UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
LABORATÓRIO DE CONTROLE
LABORATÓRIO DE FONTES ALTERNATIVAS E PROCESSAMENTO DE ENERGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GIANN BRAUNE REIS

**Estratégia de controle fuzzy para um
grupo motor gerador a diesel operando
isolado ou conectado à rede de
distribuição**

GIANN BRAUNE REIS

Estratégia de controle fuzzy para um
grupo motor gerador a diesel operando
isolado ou conectado à rede de
distribuição

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

Área de concentração: Sistemas Dinâmicos

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Vilma Alves de Oliveira

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

São Carlos

2014

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.

R375e Reis, Gianni Braune
Estratégia de controle fuzzy para um grupo motor
gerador a diesel operando isolado ou conectado à rede
de distribuição / Gianni Braune Reis; orientadora Vilma
Alves de Oliveira; coorientador Ricardo Quadros
Machado. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - 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, 2014.

1. Geração distribuída. 2. Grupo motor gerador. 3.
Gerador síncrono. 4. Controle fuzzy. 5. Controle de
sincronismo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GIANN BRAUNE REIS.**

Título da tese: "Estratégia de controle *fuzzy* para um grupo motor gerador a diesel operando isolado ou conectado à rede de distribuição".

Data da defesa: 01/04/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Ricardo Quadros Machado (Orientador designado)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **José Carlos de Melo Vieira Júnior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Felix Alberto Farret**
(Universidade Federal de Santa Maria/UFSM)

APROVADO

Prof. Dr. **Diego Berlezi Ramos**
(Universidade Federal do Pampa)

Aprovado

Prof. Dr. **Antonio Moreira dos Santos**
(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**

EESCUSP
Serviço de Pós-Graduação
Protocolado em
12/04/2014
115

"Os nossos pais amam-nos porque somos seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos de sucesso, isso pode parecer irrelevante, mas nas ocasiões de fracasso, oferecem um consolo e uma segurança que não se encontram em qualquer outro lugar."

Bertrand Russell

Agradecimentos

Primeiramente à Deus pelas oportunidades que me foram concedidas.

Aos meus pais, irmãos, sobrinhos e em especial à minha esposa Cristhiane por todo carinho e apoio ofertados, condições fundamentais que me propiciaram o ambiente e estímulos necessários para o bom andamento deste trabalho.

Aos orientadores, Dr^a. Vilma Alves de Oliveira e Dr. Ricardo Quadros Machado pelo crescimento profissional proporcionado através da experiência compartilhada.

Aos colegas e amigos pelos momentos de descontração e de troca de informações. Em especial ao Rodolpho, pelo empenho e companheirismo na elaboração dos resultados aqui apresentados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP - pelo financiamento ao projeto de número FAPESP/2011/02170-5. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - pela bolsa de estudos concedida que permitiu plena dedicação ao trabalho apresentado. Ao SEL pela estrutura e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários do SEL pelo apoio, em especial à Verinha pelos cafés de todos os dias e ao Rui pelo pronto atendimento no suporte técnico.

Resumo

Reis, Giann Braune **Estratégia de controle fuzzy para um grupo motor gerador a diesel operando isolado ou conectado à rede de distribuição.** 102 p. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Esta tese propõe uma estratégia de controle fuzzy para um grupo motor gerador a diesel como uma fonte de geração distribuída, cobrindo a parte mecânica do sistema que é composta por controle de velocidade e de potência ativa, a parte elétrica do sistema composta por controle de tensão e potência reativa, e também o controle de sincronismo com a rede de distribuição. A estratégia de controle foi baseada em lógica fuzzy que usou uma superfície de controle fixa para os controladores fuzzy. Foram investigados os distúrbios causados pelo efeito de conexão com a rede e da conexão de um motor de indução, um retificador não controlado e uma carga RLC. Resultados de simulação para fluxo de potência no modo conectado foram obtidos usando um alimentador padrão IEEE -1547. Os resultados de simulação obtidos para os modos isolado e conectado usando o controlador fuzzy foram superiores comparados aos resultados obtidos com um controlador comercial. Uma bancada experimental também foi usada para analisar a resposta do sistema no modo isolado com o controlador fuzzy proposto e com o controlador comercial para fins de comparação. Nesse contexto, espera-se com este trabalho contribuir para o desenvolvimento de pesquisas na área de controle e processamento de energia, uma vez que, soluções para a produção de energia utilizando a geração distribuída têm importância estratégica e têm sido foco de investimento e discussões por parte de governos, empresas e universidades.

Palavras-chave: Geração distribuída, Grupo motor gerador, Gerador síncrono, Controle fuzzy, Controle de sincronismo.

Abstract

Reis, Giann Braune **A fuzzy control strategy for a diesel generating set under stand-alone and grid-connected operations.** 102 p. Ph.D. Thesis - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2014.

This thesis proposes a control strategy for a diesel generating set as a distributed generation source covering the mechanical part of the system which includes speed and active power control, the electrical part of the system which includes voltage and reactive power control, and also the synchronism control with the grid. The control strategy was based on a fuzzy logic which used a fixed controller surface for the fuzzy controllers. The effect of the disturbances caused by the grid connection and the disturbances caused by the activation of a induction motor, non controled rectifier and a RLC load types were investigated. Power flow simulation results for the grid-connected mode was obtained with a IEEE -1547 standard feeder. The simulations results for both stand-alone and grid-connected operations using fuzzy controllers were superior when compared to commercial methods. An experimental setup was also used to analyze the system responses under isolated mode with the proposed fuzzy controller and with the commercial controllers for comparison proposes. In this context, it is expected that this work contributes to the development of control and energy processing research area, since solutions for energy production using distributed generation have strategic importance and have been the focus of investment and discussions from governments, companies and universities.

Keywords: Distributed generation, Generating-set, Synchronous generator, Fuzzy control, Synchronism control.

Lista de Ilustrações

2.1	Arranjo típico de um Grupo Motor-Gerador diesel: 1- Radiador; 2- Motor diesel; 3- Gerador síncrono; 4- Quadro de comando.	27
2.2	Estrutura de um sistema de geração com regulador de tensão.	28
2.3	Modelo do gerador síncrono no eixo direto (a) e no eixo quadratura (b), extraídos de Kundur (1994).	29
3.1	Diagrama de blocos simplificado da GD com indicação dos principais controladores.	33
3.2	Diagrama de blocos do modelo utilizado para o motor a diesel.	34
3.3	Circuito equivalente do eixo d e q da máquina síncrona.	35
3.4	Circuito equivalente monofásico do gerador.	36
3.5	Diagrama fasorial do circuito equivalente. Em (a) considerando o enrolamento de campo sobreexcitado e em (b) subexcitado.	37
3.6	Diagrama unifilar do alimentador IEEE Std 1547.2, 2009.	38
4.1	Diagrama de blocos da GD com indicação dos pontos de medição das variáveis utilizadas pelos controladores.	40
4.2	Estrutura do controlador fuzzy PD+I.	40
4.3	Funções de pertinência das entradas e da saída. Em (a) as funções denotadas “P” e “N” possuem distribuições de curva de sino e “Z” triangular, em (b) funções <i>single tones</i> ao longo do universo de discurso denotadas: “DM”, “DP”, “NFN”, “AP” e “AM”.	41
4.4	Superfície de controle fuzzy.	42
4.5	Estrutura do controle fuzzy coordenado para potência reativa e tensão terminal.	43
4.6	Sistema de excitação CA com um retificador controlado, anéis deslizantes e alternador com regulador de excitação (Kundur 1994).	45
4.7	Diagrama de blocos do modelo AC1A.	46
4.8	Estrutura do controle de potência ativa, velocidade e sincronismo.	47
4.9	Sincronismo dos sinais da fase do gerador e da rede de distribuição utilizando algoritmo fuzzy.	49

5.1	Comparação dos valores da tensão terminal e velocidade, para tolerância de erro entre as fases de $0,5^\circ$, utilizando o controlador comercial (CC), controlador fuzzy (CF) e o limite para velocidade (LS).	52
5.2	Comparação dos valores da tensão terminal e velocidade, para tolerância de erro entre as fases de $5,0^\circ$, utilizando o controlador comercial (CC), controlador fuzzy (CF) e o limite para velocidade (LS).	52
5.3	Transitórios em P e Q do gerador e da rede causados pelo efeito da conexão entre a GD e a rede; (a) e (c) utilizaram método de sincronismo comercial, (b) e (d) utilizaram controlador fuzzy de sincronismo.	53
5.4	Comparação da tensão terminal e velocidade do GMG obtidos com a atuação dos controladores fuzzy e CC+PI operando em modo isolado.	54
5.5	Comparação dos valores de potência ativa gerada e absorvida pelos elementos que compõem do sistema.	55
5.6	Comparação dos valores de potência reativa gerada e absorvida pelos elementos que compõem do sistema.	55
5.7	Comparação entre os valores de tensão terminal e fator de potência apresentado durante os ensaios para os dois controladores utilizados.	56
6.1	Transformador isolador e Variac.	58
6.2	Detalhe do grupo gerador.	59
6.3	Planta experimental e seus componentes de instrumentação para aquisição de sinais para controle.	60
6.4	Quadro para abrigo dos transdutores, disjuntores, aterramento e borneira de sinais do GMG.	61
6.5	Placas de condicionamento de sinais para tensão e corrente.	61
6.6	Detalhe da parte de instrumentos e bancadas no container.	62
6.7	Módulo cRIO composto por um chassi com sistema FPGA embarcado e seus módulos de acionamento e de aquisição de sinais.	63
6.8	Placas de condicionamento de sinais.	64
6.9	Regulador de velocidade do GMG.	65
6.10	Ambiente de programação FPGA.	66
6.11	Módulo de aquisição, processamento e controle da NI.	67
6.12	Sistema supervisório desenvolvido.	68
6.13	Cargas utilizadas para testes com o GMG.	70
6.14	Sistema de acionamento retificador para a cuba resistiva.	70
6.15	Diagrama geral experimental.	71
6.16	Experimento comparando a resposta dos controladores fuzzy PD+I cascata e o comercial.	72
6.17	Experimento comparando a resposta dos controladores fuzzy PD+I cascata e o comercial na partida do gerador.	73

A.1	Esquema de conexão da rede de distribuição com a GD.	80
A.2	Representação da rede de distribuição no PSCAD.	80
A.3	Cargas utilizadas para testes de desempenho do sistema de controle.	81
A.4	Bloco de controle de torque do MIT.	81
A.5	Configuração da carga RLC utilizada na simulação.	82
A.6	Representação da válvula de combustível e do motor diesel no PSCAD.	82
A.7	Bloco de controle de potência ativa.	82
A.8	Referência do controle de potência ativa.	83
A.9	Controlador fuzzy PD+I para controle de potência ativa.	83
A.10	Cálculo da potência média ativa e reativa fornecida pelo gerador.	83
A.11	Fluxograma do programa implementado em linguagem C.	84
A.12	Representação do modelo de sistema de excitação AC1A do PSCAD.	85
A.13	Controlador comercial implementado no PSCAD.	85
A.14	Controle coordenado de tensão terminal e potência reativa.	86
A.15	Diagrama de blocos do AVR-C.	86
A.16	Controlador coordenado de tensão terminal e potência reativa do AVR-C.	87
B.1	Diagrama esquemático para placa de condicionamento de temperatura e pressão.	89
B.2	Circuito para impressão da placa de condicionamento de temperatura e pressão.	90
B.3	Diagrama de instalações elétricas do container.	91
C.1	Ambiente de programação do supervisor do GMG.	94
C.2	Ambiente de programação do algoritmo de tempo real.	95

Lista de Tabelas

4.1	Regras de inferência do sistema fuzzy	41
6.1	Potências das cargas	69
A.1	Dados do modelo do atuador.	77
A.2	Dados da carga MIT	78
A.3	Dados da carga RLC	78
A.4	Dados para simulação do gerador elétrico	79
A.5	Controlador PI de velocidade.	79
A.6	Controlador PI de potência ativa.	79

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Objetivos	21
1.2	Organização do trabalho	21
2	Revisão bibliográfica	23
2.1	Geração distribuída	25
2.2	Grupo motor-gerador diesel	26
2.3	Gerador síncrono	26
2.4	Sistema de controle	30
2.5	Considerações finais	31
3	Descrição dos modelos do GMG, rede e cargas locais	33
3.1	Modelo do motor diesel	34
3.2	Modelo do gerador síncrono	35
3.3	Rede de distribuição	37
3.4	Cargas locais	37
3.5	Considerações finais	38
4	Estratégia de controle fuzzy para o GMG	39
4.1	Projeto do controlador	40
4.2	A superfície fuzzy	42
4.3	Controle coordenado de tensão terminal e potência reativa	43
4.4	Controle de velocidade, sincronismo e potência ativa	47
4.5	Considerações finais	50
5	Resultados de simulações	51
5.1	Controle de sincronismo	51
5.2	Modo de operação isolado	53
5.3	Resultados para modo de operação conectado	54
5.4	Considerações finais	56

6	Montagem da bancada e resultados experimentais	57
6.1	Descrição da planta	57
6.2	Projeto do controle	70
6.3	Resultados experimentais	71
6.4	Considerações finais	73
7	Conclusões e propostas de trabalhos futuros	75
A	Dados e parâmetros utilizados nas simulações	77
A.1	Ambiente de simulação PSCAD	79
B	Dados e placas usados nos experimentos	89
C	Telas do ambiente de programação LabVIEW	93
	Referências	97

Capítulo 1

Introdução

Esforços cada vez maiores vem sendo realizados no aprimoramento de antigas fontes energéticas e no desenvolvimento de novas tecnologias de geração e distribuição de energia. Contudo, no Brasil ainda é comum encontrarmos problemas relacionados à energia em centros consumidores afastados dos grandes centros urbanos.

O aparecimento de um quadro de dificuldades no atendimento da demanda de energia elétrica a partir de maio de 2001 em decorrência de fatores como a limitada produção de energia por grandes centrais hidroelétricas, a inviabilidade econômica e, principalmente, os efeitos ambientais causados com a implantação de novas estruturas, faz com que aumente o risco de um colapso no setor elétrico nacional (Haddad, Martins e Marques 2001, Pereira 2003). O interesse na investigação de estruturas que possibilitem a integração de fontes alternativas de energia como forma de minimizar os efeitos da crise energética tem sido incentivado por órgãos reguladores e pelo Ministério de Minas e Energia.

Nesse contexto é que se enquadra o surgimento de tecnologias baseadas em geração distribuída (GD). Através do uso dessas novas fontes consegue-se reduzir os esforços para transmissão de energia uma vez que as mesmas caracterizam-se por serem instaladas em locais próximos aos centros consumidores. Dessa forma, iniciativas para pesquisas de novas tecnologias têm sido incentivadas por meio de órgãos como a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e Ministério de Minas e Energia através do programa PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica).

Associar essa nova tendência de GD à uma fonte de energia já bastante conhecida como a geração à diesel se torna uma idéia interessante. Sendo assim, tomando a geração diesel como uma fonte de GD, pode-se obter o melhor de uma tecnologia bastante acessível e de fácil manutenção com as características de uma GD. Contudo, é preciso uma avaliação detalhada da rede na qual a GD será instalada, do tipo de carga que ela deverá suprir e o seu regime de funcionamento, caso contrário, os impactos causados pela GD podem ser mais prejudiciais do que benéficos. Dentre os principais problemas causados por sistemas de GD em redes de distribuição é possível mencionar os transitórios indesejados devido

às operações de chaveamento, a alteração dos níveis de curto-circuito e de estabilidade existentes e a atuação inadequada dos dispositivos de proteção causando ilhamento em partes do sistema (Chaitusaney e Yokoyama 2005).

Para melhorar o desempenho da geração diesel e tornar o grupo motor-gerador (GMG) diesel uma opção viável para sistemas GD, é necessário alterar os parâmetros de seu controlador, ou até mesmo a mudança do tipo de controlador. Dessa forma, utilizando as determinações do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), esta tese de doutorado possui como proposta geral analisar, em regime transitório, os efeitos decorrentes da inserção um GMG no sistema de distribuição. Além disso, como tarefa não menos importante foram verificados que os índices de qualidade de energia relacionados à operação do GMG estão dentro dos padrões estabelecidos por normas nacionais e internacionais.

Neste trabalho são apresentadas duas malhas de controle baseadas em algoritmos fuzzy uma para a operação conectada à rede de distribuição e outra quando o GMG opera em modo isolado. Independente do modo no qual o GMG estiver operando, o objetivo é melhorar os níveis de tensão e fator de potência (modo conectado) da energia fornecida pelo GMG por meio do controle de velocidade, potência ativa, tensão terminal, potência reativa e sistema de sincronismo.

O mesmo tipo de algoritmo fuzzy PD+I é utilizado em todas as malhas de controle do GMG, porém os ganhos de entrada e saída de cada malha são ajustados para atingir o desempenho desejado. A utilização do mesmo tipo de controlador é possível uma vez que as malhas de controle utilizam duas entradas com comportamento semelhante diante perturbações, sendo que uma destas representa o erro do sinal medido e a outra a variação ou derivada do erro. O benefício de se utilizar o mesmo tipo de controlador está na diminuição do esforço computacional já que a complexidade para implementar o algoritmo de controle é reduzido uma vez que, cada controlador terá apenas os ganhos modificados de acordo com o comportamento dinâmico do sistema que estiver sob controle. É importante notar que tal premissa é válida dentro do universo de discurso. Geralmente usa-se o universo de discurso $[-1, 1]$. Dessa forma, para alcançar ganhos maiores é preciso multiplicar a saída pelo valor desejado (ganho de saída do controlador).

As principais contribuições deste trabalho são: elaboração de um algoritmo fuzzy de sincronismo que utiliza tanto o erro entre os sinais de tensão entre o GMG e a rede de distribuição, quanto a derivada deste erro para minimizar o impacto causado pela conexão do GMG à rede de distribuição; elaboração de uma estrutura de controle fuzzy que coordena o controle da tensão terminal do GMG com o controle de potência reativa fornecida; elaboração de uma estrutura de controle fuzzy que melhora o desempenho do controle de velocidade do GMG e, dessa forma, permite menores perturbações no acionamento de cargas locais e permite a transferência de potência para a rede de distribuição com menores oscilações nos níveis de tensão produzidos pelo gerador.

1.1 Objetivos

Os objetivos gerais da tese de doutorado correspondem ao controle e análise de um GMG operando tanto no modo isolado quanto conectado à rede de distribuição e utilizando como diretrizes os índices de qualidade de energia definidos por normas nacionais e internacionais. Para tal tarefa, são empregados controladores fuzzy com estrutura fixa e comparados com controladores clássicos, sendo assim, tem-se como aspectos gerais:

- Desenvolver uma superfície de controle fixa para regular a tensão terminal, velocidade, sincronismo e potência do GMG diesel;
- Avaliar o desempenho do GMG com a estratégia de controle fuzzy no acionamento de cargas locais e na transferência de potência para a rede de distribuição em relação aos controladores utilizados comercialmente.

Os objetivos específicos são:

- Melhorar os níveis de tensão e fator de potência da energia fornecida pela GD no ponto de conexão com o concessionário (PCC);
- Melhorar a técnica de sincronismo através de um controlador fuzzy que utilize o erro entre os sinais de tensão e a derivada deste erro para diminuir os efeitos causados pela conexão no PCC;
- Construir uma bancada experimental, disponibilizar todos os sinais de leitura do GMG nesta bancada para testar as estratégias de controle propostas e permitir a construção de uma rede inteligente para fontes alternativas de energia.

1.2 Organização do trabalho

A presente dissertação segue como descrito abaixo após a introdução apresentada ao tema.

- **Capítulo 2** - Revisão bibliográfica no tema tratado. É apresentada uma revisão sobre fontes alternativas, GDs e controle de GMG a diesel;
- **Capítulo 3** - Descrição do sistema utilizado. Apresenta e descreve o motor diesel, gerador síncrono, cargas locais e rede de distribuição;
- **Capítulo 4** - Estratégia de Controle. É apresentada de forma detalhada a construção do controlador fuzzy, assim como das malhas de controle utilizadas;
- **Capítulo 5** - Resultados de Simulação. São apresentados os resultados obtidos com as simulações realizadas comparando o desempenho obtido pelas malhas de controle fuzzy com o dos controladores comerciais;

- **Capítulo 6** - Montagem da Bancada e Resultados Experimentais. São apresentados a descrição da parte experimental e do projeto de controle utilizado, além dos resultados obtidos com os experimentos realizados.
- **Capítulo 7** - Conclusões e trabalhos futuros. Apresenta a discussão dos resultados e propostas para futuros trabalhos.

Revisão bibliográfica

Através da utilização das fontes alternativas de energia localizadas em sistemas de geração distribuída (GD) é possível melhorar os níveis de tensão, reduzir perdas de potência em projetos de co-geração (Elkhattam e Salama 2004) e evitar transmissão de energia em longas distâncias uma vez que são instaladas próximas ao local de consumo (Rashed, Elmitwally e Kaddah 2008, Sisworahardjo, El-Sharkh e Alam 2008, Amr, Rady e Badreddin 2010, Ray, Mohanty e Kishor 2010). Dessa forma, a utilização de sistemas de geração que utilizam diesel possuem grande aplicação em sistemas de GD devido à sua simplicidade, larga faixa de potência de geração e baixo custo de aquisição, quando comparado a outras fontes alternativas, como células combustível por exemplo (Rashed et al. 2008, Cooper, Morrow e Chambers 2010, Pandiaraj, Fox, Morrow, Persaud e Martin 2002).

O diesel apresenta a desvantagem de ser um combustível fóssil (Akash, Mamlook e Mohsen 1999), contudo essa desvantagem pode ser superada quando substituído por biodiesel, uma alternativa sustentável que pode ser utilizado diretamente no GMG com pequena ou nenhuma modificação (Mirheidari, Mohammadpour, Grigoriadis e Francheek 2010, Pushparaj, Venkatesan e Ramabalan 2012). O biodiesel é uma fonte renovável de energia que produz baixa emissão de poluentes quando utilizado como combustível de um grupo GMG se comparado ao diesel convencional (Kennedy, Best, Morrow e Fox 2010, Best, Kennedy, Morrow e Fox 2011).

Mesmo com tantas vantagens na instalação de GDs, é necessária uma avaliação sobre seu local de instalação, regime de funcionamento e o tipo de carga que será suprida. Caso contrário, os efeitos podem não ser tão vantajosos e podem comprometer a qualidade da energia do barramento ao qual a GD está conectada. O estudo deve ser feito considerando situações extremas, cuja geração é mínima e a demanda na rede é alta, ou seja, a rede é quem supre a carga (Freitas et al.; 2006) ou quando toda a energia fornecida à carga é suprida pela GD consequentemente, o fluxo de potência na rede é mínimo (zero) (Freitas, Vieira, Morelato, da Silva, da Costa e Lemos 2006).

Um dos principais problemas causados por uma GD conectada à rede sem o devido estudo é a alteração dos parâmetros de curto-circuito na conexão entre a GD e a rede que pode levar a operação descoordenada da proteção e, conseqüentemente, causar danos aos equipamentos elétricos conectados à GD (Chaitusaney e Yokoyama 2005, IEEE Std 242 2001). Além disso, podem também ocorrer alterações nos padrões de qualidade da energia daquele barramento e o aumento das perdas por efeito Joule nas impedâncias das linhas devido ao fluxo de potência reativa (Kundur 1994, Xia, Shimomura e Paserba 2001).

Uma das formas de manter a qualidade da energia dentro de padrões estabelecidos por normas nacionais e internacionais em um barramento é através do controle do fluxo de potência ativa e reativa da GD. O controle da potência ativa de um GMG pode ser realizado com o controle do torque fornecido pelo motor diesel para estabilizar a potência ativa diante de um degrau na sua referência ou diante da conexão e desconexão de cargas. Já o controle de potência reativa do gerador síncrono é feito pelo regulador automático de tensão (AVR) que, por meio da corrente que circula na excitatriz, estabiliza a tensão nos seus terminais (Mota e Goldemberg 2010) que, por sua vez, altera o nível de tensão do barramento local e permite a manipulação do fluxo de potência reativa.

Os AVRs comerciais seguem diretrizes estabelecidas pela IEEE Std 421.5 que orienta tanto na configuração do controlador de tensão terminal quanto na configuração do controlador de potência reativa (IEEE Std 421.5 2005). Portanto, os AVRs podem operar sob dois modos, um para o controle de tensão terminal e o outro para o controle da potência reativa; no primeiro modo o GMG opera isolado, já no segundo o GMG é conectado à rede de distribuição.

Com melhor eficiência do AVR, distúrbios como afundamentos de tensão ou picos, decorrentes de entrada ou saída de cargas, tem seus efeitos atenuados, promovendo um melhor desempenho nos índices de qualidade da energia gerada (Neves, Reis, Aguiar, Machado e Oliveira 2012). Como o GMG tem característica não linear (Cooper, Morrow e Chambers 2009, Cooper et al. 2010) e controladores fuzzy apresentam boa resposta quando aplicados em sistemas não lineares (Sugeno 1999, Chen, Liu e Tong 2007, Tong, He e Zhang 2009, Chen, Liu, Liu e Lin 2010, Wang, Zeng e Keane 2010, Nucci, Souza, Silva, Reis, Giordano, Giordano e Cruz 2009, Chen, Jiao, Li e Li 2010, Lee 2011, Islam e Liu 2011, Tanaka, Tanaka, Ohtake e Wang 2012, Tong e Li 2012, Wu, Wang e Li 2012), portanto, faz com que sua utilização seja justificada.

Trabalhos com controladores fuzzy aplicados em máquinas elétricas começaram na década de 90. Desde então os tipos e as topologias de controladores fuzzy foram tornando-se mais versáteis e com melhores desempenhos. Em Su, Hwung e Lii (1997) é proposto um controlador fuzzy para ajustar ganhos de duas malhas de controles. Cada malha de controle atua em uma faixa de erro, obtido a partir da diferença entre valor de tensão terminal e tensão de referência, definidas entre erro grosseiro e erro fino. Em Wallace e Kiprakis (2002) é proposto o chaveamento entre controle automático de tensão terminal

e controle de fator de potência utilizando controladores PIDs.

Posteriormente, Kiprakis e Wallace (2004) utilizaram o chaveamento de Wallace e Kiprakis (2002) e estabeleceram duas outras estruturas. A primeira utiliza uma referência fixa para o fator de potência e um controlador PID para gerar um sinal referência de tensão para o AVR, limitado entre os valores de tensão máxima e mínima estabelecidos por norma ($\pm 6\%$) (Kiprakis e Wallace 2004). A segunda estrutura utiliza controladores fuzzy em cascata para gerar a referência do fator de potência a partir da tensão medida nos terminais da máquina (malha externa) e um controlador PID que trabalha com o sinal de referência gerado pela malha externa para controlar a tensão terminal (malha interna).

Em Soundarrajan e Sumathi (2011) foram utilizados o controladores fuzzy PD para controle automático da tensão terminal e para controle da potência ativa gerada aplicado a um sistema movido por turbina à vapor. Ainda, fez-se a comparação entre o controlador fuzzy e um controlador PID, no qual foram constatadas vantagens no tempo de acomodação, sobressinal e oscilação, quando se utilizam controles fuzzy.

Além das aplicações apresentadas para máquinas elétricas, os algoritmos de controle fuzzy têm sido utilizados também, para regular a operação do GMG isolado ou conectado à rede de distribuição (McGowan, Morrow e Fox 2008, Sisworahardjo et al. 2008, Su et al. 1997, Liang e Wang 2002, Moutinho, da Costa, Barra e Barreiros 2009, Gaonkar e Pillai 2010, Soundarrajan e Sumathi 2011).

2.1 Geração distribuída

Sistemas de GD são centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas, ou não, pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ANEEL 2007).

Em setembro de 1882 uma pequena estação de produção de energia elétrica instalada na cidade de Nova York (EUA) foi considerada a primeira geração distribuída, pelo fato de estar próxima ao centro consumidor. Esta estação abasteceu uma pequena rede com aproximadamente 400 lâmpadas por meio do acionamento de um pequeno motor de corrente contínua. Seu sucesso se deve ao fato de ter possibilitado a distribuição segura de energia com preço competitivo que veio a substituir a utilização de gás para iluminação pública (Ackermann 1999).

Desse ponto em diante as fontes de geração distribuída foram se difundindo cada vez mais devido à suas características marcantes, como melhora na qualidade da energia local, economia na transmissão de energia, etc (Rashed et al. 2008, Sisworahardjo et al. 2008, Amr et al. 2010, Ray et al. 2010).

A realidade brasileira para a GD surge com a necessidade de atender a demanda de pequenos centros consumidores cuja falta de interesse de grandes distribuidoras se faz marcante devido à inviabilidade econômica que um projeto desta natureza traz (Rodriguez 2002). No Brasil o tema de GD deve ter mais destaque ainda, pois nos últimos anos a qualidade ambiental da matriz energética piorou e as mudanças climáticas podem comprometer a reserva hídrica da matriz energética brasileira (Severino, Camargo e Oliveira 2008).

Outro ponto a se destacar, que torna as GDs ainda mais importantes para a realidade brasileira, está no aumento gradual de consumo de energia ano a ano. No Brasil, segundo o Boletim de Carga Mensal de dezembro de 2012 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o aumento da demanda de dezembro/2011 até dezembro/2012 foi de 6,3%. O aumento acumulado dos 12 meses foi de 4,2% em relação ao mesmo período do ano anterior (ONS 2013). Nesse contexto, as fontes GDs tonam-se uma grande aliada para centros de consumo de energia distantes das principais linhas de transmissão de energia.

2.2 Grupo motor-gerador diesel

Grupos geradores utilizando combustível diesel têm sido utilizados largamente para reduzir custos em horários de ponta de consumo de energia quando o valor tarifado é maior (McGowan, Morrow e McArdle 2003, Chambers, McGowan e Morrow 2007, Best, Member, Morrow, McGowan e Crossley 2007, Ray et al. 2010) ou como sistemas de *back-up*, devido à sua simplicidade, larga escala de potência de geração e ao baixo custo envolvido na sua aquisição, quando comparado com outras fontes alternativas de potências equivalentes (Rashed et al. 2008, Cooper et al. 2010). Ao associar o sistema de geração a diesel com o biodiesel, obtém-se uma alternativa interessante para sistemas de GD (Kennedy et al. 2010, Best et al. 2011).

Os GMGs possuem basicamente a mesma composição estrutural, são formados por um motor diesel acoplado diretamente à um gerador síncrono por meio de um eixo e possuem um quadro de comandos para partida, parada e leitura dos sinais do grupo gerador, além disso, o motor diesel possui um regulador de velocidade que ajusta a velocidade de rotação do sistema de acordo com a velocidade síncrona do gerador.

O regulador de velocidade atua no motor através do controle da válvula de combustível. Quanto maior a abertura da válvula, maior é a velocidade que o motor vai girar ou maior é o torque sobre o seu eixo. A Figura 2.1 mostra a estrutura típica de um GMG.

2.3 Gerador síncrono

Ao utilizar o GMG como sistema de GD são necessários cuidados especiais por se tratar de um gerador síncrono. Um sistema elétrico de potência (SEP), normalmente, é baseado em geradores síncronos, cuja geração é feita por máquinas síncronas. Sendo

Figura 2.1: Arranjo típico de um Grupo Motor-Gerador diesel: 1- Radiador; 2- Motor diesel; 3- Gerador síncrono; 4- Quadro de comando.

assim, é necessário que haja algumas condições para uma operação estável dos geradores, como a sincronia e o controle da tensão dos barramentos da rede, caso contrário, pode sofrer instabilidades de ângulo ou de tensão.

No caso da GD, manter o sincronismo com a rede não é o grande problema por se tratar de um sistema de geração muito menor do que os outros conectados à rede. Por outro lado, a estabilidade da tensão pode ser afetada pelo controle de tensão do gerador conectado ao barramento. Caso estabilidade de tensão seja afetada, pode comprometer grandes áreas da rede (Kundur 1994). Se a GD for pequena, isso também não será um problema, a não ser que ela esteja operando em modo isolado.

É sabido que entradas e saídas de cargas do SEP afetam as tensões nos barramentos e a frequência que está operando, fazendo com que estes oscilem próximo ao ponto de operação nominal. Quando estas oscilações são grandes e a resposta natural da GD é lenta, o SEP pode se tornar instável resultando em danos e até em sua queda (Eker e Altas 2007). Os sistemas de excitação dos geradores síncronos, conectados à rede, têm um papel importante no aumento da estabilidade de SEP (Kundur 1994, Bulic, Sumina e Miskovic 2010) e da qualidade de energia (Gunes e Dogru 2010). Através de reguladores automáticos de tensão, do inglês *Automatic Voltage Regulator* (AVR), a tensão terminal do gerador síncrono é controlada. O AVR, a partir de uma tensão de referência e da medição da tensão terminal, fornece um sinal de controle para a excitatriz, controlando a corrente ou a tensão de excitação nos enrolamentos de campo do gerador. A Fig. 2.2

apresenta uma configuração típica de um gerador síncrono com regulador de tensão.

Figura 2.2: Estrutura de um sistema de geração com regulador de tensão.

O gerador síncrono é composto pelo estator e o rotor. O estator é a parte fixa do gerador síncrono, onde estão fixados os enrolamentos de armadura. Neste enrolamento circula corrente alternada e é através do estator que o gerador fornece energia aos equipamentos ou o motor recebe energia da rede. O rotor é a parte girante que fica acoplado ao eixo do gerador. No rotor está presente o enrolamento de campo, responsável por excitar o campo da máquina síncrona. Quando é aplicada corrente no enrolamento de armadura, a interação do campo magnético gerado pelo enrolamento da armadura e o enrolamento de campo produz um torque mecânico no eixo da máquina. Quando é aplicado um torque no eixo da máquina síncrona, a interação com o campo magnético induzido pelo enrolamento de campo induz uma tensão no enrolamento da armadura do gerador.

As máquinas síncronas são uma das principais geradoras de energia elétrica em sistemas de potência pois possuem a capacidade de trocar potência reativa com a rede para controlar os níveis de tensão e o fator de potência. Além disso, esse tipo de gerador pode ser movido por forças de diferentes natureza como hidráulica, vapor, diesel ou biodiesel (Kundur 1994). O gerador síncrono foi representado neste trabalho por um modelo de máquina síncrona obtido na biblioteca do *software* PSCAD[®] que foi extraído de Kundur (1994). O modelo do gerador em transformada $dq0$ é ilustrado na Fig. 2.3.

No modelo $dq0$ da máquina síncrona, e_d e e_q são as tensões de fase do estator para os eixos direto e quadratura respectivamente, enquanto e_{fd} é a tensão no enrolamento de campo. Os termos com os índices fd referem-se aos elementos do enrolamento de campo e os termos com os índices $1d$ e $1q$ referem-se aos elementos dos enrolamentos de amortecimento no eixo direto e quadratura. R_{fd} é a resistência do circuito do rotor, R_a é a resistência de armadura por fase, R_{1d} e R_{1q} são as resistências do circuito de amortecimento, L_{1d} e L_{1q} são as indutâncias do circuito de amortecimento, L_l é a indutância de dispersão, L_{ad} , L_{aq} são as indutâncias mútuas e $L_{f1d} - L_{ad}$ representa o fluxo magnético entre o enrolamento de campo e o enrolamento amortecedor.

Figura 2.3: Modelo do gerador síncrono no eixo direto (a) e no eixo quadratura (b), extraídos de Kundur (1994).

As equações para o estator dos modelos da Fig. 2.3 são:

$$e_d = \dot{\psi}_d - R_a i_d \quad (2.1)$$

$$e_q = \dot{\psi}_q - R_a i_q \quad (2.2)$$

As equações para o rotor dos modelos da Fig. 2.3 são:

$$e_{fd} = \dot{\psi}_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (2.3)$$

$$0 = \dot{\psi}_{1d} + R_{1d} i_{1d} \quad (2.4)$$

$$0 = \dot{\psi}_{1q} + R_{1q} i_{1q}. \quad (2.5)$$

Os termos $\dot{\psi}_d$, $\dot{\psi}_q$, $\dot{\psi}_0$, $\dot{\psi}_{fd}$ e $\dot{\psi}_{1q}$, presentes em (2.1)-(2.5), representam a variação do fluxo concatenado, dados por:

$$\psi_d = -(L_{ad} + L_l) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \quad (2.6)$$

$$\psi_q = -(L_{aq} + L_l) i_q + L_{aq} i_{1q} \quad (2.7)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (2.8)$$

$$\psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{f1d} i_{1d} - L_{ad} i_d \quad (2.9)$$

$$\psi_{1d} = L_{f1d} i_{fd} + L_{11d} i_{1d} - L_{ad} i_d \quad (2.10)$$

$$\psi_{1q} = L_{11q} i_{1q} - L_{aq} i_q \quad (2.11)$$

na qual,

$$L_{fd} = L_{ffd} - L_{f1d} \quad (2.12)$$

$$L_{1d} = L_{11d} - L_{f1d} \quad (2.13)$$

$$L_{1q} = L_{11q} - L_{aq}. \quad (2.14)$$

2.4 Sistema de controle

Os parâmetros de controle dos sistemas de excitação têm importante papel na resposta e estabilidade do SEP. Sendo assim, estes parâmetros precisam ser configurados e sintonizados para que o controlador responda o mais rápido possível quando o mesmo for submetido a algum tipo de perturbação (Eker e Altas 2007). Um comportamento adequado na tensão terminal da conexão, na potência reativa fornecida e no fator de potência (FP) que o gerador controla se deve ao uso adequado da estratégia de controle do seu sistema de excitação (Bulic et al. 2010)

Os reguladores automáticos de tensão convencionais têm sido ajustados utilizando modelos lineares de máquinas síncronas. Entretanto, tanto a máquina síncrona, quanto seu sistema de excitação e os atuadores mecânicos possuem comportamento não linear (Cooper et al. 2009, Cooper et al. 2010). Assim, os sistemas convencionais de controle possuem uma boa resposta apenas no ponto de operação para o qual foi projetado (Eker e Altas 2007). Portanto é natural esperar uma melhor resposta de controladores não lineares, como, por exemplo, algoritmos de controle fuzzy, uma vez que estes podem responder melhor à uma larga faixa de operação do GMG e não apenas no ponto de operação.

Para dar suporte à utilização de controladores não lineares, normalmente se utiliza um ambiente de programação de mais alto nível, dessa forma é possível realizar alterações no código com maior facilidade. Contudo, é necessário também que este ambiente seja rápido o suficiente para realizar todo processamento dos sinais coletados e tomar atitudes junto à planta, para estes casos é comum o uso de um ambiente que utiliza código VHDL de programação.

No final dos anos 70, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos definiu um programa chamado VHSIC (Very High Speed Integrated Circuit) que visava a descrição técnica e projeto de uma nova linha de circuitos integrados. Porém, com o avanço acelerado dos dispositivos eletrônicos este programa apresentou-se ineficiente, principalmente na representação de grandes e complexos projetos. Em 1981, aprimorando-se as idéias do VHSIC, foi proposta uma linguagem de descrição de hardware mais genérica e flexível. Esta linguagem chamada VHDL (Hardware Description Language) foi bem aceita pela comunidade de desenvolvedores de hardware e em 1987 se tornou um padrão pela organização internacional IEEE, tornando-se um padrão mundial, ao lado do Verilog, uma

alternativa também expressiva no mercado de projetos de hardware. Hoje, praticamente todas as ferramentas de desenvolvimento de hardware computadorizadas aceitam essas linguagens como entrada, de forma que um projeto baseado em VHDL ou Verilog pode ser implementado com qualquer tecnologia (Hüsemann 2002).

Associando o poder de processamento da linguagem VHDL com o ambiente de programação LabVIEW da National Instruments (NI), é obtida uma plataforma de programação cuja interface homem-máquina (IHM) pode ser construída intuitivamente sem perder a alta capacidade de processamento. A NI oferece uma gama de equipamentos com unidades de aquisição de dados e de processamento dedicado, com uma central FPGA (Field Programmable Gate Array) a qual o LabVIEW faz interface.

2.5 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma revisão sobre GDs e sua forte tendência de crescimento diante de um cenário global como parte de uma solução para carência energética e melhoria dos índices de qualidade de energia. Foi apresentada também uma revisão sobre o uso da tecnologia de geração diesel, bem como suas principais vantagens e desvantagens, além de abordar o sistema de controle utilizado para esse tipo de geração de energia e sua evolução, mostrando alguns dos principais trabalhos recentemente publicados na área.

Descrição dos modelos do GMG, rede e cargas locais

Neste capítulo são apresentados os modelos utilizados para descrever a planta utilizada nas simulações para a tensão terminal, velocidade e potências ativa e reativa sob situações extremas de acionamento de cargas.

A planta utilizada neste trabalho foi elaborada no *software* PSCAD® e é composta por uma rede de distribuição padrão IEEE-1547, uma fonte de GD, sistema de controle, transformadores e cargas locais. A Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos simplificado que representa a GD e mostra os controles principais.

Figura 3.1: Diagrama de blocos simplificado da GD com indicação dos principais controladores.

A GD utilizada é um GMG cujo sistema de controle é composto por controladores

de tensão terminal, velocidade, potência e sincronismo. O GMG pode operar no modo síncrono cujo controle de velocidade e tensão terminal são responsáveis por gerir a GD ou, pode operar no modo de controle de potência que, quando a GD está conectada à rede de distribuição, controla o fluxo de potência de forma a se obter um valor desejado para o fator de potência (FP) no ponto de conexão com a rede de distribuição próximo a unidade.

3.1 Modelo do motor diesel

O motor diesel é representado por um atraso, que é uma aproximação do seu comportamento dinâmico. Já o atuador é representado pelo modelo dinâmico da válvula de combustível que alimenta o motor (*PSCAD/EMTDC User's Guide, Version 4.2.1* 2010). A Fig. 3.2 exhibe o diagrama de blocos do modelo do motor e atuador que são utilizados.

A entrada *Gate* do atuador representa a referência de abertura da válvula de combustível e é fornecida pela malha de controle de velocidade ou potência ativa. Portanto, a referência *Gate* é modificada quando há necessidade de mudança de velocidade ou potência ativa.

A saída T_m do motor é o torque entregue ao gerador síncrono. A partir do controle deste torque e do seu sistema de excitação que o gerador síncrono é capaz de fornecer energia à uma carga local ou à rede de distribuição. Os parâmetros do modelo da válvula de combustível e do motor são configurados de acordo com os valores da Tabela A.1.

Figura 3.2: Diagrama de blocos do modelo utilizado para o motor a diesel.

3.1.1 Princípio do controle da potência ativa

O controle da potência ativa de um gerador síncrono está atrelado ao controle de frequência, já o controle da potência reativa, com o controle da tensão terminal. A frequência e a tensão terminal são variáveis importantes para determinar os parâmetros de qualidade da energia elétrica. Sendo assim, o controle das potências ativa e reativa são importantes para um desempenho satisfatório e equilibrado de um gerador síncrono (Kundur 1994).

A mudança de carga nos terminais do gerador reflete, instantaneamente, no torque elétrico de saída da máquina denotado T_e , fazendo com que haja um desequilíbrio entre

o torque mecânico T_m e o torque elétrico do gerador, provocando uma aceleração ou desaceleração, dada por:

$$T_a = T_m - T_e, \quad (3.1)$$

sendo T_a o torque de aceleração dado em Nm, resultando em uma variação da velocidade do sistema quando $T_a \neq 0$ (Kundur 1994).

O GMG operando isolado, sem presença da rede, funciona no modo de controle velocidade. Quando opera dessa maneira, toda entrada de carga gera uma aceleração negativa ($T_a < 0$) e saída de carga gera uma aceleração positiva ($T_a > 0$) resultante do equilíbrio da Eq. 3.1. O controle de velocidade então ajusta T_m para reduzir essa aceleração, corrigindo a velocidade para o ponto de referência configurado e, conseqüentemente, restaurando a frequência de geração. Entretanto, quando conectado a rede, o GMG funciona no modo controle de potência ativa. A partir da alteração de T_m , a rede absorverá toda sua potência gerada, fornecendo um conjugado elétrico suficiente para não acelerar a unidade de geração ($T_a = 0$).

3.2 Modelo do gerador síncrono

O gerador síncrono é representado por um modelo padrão de máquina síncrona de sexta ordem obtido na biblioteca do *software* PSCAD® (*PSCAD/EMTDC User's Guide, Version 4.2.1* 2010) e é representado no modo direto e quadratura pela Fig.3.3, seus parâmetros são configurados de acordo com os valores da Tabela A.4. Na Fig.3.3 e_d e e_q são as tensões instantâneas fase-neutro, e_{fd} é a tensão de campo, R_{fd} a resistência do rotor, as resistências de amortecimento são representadas por: R_{1d} , R_{1q} , as indutâncias de amortecimento são: L_{1d} , L_{1q} , L_l é a indutância série da armadura, L_{ad} , L_{aq} representam as indutâncias mútuas e $L_{fld} - L_{ad}$ representam o link de fluxo entre excitatriz e o circuito de amortecimento.

Figura 3.3: Circuito equivalente do eixo d e q da máquina síncrona.

3.2.1 Excitatriz da máquina síncrona

A excitatriz de uma máquina síncrona é responsável por fornecer corrente contínua para o enrolamento de campo e, associado a um sistema de controle, é possível controlar a tensão terminal e a potência reativa fornecida pelo gerador síncrono. O controlador da excitatriz pode manipular as condições de funcionamento para proteger o sistema de geração e os equipamentos ligados a ele. Os sistemas de excitação podem ser classificados como excitação CC, excitação estática e excitação CA (Kundur 1994).

3.2.2 Princípio do controle da potência reativa e tensão terminal

Máquinas síncronas podem gerar ou absorver potência reativa dependendo da tensão de excitação contínua aplicada ao enrolamento de campo. Quando sobreexcitado, fornece energia reativa e há aumento no nível da tensão terminal, e quando subexcitado, absorve potência reativa e reduz o valor da tensão terminal. Essa capacidade de injetar ou absorver reativo é limitada pela corrente do enrolamento de campo, corrente do enrolamento da armadura e os limites de aquecimento da máquina (Al-Hamrani, Von Jouanne e Wallace 2002).

A máquina síncrona pode ser representada pelo modelo monofásico apresentado na Fig. 3.4, sendo E_{fem} a tensão induzida nos enrolamentos da armadura, R_a a resistência dos enrolamentos da armadura e V_t a tensão nos terminais da conexão da máquina. O parâmetro X_s é chamada reatância síncrona e representa a soma da indutância de reação de armadura (X_{ar}) com a indutância de fluxo disperso (X_l).

Figura 3.4: Circuito equivalente monofásico do gerador.

Analisando o circuito equivalente da Fig. 3.4, são obtidos dois diagramas fasoriais do sistema de excitação considerando V_t como referência.

A Fig. 3.5 mostra que:

- quando $|E_{fem}| > |V_t|$, a máquina está sobreexcitada e a corrente I_a está atrasada em relação a V_t , portanto o gerador injeta reativo; e
- quando $|E_{fem}| < |V_t|$, a máquina está subexcitada e a corrente I_a está adiantada em relação a V_t , portanto o gerador absorve reativo.

Figura 3.5: Diagrama fasorial do circuito equivalente. Em (a) considerando o enrolamento de campo sobrexcitado e em (b) subexcitado.

O ângulo δ , entre $|V_t|$ e E_{fem} , é conhecido como ângulo de potência (Fitzgerald, Kingsley e Umans 2002). Se $\delta > 0$ a máquina opera como gerador e quando $\delta < 0$, a máquina opera como motor. O ângulo θ representa a defasagem entre a tensão terminal e a corrente I_a . Essa defasagem é causada pela impedância da carga e aumenta para valores maiores de potência reativa que a carga consome. Quando a carga é puramente resistiva, não há defasagem entre V_t e I_a pois $\theta = 0$.

O controlador de potência reativa e tensão terminal determina o sinal de referência que será aplicado à um atuador para fornecer a tensão ou corrente de excitação do enrolamento de campo.

3.3 Rede de distribuição

A rede de distribuição é composta por um alimentador padrão IEEE-1547 (IEEE Std 1547.2 2009), que utiliza um alimentador principal de 1000 MVA operando em 69 kV. A Fig. 3.6 mostra o barramento 3 como ponto de conexão da GD e também a configuração radial da rede. A rede é composta por linhas curtas cujas impedâncias e demais parâmetros são exibidos no Apêndice A.

3.4 Cargas locais

As características dinâmicas das cargas têm uma grande influência no comportamento do GMG. Para representar algumas cargas típicas encontradas na rede de distribuição foram escolhidas três tipos com diferentes respostas dinâmicas e com as seguintes características:

1. Motor de indução, de 215 hp. Os dados do motor são apresentados na Tabela A.2 do apêndice do trabalho;
2. Carga RLC, cujos valores dos elementos passivos e potência exigida do sistema estão presentes na Tabela A.3 do apêndice do trabalho;

Figura 3.6: Diagrama unifilar do alimentador IEEE Std 1547.2, 2009.

3. Retificador não-controlado de seis pulsos que alimenta uma resistência de $2,5 \, \Omega$ e consome 250 kW.

As cargas foram dimensionadas para que a potência absorvida fique em torno de 20% da potência nominal do gerador, dada por $S_n = 1112 \, \text{kVA}$ (Tabela A.4 do Apêndice A).

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral do GMG que trata este trabalho, a representação dos elementos da rede de distribuição e as cargas locais que foram utilizados para avaliação do desempenho do sistema de controle. Ainda, foi exibido o diagrama dos modelos válvula de combustível diesel e do motor diesel, além do modelo do gerador síncrono utilizado neste trabalho. Foi apresentado também o princípio utilizado para o controle de potência ativa, potência reativa e tensão terminal, além das malhas de controle e seus pontos de aquisição de sinais na Figura 4.1.

Capítulo 4

Estratégia de controle fuzzy para o GMG

Sistemas fuzzy são conhecidos pela sua capacidade de interpretar valores linguísticos e tomar decisões através de inferências baseadas nas regras definidas por um especialista podendo, dessa forma, controlar uma planta geradora de energia. Normalmente são utilizados para controlar sistemas de natureza não linear devido à sua capacidade de responder a requisitos como tempo de acomodação e sobressinal.

O funcionamento da lógica fuzzy é feito através de etapas definidas, tais como fuzificação das entradas, inferência e defuzificação da saída. A fuzificação consiste em transformar o conjunto de entradas em valores de pertinência para cada função de pertinência da entrada. As duas entradas utilizadas no controlador fuzzy deste trabalho são eP e eD , referem-se respectivamente à entrada proporcional do sinal de erro e à derivada do sinal de erro.

Neste trabalho é utilizado um controlador fuzzy PD+I para cada uma das malhas de controle da GD conforme apresentadas na Figura 4.1 com os pontos de aquisição dos sinais utilizados pelos controladores fuzzy. Já a Fig. 4.2 mostra o diagrama de blocos do controlador fuzzy PD+I em que o ganho K_i é o ganho responsável pela velocidade de integração do sinal de erro e os ganhos K_p e K_d são responsáveis, respectivamente, pela normalização dos sinais de entrada eP e eD para o universo de discurso da entrada do controlador limitado entre $[-1, 1]$, sendo:

$$e = Sinal_{ref} - Sinal \quad (4.1)$$

$$eP = K_p e \quad (4.2)$$

$$eD = K_d sTe. \quad (4.3)$$

Os ganhos de saída K_{ui} e K_u são ajustados para que sua soma pertença ao universo de discurso da variável controlada, ou seja, se o controlador for utilizado na malha de

Figura 4.1: Diagrama de blocos da GD com indicação dos pontos de medição das variáveis utilizadas pelos controladores.

Figura 4.2: Estrutura do controlador fuzzy PD+I.

controle de velocidade esta soma representa a abertura da válvula de combustível (*Gate*) e portanto, deve ser ajustado para que esta soma represente desde sua abertura mínima até a máxima.

4.1 Projeto do controlador

O processo de inferência fuzzy é feito seguindo um conjunto de regras determinada pelo especialista e é baseado no conhecimento heurístico do sistema (McGowan et al. 2008). O controlador fuzzy foi obtido a partir da escolha de uma superfície de controle de forma a representar as não linearidades necessárias para que o controlador tomasse atitudes rápidas diante de perturbações, porém, sem perder o amortecimento necessário para estabilizar o sistema.

A Fig. 4.3(a) apresenta as funções de pertinência e seus respectivos nomes, definidas como variáveis linguísticas referentes à entrada eP , que também são as mesmas funções utilizadas para a entrada eD e portanto não houve necessidade de serem apresentadas novamente por meio de outra figura. A Fig. 4.3(b) apresenta as funções de pertinência e suas respectivas variáveis linguísticas para defuzificação da saída do controlador.

Figura 4.3: Funções de pertinência das entradas e da saída. Em (a) as funções denotadas “P” e “N” possuem distribuições de curva de sino e “Z” triangular, em (b) funções *single tones* ao longo do universo de discurso denotadas: “DM”, “DP”, “NFN”, “AP” e “AM”.

A superfície foi definida através de funções de pertinência apresentadas na Fig. 4.3(a), regras fuzzy e funções de saída *single tones* formadas por pulsos unitários apresentadas na Fig. 4.3(b). As regras de inferência são constituídas de expressões literais do tipo “Se” eP é P e eD é Z “então” u é AP e combina todas as entradas à uma determinada saída. A Tabela 4.1 apresenta as combinações das três variáveis do sistema fuzzy. Neste caso, quando eP é P (positivo) e a entrada eD é Z (zero), a saída é dada por AP (alto positivo); dessa forma, a saída varia com as mudanças ocorridas nas entradas do sistema de inferência fuzzy.

Tabela 4.1: Regras de inferência do sistema fuzzy

		eP		
		N	Z	P
eD	N	DM	DP	NFN
	Z	DP	NFN	AP
	P	NFN	AP	AM

Para o controlador implementado a defuzificação da saída foi realizada utilizando o método do centro de área (CDA) (Eker e Altas 2007) e pode ser calculado por

$$u = \frac{\sum_{k=1}^N \mu(V_k) V_k}{\sum_{k=1}^N \mu(V_k)} \quad (4.4)$$

onde N representa os pontos de discretização do universo de discurso da saída, μ representa a função de pertinência e $V_k = 1, \dots, N$ os valores *crisp* que o sistema fuzzy retornará para cada conjunto de entrada.

4.2 A superfície fuzzy

O controlador fuzzy pode ser representado por uma superfície de controle que facilita a visualização da relação existente entre as entradas e a saída do sistema fuzzy. A partir desta superfície, pode ser visualizada a atitude que o controlador tomará considerando uma dada entrada do sistema.

A superfície de controle obtida a partir do projeto do controlador fuzzy apresentado neste trabalho pode ser observada na Fig. 4.4. Por meio desta superfície, podem ser observadas variações bruscas nas fronteiras entre os valores positivos e negativos fazendo com que sejam fornecidas saídas com esta mesma característica, ou seja, o controlador fuzzy muda com maior rapidez o valor de sua saída quando os valores dos sinais de suas entradas cruzam o zero.

Figura 4.4: Superfície de controle fuzzy.

Os platôs laterais mostram que quando as entradas possuem sinais opostos, a saída do controlador fuzzy deve ser zero, pois o sistema tende a entrar em equilíbrio sem necessidade de tomar qualquer atitude. Contudo, para situações cujas entradas são de mesmo sinal, ou seja, ambas positivas ou ambas negativas, o controlador fuzzy tende a saturar em seus pontos máximos ou mínimos, nestes casos, o controlador fuzzy deve tomar atitudes de maior intensidade para que o sistema volte para ao seu ponto de equilíbrio (Reis, Neves, Aguiar, Bastos, Machado e Oliveira 2013).

4.3 Controle coordenado de tensão terminal e potência reativa

O controlador coordenado para tensão e potência reativa diferencia-se dos controladores disponíveis no mercado, pois utiliza duas malhas de controle fuzzy em paralelo que controlam simultaneamente a tensão e a potência reativa fornecida pelo gerador. A malha de controle de tensão pondera, automaticamente, a contribuição da malha de controle de potência reativa.

A potência reativa e a amplitude da tensão nos terminais da máquina são reguladas pela excitação de campo do gerador síncrono (E_f). Diferentemente da estrutura utilizada em sistemas comerciais existentes cujas malhas de controle de tensão e potência reativa atuam de forma independente na excitatriz (Neves, Reis, Aguiar, Bastos, Machado e Oliveira 2013).

A estrutura de controle desenvolvida para esta aplicação utiliza duas malhas de controle fuzzy interligadas e a soma de suas respostas atuam em conjunto para o controle da excitatriz como ilustrado na Fig. 4.5. A primeira malha de controle é responsável pelo controle da tensão terminal do gerador e utiliza referência unitária. A segunda malha é responsável pelo controle da potência reativa produzida no gerador síncrono (Neves et al. 2012). Este sistema de controle foi projetado para atuar quando a GD estiver isolada ou conectada à rede de distribuição de forma a promover melhorias na qualidade da energia fornecida.

Figura 4.5: Estrutura do controle fuzzy coordenado para potência reativa e tensão terminal.

A segunda malha utiliza como referência a potência reativa média consumida pelas cargas locais. Dessa forma o GMG supre apenas a necessidade dessas cargas e anula a troca de potência reativa entre a GD e a rede de distribuição favorecendo a manutenção do fator de potência unitário no ponto de conexão da GD.

O fator de potência pode ser calculado por:

$$fp = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + THD_{(I)}^2}} \quad (4.5)$$

em que θ é o ângulo de defasagem entre a tensão V_{rede} e a corrente I_{rede} e $THD_{(I)}$ é a distorção harmônica total da corrente.

A potência reativa instantânea pode ser calculada por:

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_a i_b - v_b i_a + v_b i_c - v_c i_b + v_c i_a - v_a i_c) \quad (4.6)$$

e a potência reativa média por:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T q \, dt \quad (4.7)$$

sendo v_a , v_b e v_c os valores de tensão instantânea do GMG e i_a , i_b e i_c as respectivas correntes de saída da máquina síncrona.

O erro da tensão terminal na malha superior é dado por:

$$e_{V_t} = V_{t_{ref}} - V_{t_{gen}} \quad (4.8)$$

e o erro na malha da potência reativa é:

$$e_Q = Q_{ref} - Q_{gen}. \quad (4.9)$$

A tensão de excitação de campo E_f é obtida pela soma:

$$E_f = E_{f0} + \Delta E_{f_{V_t}} + \Delta E_{f_Q} \quad (4.10)$$

sendo o termo E_{f0} a condição inicial de excitação de campo, $\Delta E_{f_{V_t}}$ o termo dado pelo controlador de tensão e ΔE_{f_Q} o termo dado pelo controlador de potência reativa.

Ambas as malhas da Fig. 4.5 contribuem para o sinal de controle E_f , contudo o termo ΔE_{f_Q} é dado por:

$$\Delta E_{f_Q} = \Delta E_Q \alpha \quad (4.11)$$

onde α é um fator dado por:

$$\alpha = V_{t_{ref}} - |e_{V_t}| \quad (4.12)$$

que possui valor máximo quando e_{V_t} é zero. Dessa forma, a estratégia de controle permite uma maior atuação do controlador de potência reativa na excitação do enrolamento de campo do gerador síncrono na medida que o erro da tensão diminui, priorizando assim o controle de tensão terminal. Então são evitadas grandes oscilações no nível de tensão fornecido à carga, o que favorece a melhora da qualidade da energia gerada.

Para comparação, foi utilizado um controlador comercial que utiliza o controle de tensão constante (CTC). Os resultados obtidos foram utilizados como padrão de desempenho ao analisá-lo com o controlador fuzzy que foi desenvolvido neste trabalho.

Al-Hamrani et al. (2002) define como “controle de tensão constante” (CTC) o controlador que atua somente regulando o nível de tensão fornecido pela geração, não importando com a quantidade de potência reativa gerada para que isso seja feito. Al-Hamrani et al. (2002) também define o “controle de potência reativa constante” (CPRC) para os controladores que são configurados de maneira a fornecer um determinado valor de Q no barramento de conexão da unidade geradora com a rede.

O sistema de excitação CA rotativo foi escolhido para o controle de tensão terminal e de potência reativa nas simulações deste trabalho, devido principalmente ao tipo de equipamento que o Laboratório de Controle (LAC) e o Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia (LAFAPE) possuem. O gerador diesel que os laboratórios disponibilizam utiliza um sistema de excitação do tipo *brushless*, portanto, para uma validação, foi necessário utilizar esse tipo de excitação nas simulações.

4.3.1 Sistema de retificação rotativa

Os sistemas rotativos de excitação são do tipo *brushless* (em português, “sem escovas”), nestes sistemas a necessidade dos anéis deslizantes e das escovas coletoras são eliminadas. A corrente contínua é fornecida diretamente ao enrolamento de campo do gerador síncrono. Este tipo de excitação foi desenvolvido para aplicações de grande porte, nas quais os enrolamentos de campo podem consumir potências da ordem de MW. Os sistemas de excitação que utilizam anéis e escovas também podem ser utilizados para esse porte de geração, porém necessitam de uma alta taxa de manutenção. As excitatrizes *brushless* eliminam os anéis girantes e assim toda corrente é conduzida por interações magnéticas (Gunes e Dogru 2010). A Fig. 4.6 apresenta a estrutura do sistema de excitação *brushless*.

Figura 4.6: Sistema de excitação CA com um retificador controlado, anéis deslizantes e alternador com regulador de excitação (Kundur 1994).

tensão de excitação do gerador principal então é dada pela multiplicação de V_E por F_{EX} . De acordo com Calsan (2011), F_{EX} , K_C e I_N representam uma reação da armadura do gerador principal na excitatriz, gerando um fluxo oposto ao imposto pelo regulador de tensão. Dependendo do ponto de operação do gerador principal, esta reação pode causar mudanças no modo de comutação dos diodos da excitatriz. O limite inferior zero no bloco integrador representa o bloqueio de valores negativos pelos diodos rotativos da excitatriz.

4.4 Controle de velocidade, sincronismo e potência ativa

A variação de velocidade do motor diesel promove variação na frequência do sinal gerado nos terminais da máquina síncrona devido ao acoplamento entre o eixo do motor diesel e do gerador (Cheong, Li e Xia 2010). Isso ocorre devido ao fato de ambos, motor e gerador, estarem acoplados fisicamente pelo eixo do motor diesel e pelo rotor do gerador síncrono. Essa ligação permite que seja feita a associação entre movimento mecânico e energia elétrica gerada cuja velocidade de rotação do campo é a velocidade síncrona dada pela expressão:

$$n = 60 \frac{f}{p}, \quad (4.13)$$

onde n é a velocidade do rotor em rpm, f é a frequência da rede e p é número de pares de pólos.

O sistema de geração pode operar no modo de controle isolado ou conectado com a rede, a chave S_1 define o modo no qual o GMG atua. O comando de acionamento da chave S_1 , apresentado na Fig. 4.8, define a malha de controle de velocidade como ativa quando o GMG está desconectado da rede e alimenta apenas as cargas locais. Já quando conectado, o status do comando S_1 é alterado e ativa a malha de controle de potência.

Figura 4.8: Estrutura do controle de potência ativa, velocidade e sincronismo.

O sinal de abertura da válvula de combustível $Gate$ é utilizado para modificar a velocidade do motor diesel quando a GD opera desconectada da rede de distribuição.

Quando conectado à rede distribuição, a variação em *Gate* promove variações no torque mecânico (T_m) e uma variação na potência ativa fornecida para a rede uma vez que, neste caso, a frequência é determinada pela rede.

A malha de controle de velocidade também é constituída por um algoritmo fuzzy PD+I que tem o erro de velocidade e sua derivada como entradas, esse controlador substituiu o controlador comercial com o objetivo de aumentar a velocidade de resposta da GD (Reis, Neves, Aguiar, Machado e Oliveira 2013).

O controlador fuzzy de velocidade é implementado a partir do sinal de erro de velocidade dado por:

$$e_\omega = \omega_{ref} - \omega \quad (4.14)$$

na qual ω_{ref} é a referência de velocidade e ω é a medida de velocidade do GMG.

Com o sinal de erro e_ω , o controlador fuzzy altera a saída *Gate* responsável pela atuação na velocidade do GMG. A referência de velocidade ω_{ref} é, constantemente, ajustada enquanto o GMG está desconectado da rede e é fornecida pela malha de controle de sincronismo dada por:

$$\omega_{ref} = \omega_0 + \Delta\omega_{sinc} \quad (4.15)$$

na qual ω_0 representa o valor síncrono para velocidade e $\Delta\omega_{sinc}$ a componente que modifica o valor ω_{ref} .

Para possibilitar a conexão entre os dois sistemas é necessário que a saída de tensão $v_{t_{gen}}$ do GMG esteja sincronizada com a referência obtida da rede e é determinada por:

$$v_{t_{gen}} = V_m \sin \theta_{gen}, \quad (4.16)$$

sendo V_m a magnitude do sinal de tensão senoidal e θ é dado por:

$$\theta = 2\pi ft + \phi, \quad (4.17)$$

sendo f a frequência fundamental da tensão, t o tempo e ϕ a defasagem em relação a um sinal com fase 0° ou 0 rad.

O método comercial de sincronismo baseia-se no monitoramento das fases dos sinais da rede e do GMG, conectando a GD no momento em que a diferença entre os sinais das fontes atingem uma tolerância pré estabelecida. Contudo, normalmente existem distúrbios de potência reativa durante a conexão da GD devido à falta de sincronismo. Para reduzir esse distúrbio foi desenvolvido um controlador de sincronismo baseado em algoritmo fuzzy que não apenas diminui a diferença entre as fases das tensões fornecidas pelo GMG e pela rede, como também diminui a derivada nessa diferença no momento da conexão, ou seja, o sistema fuzzy de sincronismo reduz o erro entre as fases e a variação do erro.

Utilizando um medidor de fase, extrai-se o argumento θ a partir dos sinais de tensão da geração e da rede obtendo os sinais θ_{rede} e θ_{gen} . A entrada da malha de controle do sincronismo é apresentada na Fig. 4.8 e é dada por:

$$e_\theta = \theta_{rede} - \theta_{gen}. \quad (4.18)$$

A saída desta malha fornece o sinal $\Delta\omega_{sync}$, que é responsável pelo incremento da referência de velocidade ω_{ref} que, por sua vez, realimenta a malha de controle da velocidade do GMG, apresentada na Fig. 4.8. Dessa forma, $\Delta\omega_{sync}$ modifica a velocidade de referência do GMG e acelera ou atrasa o sinal gerado até que este esteja em sincronismo com o sinal fornecido pela rede de distribuição.

O sincronismo ocorre quando o argumento θ de dois sinais estiverem dentro de uma tolerância pré estabelecida ou quando esta diferença for nula, o que significa ter $0 \leq e_\theta \leq tol$. A Fig. 4.9 mostra dois sinais sendo sincronizados ao longo do tempo e a diferença entre seus argumentos sendo minimizada.

Figura 4.9: Sincronismo dos sinais da fase do gerador e da rede de distribuição utilizando algoritmo fuzzy.

No instante em que a GD é conectada à rede de distribuição a malha de controle de velocidade é desativada pela chave $S1$ e então é acionada a malha de controle de potência ativa que assume a operação do motor diesel para seguir a referência de potência ativa P_{ref} .

O cálculo para potência ativa usado para controlar a potência fornecida à rede é dado por:

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c, \quad (4.19)$$

Calcula-se então a potência ativa média por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt. \quad (4.20)$$

O erro da potência ativa é definido por:

$$e_P = P_{ref} - P_{gen}, \quad (4.21)$$

na qual P_{ref} é a potência de referência e P_{gen} a potência gerada pela GD.

4.5 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as etapas que um sistema fuzzy executa para realizar seu processo de inferência, além de apresentar a configuração das funções de pertinência das entradas e saída e as regras do sistema fuzzy para um controlador fuzzy. Além disso, foram apresentadas a malha de controle de potência ativa e a estratégia de controle coordenado de tensão terminal e potência reativa do GMG. Foi apresentado, também, o sistema de excitação por meio do diagrama de blocos do modelo de excitatriz utilizado no trabalho (excitatriz CA *brushless* AC1A).

Capítulo 5

Resultados de simulações

Os resultados foram obtidos para operação do GMG isolado e conectado à rede de distribuição. Em cada cenário o sistema foi inicializado com o método de sincronismo proposto e, após conectado à rede, submetido à transferência de potência para a rede com conexão e desconexão de cargas. Dessa forma, resultados com métodos e controladores comerciais existentes são apresentados para comparação.

5.1 Controle de sincronismo

Foram comparados os resultados obtidos com os métodos comerciais de sincronismo para GMG e o método que utiliza controlador fuzzy. A Fig. 5.1 mostra os resultados do comportamento da tensão nos terminais da GD e de sua velocidade para uma tolerância de $0,5^\circ$ para conexão entre as fases dos sinais da rede e da GD. A Fig. 5.2 apresenta os resultados da mesma variável contudo para uma tolerância de $5,0^\circ$ para conexão.

Apesar de levar aproximadamente 4 segundos a mais para efetuar o sincronismo, o controlador fuzzy permite que a velocidade do GMG seja mais estável não ultrapassando os limites recomendados pela IEEE Std 1547.2 (IEEE Std 1547.2 2009). O mesmo não ocorre quando utilizado o método comercial que permite um comportamento oscilatório de amplitude que chega a ser 5 vezes maior que o obtido com o controle fuzzy, o que afeta o sinal da tensão terminal e também produz oscilações nas potências P e Q , como pode ser observado na Fig. 5.3.

A Fig. 5.3 mostra que o comportamento dos fluxos de potências P e Q entre a GD e a rede são influenciados pelo método de sincronismo adotado. Assim, quando o método comercial é utilizado com uma tolerância de $0,5^\circ$ para o erro entre as fases a serem sincronizadas nota-se uma grande oscilação em P e Q alcançando respectivamente 250 kW (22,5 %) e 90 kVAr (8,1 %), contudo, é visto na Fig. 5.3(b) que ao utilizar o controlador fuzzy de sincronismo para a mesma tolerância não há oscilação em P e há uma pequena oscilação em Q , em torno de 8 kVAr, ou seja, oscilação que representa apenas

Figura 5.1: Comparação dos valores da tensão terminal e velocidade, para tolerância de erro entre as fases de $0,5^\circ$, utilizando o controlador comercial (CC), controlador fuzzy (CF) e o limite para velocidade (LS).

Figura 5.2: Comparação dos valores da tensão terminal e velocidade, para tolerância de erro entre as fases de $5,0^\circ$, utilizando o controlador comercial (CC), controlador fuzzy (CF) e o limite para velocidade (LS).

0,7 % da potência nominal da máquina síncrona.

Quando utilizada uma tolerância de $5,0^\circ$, no lugar de $0,5^\circ$ para o erro entre as fases, surgem maiores distúrbios em P e Q no momento da conexão como pode ser visto, respectivamente, nas Figs. 5.3(c) e 5.3(d). O método comercial para esta tolerância permitiu uma oscilação máxima em torno de 250 kW (22,5 %) para P e de 110 kVar (9,9 %) para Q , enquanto que com a estratégia de controle fuzzy as oscilações foram 25 vezes menores em

Figura 5.3: Transitórios em P e Q do gerador e da rede causados pelo efeito da conexão entre a GD e a rede; (a) e (c) utilizaram método de sincronismo comercial, (b) e (d) utilizaram controlador fuzzy de sincronismo.

P e 7 vezes menores em Q , chegando respectivamente, a 10 kW (0,9 %) e 15 kVar (1,3 %).

5.2 Modo de operação isolado

Os testes com conexão das cargas GD foram implementados da mesma forma para os dois modos de operação do GMG. Primeiramente, um motor de indução trifásico (MIT) de 215 hp foi conectado à vazio em $t=10$ s com posterior aumento em rampa do seu torque até o mesmo atingir o valor de 1 p.u., o que representa aproximadamente 14,5% da potência total do gerador, permanecendo acionado até atingir 20 s quando então foi desconectado. Posteriormente, uma carga RLC foi conectada em $t=25$ s permanecendo até 35 s. A terceira carga utilizada, um retificador trifásico não-controlado, foi conectada à rede em $t=40$ s permanecendo até 50 s.

Os resultados apresentados na Fig. 5.4 mostram a atuação dos controladores de velocidade e tensão terminal para o modo de controle isolado. Para uma das simulações utilizou-se o controlador fuzzy para regular velocidade e tensão terminal, já na outra simulação utilizou-se um controlador PI clássico da biblioteca do PSCAD® para regular a velocidade e seus parâmetros são configurados de acordo com os valores da Tabela A.5 no anexo do trabalho e um PI configurado segundo Mota e Goldemberg (2010) para regular a tensão terminal.

Figura 5.4: Comparação da tensão terminal e velocidade do GMG obtidos com a atuação dos controladores fuzzy e CC+PI operando em modo isolado.

O controlador PI permitiu variações da velocidade do GMG 2,5 vezes maiores ao conectar ou desconectar cargas em seus terminais e apresentou respostas 2 vezes mais lentas à essas variações do que com o controlador fuzzy proposto. Os resultados para o controle da tensão terminal são semelhantes para os dois controladores.

5.3 Resultados para modo de operação conectado

Os resultados dos ensaios apresentados a seguir mostram a atuação dos controladores de tensão terminal, potência ativa e potência reativa para o modo de controle conectado à rede de distribuição.

É feita comparação entre resultados de ensaios obtidos com o controlador fuzzy desenvolvido para P e Q e resultados obtidos com o GMG controlado por um PI configurado de acordo com o padrão IEEE421 (IEEE Std 421.5 2005) para o sistema de excitação e outro controlador comercial (CC) para regular a potência ativa P , com seus parâmetros apresentados de acordo com os valores da Tabela A.6 no anexo do trabalho.

A rotina de testes com cargas seguiu a mesma metodologia apresentada para os testes dos controladores com o GMG desconectado da rede de distribuição.

Já a Fig. 5.5 apresenta os resultados de ambos controladores testados para transferência de potência ativa e conexão de cargas. A Fig. 5.6 apresenta os mesmos resultados para a potência reativa. Nas duas figuras as potências P e Q são positivas ao fornecer energia, caso contrário estão consumindo potência fornecida pela outra fonte.

As variações em Q foram 10 vezes menores se com o controlador fuzzy no momento da conexão do GMG com a rede de distribuição e obteve respostas 2 vezes mais rápidas para estabilizar Q na conexão das cargas em relação ao controlador CC+PI.

Figura 5.5: Comparação dos valores de potência ativa gerada e absorvida pelos elementos que compõem do sistema.

Figura 5.6: Comparação dos valores de potência reativa gerada e absorvida pelos elementos que compõem do sistema.

A resposta para a tensão terminal do controlador fuzzy também foi mais rápida, levou aproximadamente metade do tempo do controlador CC+PI como é apresentado na Fig. 5.7. O comportamento do FP ainda é exibido na mesma figura e, pode ser observado que o controlador fuzzy apresentou em média resultados 1% mais próximos à unidade na conexão de cargas em consequência de sua maior velocidade de resposta na correção da tensão terminal.

Figura 5.7: Comparação entre os valores de tensão terminal e fator de potência apresentado durante os ensaios para os dois controladores utilizados.

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os cenários de teste utilizados nas simulações, foram empregadas diferentes situações de acionamento de cargas além de testar também o algoritmo de sincronismo desenvolvido. O controlador fuzzy para sincronismo mostrou melhor desempenho em sincronizar os sinais de tensão uma vez que, apesar de ser um pouco mais lento, evitou oscilações na conexão do GMG com a rede de distribuição.

O controle de potência ativa obteve baixo sobressinal na resposta a entrada em rampa e nesta situação o controlador fuzzy mostrou-se um pouco mais rápido para estabilizar o sistema diante perturbações. O sistema de controle coordenado mostrou ser bastante eficiente, pois a resposta para a tensão terminal do controlador fuzzy foi mais rápida, levou aproximadamente metade do tempo do controlador CC+PI para retornar aos valores nominais, além de fazer com que as variações em Q fossem 10 vezes menores no momento da conexão do GMG com a rede de distribuição e obter respostas 2 vezes mais rápidas para estabilizar Q na conexão das cargas em relação ao controlador CC+PI.

Capítulo 6

Montagem da bancada e resultados experimentais

6.1 Descrição da planta

Para esta etapa do trabalho foi necessário um local adequado para instalação do sistema GMG diesel. O local escolhido foi uma área aberta ao lado do prédio do departamento de engenharia elétrica (SEL). O local aberto se fez necessário devido ao nível de ruído produzido pelo GMG e pela necessidade de se ter um tanque de combustível ao lado do grupo gerador, sendo inviável sua alocação dentro do prédio do SEL.

Para abrigar o GMG e a bancada experimental foi escolhido um container frigorífico de 20 pés cujas modificações necessárias foram encomendadas a um estaleiro localizado na cidade de Itajaí no estado de Santa Catarina. Dentre as adequações necessárias estão a instalação de uma parede divisória interna com isolamento térmico e acústico para separar a sala de máquinas que abriga o GMG da estação de trabalho onde é feito o monitoramento e controle dos experimentos. Além da parede foram instaladas portas e janelas sendo que uma porta é do tipo "porta pânico" para saída de emergência caso seja necessária uma saída emergencial.

Na metade que abriga o gerador foi colocado também o quadro de energia do container além de canaletas para passagem do cabeamento que liga o gerador à estação de trabalho localizada na sala ao lado que, por sua vez, foi climatizada com a instalação de sistema de condicionamento de ar que possibilita a utilização dos equipamentos de precisão necessários para medição dos sinais além da conservação dos equipamentos e conforto dos pesquisadores.

Junto ao GMG foram instalados um transformador isolador e um variac conforme mostra a Figura 6.1. A função do transformador é isolar o sistema de geração da rede de distribuição a que o sistema foi conectado. O papel do variac é amortecer a corrente de *inrush* no momento da conexão entre os dois sistemas.

O projeto das instalações elétricas do container é composto por um sistema de ilumi-

Figura 6.1: Transformador isolador e Variac.

nação, tomadas e um sistema de conexões no painel da estação de trabalho. O projeto (Figura B.3) foi elaborado pela equipe do Laboratório de Controle (LAC) e do Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia (LAFAPE). O sistema de iluminação é composto por 8 luminárias internas e 4 luminárias externas além de 2 luminárias de bancada com lâmpadas tubulares fluorescentes. Trinta pontos de tomadas, incluindo monofásicas, bifásicas e trifásicas, foram dispostas nas bancadas e em toda instalação do container disponibilizando diferentes padrões de alimentação para ligação dos equipamentos de medição e supervisorio. O quadro de cargas foi projetado para dispor de proteção independente para cada circuito monofásico, bifásico e trifásico, além de proteção independente para o sistema de condicionamento de ar da estação de trabalho.

A Fig. 6.2 mostra o grupo motor-gerador que foi o objeto de pesquisa tratado nesta tese e foi com este gerador que os testes de acionamento das cargas foram realizados. O conjunto é formado por um gerador Cramaco de 20 kVA, um motor diesel Hyundai de 4 cilindros, reguladores de velocidade Grameyer e um regulador de velocidade desenvolvido sob encomenda pela Stemac Geradores, que é a montadora e fornecedora deste grupo gerador. Mais informações sobre o grupo gerador podem ser encontradas no anexo deste trabalho. Todo o projeto das instalações elétricas do container e o esquema elétrico da bancada experimental foram desenvolvidos pela própria equipe de pesquisa do LAC/LAFAPE.

A discrepância entre o nível de potência do gerador utilizado na simulação e na bancada experimental está no fato de ser inviável a utilização de um gerador de potência grande junto ao laboratório da universidade, contudo, na simulação era necessário utilizar um gerador de potência maior para se ter a real noção do impacto causado por essa fonte na rede de distribuição, uma vez que um gerador de potência pequena permitiria perturbações insignificantes na rede de distribuição. Mesmo assim, pelas simulações e resultados experimentais apresentados mais adiante, pode ser percebido que em uma análise

qualitativa os resultados permanecem coerentes e são válidos para ambas abordagens.

Figura 6.2: Detalhe do grupo gerador.

6.1.1 Construção e automação da bancada de ensaio

A bancada de ensaios é formada pelo grupo gerador diesel que foi equipado com: transdutores de tensão, corrente e frequência montados em um quadro junto ao GMG, além de transdutor de pressão de óleo, e sensor de temperatura; o GMG possui também um controlador de tensão (AVR) e um controlador de velocidade que manipula um atuador responsável pela injeção de combustível.

A Figura 6.3 apresenta os componentes de instrumentação utilizados no grupo gerador para conexão ao sistema de supervisão e controle formados pelos módulos E/S e cRIO da National Instruments.

Os transdutores de tensão e correntes montados em um quadro como mostrado na Figura 6.4 fornecem uma corrente de zero a 20 mA proporcional ao sinal lido, podendo ser transdutor para tensão de saída do GMG, corrente ou frequência. Os transdutores de tensão e frequência geram uma corrente de aproximadamente 10 mA (metade da escala) quando o GMG apresenta tensão e frequência nominal em seus terminais, já os transdutores de corrente geram uma corrente de aproximadamente 3 mA quando o GMG não fornece corrente elétrica e aumenta o sinal gerado proporcionalmente à corrente fornecida pelo GMG.

A estação de trabalho é composta pelos instrumentos de medição (Figura 6.5), computador para supervisionar os testes, cargas utilizadas para teste do GMG (Figura 6.13) e uma bancada (Figura 6.6).

Figura 6.3: Planta experimental e seus componentes de instrumentação para aquisição de sinais para controle.

O módulo cRIO é composto por um chassi com *Field Programmable Gate Array* (FPGA) embarcado e possui módulos de acionamento e de aquisição de sinais. Na bancada da estação de trabalho foram instalados o cRIO (identificado pelo destaque número 1 na Figura 6.6), placas de sensores para realizar as aquisições dos sinais de controle (identificado pelo destaque número 2 e pela Figura 6.5), sistema de proteção das cargas (destaque número 3), terminais para conexão das fontes e das cargas (destaque número 4), além de tomadas de energia (destaque número 5), sistema de alimentação das placas de sensores (destaque número 6) e relés de estado sólido (destaque número 7) fixados na parte de trás do painel.

A estação de trabalho gerencia a conexão de todo sistema. A potência gerada pelo GMG é distribuída para as cargas e/ou rede de distribuição por meio dos relés de estado sólido acionados pelo cRIO, que também apresenta todas as medições no sistema supervisão.

As correntes dos transdutores são lidas pelo módulo para sinais analógicos de corrente de zero a 20 mA, NI 9208. Dessa forma a leitura é repassada ao NI cRIO 9073 e analisado por sua interface FPGA. Além dos sinais dos transdutores, o módulo FPGA recebe

Figura 6.4: Quadro para abrigo dos transdutores, disjuntores, aterramento e borneira de sinais do GMG.

Figura 6.5: Placas de condicionamento de sinais para tensão e corrente.

Figura 6.6: Detalhe da parte de instrumentos e bancadas no container.

também os sinais dos sensores de pressão e de temperatura, ambos os sinais são importantes para garantir que o GMG se encontra nas condições normais de operação, caso um desses sinais apresentem anormalidades o sistema de proteção deve atuar desconectando as cargas locais que possam estar sendo alimentadas naquele instante e desliga o grupo gerador automaticamente.

Os sinais dos sensores de pressão e temperatura passam por uma placa amplificadora antes de ter seus sinais recebidos pelos módulos NI. O sinal de temperatura é lido pelo módulo analógico NI 9205 para leitura de tensão de zero a 10 V, já o sinal do pressostato é lido pelo módulo de sinais digitais NI 9403, neste caso não foi necessário o uso de um sinal analógico uma vez que o pressostato informa apenas se a pressão do óleo está no nível normal ou não, sendo assim necessário apenas um sinal digital.

O módulo NI cRIO não apenas recebe sinais, como também tem a capacidade de realizar acionamento, para isso usa o módulo analógico NI 9265, que aciona o regulador de velocidade por meio do fornecimento de uma corrente que varia entre zero e 20 mA.

O cRIO-9073 é constituído por um processador industrial de 266 MHz gerenciado por um sistema operacional de tempo real, um chip de lógica reconfigurável FPGA, modelo Spartan-3 2M, e um chassi reconfigurável que aloja até oito módulos de entrada e/ou saída (E/S). O chip FPGA é conectado ao processador através de um barramento PCI de alta velocidade e cada módulo de E/S é conectado diretamente ao chip FPGA.

A Fig. 6.7 mostra o chassi do cRIO e seus módulos, que são compostos por: entrada analógica por corrente, entrada analógica de tensão, acionamento analógico de tensão e de corrente, além de relés e entradas e saídas digitais. Toda programação da lógica de

controle e do sistema de proteção para o GMG foram embarcados no sistema FPGA do cRIO. Com o FPGA podem ser realizados os testes de comparação de desempenho dos controladores comerciais com os controladores desenvolvidos.

Figura 6.7: Módulo cRIO composto por um chassi com sistema FPGA embarcado e seus módulos de acionamento e de aquisição de sinais.

As placas de condicionamento de sinais como mostrado na Figura 6.5 são compostas por placas de sensores para tensão e placas de sensores para corrente. Os sensores permitem a leitura dos níveis de tensão e corrente gerados pelo GMG, assim como a leitura dessas variáveis para as cargas e a rede de distribuição. Foram construídas também placas para condicionamento dos sinais de temperatura e de pressão do óleo do gerador.

As placas de condicionamento de temperatura e pressão do óleo usam amplificadores operacionais para amplificar o sinal lido do gerador e então transmiti-los aos módulo de aquisição de sinais do cRIO. A Figura 6.8 mostra a placa de condicionamento de sinais de temperatura e pressão do óleo (Figura 6.8(a)), mostra também a placa de condicionamento do sinal de frequência do gerador (Figura 6.8(b)). A placa de condicionamento do sinal de frequência faz uso de um chip comparador que processa o sinal pulsado oriundo do sensor instalado junto ao eixo do gerador, este sensor gera um sinal pulsado em torno de 3,15 kHz e 15 V de amplitude, dessa forma o chip comparador da placa gera um sinal de tensão contínuo diretamente proporcional à frequência medida no eixo do gerador, assim é possível ter a medida referente à velocidade de rotação do GMG.

Ao conectar os sinais dos sensores aos módulos de leitura analógica é possível obter a medida referente aos sinais de tensão e corrente na tela do sistema supervisor desenvolvido em plataforma LabVIEW. Ainda, é possível proteger o sistema de geração

Figura 6.8: Placas de condicionamento de sinais.

contra surtos de tensão ou corrente por meio do algoritmo FPGA embarcado no cRIO, que processa a uma taxa de 40 MHz os sinais obtidos pelos sensores.

A Figura 6.9 mostra o regulador de velocidade e suas conexões. Pela entrada auxiliar do regulador é feita a conexão com o módulo analógico que envia o sinal de controle do sistema fuzzy por meio do módulo cRIO. Esse sinal de controle é o responsável por alterar o valor de referência do controlador comercial embarcado no regulador de velocidade.

A Figura 6.10 mostra o ambiente de programação FPGA, onde é possível programar com diagrama de blocos assim como é feito no ambiente real time (RT) e no ambiente supervísório. No primeiro quadro da figura é apresentado o bloco de configuração da velocidade com que todo processamento é feito, neste caso, o ambiente foi programado para rodar na velocidade máxima, tendo assim o melhor desempenho possível para executar as tarefas colocadas naquele ambiente. O quadro seguinte da figura mostra os blocos referente aos módulos de leitura e acionamento do cRIO, portanto, os sinais são transmitidos assim que algum acionamento é feito pelo módulo de controle ou recebidos pelos módulos de entrada. Os sinais dos módulos de entrada passam por blocos comparadores, dessa forma, se algum sinal estiver fora dos limites configurados um sinal de alarme é gerado e enviado ao supervísório podendo até desativar o GMG.

O ambiente de programação de tempo real (RT) faz a ligação entre os dados lidos pelo módulo FPGA e o ambiente supervísório onde foi posicionado o acionamento do GMG, controle e alarmes. As Figuras C.1 e C.2 mostram respectivamente os ambientes de programação do sistema supervísório e do ambiente em tempo real. A Figura C.1 mostra os botões para acionamento das cargas, alarmes e o código de controle onde foi

Figura 6.9: Regulador de velocidade do GMG.

embarcado o algoritmo fuzzy usado nos experimentos. Este código está dentro de um bloco que recebe o sinal de erro da velocidade medida do GMG e armazena em um vetor que é fornecido ao código fuzzy do MatLab, fazendo com que, o código processe o sinal de velocidade e forneça o sinal de controle que é repassado ao ambiente FPGA que atua junto ao regulador de velocidade do GMG alterando assim, a velocidade do grupo gerador.

As placas de condicionamento em conjunto com o módulo cRIO da NI e o sistema supervisório compõem toda parte de controle e proteção do sistema disposto na bancada de ensaios. Os demais componentes da bancada fazem parte do sistema de potência, como: os relés de estado sólido comandados pelo sistema de controle para conectar os terminais do gerador com os terminais das cargas locais e também conectar o sistema de geração com a rede de distribuição quando comandado pelo sistema automático de sincronismo.

6.1.2 Interface

As características do módulo cRIO permitem o controle de processos independente de um computador, o monitoramento e desenvolvimento de interfaces com comunicação através de portas ethernet ou serial, disponíveis no chassi. A conexão dos módulos de E/S (NI 9205, NI 9263, NI 9265, NI 9208, NI 9485 e NI 9481) do cRIO-9073 com os sinais dos sensores e atuadores utilizados na automação da bancada são mostrados na Figura 6.11.

Os sinais dos sensores de temperatura e pressão de óleo são coletados e enviados para a bancada através de um cabo blindado para que possam ser utilizados nos módulo

analógicos e digitais do cRIO. Para programar o cRIO-9073, utilizam-se os softwares LabVIEW PC, LabVIEW RT (Real-Time) e LabVIEW FPGA. O processador do cRIO-9073 executa de forma determinística os VIs criados com o software LabVIEW RT e o chip FPGA executa de forma simultânea os VIs criados com o software LabVIEW FPGA. Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, VIs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface e pelo diagrama de blocos que contém o código gráfico do programa. A linguagem gráfica do LabVIEW é chamada "G".

Figura 6.11: Módulo de aquisição, processamento e controle da NI.

Neste projeto foi necessário desenvolver três VIs. Dois VIs foram criados no LabVIEW RT e LabVIEW FPGA os quais são executados diretamente no PAC. O outro VI foi criado no LabVIEW PC o qual é executado no PC Host (computador pessoal). O VI implementado com o LabVIEW FPGA faz a leitura dos sensores conectados aos módulos de entrada, a geração dos sinais para os atuadores e gera os alarmes caso os sinais ultrapassem os limites pré-estabelecidos, acionando assim a proteção do sistema. O VI implementado com o LabVIEW RT é executado a uma taxa de 40Hz e realiza as conversões de unidades, supervisiona os estados dos sensores de temperatura e pressão e faz a interface entre o ambiente FPGA e o LabVIEW PC. O VI implementado no LabVIEW PC é executado a 20Hz e é responsável pela interface com o usuário além de gravar e monitorar os dados recebidos e gerar a referência para o regulador comercial por meio de uma interface com

o algoritmo fuzzy desenvolvido no MatLab (o mesmo controlador utilizado para os resultados simulados). As telas do ambiente de programação são apresentadas no Apêndice C.

Com todos os dados do gerador dispostos no sistema supervisório é possível realizar o acionamento e controle do GMG. O cRIO processa as leituras realizadas e toma decisões como acionar ou parar o GMG através do relé de acionamento do motor. Caso o GMG atinja os limites de temperatura, pressão do óleo, os limites de excitação do sistema, limites de tensão ou de corrente fornecidas é possível desconectar o gerador das cargas automaticamente e realizar uma parada de emergência.

6.1.3 Sistema supervisório e controle

O sistema supervisório foi desenvolvido em plataforma LabVIEW e está interligado com os respectivos módulos da NI adquiridos para o projeto. O LabVIEW (acrônimo para Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments. Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, IVs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo a sua performance é comparável à exibida pelas linguagens de programação de alto nível. A linguagem gráfica do LabVIEW é chamada "G" e possui recursos bastante intuitivos que permitem ao programador produzir uma interface amigável de fácil visualização para o usuário. A Figura 6.12 exhibe a tela principal do sistema supervisório desenvolvido.

Figura 6.12: Sistema supervisório desenvolvido.

Na parte superior do supervisório desenvolvido é possível ver os sinalizadores de alarme. Caso o sistema esteja normal, o indicador é exibido na cor verde. Por outro lado, o indicador é exibido na cor vermelha, como mostra o indicador “PRESSÃO DO ÓLEO”. Ainda, o GMG possui um sinalizador de temperatura que exibe uma escala em número e cores para monitoramento da temperatura do motor. Se algum dos alarmes for acionado (cor vermelha), o alarme principal (no centro da figura) é acionado também e a manobra de parada de emergência é realizada para manter a integridade do sistema. O GMG, a rede de distribuição e as cargas são representadas por desenhos para que o operador saiba o que está acontecendo no sistema de geração. Os três sistemas possuem medições trifásicas das tensões e correntes e da frequência em que estão operando. O estado das chaves de conexões dos sistemas são representados por imagens de chaves abertas e fechadas, para facilitar o entendimento do operador.

6.1.4 Cargas

As cargas utilizadas são mostradas na Figura 6.13 e são: um motor de indução trifásico (MIT) indicado em Figura 6.13(a)-3, acoplado a um gerador CC de 2,5kW indicado em Figura 6.13(a)-2, um banco de lâmpadas indicado em Figura 6.13(b) que serve de carga para o gerador CC e um retificador controlado trifásico indicado em Figura 6.13(a)-4 que alimenta uma cuba eletrolítica indicada em Figura 6.13(a)-1 que pode consumir até 7 kW.

As potências das cargas são apresentadas na Tabela 6.1. Portando, somando as potências das cargas disponíveis temos aproximadamente 9,5 kW.

Tabela 6.1: Potências das cargas

Carga	Potência
Retificador Controlado	7,0 kW
MIT	2,5 kW

O acionamento das cargas é feito pelo sistema supervisório através dos relés de estado sólido mencionados anteriormente. Cada relé é acionado por uma porta lógica de saída do módulo de controle (cRIO-NI) disposto na bancada experimental.

Cuba resistiva A cuba resistiva é acionada pelo relé de carga controlado pelo supervisório. Esta cuba é composta por três eletrodos (um por fase) que se conectam em delta através de uma solução salina de barrilha (Na_2CO_3). Quanto mais imerso na solução salina, maior a área de contato com a solução, menor a resistência entre os eletrodos e maior a corrente que passa pela cuba resistiva.

Conjunto de motores O conjunto de motores de teste composto por um motor de indução e um gerador CC são acionados pelo relé de carga. Para aplicar torque neste

Figura 6.13: Cargas utilizadas para testes com o GMG.

motor de indução são utilizadas lâmpadas de holofotes nos terminais do gerador CC, como mostrado na Figura 6.13(b). A medida que o campo do gerador CC é excitado, o torque elétrico gerado pela máquina CC aumenta e, consequentemente, a potência drenada pelo motor de indução também aumenta para balancear o torque elétrico.

Retificador trifásico controlado A partir de uma tensão trifásica de alimentação, um retificador controlado trifásico (Figura 6.14) alimenta a cuba resistiva para servir de carga de teste no sistema.

Figura 6.14: Sistema de acionamento retificador para a cuba resistiva.

O retificador trifásico é baseado em um inversor de frequência existente no LAFAPÉ. Um controlador PI foi desenvolvido e embarcado no microcontrolador PIC 18F2550. O microcontrolador faz um controle de corrente que aciona a cuba resistiva. O controle de corrente é feito na faixa de 0 a 20 A, que corresponde a uma potência de até 7 kW na saída do retificador.

6.2 Projeto do controle

O controlador fuzzy utilizado para a etapa experimental foi o mesmo tipo usado nas simulações e apresentado na Seção 4.2. Contudo, por necessidades operacionais, foi ado-

tado uma estrutura do tipo fuzzy PD em cascata com o controlador comercial, ficando assim uma estrutura fuzzy PD cascata como apresentado na Figura 6.15, por este motivo também não foi utilizado o integrador junto ao controlador fuzzy, sendo apenas um fuzzy PD e não mais um fuzzy PD+I, uma vez que o controlador comercial já possui integrador em sua malha.

Essa estrutura se fez necessária uma vez que os drives comerciais, que vieram no equipamento, não permitiam acionar os atuadores de velocidade e da excitatriz sem que fossem utilizados os controladores comerciais. Logo, a alternativa foi utilizar a entrada auxiliar disponível no regulador de velocidade que veio instalado com o equipamento. Contudo, neste caso têm-se que o controlador desenvolvido fica condicionado a atuar em cascata com o controlador comercial.

Figura 6.15: Diagrama geral experimental.

A estrutura fuzzy PD cascata pode ter sua sensibilidade alterada em relação ao sinal de erro obtido apenas alterando o ganho de entrada do controlador, que altera a magnitude do erro em relação ao universo de discurso do controlador fuzzy. Essa alteração faz com que seja possível aumentar ou diminuir a atitude tomada pelo controlador fuzzy em relação ao sinal de erro obtido.

6.3 Resultados experimentais

Os resultados foram obtidos para operação do GMG em modo isolado. O cenário utilizado abordou a conexão e desconexão das cargas locais para avaliar o desempenho do controlador fuzzy cascata. Os resultados com métodos e controladores comerciais existentes são apresentados para comparação.

As cargas foram conectadas simultaneamente com potência máxima, ou seja, utilizando aproximadamente 10 kW disponíveis, o que representou aproximadamente 50% da potência do gerador. Com isso, a perturbação causada junto ao GMG foi suficiente para visualizar a diferença de desempenho entre os controladores aqui utilizados.

A Figura 6.16 apresenta em linha cheia a resposta do controlador fuzzy PD cascata para o acionamento das cargas sendo conectadas ao GMG no tempo 62 s e desconectadas no tempo 127 s. A figura apresenta também, em linha tracejada, o comportamento do GMG em resposta ao controlador comercial com acionamento das cargas no tempo 48 s e desconexão das cargas em 123 s.

Figura 6.16: Experimento comparando a resposta dos controladores fuzzy PD+I cascata e o comercial.

Para este resultado é possível perceber que o GMG teve um melhor desempenho com o controlador fuzzy PD cascata, uma vez que teve uma variação na velocidade 8,3 % menor no acionamento das cargas e 6,7 % menor na desconexão das cargas, levando assim à uma menor oscilação na frequência da tensão terminal produzida pelo gerador.

A Figura 6.17 apresenta em linha cheia a resposta do controlador fuzzy PD cascata na partida do GMG utilizando um ganho de 0,01; enquanto em linha tracejada é apresentado o comportamento do GMG na partida diante do controlador comercial e em linha traço e ponto é apresentada a mesma resposta do GMG na partida utilizando o controlador fuzzy

PD cascata com ganho de 0,05.

Figura 6.17: Experimento comparando a resposta dos controladores fuzzy PD+I cascata e o comercial na partida do gerador.

Para este resultado é possível perceber que o controlador fuzzy PD cascata exige uma resposta mais brusca do GMG na partida, o que leva a um sobre-sinal, contudo, mesmo assim este controlador atinge o valor de referência (60 Hz) ao mesmo tempo do controlador comercial. É utilizado o mesmo controlador fuzzy PD cascata com um ganho maior a fim de extrapolar os resultados e, pode ser visto que não há vantagem em utilizar um ganho maior uma vez que o sobre-sinal aumenta e não oferece ganho algum na resposta do GMG diante o acionamento de cargas pois, como pode ser visto, no tempo de 62 s o sinal de velocidade apresentou o mesmo afundamento diante de ambos os controladores fuzzy cascata. Com um ganho muito alto o controlador inclusive acrescenta sobre-sinal após a conexão das cargas, como pode ser visto pelo tracejado preto após a retomada de conexão das cargas em 62 s.

6.4 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a estação de trabalho utilizada para elaboração dos testes experimentais, foi apresentada também a estrutura adotada para aquisição dos

sinais e controle do gerador, bem como o ambiente de programação para aquisição, supervisão e controle construídos na plataforma de desenvolvimento LabVIEW. Os resultados experimentais mostraram uma melhora no desempenho do GMG ao utilizar o controlador fuzzy desenvolvido em cascata com o comercial em relação aos resultados obtidos utilizando apenas o sistema comercial.

Conclusões e propostas de trabalhos futuros

O controlador fuzzy desenvolvido a partir da superfície fixa de controle mostrou-se versátil para controlar desde a velocidade e potência ativa até tensão terminal e potência reativa, incluindo um sistema de sincronismo desenvolvido para GMG. O controlador proposto permitiu atuações mais rápidas e precisas, levando a oscilações das variáveis controladas até 25 vezes menores em relação ao controlador comercial.

A estrutura coordenada do controlador fuzzy desenvolvido para o sistema de excitação mostrou-se, pelas simulações realizadas, capaz de regular de forma eficiente a potência reativa gerada para elevar o fator de potência no ponto de conexão com a rede de distribuição e ao mesmo tempo manter o nível da tensão terminal dentro dos limites recomendados pela IEEE Std 1547.2 (IEEE Std 1547.2 2009).

O controlador fuzzy para sincronismo proporcionou redução do transitório causado pelo efeito da conexão de forma a não ultrapassar os limites recomendados pela IEEE Std 1547.2 (IEEE Std 1547.2 2009), o que fez com que este distúrbio não se propagasse ao transferir potência ativa da GD para a rede de distribuição. Já no método comercial, o distúrbio causado pela conexão foi significativo o bastante para se propagar por todo período de transferência de potência. Por meio destes resultados, foi possível concluir que quanto maior a tolerância do erro entre o ângulo das fases, menor será o tempo gasto para sincronizar e obter a conexão entre as fontes. Foi possível verificar, também, que o método comercial permite uma conexão mais rápida entre as fontes, contudo permite uma maior oscilação causada pelo efeito de conexão das fontes.

O controlador fuzzy permitiu valores mais próximos à unidade para o fator de potência. Já o controlador comercial apresentou respostas semelhantes para FP apenas quando houve a conexão do MIT, que absorve potência de maneira lenta, contudo, ainda assim os valores para tensão terminal apresentados neste momento mostraram que o controlador fuzzy apresentou melhor desempenho.

O Controlador fuzzy desenvolvido mostrou-se eficiente também quando usado em cas-

cata com o controlador comercial como pode ser visto nos experimentos realizados, uma vez que os distúrbios causados pela conexão e desconexão de cargas foi reduzido, acelerando a retomada da velocidade nominal do gerador e melhorando seu desempenho.

A melhora de desempenho obtida com o controlador fuzzy cascata indica que há margem para melhorar ainda mais o desempenho do GMG caso este controlador em cascata seja substituído pelo controlador utilizado nas simulações, para tanto, fica aqui registrado como sugestão de aprimoramento a aplicação dos controladores coordenados para tensão, sincronismo e potência para o experimento prático.

Para tornar possível a plena atuação do controlador fuzzy sem uso de estruturas em cascata com os algoritmos comerciais são necessários novos drives. Portanto, é imprescindível que em trabalhos futuros estes drives sejam implementados tornando possível a atuação tanto do controlador fuzzy quanto de outro controlador que se queira testar. Fica também como proposta de trabalhos futuros a utilização do grupo gerador como fonte base para a criação de uma rede inteligente formada por fontes alternativas pela equipe do LAC/LAFAPE, uma vez que com a estrutura que foi montada por este trabalho e com demais fontes já disponíveis no LAFAPE é possível montar essa rede inteligente e contribuir para pesquisas nessa área.

Apêndice A

Dados e parâmetros utilizados nas simulações

Neste apêndice estão apresentados as tabelas contendo dados, parâmetros e os controladores utilizados para os resultados das simulações desta tese.

A Tabela A.1 apresenta os dados do atuador do motor diesel utilizado para as simulações (*PSCAD/EMTDC User's Guide, Version 4.2.1* 2010).

Tabela A.1: Dados do modelo do atuador.

K_1	T_1	T_2	K_2	T_3	T_4	T_5
80	0,25 s	0,39 s	1	0,009 s	1	0,0025 s

A rede de distribuição é composta por um alimentador, linhas curtas, transformadores e cargas configurados conforme padrão IEEE-1547 (IEEE Std 1547.2 2009) e com os dados apresentados na sequência.

Dados do alimentador

$S_{sc} = 1000 \text{ MVA}$ / X/R razão = 22.2%

Dados das linhas

$Z_1 = 0,151 + j0,296\%$, distância₁ = 3,050 km

$Z_2 = 6,065 + j10,15\%$, distância₂ = 4,830 km

$Z_3 = 3,976 + j5,127\%$, distância₃ = 2,060 km

$Z_4 = 3,564 + j2,661\%$, distância₄ = 0,976 km

$Z_5 = 0,423 + j0,154\%$, distância₅ = 0,189 km

$Z_6 = 2,560 + j0,332\%$, distância₆ = 0,362 km

$Z_7 = 0,732 + j0,095\%$, distância₇ = 0,104 km

$Z_8 = 0,104 + j0,135\%$, distância₈ = 0,148 km

Dados dos transformadores (V / P / Z)

Trafo 1 (T_1) - 69,0/13,80 kV / 15,0 MVA / $0,667 + j5,330\%$
 Trafo 2 (T_2) - 13,8/0,48 kV / 1,50 MVA / $6,480 + j38,30\%$
 Trafo 3 (T_3) - 13,8/0,48 kV / 1,25 MVA / $5,600 + j48,00\%$
 Trafo 4 (T_4) - 13,8/2,40 kV / 2,50 MVA / $3,290 + j2,300\%$
 Trafo 5 (T_5) - 13,8/0,48 kV / 1,00 MVA / $8,210 + j57,50\%$
 Trafo 6 (T_6) - 13,8/2,40 kV / 3,75 MVA / $2,440 + j14,800\%$

Dados das cargas da rede

carga 1 (L_1) = $900 + j0,00$ kVA
 carga 2 (L_2) = $900 + j600$ kVA
 carga 3 (L_3) = $1500 + j1000$ kVA
 carga 4 (L_4) = $800 + j470$ kVA
 carga 5 (L_5) = $3200 + j1900$ kVA

As tabelas A.2 e A.3 apresentam, respectivamente, a configuração das cargas locais MIT e RLC extraídas da biblioteca do *software* PSCAD® (*PSCAD/EMTDC User's Guide, Version 4.2.1* 2010). Assim como o gerador elétrico e seus controladores, cujos dados são apresentados, respectivamente, nas tabelas A.4, A.5 e A.6.

Tabela A.2: Dados da carga MIT

Motor de indução		
Número de fases	3	
Número de pólos	4	
Tensão de linha	480	V
Corrente de fase	140	A
Base de frequência angular	377	rad/s
Potência	215	hp
Modo de controle	Torque	
Torque	1,00	pu
Velocidade de entrada	0,98	pu

Tabela A.3: Dados da carga RLC

Elementos	Valores	
R	1,536	Ω
L	3,950	mH
C	5,424	mF
P	154	kW
Q	149	kVAr

Tabela A.4: Dados para simulação do gerador elétrico

Parâmetro	Valores	Parâmetro	Valores
$\mathbf{V}_n$	0,48 kV	$\mathbf{X}_d''$	29,50 %
$\mathbf{S}_n$	1112 kVA	$\mathbf{X}_q''$	18,30 %
$\mathbf{P}_n$	890 kW	$\mathbf{X}_l$	10,00 %
$\mathbf{FP}$	0,80	$\mathbf{T}_{do}'$	3,0070 s
$\mathbf{f}$	60,00 Hz	$\mathbf{T}_{do}''$	0,0153 s
$\mathbf{n}$	1200 rpm	$\mathbf{T}_{qo}''$	0,0081 s
$\mathbf{X}_d$	208,10 %	$\mathbf{R}_a$	2,70 %
$\mathbf{X}_q$	114,40 %	$\mathbf{H}$	0,4182 s
$\mathbf{X}_d'$	19,30 %	$\mathbf{D}$	1,00 pu

Tabela A.5: Controlador PI de velocidade.

$$CM_\omega(s) = \frac{0,0625s+0,25}{0,0002s^2+0,001s+1}$$

Tabela A.6: Controlador PI de potência ativa.

$$CM_P(s) = \frac{0,00125s+0,005}{0,0002s^2+0,001s+1}$$

A.1 Ambiente de simulação PSCAD

Nesta tese foi utilizado o *Power Systems CAD/Electromagnetic Transients including DC*. O PSCAD/EMTDC é uma ferramenta de simulação para estudos de comportamentos transitórios de sistemas elétricos (*PSCAD/EMTDC User's Guide, Version 4.2.1* 2010). A interface gráfica do PSCAD permite que em um único ambiente seja composto por circuitos elétricos, sistemas de controle e análise de resultados. Este programa possui capacidade de modelagem com algoritmos altamente complexos e uma biblioteca extensa para que o usuário concentre mais esforços nas análises de resultados do que na modelagem matemática de seus problemas (Anaya-Lara e Acha 2002).

Nesta seção são mostradas algumas figuras que ilustram o ambiente de programação para simulação. O esquema da conexão da rede de distribuição com o GMG e as cargas locais, construído no PSCAD, assim como os pontos de medição para tensão e corrente dos elementos conectados ao PCC, são exibidos na Fig. A.1.

Figura A.1: Esquema de conexão da rede de distribuição com a GD.

A Fig. A.2 representa a rede de distribuição utilizada, é composta por blocos que representam o alimentador principal, as impedâncias das linhas de transmissão, os transformadores e as cargas nos finais dos ramos. A GD é conectada no barramento 3, na linha de 13,8 kV.

Figura A.2: Representação da rede de distribuição no PSCAD.

As cargas utilizadas são mostradas na Fig. A.3, cada carga possui uma chave de

seccionamento que conecta e desconecta a carga quando programado. A partida do motor de indução trifásico é dada a vazio, com controle de velocidade feito pelo próprio programa até atingir 0,98 p.u. Em seguida, é adicionada carga ao MIT até que o torque atinja 1 p.u. O torque do MIT é configurado pelo bloco “Controle de torque” e é detalhado na Fig. A.4. Quando a chave “BRKmotor” é acionada, o sinal de acionamento é utilizado para dar início à rotina do controle de torque. Após 1 segundo, o torque é adicionado à máquina em rampa, com uma taxa de 0,3 p.u./s. O detalhe de construção da carga RLC é mostrado na Fig. A.5. O retificador trifásico não controlado é composto por uma ponte de retificação de ciclo completo e uma resistência utilizada como carga.

Figura A.3: Cargas utilizadas para testes de desempenho do sistema de controle.

Figura A.4: Bloco de controle de torque do MIT.

A representação do gerador síncrono, Fig. A.1, tem como entrada o torque mecânico T_m e a tensão de excitação de campo E_{fd} . O torque mecânico é dado pela representação do motor diesel, exibido na Fig. A.6. A seleção do modo de operação do gerador síncrono é dado pelo sinal da chave S1. Se a chave está aberta, o GMG opera com controle de

Figura A.5: Configuração da carga RLC utilizada na simulação.

velocidade e, caso contrário, opera com controle de potência ativa. Quando o gerador opera em modo conectado, o controle de potência ativa é feito pelo controlador exibido na Fig. A.9. A referência do controle de potência ativa é programada em rampa como é mostrado na Fig. A.8. A rampa possui uma inclinação de 0,1 p.u./s, satura em 0,3 p.u e depois é multiplicada pelo valor base da potência para ser repassada ao controlador.

Figura A.6: Representação da válvula de combustível e do motor diesel no PSCAD.

Figura A.7: Bloco de controle de potência ativa.

O controle de potência ativa é feito pelo controlador fuzzy PD+I exibido na Fig. A.9. As entradas para este controlador são a potência de referência e a potência fornecida pelo gerador, P_{ger} , e a saída é o sinal Gate, repassado ao modelo do atuador mecânico da Fig. A.6. A potência fornecida pelo gerador é calculada a partir dos sinais de tensão e corrente medidos nos terminais do gerador. A Fig. A.10 mostra como são calculadas as potências ativa e reativa médias fornecidas pelo gerador. As medições são feitas nas escalas de kV e kA, sendo assim, precisam ser multiplicadas por 1000 para que o resultado não seja dado em MW ou MVar.

Figura A.8: Referência do controle de potência ativa.

Figura A.9: Controlador fuzzy PD+I para controle de potência ativa.

Figura A.10: Cálculo da potência média ativa e reativa fornecida pelo gerador.

Com o intuito de reduzir o custo computacional do sistema fuzzy utilizado, Fig. A.9, a superfície de controle foi mapeada e transformada em uma tabela, com 200 pontos de discretização para cada entrada no universo de discurso ($[-1, 1]$). Foram feitas todas as combinações dos possíveis valores das entradas e estas combinações foram indexadas em forma de tabela.

No PSCAD foi construída uma rotina em C para acessar a tabela fuzzy, que funciona de acordo com o fluxograma da Fig. A.11, na qual T_s é o período de amostragem utilizada na discretização da superfície.

Figura A.11: Fluxograma do programa implementado em linguagem C.

Dada uma combinação de valores de entrada, é escolhido um par amostrado na tabela de mapeamento. Caso a diferença entre o conjunto de entrada e o valor tabelado for menor que 0,005, metade do valor de discretização do universo de discurso, o valor de entrada corresponde ao valor tabelado e esse conjunto de valores possui uma respectiva saída u encontrada na tabela. Se não, o algoritmo escolhe o próximo ponto da tabela e refaz a comparação.

A segunda entrada da representação do gerador síncrono, Fig. A.1, é a tensão de excitação de campo E_{fd} . A tensão de excitação de campo é dado pelo sistema de excitação. A biblioteca do PSCAD possui o modelo AC1A utilizado neste trabalho e exibido na Fig. A.12.

O controlador comercial foi implementado como exibido na Fig. A.13. Os limites de excitação foram inseridos com valores relacionados ao limite de potência reativa que o gerador poderia oferecer no ponto de operação programado. Para o ponto de operação de

Figura A.12: Representação do modelo de sistema de excitação AC1A do PSCAD.

0,3 p.u. de potência ativa, o limite para absorção de potência reativa é de 0,4 p.u. e para geração de reativo é de 0,85 p.u.

Figura A.13: Controlador comercial implementado no PSCAD.

O controle coordenado de tensão terminal e potência reativa, é exibido na Fig. A.14. O controlador coordenado ajusta a tensão de referência para que a excitatriz possa aplicar a tensão necessária no enrolamento de campo.

Para utilizar a estratégia de controle coordenado no sistema de excitação foi necessária a adaptação do controlador da excitatriz. O resultado da substituição do controlador do modelo AC1A e o diagrama de blocos do AVR-C é exibida na Fig. A.15. Ao invés de controlar apenas a tensão terminal, o AVR-C tem capacidade de controlar o reativo a partir da leitura das tensões e das correntes no ponto de conexão do gerador. O controlador coordenado do AVR-C é mostrado na Fig. A.16.

Figura A.14: Controle coordenado de tensão terminal e potência reativa.

Figura A.15: Diagrama de blocos do AVR-C.

Figura A.16: Controlador coordenado de tensão terminal e potência reativa do AVR-C.

Apêndice B

Dados e placas usados nos experimentos

A placa de condicionamento de sinais para pressão e temperatura usa um chip com quatro amplificadores operacionais sendo que três são usados no canal de leitura de temperatura e um amplificador ficou de reserva. A Figura B.1 mostra o esquema utilizado no circuito e a Figura B.2 mostra o circuito impresso para confecção da placa.

Figura B.1: Diagrama esquemático para placa de condicionamento de temperatura e pressão.

O canal de leitura de temperatura faz uso de um resistor que varia com a temperatura, os amplificadores foram dimensionados para transformar esta variação em uma tensão possível de ser lida pelo canal analógico do cRIO. O pressostato é uma chave normalmente fechada com o terra que se abre ao detectar que a pressão do óleo alcançou o valor pré

estabelecido, o que indica que o gerador estaria pronto para uso, sendo assim, o canal de leitura do pressostato usa apenas um resistor de alta impedância para limitar a corrente quando o pressostato se encontra na posição normalmente fechada, pois caso contrário o canal lê os 5 V fornecidos pela fonte utilizada.

Figura B.2: Circuito para impressão da placa de condicionamento de temperatura e pressão.

A Figura B.3 mostra o diagrama esquemático elétrico do container que foi projetado pela equipe do LAC/LAFAPE e executado conforme mostra o esquema.

Apêndice C

Telas do ambiente de programação LabVIEW

Os algoritmos construídos na plataforma LabVIEW serviram para aquisição, tratamento e controle dos sinais necessários ao funcionamento do grupo gerador. A Figura C.1 mostra a interface de programação do ambiente supervisorio, nela encontra-se os mostradores de alarme, botoeiras para acionamento do grupo gerador e cargas e mostra também a interface de controle com o algoritmo fuzzy construído via plataforma MatLab para realizar o processamento e fornecer a variável de controle para o grupo gerador. Nesta figura ainda é visto o bloco responsável para gravação dos dados adquiridos para futuras análises, além da rotina de desligamento do grupo gerador que, ao ser acionada, desconecta automaticamente o GMG das cargas locais e temporiza seu desligamento, este procedimento permite que o grupo gerador não desligue fornecendo potência, o que poderia causar o aquecimento das bobinas do gerador e levando ao seu mal funcionamento.

A Figura C.2 mostra a interface de programação do ambiente de processamento RT, ela é responsável por toda interface de transferência de dados do supervisorio e do sistema FPGA, sendo assim, todos os dados adquiridos pelo ambiente FPGA e os alarmes gerados podem ser transmitidos ao sistema supervisorio e os sinais de controle e podem ser enviados de volta ao ambiente FPGA para então atuarem junto ao GMG.

Figura C.1: Ambiente de programação do supervisor do GMG.

Figura C.2: Ambiente de programação do algoritmo de tempo real.

Referências

- Ackermann, T. (1999). Distribution power generation in a deregulated market environment.
- Akash, B., Mamlook, R. e Mohsen, M. (1999). Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process, *Electric Power Systems Research* **52**(1): 29–35.
- Al-Hamrani, M., Von Jouanne, A. e Wallace, A. (2002). Power factor correction in industrial facilities using adaptive excitation control of synchronous machines, *Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2002*, Toronto, Ontario, Canada, pp. 148–154.
- Amr, A. K., Rady, S. e Badreddin, E. (2010). A plant for cogeneration of electricity and water powered by renewable energy sources based on using high level of automation, *10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2010*, Cairo, pp. 209–213.
- Anaya-Lara, O. e Acha, E. (2002). Modeling and analysis of custom power systems by PSCAD/EMTDC, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(1): 266–272.
- ANEEL (2007). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 1.
- Best, R. J., Member, S., Morrow, D. J., McGowan, D. J. e Crossley, P. A. (2007). Synchronous islanded operation of a diesel generator, *IEEE Transactions On Power Systems* **22**(4): 2170–2176.
- Best, R., Kennedy, J., Morrow, D. e Fox, B. (2011). Steady-state and transient performance of biodiesel-fueled compression-ignition-based electrical generation, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* **2**(1): 20–27.
- Bulic, N., Sumina, D. e Miskovic, M. (2010). A Comparison of advanced control structures for synchronous generator Excitation Control, *International Review of Electrical Engineering-iree* **5**(2, Part a): 473–480.

- Calsan, M. (2011). *Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída*, Master's thesis, Universidade de Campinas.
- Chaitusaney, S. e Yokoyama, A. (2005). Impact of protection coordination on sizes of several distributed generation sources, *Proc. The 7th International Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005*, Vol. 2, Singapore, pp. 669–674.
- Chambers, K., McGowan, D. e Morrow, D. (2007). A digital load relief scheme for a diesel generating set, *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007*, Tampa, FL, pp. 1–7.
- Chen, B., Liu, X., Liu, K. e Lin, C. (2010). Fuzzy-approximation-based adaptive control of strict-feedback nonlinear systems with time delays, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 18(5): 883–892.
- Chen, B., Liu, X. e Tong, S. (2007). Adaptive fuzzy output tracking control of mimo nonlinear uncertain systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 15(2): 287–300.
- Chen, W., Jiao, L., Li, R. e Li, J. (2010). Adaptive backstepping fuzzy control for nonlinearly parameterized systems with periodic disturbances, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 18(4): 674–685.
- Cheong, K., Li, P. e Xia, J. (2010). Control oriented modeling and system identification of a diesel generator set (genset), *Proc. American Control Conference (ACC), 2010*, Baltimore, pp. 950–955.
- Cooper, A., Morrow, D. e Chambers, K. (2009). A turbocharged diesel generator set model, *44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009*, Glasgow, pp. 1–5.
- Cooper, A., Morrow, D. e Chambers, K. (2010). Development of a diesel generating set model for large voltage and frequency transients, *IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010*, Minneapolis, MN, pp. 1–7.
- Eker, M. K. e Altas, I. H. (2007). A fuzzy voltage regulator (FVR) for a stand-alone synchronous generator, *Electric Power Components and Systems* 35(4): 429–443.
- Elkhattam, W. e Salama, M. (2004). Distributed generation technologies, definitions and benefits, *Electric Power Systems Research* 71(2): 119–128.
- Fitzgerald, A., Kingsley, C. e Umans, S. (2002). *Electric Machinery*, McGraw-Hill series in electrical engineering: Power and energy, McGraw-Hill.

- Freitas, W., Vieira, J., Morelato, A., da Silva, L., da Costa, V. e Lemos, F. (2006). Comparative analysis between synchronous and induction machines for distributed generation applications, *IEEE Transactions on Power Systems* **21**(1): 301–311.
- Gaonkar, J. e Pillai, G. (2010). Fuzzy logic based coordinated voltage regulation method for distribution system with multiple synchronous generators, *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2010*, New Delhi, pp. 1–5.
- Gunes, M. e Dogru, N. (2010). Fuzzy control of brushless excitation system for steam turbogenerators, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **25**(3): 844–852.
- Haddad, J., Martins, A. R. S. e Marques, M. (2001). *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*, Tese de doutorado, Itajubá, MG.
- Hüsemann, R. (2002). Apostila de VHDL. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- IEEE Std 1547.2 (2009). IEEE application guide for IEEE Std 1547, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems, pp. 1–207.
- IEEE Std 242 (2001). IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems (revision of IEEE Std 242-1986), pp. 1–740.
- IEEE Std 421.5 (2005). Approved IEEE recommended practice for excitation systems for power stability studies (superseded by 421.5-2005).
- Islam, S. e Liu, P. (2011). Robust adaptive fuzzy output feedback control system for robot manipulators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **16**(2): 288 –296.
- Kennedy, J., Best, R., Morrow, D. e Fox, B. (2010). Performance evaluation of biodiesel fuelled electrical generation, *IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010*, Minneapolis, MN, pp. 1 –7.
- Kiprakis, A. e Wallace, A. (2004). Maximising energy capture from distributed generators in weak networks, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* **151**(5): 611 – 618.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York.
- Lee, H. (2011). Robust adaptive fuzzy control by backstepping for a class of mimo non-linear systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **19**(2): 265 –275.
- Liang, R. e Wang, Y. (2002). Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system, *IEEE Power Engineering Review* **22**(12): 610–618.

- McGowan, D., Morrow, D. e Fox, B. (2008). Multiple input governor control for a diesel generating set, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **23**(3): 851–859.
- McGowan, D., Morrow, D. e McArdle, M. (2003). A digital pid speed controller for a diesel generating set, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 3, Toronto, p. 4 vol. 2666.
- Mirheidari, S., Mohammadpour, J., Grigoriadis, K. e Franchek, M. (2010). Biodiesel blend estimation based on fuel consumption and engine power, *American Control Conference (ACC)*, 2010, Baltimore, MD, pp. 3021–3026.
- Mota, D. e Goldemberg, C. (2010). Comparison between voltage control structures of synchronous machines, *IEEE Latin America Transactions* **8**(6): 631–636.
- Moutinho, M., da Costa, C., Barra, W. e Barreiros, J. (2009). Identification, digital control and fuzzy logic techniques applied to a synchronous generator, *IEEE Latin America Transactions* **7**(2): 141–150.
- Neves, R., Reis, G., Aguiar, C., Bastos, R., Machado, R. e Oliveira, V. (2013). Comparação entre topologias para controle de tensão terminal e potência reativa de um grupo motor gerador diesel conectado à rede de distribuição, *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBAI 2013*, Fortaleza, pp. 1–6.
- Neves, R., Reis, G., Aguiar, C., Machado, R. e Oliveira, V. (2012). Controle fuzzy da excitatriz de gerador síncrono aplicado a geração diesel, *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012*, Campina Grande, pp. 429–435.
- Nucci, E. R., Souza, V. R., Silva, R. G., Reis, G. B., Giordano, R. L. C., Giordano, R. C. e Cruz, A. J. G. (2009). On-line monitoring of penicillin g acylase (pga) production using a fuzzy logic algorithm, *Chemical Product and Process Modeling* **4**(4): 12.
- ONS (2013). Boletim de Carga Mensal de dezembro de 2012. <http://www.ons.org.br/>.
- Pandiaraj, K., Fox, B., Morrow, D., Persaud, S. e Martin, J. (2002). Centralised control of diesel gen-sets for peak shaving and system support, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* **149**(2): 126 –132.
- Pereira, V. M. (2003). *Estudo e Modelagem Dinâmica de Gerador de Indução Acionado por Máquina de Combustão Interna com Controle de Tensão e de Frequência por meio de Inversor PWM*, Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- PSCAD/EMTDC User's Guide, Version 4.2.1 (2010). Manitoba HVDC Research Centre Inc. .

- Pushparaj, T., Venkatesan, C. e Ramabalan, S. (2012). Emission studies on karanja biodiesel fuelled diesel engine with ethanol as additive, *2012 International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*, Nagapattinam, Tamil Nadu, pp. 263–268.
- Rashed, M., Elmitwally, A. e Kaddah, S. (2008). New control approach for a pv-diesel autonomous power system, *Electric Power Systems Research* **78**(6): 949–956.
- Ray, P., Mohanty, S. e Kishor, N. (2010). Dynamic modeling and control of renewable energy based hybrid system for large band wind speed variation, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010*, Gothenburg, pp. 1–6.
- Reis, G., Neves, R., Aguiar, C., Bastos, R., Machado, R. e Oliveira, V. (2013). Performance improvement of a diesel generating set with fuzzy control for stand-alone and grid-connected operations, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2013)*, San Francisco.
- Reis, G., Neves, R., Aguiar, C., Machado, R. e Oliveira, V. (2013). A fuzzy control strategy for a diesel generating set under stand-alone and grid-connected operations, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* pp. 1–10.
- Rodriguez, C. R. C. (2002). *Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede*, Tese de doutorado, Unicamp, SP.
- Severino, M. M., Camargo, I. e Oliveira, M. A. G. (2008). Geração Distribuída: Discussão Conceitual e Nova Definição, *Revista Brasileira de Energia* **14**(1): 47–69.
- Sisworahardjo, N., El-Sharkh, M. e Alam, M. (2008). Neural network controller for microturbine power plants, *Electric Power Systems Research* **78**(8): 1378–1384.
- Soundarrajan, A. e Sumathi, S. (2011). Fuzzy-based intelligent controller for power generating systems, *Journal of Vibration and Control* **17**(8): 1265–1278.
- Su, C., Hwung, H. e Lii, G. (1997). Fuzzy logic based voltage control for a synchronous generator, *Electric Power Systems Research* **41**: 225–231.
- Sugeno, M. (1999). On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **7**(2): 201–224.
- Tanaka, K., Tanaka, M., Ohtake, H. e Wang, H. (2012). Shared nonlinear control in wireless-based remote stabilization: A theoretical approach, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **17**(3): 443–453.

- Tong, S.-C., He, X.-L. e Zhang, H.-G. (2009). A combined backstepping and small-gain approach to robust adaptive fuzzy output feedback control, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **17**(5): 1059 –1069.
- Tong, S. e Li, Y. (2012). Adaptive fuzzy output feedback tracking backstepping control of strict-feedback nonlinear systems with unknown dead zones, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **20**(1): 168 –180.
- Wallace, A. e Kiprakis, A. (2002). Reduction of voltage violations from embedded generators connected to the distribution network by intelligent reactive power control, *Fifth International Conference on Power System Management and Control, 2002*, London, pp. 210–215.
- Wang, D., Zeng, X.-J. e Keane, J. (2010). An evolving-construction scheme for fuzzy systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **18**(4): 755 –770.
- Wu, H.-N., Wang, J.-W. e Li, H.-X. (2012). Exponential stabilization for a class of nonlinear parabolic pde systems via fuzzy control approach, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **20**(2): 318 –329.
- Xia, Y., Shimomura, M. e Paserba, J. (2001). Active power control for preventing voltage instability using an adjustable speed machine, *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, Vol. 2, Vancouver, BC, pp. 866–871.