F_{CLi}}{G_{OLi}} \quad (3.2)$$

$$K_{i_i} = \frac{K_{p_i} 2\pi F_{CLi}}{\tan(mfi)} \quad (3.3)$$

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros utilizados para o projeto do controlador de corrente em simulação, sendo utilizados valores típicos para (mfi) e (F_{CLi}), os quais são encontrados em (BUSO e MATTARELLI, 2006).

Tabela 3.1: Parâmetros do sistema simulado – PI corrente.

$F_{CLi}(Hz)$	$mfi(^{\circ})$	$V_{CC}(V)$	$L_{conv}(mH)$	H_i	K_{p_i}	K_{i_i}
1000	70	1000	2	0,004	6,28	14369

A resposta em frequência é ilustrada na Figura 3.2 e mostra a ampla banda passante apresentada pela estrutura de controle.

Figura 3.2: Resposta em frequência do controle em corrente em malha fechada.

3.2 Operação no Modo Ilhado

A malha de controle que representa a operação no modo ilhado é representada na Figura 3.3. A estrutura utilizada é apresentada em coordenadas $\alpha\beta 0$.

De forma semelhante à utilizada para obtenção das constantes do controlador na malha de controle em corrente, define-se a margem de fase (mf_v), a frequência de corte em malha fechada (F_{CLv}) e o ganho em malha aberta (3.4) do controle em tensão. Neste caso, a malha de controle em corrente é considerada um ganho, pois na frequência de interesse na qual é projetado o controle de tensão o atraso associado ao controlador de corrente é desprezível (MACHADO, 2005; MACHADO, BUSO e POMILIO, 2006).

Figura 3.3: Controle em tensão para o sistema ilhado.

$$G_{OLv} = G_{OLi} \frac{1}{C_{conv}} \frac{H_v}{H_i} \quad (3.4)$$

O ganho proporcional (K_{p_v}) e o integral (K_{i_v}) do controlador PI são definidos conforme as equações (3.5) e (3.6), respectivamente (BUSO e MATTAVELLI, 2006).

$$K_{p_v} = \frac{2\pi F_{CLv}}{G_{OLv}} \quad (3.5)$$

$$K_{i_v} = \frac{K_{p_v} 2\pi F_{CLv}}{\tan(mf_v)} \quad (3.6)$$

Como discutido no capítulo 2, as deficiências apresentadas pelo regulador de tensão são reduzidas posicionando em paralelo, com o controlador proporcional de tensão, um controlador ressonante como representado na Figura 3.4. O objetivo da utilização do

controlador ressonante é compor o sinal fundamental de tensão e compensar harmônicos, caso seja necessário. A forma geral do controlador ressonante é encontrada em (3.7) na qual (ω_0) é a frequência angular de ressonância e (k_{i_v}) é o ganho do controlador ressonante (MATTAVELLI, 2001; TEODORESCU, BLAABJERG, *et al.*, 2006; BLAABJERG, TEODORESCU, *et al.*, 2006; BUSO e MATTAVELLI, 2006).

$$G(s) = k_{i_v} \frac{2s}{s^2 + (\omega_0)^2} \quad (3.7)$$

Da mesma forma que se pode utilizar para compensar a frequência fundamental, $G(s)$ pode ser expandida para a compensação de múltiplas harmônicas. O procedimento para a compensação de harmônicos de frequência é a introdução de um filtro ressonante para cada harmônico a ser compensada. Com isso, o equacionamento matemático apresentando em (3.7) pode ser reescrito passando a ter a forma $G_h(s)$ apresentada em (3.8):

$$G_h(s) = \sum_{h \in N_h} k_{i_v} \frac{2s}{s^2 + (h\omega_0)^2} \quad (3.8)$$

Onde N_h é o conjunto de harmônicos selecionados e h é a ordem do harmônico.

Figura 3.4: Controle ressonante.

O controle da malha interna de corrente no modo ilhado apresenta dinâmica semelhante ao apresentado no modo conectado, portanto não é demonstrado nesta seção. Já o diagrama de magnitude e de fase, resultante da compensação da fundamental (60 Hz), 3^a, 5^a, 7^a e 9^a harmônicos estão apresentados na Figura 3.5.

A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros utilizados para o projeto do controlador de tensão no modo ilhado em simulação, sendo utilizados valores típicos para (mfi) e (F_{CLI}), os quais são encontrados em (BUSO e MATTARELLI, 2006).

Tabela 3.2: Parâmetros do sistema simulado – P tensão e ressonante.

$F_{CLv}(Hz)$	$mfv(^{\circ})$	$V_{CC}(V)$	$C_{conv}(\mu F)$	H_v	k_{i_v}	k_{p_v}
100	70	1000	15	0,001	0,042	9,60

Na resposta em frequência do controle no modo ilhado, utilizando o controlador do tipo PI, é possível observar a reduzida banda passante (forma de onda cinza), demonstrando a necessidade da utilização do controle ressonante.

O efeito do controlador ressonante associado ao P (forma de onda preta) faz com que ocorra uma redução na impedância da GD em determinados harmônicos. Com isso, a GD tem maior capacidade em fornecer corrente nestas frequências para compensar tais não linearidades (MACHADO, 2005). Contudo, no momento da ocorrência do ilhamento, a compensação potencializa o transitório de forma expressiva ao ponto de ultrapassar os limites de variação de tensão estabelecidos em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000). Para minimizar tal efeito, com exceção da componente fundamental, a compensação de harmônicos somente é ativada após o sinal do relé de identificação de ilhamento ser acionado.

Figura 3.5: Resposta em frequência para o sistema no modo ilhado. Em cinza resposta sem o controlador ressonante (PI) e em preto com controlador ressonante (P + ressonante).

3.3 Algoritmo de Sincronização

O diagrama de blocos da Figura 3.6 é a representação simplificada do algoritmo de sincronização. Devido a altas frequências de amostragem, a função que representa o atraso pode ser desconsiderada e o sistema pode ser reduzido à forma canônica de segunda ordem como mostrado em (3.9) (MARAFAO, 2004).

Figura 3.6: Diagrama de bloco PLL.

$$H_{cl} = \frac{k_{p_pll}s + k_{i_pll}}{s^2 + k_{p_pll}s + k_{i_pll}} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.9)$$

Desta forma, k_{p_pll} e k_{i_pll} podem ser ajustados de acordo com as equações (3.10) e (3.11), respectivamente.

$$k_{p_pll} = 2\xi\omega_n \quad (3.10)$$

$$k_{i_pll} = \omega_n^2 \quad (3.11)$$

Observa-se que reduzindo a frequência de malha fechada ω_n , o algoritmo PLL torna-se menos sensível a ruídos e distorções harmônicas do sinal de entrada. Contudo, uma redução significativa da frequência de malha fechada significa tornar a resposta transitória do algoritmo lenta.

Para aplicações que empregam técnicas de detecção antiilhamento em frequência, associadas às variáveis internas do PLL (θ_{pll} , ω_{pll}), torna-se importante que o algoritmo possua uma rápida resposta dinâmica, pois quanto mais rápida for a resposta menor é o tempo de detecção da técnica antiilhamento. Além disso, uma rápida resposta dinâmica do algoritmo de sincronização implica em uma redução significativa dos ganhos de realimentação positiva empregados nas técnicas, nas quais estão diretamente associados à injeção de distúrbios no

sistema de controle da GD. Contudo, há um compromisso entre se obter uma rápida resposta dinâmica e um reduzido sobressinal.

Assim, é proposta a inserção de um saturador dinâmico no controlador do algoritmo de sincronização de forma a melhorar a resposta dinâmica sem tornar o sistema instável (BUSO e MATTAVELLI, 2006). A ideia central do saturador dinâmico é separar os limites da parte integral e proporcional do controlador PI de forma que nas transições abruptas, a parte proporcional do controlador atue na regulação, enquanto a parte integral seja limitada até que o sistema convirja. Este fato possibilita que o sistema tenha uma rápida resposta dinâmica com reduzido sobressinal.

A Figura 3.7 ilustra o funcionamento do saturador dinâmico. O qual Y_{max} representa o limite máximo de saída do controlador PI e L_{i_pll} o valor máximo assumido, dinamicamente, pelo controle integral do PLL, sendo seu valor calculado pela equação (3.12).

$$|L_{i_pll}| = Y_{max} - |K_{p_pll}\epsilon| \quad (3.12)$$

Figura 3.7: Saturador dinâmico.

A atuação do saturador dinâmico utilizada no algoritmo de sincronização é observada na Figura 3.8. Observa-se que a redução do sobressinal em aproximadamente 77% indica a possibilidade de utilização de uma frequência de corte superior, ao passo que o não emprego da saturação dinâmica limita o aumento da frequência de corte e impede uma resposta dinâmica mais rápida.

A Tabela 3.3 apresenta os valores utilizados na simulação dos resultados para o algoritmo PLL.

Tabela 3.3: Parâmetros do PLL.

$\omega_n(rad/s)$	ξ	k_{p_pll}	k_{i_pll}	Y_{max}
54,0	0,707	76,356	2916	10

(a)

(b)

Figura 3.8: Resposta em frequência do PLL com saturação dinâmica (a) e resposta ao degrau do PLL com (cinza) e sem (preto) Saturação dinâmica (b).

Com o propósito de evidenciar o impacto do projeto do algoritmo de sincronização nas técnicas antiilhamento em frequência, são apresentados resultados que relacionam o tempo de detecção da técnica, o ganho de realimentação positiva (k_{SFS}) e (k_{GEFS}) e a frequência de corte associado ao projeto do PLL (ω_n). Os resultados foram obtidos para as técnicas: *Sandia*

Frequency Shift (SFS) e *General Electric Frequency Scheme* (GEFS) as quais estão detalhadas no capítulo 4.

O resultado para a técnica GEFS, demonstrado na Figura 3.9, evidencia que para ganhos de realimentação positiva (k_{GEFS}) elevados a influência do aumento de ω_n no projeto do PLL é mínima, por outro lado, para ganhos menores a contribuição no tempo de detecção é substancial, ao ponto de reduzir o ganho da técnica em 97% e o tempo de detecção em 80%.

Figura 3.9: Tempo de detecção vs frequência de corte do PLL para o método GEFS.

De forma análoga, para a técnica SFS observa-se que o impacto do projeto nos ganhos de realimentação positiva elevados é reduzido, contudo a influência é significativa para ganhos menores. Através da Figura 3.10, é possível verificar a redução do ganho de realimentação positiva em aproximadamente 90% do seu valor original.

Para ambas as técnicas, esta redução significa a diminuição de injeção de distúrbios no sistema de controle da GD, uma vez que a realimentação positiva é diretamente proporcional ao seu respectivo ganho. O detalhamento das técnicas é abordado nos próximos capítulos, sendo que a apresentação destes resultados tem puramente como objetivo mostrar, de forma parcial, a relação do projeto do algoritmo de sincronização com o desempenho das técnicas antiilhamento em frequência.

Figura 3.10: Tempo de detecção vs frequência de corte do PLL para o método SFS.

3.4 Resultados de Simulação

A estrutura apresentada no capítulo 3 é validada através de simulação a partir da análise do chaveamento do controle no momento da desconexão e reconexão da rede de distribuição. A carga utilizada é do tipo RLC e é ajustada conforme (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000). Operando de forma conectada ou ilhada, a carga local consome a totalidade da potência gerada pela GD.

Nas simulações, a GD é conectada na rede de distribuição e em 0,5 s começa a transferir potência. A carga local é conectada em 2 s e o sistema é ilhado em 3 s. Após operar 1 s no modo ilhado a rede retorna em 4 s e, novamente, a GD passa a trabalhar no modo conectado.

A sincronização da GD com a rede é apresentada na Figura 3.11. É possível observar que em cerca de 150 ms a GD está sincronizada com a rede de distribuição.

Os resultados discutidos em (GONÇALVES, 2010; BALAGUER, LEI, *et al.*, 2011) relativo à alteração no modo do controle do sistema de GD, demonstram o grande interesse em minimizar impactos associados à transição no modo de operação. Para este trabalho, a Figura 3.12 apresenta os resultados obtidos em simulação. Para efeito de análise são apresentados os valores limite de operação para o sistema de GD descritos em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000).

Figura 3.11: Sincronização da GD com a rede de distribuição.

Figura 3.12: Tensão no PAC no momento de chaveamento de controle.

Como observado na Figura 3.12 o transitório no momento do ilhamento, apesar da carga RLC, é bastante reduzido. Da mesma forma que o transitório na reconexão é praticamente inexistente. A Figura 3.13 apresenta em detalhes as transições no momento da desconexão (a) e da reconexão (b) da GD e demonstra o bom desempenho do controle proposto através da operação dentro dos limites operativos do sistema de GD.

Figura 3.13: Detalhe do chaveamento do controle. (a) ilhamento e (b) reconexão.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo, verificou-se o procedimento de projeto dos controladores para ambos os modos de operação. Através dos resultados apresentados, concluiu-se que a resposta em frequência para o modo conectado está com uma banda passante adequada. Já para o modo ilhado a utilização do controlador ressonante torna possível adequar a componente fundamental do sinal de tensão. O transitório no chaveamento de controle é reduzido e está dentro dos limites de operação exigido pelas principais normas internacionais. A discussão em torno do efeito do projeto do PLL em técnicas antiilhamento, mostrou uma melhoria considerável no tempo de detecção do ilhamento e na redução do ganho de realimentação positiva das técnicas em frequência.

Capítulo 4

Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída

Denomina-se ilhamento a situação na qual a GD está eletricamente isolada do restante do sistema elétrico de potência, porém parte da rede continua a ser energizada não mais pelo alimentador principal, mas sim pelo próprio sistema de GD. A ocorrência do ilhamento pode levar a uma série de problemas tanto para os operadores envolvidos na manutenção do sistema, quanto para cargas e fontes conectadas ao sistema ilhado (YU, MATSUI e YU, 2010). Dentre os principais problemas, podem ser citados (ROBITAILLE, AGBOSSOU, *et al.*, 2011; RICCIARDI, 2010):

- ✓ A qualidade da energia fornecida aos consumidores na rede ilhada passa a não ser controlada pela concessionária, embora seja a responsável legal por este item;
- ✓ A segurança dos técnicos de manutenção da concessionária, assim como dos consumidores em geral, pode ser colocada em risco devido às áreas que continuam energizadas sem o conhecimento da concessionária;
- ✓ A coordenação do sistema de proteção da rede ilhada pode deixar de operar satisfatoriamente devido à redução dos níveis de curto-circuito na rede ilhada;
- ✓ Equipamentos conectados no sistema ilhado podem ser danificados pelas elevadas correntes provenientes de uma reconexão não sincronizada com a rede.

Nesse contexto, a ideia central de detecção em sistemas de GD é monitorar os parâmetros do sistema e/ou da rede de distribuição e decidir se a contingência ocorreu ou não a partir da mudança destes parâmetros. As técnicas de detecção podem ser classificadas em dois grupos: técnicas remotas e locais.

Técnicas remotas são baseadas na comunicação entre a rede de distribuição e a GD. Embora essas técnicas possuam alta eficiência na detecção, são caracterizadas pelo alto custo de implementação principalmente em aplicações que utilizam conversores de potência, os quais são empregados em maior número (menor potência) em relação a outros tipos de

dispositivos como, por exemplo, as máquinas rotativas. Exemplos de técnicas remotas são: *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e *Power Line Carrier* (PLC).

Diferentemente das técnicas remotas, nas técnicas locais a detecção do ilhamento é identificada pelo próprio sistema GD. Além disso, as técnicas locais são caracterizadas por seu baixo custo e pelo desempenho associada ao tipo de carga. As técnicas locais podem ser classificadas em passivas e ativas.

Técnicas passivas monitoram os parâmetros do sistema continuamente, tal como frequência, magnitude da tensão, distorção harmônica, entre outros. Neste método, ajustando limites de variação aos parâmetros, é possível diferenciar quando a GD está conectada à rede de distribuição. A técnica de proteção por sub/sobre frequência utiliza limites superior e inferior, cujos valores são ajustados entre 59,3 e 60,5 Hz, respectivamente (ESTÉBANEZ, MORENO, *et al.*, 2011; ZEINELDIN e KIRTLEY, 2009). Já na técnica passiva por sub/sobre tensão, os limites são ajustados em 88% e 110% em relação ao valor da tensão nominal, respectivamente (ESTÉBANEZ, MORENO, *et al.*, 2011; ZEINELDIN e KIRTLEY, 2009). Por suas características intrínsecas, métodos passivos possuem grandes regiões de não detecção (NDZ's) (ZEINELDIN e KIRTLEY, 2009). Sendo a NDZ a zona/região de atuação da carga local em que os métodos preventivos de ilhamento não são capazes de detectar a contingência (ESTÉBANEZ, MORENO, *et al.*, 2011).

Por outro lado, as técnicas ativas são projetadas no sentido de desestabilizar a GD no momento em que a condição de ilhamento estiver estabelecida. Estes métodos inserem na saída do conversor de potência, um distúrbio constante de forma a tornar o sistema instável no momento da desconexão (KIM, JEON, *et al.*, 2011). A principal vantagem está associada a sua pequena NDZ quando comparada aos métodos passivos. Porém, os métodos ativos degradam a qualidade da energia fornecida pelo conversor de potência (ESTÉBANEZ, MORENO, *et al.*, 2011).

De forma a exemplificar este grupo de técnicas, na Figura 4.1 é mostrado o efeito da técnica com desvio ativo em frequência, do inglês *Active Frequency Drift* (AFD) proposta por (M. E. ROPP, 1999). Este método distorce ciclicamente a forma de onda da corrente de saída da GD, alterando a frequência da tensão no PAC após a ocorrência do ilhamento. A distorção é dada pelo intervalo de tempo t_z , no qual a corrente permanece nula. Com a ajuda da Figura 4.1, fica evidenciado a limitação deste método associado à distorção injetada no sinal de corrente, a qual é diretamente proporcional ao tempo t_z , além da redução dos índices de qualidade de energia do sistema provocadas pelo método (M. E. ROPP, 1999).

Figura 4.1: Forma de onda da corrente injetada pelo inversor com a técnica AFD.

Dentro da classificação dos métodos ativos, existe um grupo de técnicas que empregam um sinal de realimentação positiva por meio da injeção de um sinal proporcional a variação da tensão ou frequência. Portanto, diferentemente das técnicas ativas convencionais, a injeção por realimentação positiva é dinâmica e depende da variação do sinal de entrada e do ganho proposto para a técnica.

Estes métodos podem ser implementados com algoritmos em frequência e/ou tensão. Algoritmos em frequência injetam um sinal de realimentação positiva no eixo em quadratura da corrente de referência da GD. Sendo que esta injeção de realimentação positiva produz variações na potência não ativa e são observadas como desvios de frequência no PAC. A mesma consideração pode ser estendida para algoritmos em tensão, porém a realimentação positiva é injetada no eixo direto da corrente de referência, sendo os desvios observados na magnitude da tensão no PAC.

Neste capítulo, são abordadas técnicas ativas que utilizam um sinal de realimentação positiva para a detecção de ilhamento, cujo foco é analisar o desempenho das principais técnicas em relação ao tempo de detecção, injeção de distúrbios e validar o projeto do algoritmo de sincronização para métodos em frequência.

4.1 Sandia Frequency Shift - SFS

A técnica *Sandia Frequency Shift* utiliza o desvio de frequência em relação ao valor nominal de forma a realimentar um sinal de realimentação positiva θ_f (ESTÉBANEZ, MORENO, *et al.*, 2011; ROBITAILLE, AGBOSSOU, *et al.*, 2011). O sinal de saída da técnica, θ_f , pode ser representado pela equação (4.1).

$$\theta_f = \frac{\pi}{2} \left(cf_0 + k_{SFS}(\omega_0 - \omega_{pll}) \right) \quad (4.1)$$

Na equação (4.1) ω_{pll} é a frequência da tensão de saída da GD, ω_0 é a frequência no PAC, k_{SFS} é o ganho de realimentação positiva e cf_0 é a “fração inicial de recortamento” do inglês “initial chopping fraction” dado pela equação (4.2), onde T_0 é o período do sinal e t_z é a banda morta, na qual o sinal permanece em zero. A Figura 4.2 representa o esquema proposto para a técnica juntamente com a matriz de transformação do ângulo de fase.

$$cf_0 = \frac{2t_z}{T_0} \quad (4.2)$$

Figura 4.2: Esquema da técnica SFS.

4.2 General Electric Frequency Scheme - GEFS

O método ativo em frequência GEFS, proposto pela *General Electric*, detecta variações na frequência (ω_{pll}) gerando a saída Δi_q , que altera a corrente de referência no eixo

em quadratura (i_{q_ref}) do controlador em corrente (DU, YE, *et al.*, 2010; YE, WALLING, *et al.*, 2004; DU, 2006). A Figura 4.3 demonstra a estrutura do método.

Esta técnica consiste em um filtro *washout*, um ganho proporcional e um filtro passa-baixa de primeira ordem. A função de transferência do método é representada em (4.3).

$$H_{GEFS}(s) = k_{GEFS} \frac{sT_w}{(1 + sT_w)(1 + sT_0)} \quad (4.3)$$

Figura 4.3: Diagrama da técnica GEFS.

Os principais ajustes desta técnica são (YE, 2004):

- ✓ A frequência do filtro *washout*, T_w ;
- ✓ O ganho, k_{GEFS} ;
- ✓ A frequência do filtro passa-baixa de primeira ordem, T_0 .

O filtro *washout* funciona como um passa-alta, sendo os sinais com frequência inferior a $1/T_w$, especialmente os sinais DC, atenuados por este filtro. A combinação do filtro *washout* com o filtro de primeira ordem (passa-baixa) constitui um filtro passa-banda. Já o ajuste do ganho de realimentação positiva k_{GEFS} é o compromisso em garantir uma rápida detecção e a mínima injeção de distúrbios no sistema de controle da GD.

4.3 General Electric Voltage Scheme - GEVS

Semelhante ao método com realimentação positiva em frequência, a técnica com realimentação positiva em tensão, proposta pela *General Electric*, tem como objetivo observar variações na tensão do eixo direto v_d de forma a gerar a saída Δ_{id} , na qual altera a corrente de referência no eixo direto (i_{d_ref}) do controlador em corrente (DU, YE, *et al.*, 2010; YE, WALLING, *et al.*, 2004; DU, 2006). A Figura 4.4 demonstra a estrutura do método.

Semelhante a GEFS, a técnica consiste de um filtro *washout*, um ganho proporcional e um filtro passa-baixa de primeira ordem. A função de transferência do método é representada em (4.4).

$$H_{GEVS}(s) = k_{GEVS} \frac{sT_w}{(1 + sT_w)(1 + sT_0)} \quad (4.4)$$

Figura 4.4: Esquema da técnica GEVS.

Os principais ajustes apresentados em (YE, 2004), aplicados para a técnica em frequência, se aplicam integralmente para o método em tensão. A grande vantagem dos métodos com realimentação positiva em tensão, em relação aos métodos em frequência, é o baixo impacto que sofrem com o aumento do fator de qualidade da carga local (ROBITAILLE, AGBOSSOU, *et al.*, 2011).

4.4 Procedimentos de Ensaios de Técnicas Antiilhamento

Padrão IEEE 1547.1 e IEEE 929

Para validação de sistemas de detecção de ilhamento, habitualmente as referências utilizadas são os padrões IEEE Std 1547 de 2003 e IEEE Std 929 de 2000 (ESTÉBANEZ, MORENO, *et al.*, 2011; KIM, JEON, *et al.*, 2011). O padrão IEEE Std 1547 trata da conexão de sistemas de GD em sistemas elétricos de potência. Especificamente, a série IEEE Std 1547.1 define o tipo, produção e testes para equipamentos (técnicas) antiilhamento, sendo que a série Std 1547.4 de 2011 descreve o projeto, operação e a integração de sistemas de GD ilhados em sistemas de potência. A Tabela 4.1, extraída de (YU, MATSUI e YU, 2010), sumariza os limites de detecção de ilhamento para o padrão IEEE Std 1547.

Tabela 4.1: Tempo de detecção para IEEE Std 1547.

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>Tempo detecção (ciclos)</i>
$f < 59,3$	10
$f > 60,5$	10
<i>Tensão (rms)</i>	<i>Tempo detecção (ciclos)</i>
$V < 60$	10
$60 \leq V < 106$	120
$132 \leq V < 144$	60
$V \geq 144$	10

Já o padrão IEEE Std 929 trata da conexão de painéis fotovoltaicos em redes de distribuição, ao mesmo tempo aborda questões associadas à detecção de ilhamento para estes sistemas. Em termos de detecção, o item 5.1.2 em (IEEE STD 929, 2000) estabelece seis ciclos de operação para detecção de ilhamento em frequência, enquanto em (IEEE STD 1547.1, 2005) é estabelecido dez ciclos. Apesar disso, a principal diferença observada entre os padrões está associada ao fator de qualidade da carga RLC, que emprega valor unitário para o padrão IEEE 1547 e de 2,5 para o IEEE 929. A Tabela 4.2, extraída de (IEEE STD 929, 2000), descreve os limites de detecção de ilhamento para o padrão IEEE 929.

Além disso, outro fator descrito como fundamental em ambos os procedimentos está associado ao fluxo de potência em testes de detecção de ilhamento. Tendo como recomendação a utilização de fluxo de potência próximo à zero entre a GD e a rede de distribuição.

Tabela 4.2: Tempo de detecção para IEEE Std 929.

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>Tempo detecção (ciclos)</i>
$f < 59,3$	6
$f > 60,5$	6
<i>Tensão (rms)</i>	<i>Tempo detecção (ciclos)</i>
$V < 60$	10
$60 \leq V < 106$	120
$106 \leq V \leq 132$	Operação normal
$132 \leq V \leq 165$	120
$V \geq 165$	2

O procedimento executado para as simulações das técnicas antiilhamento é baseado em ambos os padrões (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000). Dentre as principais características deste procedimento podem ser citadas:

- ✓ Frequência de ressonância da carga próxima a da GD. Neste trabalho é utilizada a frequência de 60 Hz, o qual é considerado o caso mais crítico;
- ✓ Fator de qualidade da carga unitário para o padrão (IEEE STD 1547.1, 2005) e 2,5 para (IEEE STD 929, 2000);
- ✓ Fluxo de potência entre a GD e a rede de distribuição próximo a zero;
- ✓ Tempo máximo de detecção conforme Tabela 4.1 e Tabela 4.2.

O circuito definido para validação das técnicas é, da mesma forma, definido em (IEEE STD 1547.1, 2005) e é apresentado na Figura 4.5.

Sendo a resistência R_L , a indutância L_L e a capacitância C_L da carga calculadas da seguinte forma:

$$R_L = \frac{(v_f)^2}{P} \quad (4.5)$$

$$L_L = \frac{(v_f)^2}{2\pi f P Q_f} \quad (4.6)$$

$$C_L = \frac{P Q_f}{2\pi f (v_f)^2} \quad (4.7)$$

O fator de qualidade Q_f e a frequência de ressonância f_r da carga são definidos pelas seguintes equações:

$$Q_f = R_L \sqrt{\frac{C_L}{L_L}} \quad (4.8)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_L L_L}} \quad (4.9)$$

Figura 4.5: Configuração do circuito para teste de ilhamento (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000).

4.5 Resultados de Simulação

A fim de padronizar as análises realizadas neste capítulo, a sequência de eventos após o sistema ser iniciado ocorre da seguinte maneira: a GD é conectada na rede de distribuição e em 0,5 s inicia a transferir potência para o sistema de distribuição, sendo a carga acionada em 2 s e o ilhamento ocorrendo 1 s após a conexão da carga. A simulação é obtida com os parâmetros de carga encontrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros de simulação para diferentes Q_f .

Q_f	R_L	L_L	C_L	f_r
1	2,904 (Ω)	7,7 m(H)	913,4 μ (F)	60 (Hz)
2,5	5,186 (Ω)	5,5 m(H)	1,2787 m(F)	60 (Hz)

4.5.1 Sandia Frequency Shift

Os resultados de simulação para a técnica *Sandia Frequency Shift* são exibidos a partir da Figura 4.6, a qual mostra o resultado para diferentes ganhos k_{SFS} e carga com fator de qualidade unitário. Em 23,1 ms a técnica detecta o ilhamento com ganho de 0,5. Torna-se evidente que na medida em que o ganho aumenta o tempo de detecção é reduzido. Contudo,

para ganhos inferiores a 0,01 a técnica não é capaz de detectar dentro dos padrões exigidos em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000).

Figura 4.6: Frequência no PAC no momento do ilhamento $Q_f = 1$.

Com o objetivo de demonstrar a injeção de distúrbios no sistema de controle da GD, são realizadas manobras na rede de distribuição com três diferentes tipos de carga: RLC, retificador trifásico não controlado e motor de indução. Este tipo de manobra é comum em redes de distribuição e, neste caso, serve para demonstrar o comportamento das técnicas nestes instantes. A variável medida é a relação entre a referência original i_{d_ref} e i_{q_ref} e a soma da referência original e a realimentação positiva, como apresentado na equação (4.10) para o eixo direto. Observa-se que não se tem como objetivo avaliar quais das cargas tem um maior impacto no sistema de controle da GD, mas sim demonstrar o quanto a referência do controlador é alterada com a ação da técnica antiilhamento na ocorrência de entradas de cargas.

$$i_{dq_distúrbio} = \frac{i_{dq_ref}}{(i_{dq_ref} + \text{realimentação positiva})} \quad (4.10)$$

O retificador trifásico, a carga RLC e o motor de indução são acionados em 2 s, 3 s e 4 s, respectivamente. A configuração das cargas utilizadas é encontrada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros de simulação para manobras de carga.

RLC				
Q_f	R_L	L_L	C_L	f_r
2,5	5,186 (Ω)	5,5 m(H)	1,2787 m(F)	60 (Hz)
Retificador trifásico não controlado				
$v_{f(RMS)}$	Δv_c	f_r	R_L	P_L
220 (V)	5 (%)	60 (Hz)	18(Ω)	16 (kW)
Motor de indução				
$v_{f(RMS)}$	$i_{f(RMS)}$	f_r	Nº de fases	
220 (V)	8 (A)	60 (Hz)	3	

Observando o comportamento da Figura 4.7, observa-se que a injeção de distúrbios é mais significativa para ganhos mais elevados, podendo alcançar variação em torno de 2,5% no eixo em quadratura, além de um erro em regime equivalente a 1,6%.

(a)

(b)

Figura 4.7: Injeção de distúrbios no sistema de controle da GD. (a) Eixo direto e (b) Eixo em quadratura.

Além disso, a dependência associada ao tipo de carga, discutida em (ZEINELDIN e SALAMA, 2011), é apresenta na Figura 4.8. Diferentemente da situação anterior na qual o valor do fator de qualidade é unitário e a relação de potência corresponde a $Q_C = Q_L = Q_f = P$, com o valor do fator de qualidade igual a 2,5 a relação passa a ser $Q_C = Q_L = Q_f = 2,5P$, identificando o modo mais crítico de detecção de ilhamento. Para um ganho de realimentação positiva (k_{SFS}) de 0,1, no caso mais crítico ($Q_f = 2,5P$), o tempo de detecção que estava em 63 ms passou a ser de 123 ms. O qual corresponde a 7,4 ciclos, ou seja, acima do especificado pelo padrão IEEE 929. Ganhos de realimentação positiva menores corresponderão a tempos de detecção fora do especificado, ao contrário, ganhos maiores resultarão em tempos menores, contudo com o aumento da injeção de ruídos na GD. A Figura 4.8 descreve a detecção de ilhamento para a situação com carga RLC com fator de qualidade equivalente a 2,5 e ganho de realimentação de 0,1.

Figura 4.8: Freqüência no PAC no momento do ilhamento para $k_{SFS} = 0,1$ e $Q_f = 2,5$.

A proposta para adequação ao tempo de detecção e redução de injeção de distúrbios na GD é a utilização do projeto do algoritmo de sincronização com saturador dinâmico descrito no capítulo 3. Para a mesma configuração da simulação da Figura 4.8, porém com o projeto das constantes do algoritmo PLL utilizando frequência de corte 40% superior (de $\omega_n = 37,7_{Rad/s}$ para $\omega_n = 54,0_{Rad/s}$) é possível adequar a técnica ao Padrão IEEE Std 929. Na Figura 4.9 é possível verificar que o tempo de detecção é reduzido em 70% sem aumentar o ganho da técnica. Com esta configuração, a frequência tem um comportamento decrescente e quem atua é o relé de subfrequência. A parametrização do algoritmo de sincronização é encontrada na Tabela 3.3.

Figura 4.9: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $k_{SFS} = 0,1$ e $Q_f = 2,5$ e PLL com saturador dinâmico.

4.5.2 General Electric Frequency Scheme

Na técnica em frequência da *General Electric* é necessário determinar as frequências dos filtros de entrada. Dados típicos encontrados em (DU, APONTE e NELSON, 2010; DU, YE, *et al.*, 2010) indicam uma banda entre 6,2 – 62 Hz, já em (YE, WALLING, *et al.*, 2004; YE, 2004) é selecionada uma banda entre 3 – 3,5 Hz aproximadamente. Neste trabalho optou-se por uma banda entre 5 – 10 Hz, a fim de caracterizar um sinal mais adequado para detecção de ilhamento. A função de transferência para a técnica é exibida em (4.11).

$$H_{GEFS}(s) = k_{GEFS} \frac{0,2s}{(1 + 0,2s)(1 + 0,1s)} \quad (4.11)$$

O gráfico da Figura 4.10 mostra a frequência no PAC no instante da ocorrência do ilhamento para diferentes ganhos de realimentação positiva e fator de qualidade unitário. O ilhamento detectado de forma mais rápida está relacionado ao ganho de realimentação unitário, em aproximadamente 46,1 ms, sendo que para ganhos de 0,3 e 0,03 os tempos de detecção foram de 266 ms e 598,1 ms, respectivamente. Assim como ocorre na técnica SFS, ganhos maiores resultam em uma detecção mais rápida, contudo não se observa uma proporcionalidade em relação ao aumento do ganho de realimentação e o tempo de detecção.

 Figura 4.10: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 1$.

A Figura 4.11 apresenta o comportamento da frequência para uma carga local com fator de qualidade equivalente a 2,5. Nota-se que o aumento do fator de qualidade implica em um aumento do tempo de detecção quando comparado ao resultado apresentado na Figura 4.10. Contudo, o aumento no tempo de detecção é mais significativo nos ganhos menores da técnica (0,3 e 0,03), já que para o maior ganho simulado (unitário) o aumento no tempo de detecção é de aproximadamente 13%.

 Figura 4.11: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$.

Na técnica GEFS o impacto da realimentação positiva Δ_{iq} no sistema de controle da GD é mais significativo com ganhos elevados, ainda que exista a contribuição do projeto do filtro de entrada da técnica. Em (DU, YE, *et al.*, 2010) a utilização de ganhos de realimentação na ordem de 80 e uma banda passante entre 6,2 – 62 Hz do filtro de entrada

indicam um impacto mais elevado no sistema de controle da GD do que os apresentados na Figura 4.12. A configuração das cargas é encontrada na Tabela 4.4.

Figura 4.12: Injeção de distúrbios na referência de corrente em quadratura.

Como observado nos resultados anteriores, para cargas com fator de qualidade unitário e de 2,5, apenas a técnica com ganho unitário se enquadra nas normas internacionais. Contudo, com a utilização do projeto do algoritmo de sincronização descrito no capítulo 3, o tempo de detecção é alterado substancialmente, reduzindo em aproximadamente 87% o tempo de detecção para a técnica com ganho equivalente a 0,3 e em 50% para a técnica com ganho unitário. Porém, para o ganho equivalente a 0,03 houve redução no tempo de detecção, contudo não suficiente para ajustá-lo aos padrões estabelecidos pelas normas internacionais. A Figura 4.13 indica as variações dos ganhos descritos acima.

Figura 4.13: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$ e PLL com saturador dinâmico.

4.5.3 General Electric Voltage Scheme

A função de transferência para a técnica da *General Electric* em tensão é apresentada na equação (4.12). Da mesma forma que nas simulações anteriores, após o ilhamento ser detectado, o controle não é chaveado, sendo apenas apresentados os sinais de chaveamento dos relés a fim de se observar o efeito das técnicas no sistema de GD. Como o projeto do algoritmo de sincronização não influencia na técnica em tensão, nas simulações mostradas, é utilizado diretamente o controlador do PLL com saturação dinâmica.

$$H_{GEVS}(s) = k_{GEVS} \frac{1s}{(1+s)(1+0,1s)} \quad (4.12)$$

O gráfico da Figura 4.14 ilustra a tensão da GD no PAC no instante da ocorrência do ilhamento. A carga utilizada é do tipo RLC e possui fator de qualidade unitário. O ilhamento é detectado em aproximadamente 10 ciclos para um ganho de realimentação equivalente a 5. Observa-se que a detecção é realizada pelo relé de sobretensão.

Para a técnica em tensão, não é possível correlacionar o ganho de realimentação positiva com o ganho da técnica em frequência, principalmente pela dinâmica da variável de entrada que para a técnica em frequência é a própria frequência e para a técnica em tensão é a tensão no eixo direto.

Figura 4.14: Tensão no PAC no instante do ilhamento para $k_{GEVS} = 5$.

Para o ganho de realimentação positiva equivalente a 8 o tempo de detecção é reduzido em 53% e para um ganho de realimentação igual a 10 a redução é de aproximadamente 63%. A Figura 4.15 demonstra a redução do tempo de detecção para um

ganho igual a 8. Apesar da redução, os resultados da técnica em tensão demonstram um aumento no tempo de detecção quando comparadas com métodos em frequência.

Figura 4.15: Tensão no PAC no instante do ilhamento para $k_{GEVS} = 8$.

A injeção de distúrbios associada a manobras de carga para a técnica em tensão é ilustrada através do gráfico da Figura 4.16. Assim como nas técnicas em frequência, o impacto da realimentação positiva Δ_{id} no sistema de controle da GD é mais significativo para ganhos elevados de realimentação positiva. Além disso, a injeção de distúrbios na técnica em tensão é superior quando comparada com técnicas em frequência. A configuração das cargas é encontrada no Tabela 4.4.

Figura 4.16: Injeção de distúrbios para a técnica GEVS.

4.5.4 Quadro Comparativo

Por fim, é apresentado um quadro comparativo em relação ao tempo de detecção, injeção de distúrbios e ao impacto do algoritmo de sincronização nas técnicas em frequência. A Tabela 4.5 mostra que somente é possível adequar o tempo de detecção em relação às normas internacionais com ganhos elevados. Porém, a Tabela 4.6 demonstra que a injeção de distúrbios é mais elevada para ganhos maiores.

Tabela 4.5: Quadro comparativo em relação ao tempo de detecção.

<i>Técnica</i>	<i>Q_f</i>	<i>Ganho</i>	<i>Filtro (Hz)*</i>	<i>Tempo de detecção (ms)</i>
<i>SFS</i>	<i>1</i>	<i>0,5</i>	<i>-</i>	<i>23,1</i>
		<i>0,1</i>	<i>-</i>	<i>63,0</i>
		<i>0,05</i>	<i>-</i>	<i>138,1</i>
		<i>0,01</i>	<i>-</i>	<i>481,0</i>
	<i>2,5</i>	<i>0,1</i>	<i>-</i>	<i>123,0</i>
<i>GEFS</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>5-10</i>	<i>46,1</i>
		<i>0,3</i>	<i>5-10</i>	<i>266,0</i>
		<i>0,03</i>	<i>5-10</i>	<i>598,1</i>
	<i>2,5</i>	<i>1</i>	<i>5-10</i>	<i>52,1</i>
		<i>0,3</i>	<i>5-10</i>	<i>592,0</i>
<i>GEVS</i>	<i>1</i>	<i>0,03</i>	<i>5-10</i>	<i>709,0</i>
		<i>10</i>	<i>1-10</i>	<i>61,5</i>
		<i>8</i>	<i>1-10</i>	<i>78,7</i>
	<i>5</i>	<i>1-10</i>	<i>166,0</i>	

Tabela 4.6: Quadro comparativo em relação a injeção de distúrbios.

<i>Técnica</i>	<i>Q_f</i>	<i>Ganho</i>	<i>Filtro</i>	<i>I_{dref}(%)**</i>	<i>I_{qref}(%)**</i>
<i>SFS</i>	<i>2,5</i>	<i>0,5</i>	<i>-</i>	<i>1,2</i>	<i>2,7</i>
		<i>0,1</i>	<i>-</i>	<i>0,8</i>	<i>0,35</i>
		<i>0,05</i>	<i>-</i>	<i>0,7</i>	<i>0,2</i>
		<i>0,01</i>	<i>-</i>	<i>0,6</i>	<i>0,06</i>
<i>GEFS</i>	<i>2,5</i>	<i>1</i>	<i>5-10</i>	<i>-</i>	<i>1,2</i>
		<i>0,3</i>	<i>5-10</i>	<i>-</i>	<i>0,3</i>
		<i>0,03</i>	<i>5-10</i>	<i>-</i>	<i>0,05</i>
<i>GEVS</i>	<i>2,5</i>	<i>10</i>	<i>1-10</i>	<i>6</i>	<i>-</i>
		<i>8</i>	<i>1-10</i>	<i>5,1</i>	<i>-</i>
		<i>5</i>	<i>1-10</i>	<i>3,15</i>	<i>-</i>

Finalmente, a Tabela 4.7 resume o impacto do algoritmo de sincronização nas técnicas em frequência.

Tabela 4.7: Quadro comparativo em relação ao impacto do algoritmo de sincronização no tempo de detecção.

<i>Técnica</i>	<i>Q_f</i>	<i>Ganho</i>	<i>Filtro (Hz)*</i>	<i>ω_n (rad/s)</i>	<i>Tempo de detecção (ms)</i>
<i>SFS</i>	2,5	0,1	NA	37,7	123,0
		0,1	NA	54	35,1
		1	5-10	37,7	52,1
			5-10	54	26,1
<i>GEFS</i>	2,5	0,3	5-10	37,7	592,0
			5-10	54	73,1
	0,03		5-10	37,7	709,0
			5-10	54	245,1

* Considerando os valores do filtro passa-alta e passa-baixa.

** Considerando o valor de injeção de distúrbios máximo entre as cargas testadas em (%).

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo realizou-se uma breve introdução a cerca das técnicas antiilhamento. Nele foram discutidas as vantagens e desvantagens de cada método e os motivos pela escolha das técnicas que empregam realimentação positiva. Através de simulações, analisou-se o desempenho das técnicas em relação ao tempo de detecção e injeção de distúrbios no sistema de controle da GD. Os resultados identificam a dependência em relação ao tipo de carga e a necessidade de ganhos elevados para atender as normas internacionais. Além disso, a dificuldade em encontrar um ganho que atenda requisitos de qualidade, principalmente nas técnicas da *General Electric*, na qual é necessário modelar as constantes do filtro de entrada, são considerados pontos desfavoráveis no uso da mesma.

O projeto do algoritmo PLL para as técnicas em frequência mostrou-se eficiente e as simulações sugerem uma significativa redução dos ganhos de realimentação positiva e a adequação das técnicas em relação ao tempo de detecção e, da mesma forma, a redução de injeção de distúrbios.

Por fim, entre as técnicas apresentadas, as técnicas em tensão apresentaram um maior tempo de detecção associada a uma elevada injeção de distúrbios no controle da GD.

Capítulo 5

Identificadores Fuzzy Utilizados para a Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída

Atualmente o desafio em termos de detecção de contingências do tipo ilhamento consiste em encontrar um método que tenha capacidade de detecção sem degradar a qualidade de energia do sistema de GD. Os métodos com realimentação positiva apresentam-se como alternativa em relação à velocidade de detecção, reduzindo as NDZ's anteriormente observadas em técnicas passivas e ativas convencionais. Contudo, a injeção de distúrbios e o consequente impacto nos índices de qualidade de energia ainda estão presentes nas técnicas que empregam realimentação positiva (VAHEDI, NOROOZIAN, *et al.*, 2011). Além disso, o desempenho da técnica associada ao perfil da carga e a forma empírica do ajuste do ganho de realimentação positiva dificultam a sua utilização na prática.

A ideia central apresentada neste capítulo é o desenvolvimento de técnicas antiilhamento, através de conceitos já existentes, que além de possuir uma rápida detecção não insira distúrbios no sistema de controle da GD. Para tanto, a metodologia fuzzy é utilizada na estrutura da técnica de forma a simplificar a modelagem matemática e eliminar etapas de projeto empírico como: ganhos de realimentação positiva, filtros de entrada e saturadores.

Além disso, a necessidade de um especialista, ou seja, de um conhecimento específico do problema associada ao uso de sistemas fuzzy em detecção de ilhamento é, neste caso, delimitado e amplamente estabelecido por padrões nacionais e internacionais, o que simplifica o desenvolvimento e projeto da técnica conferindo uma vantagem na sua utilização.

5.1 Realimentação Positiva Fuzzy em Frequência

No método antiilhamento fuzzy proposto, as variáveis de entrada adotadas são a frequência de saída do algoritmo de sincronização e a derivada da frequência. De acordo com

(5.1), a injeção de um sinal de realimentação I_{q_fuzzy} com a contribuição do desvio da frequência ω_{pll} , altera a referência de corrente no eixo em quadratura e, por conseguinte a frequência no PAC é alterada para além dos limites estabelecidos, fazendo com que a contingência possa ser detectada. A Figura 5.1 ilustra a técnica proposta.

$$u_q = \left(k_{p_i} + \frac{k_{i_i}}{s} \right) (i_{q_ref} - i_q + I_{q_fuzzy}) \quad (5.1)$$

Figura 5.1: Esquema da técnica de detecção em frequência fuzzy.

Com a adição da lógica fuzzy a técnica passa a ter um ganho variável e não apenas um ganho proporcional à entrada. Supondo uma variação hipotética de frequência equivalente ao representado na Figura 5.2 (amarelo). Observa-se que a realimentação positiva de uma técnica tradicional é proporcional a variação de frequência (Δf) e ao ganho de realimentação (k).

Figura 5.2: Resposta da realimentação positiva tradicional com variação de frequência.

Para uma mesma variação de frequência a ilustração do comportamento esperado da saída fuzzy é observada na Figura 5.3. Nota-se que a realimentação fuzzy projetada é próxima de zero para pequenas variações de frequência, porém na medida em que a derivada da frequência continua positiva e o desvio de frequência aumenta, a realimentação fuzzy é

projetada para aumentar o seu valor. Contudo, no momento em que a derivada da frequência passa a ser negativa a técnica zera imediatamente a saída fuzzy. Neste instante, a técnica entende que a frequência está retornando para seu valor nominal e então não se faz necessário realimentar positivamente o sistema.

Figura 5.3: Resposta hipotética da realimentação positiva fuzzy com variação de frequência.

Já para uma condição hipotética de ilhamento, com descrito na Figura 5.4, após a frequência alcançar um patamar elevado (60,4 Hz) e a sua respectiva derivada continuar positiva, a técnica é projetada no sentido de inserir um sinal elevado de realimentação positiva para que o ilhamento seja detectado rapidamente.

Figura 5.4: Resposta da realimentação positiva fuzzy com a ocorrência de ilhamento.

As ilustrações hipotéticas mostram o funcionamento da técnica fuzzy e demonstram a capacidade da técnica em diferenciar a condição de ilhamento em relação a variações na frequência. Esta característica confere a técnica uma maior robustez e segurança na operação da GD conectada na rede de distribuição.

5.2 Realimentação Positiva Fuzzy Híbrida

No método antiilhamento híbrido proposto, as variáveis de entrada são a tensão no eixo direto e a derivada da frequência como ilustra a Figura 5.5. A combinação destas duas variáveis permite, por exemplo, que haja manobras de carga no sistema seguidas de variações na tensão sem a inserção de realimentação positiva no sistema de controle. Ao contrário das técnicas ativas em tensão que inserem realimentação a partir de variações na tensão. O objetivo da utilização da derivada de frequência é evitar que afundamentos de tensão se propaguem para o sistema de controle através da técnica antiilhamento.

Figura 5.5: Esquema da técnica fuzzy híbrida.

Por meio da equação (5.2) a injeção do sinal I_{d_fuzzy} , a partir da variação da magnitude da tensão v_d e da derivada da frequência ω_{pll} , altera a referência de corrente no eixo direto, fazendo com que a magnitude da tensão no PAC seja modificada até alcançar os limites estabelecidos e a contingência possa então, ser detectada.

$$u_d = \left(k_{p_i} + \frac{k_{i_i}}{s} \right) (i_{d_ref} - i_d + I_{d_fuzzy}) \quad (5.2)$$

Semelhante à técnica em frequência, a técnica híbrida é projetada no sentido de diferenciar a condição de ilhamento, o que possibilita reduzir a injeção de distúrbios na operação conectada. A diferença entre a técnica ativa em tensão e a técnica fuzzy híbrida é ilustrada na Figura 5.6 e Figura 5.7.

Supondo uma oscilação hipotética de tensão no sistema de GD equivalente ao da Figura 5.6 (amarelo), a tensão do eixo direto tem um comportamento contínuo e a realimentação da técnica tradicional segue o mesmo comportamento, transferindo a oscilação de tensão ao sistema de controle proporcionalmente ao ganho de realimentação utilizado.

Figura 5.6: Resposta hipotética da realimentação positiva tradicional com variação de tensão no eixo direto.

Supondo agora uma oscilação seguida de um ilhamento no sistema de GD equivalente ao da Figura 5.7. Na primeira oscilação de tensão (limite inferior não atingido), a técnica fuzzy híbrida não encontra variações na frequência e então, o sistema de controle da GD, não é realimentado positivamente. Contudo, com o aparecimento de um desvio de frequência seguido de um desvio de tensão, em um determinado valor de tensão próximo ao que é estabelecido por norma (-88 e 110% do valor nominal de tensão), a técnica começa a realimentar positivamente o sistema. Após a tensão atingir um valor mais elevado, a técnica inicia a inserir uma realimentação elevada no sentido de intensificar a detecção de ilhamento.

Figura 5.7: Resposta da realimentação positiva fuzzy híbrida.

Para ambas as ilustrações das técnicas propostas fuzzy em frequência e fuzzy híbrida, o objetivo é demonstrar seu funcionamento em relação às técnicas tradicionais e facilitar o entendimento na etapa de projeto das técnicas fuzzy.

5.3 Projeto das Técnicas Fuzzy

O desenvolvimento das técnicas fuzzy pode ser dividido em três etapas: fuzzificação das entradas, processo de inferência e defuzzificação da saída. A fuzzificação é o mapeamento das entradas na forma de conjuntos fuzzy. Tais conjuntos são representados neste trabalho por termos linguísticos, tais como frequência alta, média e baixa. Já o procedimento de inferência fuzzy é responsável por, a partir dos valores de entrada fuzzificados, inferir o valor de saída fuzzificado correspondente. Por fim, a defuzzificação é usada para associar um valor numérico ao conjunto fuzzy de saída, o qual é obtido através do procedimento de inferência fuzzy. Tal valor numérico representa o quanto o sistema de GD está ilhado e é o sinal de saída da técnica fuzzy, o qual é análogo ao sinal de realimentação positiva dos métodos já apresentados neste trabalho.

A fuzzificação das entradas é realizada através da observação do comportamento das variáveis para os eventos mais críticos na GD e rede de distribuição. Como descrito em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000), o uso de cargas com fator de qualidade entre 1 e 2,5 e a potência fornecida pela GD próximo do valor consumido pela carga local são usados como eventos críticos de forma a parametrizar os intervalos das funções de pertinência da técnica.

A função de pertinência da saída de ambas as técnicas fuzzy está graficamente ilustrada na Figura 5.8, na qual a variável linguística pequena (P) está associada à realimentação positiva próxima a zero, negativa grande (NG) e positiva grande (PG) constitui uma saída elevada e negativa média (NM) e positiva média (PM) a uma realimentação positiva média. As funções de pertinência foram distribuídas em um universo de discurso cujo intervalo está entre $[-1,1]$, devido à importância de se ter um ponto geométrico em torno de zero para representar a região de equilíbrio do sistema. Além disso, o processo de inferência das regras fuzzy é utilizado o método de Mamdani.

Figura 5.8: Função de pertinência para a saída da técnica fuzzy.

Para a técnica fuzzy híbrida, a função de pertinência é ilustrada na Figura 5.9. A variável linguística tensão pequena (TP) representa o sistema quando este está estável e, portanto, a saída fuzzy está relacionada com a variável linguística pequena (P), independentemente do comportamento da derivada da frequência. Contudo, quando a tensão do eixo direto está relacionada à variável linguística tensão negativa grande (TNG) ou tensão positiva grande (TPG) e a derivada da frequência é pequena (dFP) a saída também é pequena (P). Esta forma garante não haver a injeção de distúrbios no momento de manobras de carga, que em geral produzem afundamentos de tensão.

Figura 5.9: Função de pertinência para a tensão no eixo direto (a) e derivada da frequência (b).

Ainda, caso a derivada da frequência esteja associada à variável linguística negativa grande (dFNG) e a tensão for (TNG) a realimentação positiva é (NG) significando que existem variações na frequência e na tensão em relação ao seu valor nominal. Da mesma forma, se a derivada da frequência estiver vinculada a variável linguística positiva grande (dFPG) e a tensão for (TNG) a realimentação positiva é (NG), significando variações na frequência e na tensão em relação ao seu valor nominal. O resumo das regras fuzzy está listado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Regras fuzzy para técnica híbrida.

<i>Tensão</i>	<i>Derivada da frequência</i>		
	dFNG	dFP	dFPG
TNG	NG	P	NG
TP	P	P	P
TPG	PG	P	PG

A superfície que representa a técnica fuzzy antiilhamento híbrida é apresentada na Figura 5.10.

Figura 5.10: Superfície da técnica fuzzy híbrida.

O projeto da técnica fuzzy em frequência segue raciocínio semelhante ao apresentado anteriormente, no entanto a diferença reside no perfil das variáveis de entrada.

Em termos de função de pertinência, a técnica em frequência pode ser representada pela Figura 5.11. A variável linguística frequência pequena (FP) representa o sistema de GD operando de forma estável e, independentemente do valor da derivada da frequência, aciona a saída (P). Contudo, se a variável linguística for frequência negativa grande (FNG) e, ao mesmo tempo, a derivada for pequena (dFP) então a saída é (NM). Entretanto, se a derivada for negativa grande (dFNG) sinaliza que o sinal de frequência está fortemente se afastando do seu valor nominal e caracteriza um possível ilhamento, com isso a saída é (NG). Ao contrário, caso a derivada seja positiva (dFPG) caracteriza um pequeno distúrbio e significa que o sinal está retornando ao seu valor nominal e, portanto, a saída (P) é a mais adequada no sentido de não desestabilizar o sistema. O mesmo raciocínio é utilizado quando a frequência for positiva grande (FPG).

Figura 5.11: Função de pertinência para técnica em frequência (a) e derivada da frequência (b).

Com o objetivo de exemplificar as regras da técnica fuzzy em frequência é mostrada a superfície da técnica na Figura 5.12.

Figura 5.12: Superfície da técnica em frequência fuzzy.

A defuzzificação, para ambas as técnicas, é realizada através do método centro de área. Este método mostrou-se mais adequado no sentido de buscar uma região de equilíbrio na qual se tenha uma baixa injeção de distúrbios na rede de distribuição. A equação (5.3) representa o método:

$$\text{Centro_de_área} = i_{dq_fuzzy} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot s_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (5.3)$$

Onde μ_i é o grau de pertinência, s_i representa os valores do universo de discurso e n é o número de elementos discretizados.

5.4 Resultados de Simulação

A padronização para as simulações das técnicas fuzzy é semelhante à utilizada nas técnicas tradicionais, contudo, depois de detectado o ilhamento, o sistema de controle é alterado para o modo ilhado de forma a operar isolado. Além disso, já é empregado o projeto do algoritmo de sincronização com saturador dinâmico para as simulações apresentadas. Os parâmetros da carga RLC seguem conforme a Tabela 4.3.

5.4.1 Realimentação Positiva Fuzzy em Frequência

A detecção de ilhamento através da técnica fuzzy é representada na Figura 5.13. A simulação é realizada com carga RLC de fator de qualidade unitário. Após a ocorrência do ilhamento, a técnica faz com que o relé de sobre frequência atue em 24,1 ms e a partir de então a GD passa a trabalhar com o controle no modo ilhado. Em 4 s a rede de distribuição é reconectada e o controle da GD é alterado para o modo conectado.

Uma das contribuições na utilização de técnicas fuzzy é trazida na Figura 5.14 e em detalhes na Figura 5.15. Este resultado demonstra a injeção de distúrbios no sistema de controle da GD com entrada de carga e ocorrência de ilhamento. No instante de entrada de carga, a técnica injeta um sinal de realimentação positiva na ordem de $3,5 \cdot 10^{-17}$, ou seja, insuficiente para causar qualquer dano ao sistema de controle da GD. Naturalmente, após o ilhamento, que ocorre em 3 s, há um incremento na saída da técnica fuzzy no sentido de acelerar a detecção da contingência.

Figura 5.13: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 1$.

 Figura 5.14: Injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy para $Q_f = 1$.

 Figura 5.15: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy $Q_f = 1$.

Elevando o fator de qualidade da carga local para 2,5, o tempo de resposta da técnica fuzzy torna-se superior em relação à resposta utilizando cargas com fator de qualidade unitário, justamente pela entrada da técnica em frequência ser impactada pelo perfil da carga (ZEINELDIN e SALAMA, 2011). Apesar disso, o tempo de detecção está dentro dos padrões estabelecidos. A Figura 5.16 descreve a condição mencionada acima e a Figura 5.17 detalha esta condição.

 Figura 5.16: Frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$.

 Figura 5.17: Detalhe da frequência no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$.

Ainda, com fator de qualidade em 2,5 é possível observar que a injeção de distúrbios na GD pode ser considerada inexistente. Na Figura 5.19, observa-se que na entrada de carga, a realimentação positiva está em torno de $3,8 \cdot 10^{-17}$, ficando evidente a inexistência de injeção de distúrbios com a utilização de técnicas fuzzy. A Figura 5.18 exibe a realimentação positiva fuzzy em frequência no instante da ocorrência do ilhamento.

 Figura 5.18: Injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy $Q_f = 2,5$.

 Figura 5.19: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica em frequência fuzzy $Q_f = 2,5$.

5.4.2 Realimentação Positiva Fuzzy Híbrida

Sendo estabelecida em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000), a operação estável em relação à amplitude da tensão, tem seus limites delimitados entre 88% e 110% do valor da tensão nominal medida no PAC. Dada esta condição, a detecção de ilhamento através da técnica fuzzy híbrida é representada na Figura 5.20. Utilizando carga local do tipo RLC com fator de qualidade unitário, após a ocorrência do ilhamento em 3 s, a técnica atua de forma que o relé de sub tensão detecte em 61,4 ms a condição de ilhamento. Após a ocorrência da contingência, a GD opera no modo ilhado e em 4 s a rede de distribuição é conectada e o controle da GD é alterado para o modo conectado.

Semelhante ao ocorrido na técnica fuzzy em frequência, a injeção de realimentação positiva no sistema de controle da GD, na operação conectada, continua inexistente na técnica híbrida. No instante de entrada de carga, a técnica injeta um sinal de realimentação positiva na ordem de $3,9 \cdot 10^{-17}$. Assim como nas técnicas em frequência, tal valor é insuficiente para causar qualquer dano ao sistema de controle da GD. A Figura 5.21 ilustra a realimentação positiva no instante da ocorrência do ilhamento e a Figura 5.22 demonstra a injeção de realimentação no instante de entrada de carga.

Figura 5.20: Tensão no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 1$.

Figura 5.21: Injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 1$.

 Figura 5.22: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 1$.

Já para a carga local com fator de qualidade equivalente a 2,5, o tempo de detecção da técnica fuzzy aumenta cerca de 15% em relação a simulação utilizando carga com fator de qualidade unitário. Além disso, o transitório no momento da desconexão da rede de distribuição é superior quando comparado à simulação com fator de qualidade unitário. Apesar disso, o relé de sub tensão atua em 70,7 ms e está dentro dos padrões exigidos em (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000). O aumento no tempo de detecção está associado à utilização da derivada da frequência que, como já apresentado neste trabalho, apresenta um desempenho inferior com o aumento do fator de qualidade da carga. A Figura 5.23 ilustra o comportamento descrito acima.

 Figura 5.23: Tensão no PAC no momento do ilhamento para $Q_f = 2,5$.

Novamente, a vantagem da utilização da técnica fuzzy híbrida em relação à tradicional (em tensão) está ilustrada na Figura 5.25. Observa-se que mesmo com entrada de carga local com fator de qualidade equivalente a 2,5, a realimentação positiva está em torno de $3,8 \cdot 10^{-17}$, evidenciando a baixa injeção de distúrbios com a utilização de técnicas fuzzy. A Figura 5.24 exibe a realimentação positiva fuzzy híbrida no instante da ocorrência do ilhamento.

Figura 5.24: Injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 2,5$.

Figura 5.25: Detalhe da injeção de distúrbios para a técnica fuzzy híbrida $Q_f = 2,5$.

5.4.3 Quadro Comparativo

O quadro comparativo em relação ao tempo de detecção apresentado na Tabela 5.2 demonstra o baixo impacto do perfil de carga nas técnicas propostas. Sendo que na Tabela 5.3 é exibida a comparação de injeção de distúrbios para as técnicas clássicas e as propostas. Observa-se que ambas as técnicas fuzzy reduzem significativamente a injeção de distúrbios quando comparadas com as técnicas clássicas.

Tabela 5.2: Quadro comparativo em relação ao tempo de detecção.

<i>Técnica</i>	Q_f	<i>Ganho</i>	<i>Filtro (Hz)*</i>	<i>Tempo de detecção (ms)</i>
<i>SFS</i>	<i>1</i>	<i>0,5</i>	<i>-</i>	<i>23,1</i>
		<i>0,1</i>	<i>-</i>	<i>63,0</i>
		<i>0,05</i>	<i>-</i>	<i>138,1</i>
		<i>0,01</i>	<i>-</i>	<i>481,0</i>
	<i>2,5</i>	<i>0,1</i>	<i>-</i>	<i>123,0</i>
<i>GEFS</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>5-10</i>	<i>46,1</i>
		<i>0,3</i>	<i>5-10</i>	<i>266,0</i>
		<i>0,03</i>	<i>5-10</i>	<i>598,1</i>
	<i>2,5</i>	<i>1</i>	<i>5-10</i>	<i>52,1</i>
		<i>0,3</i>	<i>5-10</i>	<i>592,0</i>
<i>GEVS</i>	<i>1</i>	<i>0,03</i>	<i>5-10</i>	<i>709,0</i>
		<i>10</i>	<i>1-10</i>	<i>61,5</i>
		<i>8</i>	<i>1-10</i>	<i>78,7</i>
		<i>5</i>	<i>1-10</i>	<i>166,0</i>
<i>Fuzzy Frequência</i>	<i>1</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>24,1</i>
	<i>2,5</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>34,1</i>
<i>Fuzzy Híbrida</i>	<i>1</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>61,4</i>
	<i>2,5</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>70,7</i>

Tabela 5.3: Quadro comparativo em relação a injeção de distúrbios.

<i>Técnica</i>	Q_f	<i>Ganho</i>	<i>Filtro*</i>	$I_{dref}(\%)^{**}$	$I_{qref}(\%)^{**}$
<i>SFS</i>	<i>2,5</i>	<i>0,5</i>	<i>-</i>	<i>1,2</i>	<i>2,7</i>
		<i>0,1</i>	<i>-</i>	<i>0,8</i>	<i>0,35</i>
		<i>0,05</i>	<i>-</i>	<i>0,7</i>	<i>0,2</i>
		<i>0,01</i>	<i>-</i>	<i>0,6</i>	<i>0,06</i>
<i>GEFS</i>	<i>2,5</i>	<i>1</i>	<i>5-10</i>	<i>-</i>	<i>1,2</i>
		<i>0,3</i>	<i>5-10</i>	<i>-</i>	<i>0,3</i>
		<i>0,03</i>	<i>5-10</i>	<i>-</i>	<i>0,05</i>
<i>GEVS</i>	<i>2,5</i>	<i>10</i>	<i>1-10</i>	<i>6</i>	<i>-</i>
		<i>8</i>	<i>1-10</i>	<i>5,1</i>	<i>-</i>
		<i>5</i>	<i>1-10</i>	<i>3,15</i>	<i>-</i>
<i>Fuzzy Frequência</i>	<i>1</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	$8,5 \cdot 10^{-15}$
	<i>2,5</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	$9,3 \cdot 10^{-15}$
<i>Fuzzy Híbrida</i>	<i>1</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	$9,1 \cdot 10^{-15}$	<i>-</i>
	<i>2,5</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	$8,9 \cdot 10^{-15}$	<i>-</i>

* Considerando os valores do filtro passa-alta e passa-baixa.

** Considerando o valor de injeção de distúrbios máximo entre as cargas testadas em (%).

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se a proposta de detecção utilizando técnicas antiilhamento fuzzy. O projeto é descrito de forma a reduzir a injeção de distúrbios no sistema de controle da GD com o compromisso em relação ao tempo de detecção. Quando a técnica fuzzy em frequência é comparada com os métodos tradicionais há um ganho significativo em relação à injeção de distúrbios. Já a técnica fuzzy híbrida, além de não injetar distúrbios no sistema de controle, apresenta um desempenho superior em termos de tempo de detecção em relação às tradicionais.

Outra vantagem importante associado às técnicas fuzzy está ligado à eliminação da modelagem de ganhos de realimentação positiva e constantes inerentes às técnicas tradicionais.

Capítulo 6

Protótipo Experimental do Sistema de Geração Distribuída

Este capítulo é destinado à explanação do protótipo experimental. Nesta seção apresenta-se a montagem do sistema de GD, do conversor de potência e dos elementos passivos tais como indutores e capacitores. A plataforma eZdspTM F28335 da *Texas Instruments* é utilizada para inserção das leis de controle descritas nos capítulos 2 e 3, das técnicas tradicionais apresentadas no capítulo 4 e das técnicas fuzzy propostas para detecção de ilhamento, assim como para a aquisição de sinais.

6.1 Objetivos do Protótipo Experimental

De forma geral, o objetivo do protótipo é validar a proposta de detecção de ilhamento através da realimentação positiva fuzzy comparando-a com os métodos clássicos existentes.

Os objetivos específicos estão listados abaixo:

- ✓ Implementar e analisar o desempenho de técnicas de detecção de ilhamento ativas com realimentação positiva;
- ✓ Implementar e avaliar o desempenho das técnicas de detecção de ilhamento fuzzy propostas nessa dissertação;
- ✓ Examinar a transição da operação conectado-ilhado e ilhado-conectado;
- ✓ Confrontar os resultados obtidos com os padrões IEEE Std 1547 de 2003 e IEEE Std 929 de 2000.

6.2 Descrição do Protótipo Experimental

O sistema de GD desenvolvido em bancada é inicializado isolado da rede, operando com o controle no modo ilhado com referência fixa não sincronizada com a rede de

distribuição. A “Chave antiilhamento”, conforme Figura 6.2, é comandada através do DSP pela técnica antiilhamento e a “Chave de conexão rede” é comandada manualmente de forma a emular a contingência e/ou o retorno da rede.

Partindo isolado da rede, após o fechamento da “Chave de conexão rede”, a referência do controle ilhado é chaveada passando a estar sincronizada com a rede de distribuição através da medição de “ v_{rede_ab} ” conforme Figura 6.2. Neste momento, a GD está sincronizada, porém não conectada a rede. A Figura 6.1 apresenta o algoritmo utilizado para fechar a “Chave antiilhamento” e alterar o modo de operação da GD.

Figura 6.1: Algoritmo utilizado para o chaveamento da operação do sistema de GD.

Ao contrário, caso a GD esteja conectada na rede de distribuição e ocorra uma contingência, ou seja, a abertura da “Chave de conexão rede”, é previsto que a técnica antiilhamento atue no sentido de detectar tal contingência abrindo a “Chave antiilhamento” e alterando o modo de operação da GD.

Figura 6.2: Descrição do protótipo experimental.

As leituras de corrente i_{conv_ab} são realizadas com os próprios sensores interno ao conversor de potência e são posicionados antes da indutância L_{conv} . Já as medidas das tensões de saída da GD v_a , v_b e v_c são medidas sobre o filtro R_f e C_f , sendo a leitura da tensão para sincronização v_{rede_ab} posicionada após a “Chave antiilhamento” e a indutância da rede L_{rede} .

Na Tabela 6.1 são apresentadas as configurações das variáveis utilizadas no sistema experimental da GD.

Tabela 6.1: Parâmetros do sistema experimental: variáveis.

Variáveis	Valor
Corrente nominal	5 (A)
Tensão nominal (Linha-Linha)	110 V
Tensão CC	300 (V)
Frequência da rede	60 (Hz)
Relação do transformador	2:1
Taxa de amostragem	12000 (Hz)

Já a Tabela 6.2 apresenta os valores e descrição dos componentes utilizados no sistema experimental da GD.

Tabela 6.2: Parâmetros do sistema experimental: componentes.

<i>Componentes</i>	<i>Valor / Descrição</i>
L_{conv}	2 (mf)
R_f	10 (Ω)
C_f	10 (μF)
L_{rede}	5 (mf)
Chave antiilhamento	TRV4-L12V 40A Tianbo
Chave de conexão rede	Disjuntor termomagnético (15 A)

A Figura 6.3 detalha o sistema desenvolvido experimentalmente, mostrando a disposição dos componentes passivos, transformador da rede de distribuição, conversor de potência, chaves para conexão com a rede e etc.

Figura 6.3: Visão geral do protótipo construído.

6.3 Operação Conectada - Protótipo Experimental

O projeto do controlador de corrente para o modo conectado é idêntico ao realizado em simulação na seção 3.1. A frequência de corte utilizada no projeto é reduzida de 1000 Hz para 800 Hz em relação à utilizada em simulação, tendo em vista o aparecimento de

oscilações e a atuação intermitentemente da proteção do DSP em frequências mais elevadas. Na Tabela 6.3 são apresentados os parâmetros utilizados para o projeto do controlador de corrente no modo conectado.

Tabela 6.3: Parâmetros do sistema experimental – PI corrente.

$F_{CLv}(Hz)$	$mfv(^{\circ})$	$V_{CC}(V)$	$L_{conv}(mH)$	H_i	k_{i_i}	k_{p_i}
800	70	300	2	0,1	1226,2	0,6702

6.4 Operação Ilhada - Protótipo Experimental

O projeto realizado para encontrar as constantes do controlador neste modo de operação é análogo ao apresentado na seção 3.2. Contudo, em simulação utiliza-se uma estrutura P+R com ressonante sintonizado na fundamental (60 Hz), 3^a, 5^a, 7^a e 11^a harmônicos, porém no protótipo opta-se pela utilização da estrutura P+R com ressonante apenas na fundamental (60 Hz). Além disso, da mesma forma que na operação conectada, a frequência de corte empregada no projeto dos controladores é reduzida em 20% em relação à utilizada em simulação.

Na Tabela 3.2 são apresentados os parâmetros utilizados para o projeto do controlador de tensão no modo ilhado.

Tabela 6.4: Parâmetros do sistema experimental – P + R de tensão.

$F_{CLv}(Hz)$	$mfv(^{\circ})$	$V_{CC}(V)$	$C_{conv}(\mu F)$	H_v	k_{i_v}	k_{p_v}
80	70	300	10	0,005567	18,3935	0,1005

No desenvolvimento do controle em tensão, observou-se um desempenho superior do controlador ressonante quando adicionado a variável (ω_c) na equação (6.1). O melhor desempenho é alcançado através do ajuste da banda de frequência, já que (ω_c) fornece a largura de banda do controlador ressonante. A banda de frequência deve ser escolhida favoravelmente de forma que a mesma não seja excessivamente aberta, de forma a absorver muitos ruídos, ou estreita demais, de forma que não realize o controle desejado. Em (6.2) é apresentada a forma utilizada no protótipo.

$$\frac{y(s)}{e(s)} = k_{i_v} \frac{2s}{s^2 + (\omega_0)^2} \quad (6.1)$$

$$\frac{y(s)}{e(s)} = k_{i_v} \frac{(2\omega_c)s}{s^2 + (2\omega_c)s + (\omega_0)^2} \quad (6.2)$$

A equação descrita no domínio da frequência (s) necessita ser transformada para o domínio discreto (z) e na forma de equação de diferenças para que seja possível processá-las no DSP. Aplicando o produto cruzado em (6.2), tem-se:

$$2k_{i_v}\omega_c \dot{e}(s) = \ddot{y}(s) + 2\omega_c \dot{y}(s)s + \omega_0^2 y(s) \quad (6.3)$$

Considerando que a transformação bilinear é realizada de acordo com a equação (6.4).

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (6.4)$$

Utilizando a equação (6.3) e aplicando a definição (6.4) obtêm-se os índices da função de transferência discreta do controlador ressonante (6.5).

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{2c_1 k_{i_v} \omega_c}{c_1^2 + 2c_1 \omega_c + \omega_0^2} \\ b_1 &= 0 \\ b_2 &= -\frac{2c_1 k_{i_v} \omega_c}{c_1^2 + 2c_1 \omega_c + \omega_0^2} \\ a_0 &= \frac{2c_1 k_{i_v} \omega_c}{c_1^2 + 2c_1 \omega_c + \omega_0^2} \\ a_1 &= 0 \\ a_2 &= -\frac{2c_1 k_{i_v} \omega_c}{c_1^2 + 2c_1 \omega_c + \omega_0^2} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Onde c_1 é dado por:

$$c_1 = \frac{2}{T_s} \quad (6.6)$$

A equação a diferenças que corresponde ao controlador ressonante pode ser dada por:

$$y[k] = b_0 e[k] + b_1 e[k - 1] + b_2 e[k - 2] - a_1 e[k - 1] - a_2 e[k - 2] \quad (6.7)$$

Para o controle em corrente, as constantes do controlador são idênticas às utilizadas para a operação no modo conectado e são dadas pela Tabela 6.3.

6.5 Técnicas Antiilhamento Fuzzy - Algoritmo

As técnicas de detecção de ilhamento propostas foram implementadas na forma matricial no DSP F28335, sendo cada técnica composta de uma matriz contendo 400 pontos que representam o valor de realimentação positiva fuzzy associada às variáveis de entrada. Uma ilustração da estrutura da matriz para técnica em frequência pode ser observada na Figura 6.4.

Figura 6.4: Matriz de saída das técnicas fuzzy utilizada no DSP.

A obtenção do valor de realimentação positiva é realizada através do cálculo dos índices do elemento da matriz. Para o cálculo dos índices é necessária a leitura da frequência e de sua respectiva derivada, dos limites de operação para cada variável e do tamanho da matriz. A equação (6.8) apresenta a equação que calcula os índices para encontrar o elemento da matriz.

$$\text{Índice} = \frac{(\text{tamanho}_{\text{matriz}} - 1)(\text{valor}_{\text{medido}} - \text{limite}_{\text{inferior}})}{(\text{limite}_{\text{superior}} - \text{limite}_{\text{inferior}})} \quad (6.8)$$

Nesta estrutura, o índice calculado através da frequência representa a posição da linha onde o elemento se encontra e o calculado, utilizando a derivada da frequência, representa a coluna onde está o elemento da matriz.

6.6 Filtro de saída

A configuração do filtro de saída da GD é alterada conforme o seu modo de operação, sendo um filtro *LC* para o sistema ilhado e *LCL* para o sistema conectado, desde que considerada a indutância de acoplamento utilizada entre o PAC e o transformador.

Para ambos os modos de operação, a escolha do capacitor é um compromisso entre a energia não ativa que flui pelo capacitor e a atenuação de harmônicos. A escolha por um capacitor de 10 μF está associada ao fato de se buscar a mínima defasagem no PAC. Por outro lado, a indutância de 2 mH é projetada considerando, principalmente, o *ripple* de corrente.

Além disso, em (LISERRE, BLAABJERG e HANSEN, 2005; GABE, 2008) recomenda-se que a frequência de ressonância do filtro seja posicionada em um intervalo de frequências dado por:

$$10f_{rede} \leq f_{ress} \leq 0,5f_s \quad (6.9)$$

Sendo f_{rede} a frequência nominal da rede e f_s a frequência de comutação do inversor.

A frequência de ressonância no modo conectado, considerando o filtro *LCL*, é dada pela equação (6.10).

$$f_{ress} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{rede} + L_{conv}}{L_{rede}L_{conv}C_f}} \quad (6.10)$$

Localizando f_{ress} neste intervalo de frequência, evita-se a excitação dos modos oscilatórios do filtro pela interação com os harmônicos de alta frequência gerados pela GD ou com os harmônicos de baixa ordem presentes na rede (LISERRE, BLAABJERG e HANSEN, 2005; GABE, 2008). A frequência de ressonância calculada através da equação (6.10) tem valor equivalente a 1331,6 Hz e satisfaz a condição dada em (6.9).

6.7 Resultados Experimentais – Operação da GD

Inicialmente, são apresentados os resultados experimentais para a GD operando ilhada e, posteriormente são exibidos os resultados para sincronização e conexão com a rede. Além disso, são mostrados os resultados para o fluxo de potência entre a GD e a rede de distribuição e os resultados associados ao chaveamento do controle juntamente com os resultados de detecção de ilhamento.

O impacto do algoritmo de sincronização é demonstrado de forma semelhante ao da simulação, com aumento da frequência de corte para o projeto do controlador e aplicando a saturação dinâmica no algoritmo PLL.

Ressalta-se que não se tem como objetivo correlacionar diretamente os resultados experimentais com os de simulação, pois além de apresentarem potências diferentes, a carga RLC utilizada em simulação foi substituída por um conjunto de lâmpadas para emular a carga local no sistema experimental.

6.7.1 Operação Ilhada

As tensões e correntes de fase produzidas pelo sistema de GD estão representadas pela Figura 6.5. Tais tensões e correntes estão equilibradas e defasadas de 120° . Utilizou-se um conjunto de lâmpadas com potência trifásica equivalente a 300 W para a validação do sistema.

Figura 6.5: Tensões e correntes produzidas pela GD. Laranja: tensão da fase “a” (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).

A fim de verificar o controle de tensão, um degrau de carga é imposto ao sistema de GD. A Figura 6.6 demonstra a entrada e saída da carga local. Sendo que na Figura 6.7, a GD alimenta uma carga trifásica de 300 W e em um dado momento é adicionada uma carga adicional de 300 W. Na Figura 6.8 é ilustrada a desconexão da carga local. Observa-se que para ambas as manobras tanto a tensão quanto a corrente apresentam uma reduzida distorção.

Figura 6.6: Entrada e saída de carga no PAC. Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).

Figura 6.7: Entrada de carga no PAC. Laranja: tensão da fase “a” (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).

Figura 6.8: Desconexão de carga no PAC. Laranja: tensão da fase “a” (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” (5A/div). Verde: tensão da fase “b” (40V/div). Azul: corrente da fase “b” (5A/div).

6.7.2 Sincronização com a Rede de Distribuição

A sincronização entre a GD e a rede de distribuição está ilustrada na Figura 6.9 e Figura 6.10. Na primeira ilustração, é possível observar a operação ilhada da GD e o instante em que a GD detecta a entrada da rede e executa o algoritmo proposto na Figura 6.1. Observa-se que em aproximadamente cinco ciclos após o algoritmo de sincronização atuar, a GD está sincronizada com a rede. Ressalta-se que neste momento a GD está sincronizada, porém não conectada na a rede de distribuição. A oscilação de tensão da GD apresenta na Figura 6.9 é decorrente do chaveamento da referência que passa a utilizar a saída do PLL como referência.

Já na Figura 6.10, após o sistema de controle validar a tensão e frequência da rede (Figura 6.1), a referência do controle na operação ilhada é chaveada e o algoritmo PLL sincroniza a GD com a rede de distribuição. O chaveamento da referência pode ser efetuado ao mesmo tempo da entrada da rede, porém é adotado este período de verificação das variáveis da rede para que não ocorra uma conexão com oscilações na rede e que a manobra ofereça segurança ao usuário que opera o protótipo experimental.

Figura 6.9: Sincronização da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).

Figura 6.10: Detalhe da sincronização da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).

6.7.3 Conexão com a Rede de Distribuição

Após a sincronização com a rede de distribuição, a GD é conectada na rede como está ilustrado na Figura 6.11. No momento da conexão, a GD continua entregando potência no PAC, contudo como neste caso a potência da carga local consome toda a potência fornecida pela GD, a corrente absorvida e/ou injetada na rede (azul) é próximo de zero.

O momento da conexão é demonstrado na Figura 6.12. Observa-se que a conexão com a rede é isenta de afundamentos de tensão, apenas no exato momento do chaveamento da “Chave antiilhamento” nota-se um distúrbio na tensão e corrente da GD associado ao próprio chaveamento do relé.

Destaca-se que a conexão na rede implica no chaveamento do controle da GD. Contudo, através dos resultados apresentados, nota-se que a proposta empregada para alterar a operação não afeta o desempenho da GD na transição.

Figura 6.11: Conexão da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).

Figura 6.12: Momento da conexão da GD com a rede de distribuição. Laranja: tensão da fase “a” da GD (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div).

6.7.4 Fluxo de potência entre GD e Rede de Distribuição

O fluxo de potência é ilustrado com a carga local absorvendo toda a potência fornecida pela GD. Em um dado instante, é retirada em rampa a potência injetada no PAC por parte da GD e, ao mesmo tempo, a rede de distribuição começa a injetar o restante de potência solicitada pela carga local. Após 2 s a injeção de potência da GD é próxima de zero e a rede é quem está suprindo a carga local.

A Figura 6.13 ilustra o decréscimo em rampa de corrente da GD e o acréscimo em rampa de corrente da rede no PAC. Já a Figura 6.14 apresenta em detalhes a injeção de corrente da GD no PAC, enquanto a Figura 6.15 ilustra a injeção de corrente por parte da rede de distribuição no PAC.

Figura 6.13: Fluxo de potência da GD com a rede de distribuição. Verde: tensão da fase “a” da rede (100V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (10A/div).

Figura 6.14: Fluxo de potência da GD com a rede de distribuição (Injeção de corrente da GD). Verde: tensão da fase “a” da rede (80V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (20A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (20A/div).

Figura 6.15: Fluxo de potência da GD com a rede de distribuição (Injeção de corrente da rede de distribuição). Verde: tensão da fase “a” da rede (80V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (20A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (20A/div).

6.8 Resultados Experimentais – Detecção de ilhamento

Inicialmente, são apresentados os resultados experimentais para a GD operando com fluxo de potência com a rede. A ideia central deste resultado é demonstrar que havendo fluxo de potência entre a rede e a GD, a detecção de ilhamento é realizada diretamente por técnicas passivas, não sendo necessário o uso de técnicas ativas e/ou fuzzy.

A Figura 6.16 ilustra a transição do sistema de GD do modo ilhado para conectado e conectado para ilhado. Neste resultado é apresentado o sinal do relé, o qual é comandado pelo DSP e ilustra o chaveamento da operação da GD. Nesta representação, no instante da ocorrência do ilhamento, a rede de distribuição é quem fornece potência a carga local. Em um dado instante, a “Chave de conexão rede” (Figura 6.2 e Figura 6.3) é aberta manualmente, a fim de emular o ilhamento e observa-se que no mesmo instante o sinal de frequência é alterado e o ilhamento é detectado através da técnica passiva.

A Figura 6.17 mostra em detalhes a corrente da rede (azul) indo à zero, o que representa o instante do ilhamento, e ao mesmo tempo o relé atuando no sentido de desconectar a GD da rede de distribuição.

Figura 6.16: Detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede. Verde: tensão da fase “a” da rede (70V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.17: Detalhe da detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Por outro lado, a ausência de fluxo de potência entre a GD e rede implica em uma condição crítica para a detecção, ou seja, a ocorrência de ilhamento nesta condição implica na necessidade de utilização de técnicas mais sofisticadas de detecção de ilhamento. De maneira geral, a ideia em apresentar este cenário é demonstrar a necessidade em se empregar técnicas antiilhamento ativas.

A Figura 6.18 ilustra a transição do sistema de GD do modo ilhado para conectado. Observa-se que após a ocorrência do ilhamento (corrente azul indo à zero) a GD não é capaz de detectar a contingência e então o sistema permanece energizando o PAC sem acionar a “Chave antiilhamento”.

A Figura 6.19 mostra em detalhes a corrente da rede (azul) indo à zero, o que representa o instante do ilhamento, e ao mesmo tempo o relé não atuando no sentido de desconectar a GD da rede de distribuição.

Figura 6.18: Detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede próximo a zero. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.19: Detalhe da detecção de ilhamento com fluxo de potência entre GD e rede próximo a zero. Verde: tensão da fase “a” da rede (70V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (5A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

6.8.1 Sandia Frequency Shift - SFS

Os ganhos de realimentação positiva para a técnica *SFS* são obtidos experimentalmente. Partiu-se com ganho unitário até ser encontrado um ganho de realimentação equivalente a 0,2, com o qual é possível detectar a contingência sem tornar o sistema instável. Ressalta-se que para ganhos próximo do valor unitário a GD tornou-se instável, a ponto de não ser possível operar o protótipo.

A Figura 6.20 ilustra a condição de ilhamento para um ganho de realimentação de 0,2. Com este ganho a técnica detecta em aproximadamente 1 ciclo a contingência. A Figura 6.21 apresenta a detecção com uma redução do ganho de 0,2 para 0,02. Com esta redução, o tempo de detecção passa a ser de 21,5 ciclos. A ideia em reduzir o ganho é demonstrar o impacto do algoritmo de sincronização, pois com o aumento da frequência de corte em 40% (de $\omega_n = 37,7_{Rad/s}$ para $\omega_n = 54,0_{Rad/s}$) é possível adequar o tempo de detecção aos padrões (IEEE STD 1547.1, 2005; IEEE STD 929, 2000). A Figura 6.22 demonstra a redução do tempo em detecção em 72% com ganho de 0,02.

Figura 6.20: Detecção de ilhamento SFS – $k_{sfs} = 0,2$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.21: Detecção de ilhamento SFS – $k_{sfs} = 0,02$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.22: Detecção de ilhamento com aumento da frequência de corte em 40% do PLL SFS – $k_{sfs} = 0,02$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

6.8.2 General Electric Frequency Scheme - GEFS

De forma idêntica a técnica SFS, na técnica GEFS os ganhos de realimentação positiva são obtidos experimentalmente. Avaliou-se que com um ganho de realimentação equivalente a 0,5 e com uma banda semelhante à utilizada em simulação de 4,5Hz – 6Hz é possível detectar a contingência sem tornar o sistema instável.

A Figura 6.23 ilustra a condição de detecção para o ganho de realimentação de 0,5. Com este ganho, a técnica detecta em aproximadamente 5,5 ciclos a contingência. A Figura 6.24 apresenta o resultado para uma redução do ganho de 0,5 para 0,05, sendo o tempo de detecção excedido consideravelmente em relação ao ganho de 0,5. Porém, com o aumento da frequência de corte do PLL em 40% o tempo passa a ser de 6,5 ciclos, o qual é semelhante ao tempo utilizando um ganho de 0,5 (10 vezes maior). Desta forma, é possível demonstrar a eficácia do projeto do PLL no tempo de detecção e redução do ganho de realimentação positiva da técnica. A Figura 6.25 demonstra o impacto do PLL na técnica em frequência.

Figura 6.23: Detecção de ilhamento GEFS – $k_{GEFS} = 0,5$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.24: Detecção de ilhamento GEFS – $k_{GEFS} = 0,05$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.25: Detecção de ilhamento com aumento da frequência de corte em 40% do PLL GEFS – $k_{GEFS} = 0,05$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

6.8.3 General Electric Voltage Scheme - GEVS

Como observado em simulação, a resposta dinâmica da técnica em tensão é mais lenta em relação às técnicas em frequência. Além disso, os ganhos de realimentação positiva são maiores em relação às técnicas em frequência. O ganho para técnica é obtido experimentalmente, sendo utilizada uma banda de 5Hz – 10Hz.

A Figura 6.26 ilustra a condição de ilhamento para um ganho de realimentação de 1,8. Observa-se que nesta técnica, aparecem oscilações na tensão ocasionadas pelo próprio método no sentido de detectar o ilhamento. Com ganho de 1,8, a técnica detecta em aproximadamente 40 ciclos a contingência. A Figura 6.27 apresenta a detecção com um aumento do ganho de 1,8 para 2,0. Com este aumento o tempo de detecção passa a ser de 5,5 ciclos. Nota-se que não há uma correlação entre o ganho de realimentação e o tempo de detecção, pois com aumento de 11,11% do ganho de realimentação há uma redução de 86,25% no tempo de detecção.

Figura 6.26: Detecção de ilhamento GEVS – $k_{GEVS} = 1,8$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.27: Detecção de ilhamento GEVS – $k_{GEVS} = 2,0$. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

6.8.4 Realimentação Positiva Fuzzy em Frequência

Como não há a necessidade de projeto para o ganho de realimentação positiva da técnica fuzzy, a técnica em frequência utilizada no protótipo é a mesma apresentada em simulação, porém com a utilização do algoritmo ilustrado na seção 6.5. Destaca-se o equilíbrio na operação do protótipo com a técnica fuzzy inserida no sistema de controle da GD, pois não existe injeção de distúrbios sem a ocorrência de ilhamento.

Além disso, não há impacto do algoritmo de sincronização no tempo de detecção, pois com ou sem aumento da frequência de corte do PLL, o tempo de detecção é de aproximadamente 1,5 ciclos. A Figura 6.28 ilustra a condição de ilhamento sem aumento da frequência de corte e a Figura 6.29 com aumento da frequência.

Figura 6.28: Detecção de ilhamento fuzzy em frequência sem aumento da frequência de corte do PLL. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

Figura 6.29: Detecção de ilhamento fuzzy em frequência com aumento da frequência de corte do PLL. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

6.8.5 Realimentação Positiva Fuzzy Híbrida

De forma análoga a técnica fuzzy em frequência, a técnica fuzzy híbrida é idêntica à exibida em simulação. Como não há a necessidade de projeto para o ganho de realimentação e tampouco para o filtro passa-banda, a implementação torna-se simples. Igualmente, observa-se um equilíbrio e segurança na implementação da técnica em protótipo, pois não há a presença de afundamentos súbitos de tensão e/ou distúrbios associados à realimentação positiva.

A Figura 6.30 ilustra a condição de ilhamento da técnica proposta. A técnica fuzzy híbrida detecta a contingência em aproximadamente 1,5 ciclos e oferece uma redução do tempo de detecção em 72% em relação ao método GEVS. Na Figura 6.30, nota-se que logo após a ocorrência do ilhamento, a primeira oscilação que ocorre já ultrapassa os limites estabelecidos por norma e então se torna possível a detecção. Esta rápida dinâmica está associada ao valor de realimentação injetada pela técnica fuzzy.

Figura 6.30: Detecção de ilhamento fuzzy híbrida. Verde: tensão da fase “a” da rede (40V/div). Vermelho: corrente da fase “a” da GD (10A/div). Azul: corrente da fase “a” da rede (5A/div). Laranja: sinal do relé “Chave antiilhamento” (20V/div).

6.8.6 Quadro Comparativo

As conclusões retiradas do quadro comparativo dos resultados experimentais são semelhantes às obtidas nos resultados de simulação. A Tabela 6.5 mostra que, para as três técnicas clássicas apresentadas, somente consegue-se adequar o tempo de detecção em relação às normas com ganhos elevados. Além disso, experimentalmente a técnica híbrida possui um reduzido tempo de detecção, o que lhe confere uma vantagem em relação à técnica clássica em tensão.

Por fim, a Tabela 6.6 resume o impacto do algoritmo de sincronização nas técnicas em frequência. Observa-se que a redução é significativa para as técnicas clássicas, sendo que para a técnica fuzzy em frequência não há redução no tempo, visto que o tempo de detecção é reduzido mesmo para uma frequência de projeto do algoritmo de sincronização menor.

Tabela 6.5: Quadro comparativo em relação ao tempo de detecção.

<i>Técnica</i>	<i>Ganho</i>	<i>Filtro (Hz)*</i>	<i>Tempo de detecção (ciclos)</i>
<i>SFS</i>	0,2	-	1
	0,02	-	21,5
<i>GEFS</i>	0,5	4,5-6	5,5
	0,05	4,5-6	192
<i>GEVS</i>	2	5-10	5,5
	1,8	5-10	40
<i>Fuzzy Frequência</i>	-	-	1,5
<i>Fuzzy Híbrida</i>	-	-	1,5

Tabela 6.6: Impacto do algoritmo de sincronização no tempo de detecção.

<i>Técnica</i>	<i>Ganho</i>	<i>Filtro (Hz)*</i>	ω_n (rad/s)	<i>Tempo de detecção (Ciclos)</i>
<i>SFS</i>	0,02	NA	37,7	21,5
		NA	54	5,5
<i>GEFS</i>	0,05	4,5-6	37,7	192
		4,5-6	54	6,5
<i>Fuzzy Frequência</i>	-	-	37,7	1,5
		-	54	1,5

* Considerando os valores do filtro passa-alta e passa-baixa.

6.9 Conclusões Finais

No desenvolvimento deste capítulo, procurou-se demonstrar a operação da GD operando ilhada e conectada na rede de distribuição, bem como o algoritmo utilizado para alterar o controle após a ocorrência do ilhamento. Além disso, aspectos associados à implementação tais como o filtro de saída, controlador ressonante e a inserção das técnicas fuzzy no DSP foram apresentados.

Evidenciou-se o impacto do algoritmo de sincronização nas técnicas em frequência ao ponto de se obter uma redução de 74% para a técnica *SFS* e de 96% para a técnica da *GEFS* em relação ao tempo de detecção.

Em relação às técnicas propostas, as suas aplicações em termos de esforço computacional foram reduzidas, pois foram realizadas por meio de uma única tabela, a qual representa a realimentação positiva. Ainda, a técnica fuzzy híbrida reduziu o tempo de detecção em 72% quando comparada a técnica em tensão da *GEVS*. Já a técnica fuzzy em frequência obteve um resultado similar ao da técnica *SFS* quando é considerado o maior ganho (0,2). Porém, quando comparado ao ganho de 0,02 a redução é de 93%.

Capítulo 7

Conclusões Gerais

Dentro do contexto relativo à detecção de ilhamento, este trabalho apresentou o modelo das técnicas de detecção tradicionais dando enfoque nos métodos que utilizam como saída um sinal de realimentação positiva. Como alternativa para detecção desta contingência, propôs-se a detecção de ilhamento através da metodologia fuzzy, a fim de melhorar o desempenho em termos de tempo de detecção, reduzir a injeção de distúrbios no sistema de controle da GD e simplificar o modelo e a implementação das técnicas antiilhamento. Além disso, discutiu-se o modo de operação da GD conectada e ilhada.

Na revisão relativa às técnicas tradicionais, pôde-se verificar que a velocidade de detecção nos métodos em frequência está associada à utilização de ganhos elevados. Ainda em simulação, realizou-se uma abordagem a respeito da injeção de distúrbios no sistema de controle da GD, tendo a técnica em tensão como a mais prejudicial à GD. Além disso, a inexistência de uma metodologia no sentido de encontrar um ganho que atenda a requisitos de qualidade e tempo de detecção são pontos que dificultaram a sua aplicação.

Quanto aos resultados associados à injeção de distúrbios, facilmente é observado o melhor desempenho das técnicas fuzzy. Para manobras com o mesmo perfil de carga, enquanto os métodos tradicionais inserem uma realimentação positiva de 2,5% a 6% do valor equivalente a referência, a técnica proposta insere uma realimentação na ordem de $3,5 \cdot 10^{-17}$.

O algoritmo PLL, direcionado neste trabalho a detecção de ilhamento, mostrou-se eficaz ao ponto de reduzir os ganhos de realimentação positiva em até 90% e reduzir o tempo de detecção das técnicas em frequência em até 96% como é demonstrado nos resultados experimentais.

Através do desenvolvimento do protótipo, é possível concluir que a estrutura de controle da GD fornece uma resposta com baixa oscilação no momento de transição da operação, respeitando os limites de operação das principais normas internacionais.

A proposta de detecção utilizando técnicas antiilhamento fuzzy, teve seu projeto simplificado a partir do fato de que toda a parametrização da técnica fundamentou-se em padrões já estabelecidos, ou seja, limites de operação de tensão e frequência, por exemplo, já são amplamente conhecidos. Além disso, a não utilização de constantes e ganhos reduziu a complexidade do projeto e implementação no DSP da técnica. Em termos de desempenho de detecção no protótipo desenvolvido, a técnica fuzzy híbrida obteve uma redução de 40% em relação ao tempo de detecção quando comparada à tradicional.

7.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para continuidade do trabalho, têm-se:

- ✓ Associar as técnicas fuzzy híbrida e em frequência de forma a se obter uma técnica única. Desta forma, é possível projetar uma técnica com boa velocidade de detecção e com reduzida dependência do tipo de carga;
- ✓ Inclusão de fontes CC com diferentes características;
- ✓ Avaliar o sistema frente a problemas de qualidade de energia como: afundamentos de tensão, distorções, etc.

Referências Bibliográficas

- ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 2 Maio 2012.
- BALAGUER, I. J. et al. Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 1, p. 147 - 157, 2011.
- BLAABJERG, F. et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 5, p. 1398-1409, 2006.
- BUSO, S.; MATTAVELLI, P. *Digital Control in Power Electronics*. 1. ed. [S.l.]: Morgan & Claypool, 2006.
- DU, P. Operation of power systems with distributed generation. Rensselaer Polytechnic Institute. New York. 2006. (Tese de Doutorado).
- DU, P. et al. Positive-Feedback-Based Active Anti-Islanding Schemes for Inverter-Based Distributed Generators: Basic Principle, Design Guideline and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 25, n. 12, p. 2941 - 2948, 2010.
- DU, P.; APONTE, E. E.; NELSON, J. K. Performance analysis of positive-feedback-based active anti-islanding schemes for inverter-based distributed generators. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, p. 1 - 9, 2010.
- ESTÉBANEZ, E. J. et al. Performance Evaluation of Active Islanding-Detection Algorithms in Distributed-Generation Photovoltaic Systems: Two Inverters Case. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 4, p. 1185 - 1193, 2011.
- GABE, I. J. Contribuição ao Controle de Inversores PWM Alimentados. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria. 2008. (Dissertação de Mestrado).
- GONÇALVES, A. F. Q. Controle e Análise de Conversores CC-CA Conectados em Redes de Distribuição e Utilizados em Sistemas de Geração Distribuída. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010. (Dissertação de Mestrado).

IEEE Std 399 Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis. IEEE, 1997.

IEEE STD 1547.1. IEEE Std 1547.1 Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE, 2005.

IEEE STD 929. IEEE Std 929-2000 IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. IEEE, 2000.

KIM, S. K. et al. Voltage Shift Acceleration Control for Anti-Islanding of Distributed Generation Inverters. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, n. 4, p. 2223-2234, 2011.

LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; HANSEN, S. Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, n. 5, p. 1281-1291, 2005.

M. E. ROPP, M. B. A. A. R. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 14, n. 3, p. 810-816, 1999.

MACHADO, R. Q. Sistema de Geração Distribuída com Fontes CA e CC Conectado a Rede Monofásica e Controle Eletrônico da Qualidade da Energia Elétrica. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas. 2005. (Tese de Doutorado).

MACHADO, R. Q.; BUSO, S.; POMILIO, J. A. A Line-Interactive Single-Phase to Three-Phase Converter System. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 21, n. 6, p. 1628 - 1636, 2006.

MARAFÃO, F. P. Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas. 2004. (Tese de Doutorado).

MATTAVELLI, P. A closed-loop selective harmonic compensation for active filters. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 37, n. 1, p. 81 - 89, 2001.

PADUA, M. S. et al. Comparative analysis of Synchronization Algorithms based on PLL, RDFT and Kalman Filter. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, p. 964-970, 2007.

RICCIARDI, T. R. Análise do Impacto da Proteção Antiilhamento na Estabilidade de Geradores Conectados Via Inversores. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas. 2010. (Dissertação de Mestrado).

ROBITAILLE, M. et al. Islanding Detection Method for a Hybrid Renewable Energy System. International Journal of Renewable Energy Research, v. 1, n. 1, p. 41 - 53, 2011.

- TEODORESCU, R. et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters. IEE Proceedings - Electric Power Applications, v. 153, n. 5, p. 750 - 762, 2006.
- VAHEDI, H. et al. A New Method for Islanding Detection of Inverter-Based Distributed Generation Using DC-Link Voltage Control. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 26, n. 2, p. 1176-1186, 2011.
- YE, Z. Study and Development of Anti-Islanding Control for Synchronous Machine-Based Distributed Generators. National Renewable Energy Laboratory. New York. 2004.
- YE, Z. et al. Study and Development of Anti-Islanding Control for Grid-Connected Inverters. National Renewable Energy Laboratory. [S.l.]. 2004. (NREL/SR-560-36243).
- YE, Z.; DAME, M.; KROPOSKI, B. Grid-Connected Inverter Anti-Islanding Test Results for General Electric Inverter-Based Interconnection Technology. National Renewable Energy Laboratory. [S.l.]. 2005. (NREL/TP-560-37200).
- YU, B.; MATSUI, M.; YU, G. A Review of Current Anti-islanding Methods for Photovoltaic Power System. Solar Energy, v. 84, n. 5, p. 745 – 754, 2010.
- ZEINELDIN, H. H.; KIRTLEY, J. L. A Simple Technique for Islanding Detection with Negligible Nondetection Zone. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 24, n. 2, p. 779–786, 2009.
- ZEINELDIN, H. H.; SALAMA, M. M. A. Impact of Load Frequency Dependence on the NDZ and Performance of the SFS Islanding Detection Method. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 58, n. 1, p. 139-146, 2011.

Apêndice

Conversor de Potência

O conversor empregado é do fabricante Semikron, sendo que o modelo utilizado é o SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI 12V12. Este módulo possui um retificador trifásico não controlado, banco de capacitores e um conjunto de 7 chaves do tipo IGBT. A Figura A1 apresenta as características operacionais do módulo de potência, enquanto a Figura A2 apresenta a disposição dos elementos presentes no módulo.

SEMISTACK 1)

Three-phase inverter

SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI 12 V12

SK 60 GB 128

SK 30 GAL 123

SK 95 D 12

P 35/325F

SKHI 200pA

Preliminary Data

Features

- Compact design
- Hall Effect Current Sensor
- Circuit for soft charge the capacitors
- IGBT Braking chopper
- Vce monitoring

Typical Applications

- AC Motor Control
- Elevator
- Industrial

Circuit	I _{rms}	V _{ac} (V _{dc})	Types
B6CI	30	380 750	SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI 12 V12

Symbol	Conditions	Values	Units
I _{rms} max	No overload; 10 kHz	30	A
T _{amb} = 35 °C	150% overload, 60s every 10min (I _{ov} /I _N)	36/24	A
	200% overload, 10s every 10min (I _{ov} /I _N)	42/21	A
V _{ce} max		1200	V
f _{sw} max	Absolute maximum switching frequency	15	kHz
f _{sw} max Csl	Advise maximum switching frequency	10	kHz
C	Type EPCOS B43303A0687	680/400	µF/V
C _{eqvl}	Equivalent capacitor bank	1700/800	µF/V
T _{dis}	Discharge time of the capacitor bank	-	s
V _{DC} max	Max DC voltage applied to capacitor bank	750	V
Rectifier		380	V _{ac}
V _{net} max	Max network voltage (line side)	-20%/+15%	
T _{vj}	Junction temperature for continous operation	-40...+125	°C
T _{slg}	without requirement of reforming of capacitors	-20...+40	°C
T _{amb}		-20...+55	°C
V _{sol}	60Hz/1min	2500	V
w	Aprox. total weight	-	Kg
Cooling	Fan, DC power supply	24	V
	Current Consumption (per fan)	0.11	A
	Required air flow (per fan)	42.5	m ³ /h
Losses	B6CI, Converter at P _{max} , T _{amb} = 35 °C	432	W
	Efficiency	97	%
Current sensor	Hall-type LEM LA 55-P		
Thermal trip	normally closed	71	°C
Others components	Relay Metaltex J1NAC3		
Options			
Tests	Functional Test Short Circuit Test Visual Inspection		
	-		

Figura A1: Características operacionais do módulo SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI 12V12.

Figura A2: Disposição dos elementos do módulo SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI 12V12.

DSP TMS320F28335

O DSP utilizado para desenvolvimento desse trabalho é o modelo TMS320F28335 do fabricante Texas Instruments®. A programação é feita no software *Code Composer*, com suporte para a linguagem “C”. As principais características do DSP são:

- ✓ 150 MHz de velocidade de operação;
- ✓ Unidade em ponto-flutuante de 32 bits;
- ✓ 16 canais de conversores analógico digital de 12 bits;
- ✓ 30 MHz de clock interno;
- ✓ 68K bytes de RAM;
- ✓ 512k bytes de memória SRAM;
- ✓ Conexão de comunicação via USB.

A Figura A3 apresenta uma foto do DSP TMS320F28335 utilizado no protótipo experimental.

Figura A3: DSP TMS320F28335 utilizado no protótipo experimental.

Condicionamento de Sinais

Circuito de condicionamento de corrente.

Figura A4: Circuito utilizado para medição de corrente.

Circuito de condicionamento de tensão.

Figura A5: Circuito utilizado para medição de tensão.

Circuito de interface entre DSP e acionamento das chaves do conversor de potência.

Figura A6: Circuito do drive de interface entre DSP e acionamento do conversor de potência.

Circuito de proteção utilizado.

Figura A7: Circuito de proteção para a corrente no lado CA.