

COMPARAÇÃO ENTRE TOPOLOGIAS PARA CONTROLE DE TENSÃO TERMINAL E POTÊNCIA REATIVA DE UM GRUPO MOTOR GERADOR DIESEL CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO

RODOLPHO V. A. NEVES*, GIANN B. REIS*, CASSIUS R. AGUIAR*, RENAN F. BASTOS*,
RICARDO Q. MACHADO*, VILMA A. OLIVEIRA*

**Laboratório de Controle – LAC
Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia – LAFAPE
Departamento de Engenharia Elétrica e Computação
USP - São Carlos
São Carlos, SP, Brasil*

Emails: rodolphon@sc.usp.br, giann@sc.usp.br, caroaguiar@gmail.com,
renan_elt2005@hotmail.com, rquadros@sc.usp.br, vilma@sc.usp.br

Abstract— This paper presents a comparison between a coordinated control strategy for terminal voltage and reactive power with a classic PI controller for terminal voltage or reactive power control applied to a diesel generating set for a distributed generation system (DG). The coordinated fuzzy PD+I controller adjusts, automatically, the terminal voltage at the generator and the reactive power supplied to the grid. The coordinated strategy is given by a adjust parameter that regulates the reactive power control loop through the voltage error, prioritizing the voltage level and pondering the reactive power control loop. Results for the DG connected to the grid and submitted to events such load acceptance and load rejection were considered. Results for terminal voltage, power factor and reactive power exchange between the DG and the grid illustrate the efficiency for the strategy presented, improving the power factor from the bus in which the DG is connected, without harm the terminal voltage, keeping the operation in safety limits.

Keywords— Fuzzy controller, Synchronous generator, Excitation control, Terminal voltage and reactive power control

Resumo— Este trabalho apresenta a comparação uma estratégia de controle coordenado para potência reativa e tensão terminal e um controlador clássico PI para controle de potência reativa ou tensão terminal, de um grupo moto gerador (GMG), para uso em um sistema de geração distribuída (GD). O controlador coordenado fuzzy PD+I ajusta automaticamente a tensão nos terminais da máquina e a potência reativa fornecidas à rede de distribuição. A estratégia coordenada é dada através de um parâmetro que regula a malha de potência reativa a partir do erro de tensão terminal, priorizando o ajuste da tensão e ponderando a malha de controle de potência reativa. Para avaliar o desempenho do sistema de controle, a GD é conectada a uma rede de distribuição e submetido a eventos como entrada e saída de cargas locais. Resultados para tensão terminal, fator de potência e fluxo de potências entre o sistema, as cargas e a rede, ilustram a eficiência da estratégia de controle apresentada, melhorando os índices de fator de potência do barramento em que a GD estava conectada, sem prejudicar a tensão terminal do GMG, mantendo a GD em limites seguros de operação.

Keywords— Controlador fuzzy, Gerador síncrono, Controle de excitação, Controle de potência reativa e tensão terminal

1 Introdução

Grupos geradores diesel têm sido largamente utilizados para reduzir custos em horários de ponta de consumo de energia quando o valor tarifado é maior (McGowan et al., 2003; Chambers et al., 2007; Best et al., 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, comparado à 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 sustentável para sistemas de geração distribuída (GD) (Kennedy et al., 2010; Best et al., 2011).

O grupo gerador diesel (GMG) é formado por um motor diesel acoplado ao eixo de um gerador síncrono. Um regulador de velocidade atua na válvula de combustível para ajustar a velocidade de rotação do motor diesel de acordo com

a velocidade síncrona do gerador. Ao utilizar o GMG como sistema de GD é necessário estabelecer o sincronismo com a rede além de sintonizar o controle da tensão do GMG, caso contrário, o sistema pode sofrer instabilidades de ângulo ou de tensão (Kundur, 1994) na presença do GMG.

Os sistemas de excitação dos geradores síncronos têm um papel importante no aumento da estabilidade de sistemas elétricos de potência (SEP) (Bulic et al., 2010) e da qualidade da energia fornecida pelo gerador (Gunes and Dogru, 2010). Através de reguladores automáticos de tensão, do inglês *Automatic Voltage Regulator* (AVR), a tensão terminal do gerador síncrono é controlada. Entretanto, o AVR necessita de um sistema de controle em cascata para controlar a potência reativa fornecida pelo gerador. Várias topologias de controlador estão modeladas em IEEE Std 421.5 (2005).

Muitos estudos têm desenvolvido AVRs adap-

tativos ou com sintonia automática para que o controlador tenha respostas rápidas e mais precisas nos pontos de operação (Eker and Altas, 2007). O uso de inteligência computacional para controladores de sistemas de excitação tem se tornado uma tendência (Bulic et al., 2010). Controladores baseados em lógica fuzzy têm se destacado e despertado interesse dos pesquisadores em sistemas elétricos (Eker and Altas, 2007).

Este trabalho propõem a utilização de um controlador fuzzy PD+I para controle de tensão terminal e potência reativa utilizando uma excitatriz do tipo AC1A de um grupo motor gerador a diesel como sistema de GD. Para isso, foram projetados controladores fuzzy PD+I que ajustam, automaticamente, a tensão nos terminais do gerador e a potência reativa fornecida pela GD. Comparações de desempenho entre os sistemas com controlador clássico e os controladores propostos ilustram a eficiência da estratégia de controle fuzzy diante entradas e saídas de cargas comuns encontradas no SEP.

2 Descrição do sistema

O sistema estudado neste trabalho é composto por um GMG conectado à uma rede de distribuição e transmissão e um conjunto de cargas locais.

A rede é composta por um alimentador principal de 100 MVA operando em 69 kV conforme IEEE Std 1547.2 (IEEE Std 1547.2, 2009). Para representar algumas cargas típicas encontradas na rede de distribuição foram escolhidas três cargas com diferentes respostas dinâmicas, um motor de indução trifásico (MIT) cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1, uma carga RLC cujos valores são apresentados na Tabela 2 e um retificador não controlado trifásico cuja resistência é de 2,5 Ω , consumindo aproximadamente 250 kW.

Tabela 1: Dados do 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

O GMG é composto por um motor a diesel e um gerador síncrono. A Fig. 1, extraída de Boldea and Nasar (1999), exibe o diagrama de blocos da representação do motor a diesel e a dinâmica de seu atuador. A entrada do diagrama, *Gate*, representa a abertura da válvula de combustível e o

Tabela 2: Dados da carga RLC

Elementos	Valores
P	154 kW
Q	+149 kVAr

valor é fornecida pela malha de controle de velocidade.

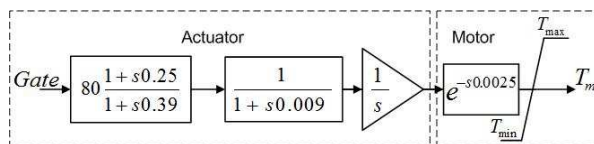


Figura 1: Diagrama de blocos do modelo do motor a diesel, extraído de Boldea e Nasar (1999).

O gerador síncrono foi representado neste trabalho por um modelo de máquina síncrona obtido na biblioteca do *software* PSCAD[®] configurado seguindo os parâmetros de um gerador da fabricante Caterpillar e pode ser analisado com mais detalhes em Neves et al. (2012) e Kundur (1994).

2.1 Topologias para controle de tensão terminal e potência reativa

Para analisar o desempenho do controlador proposto neste trabalho foram abordadas três topologias de sistemas. Na primeira topologia é utilizado o regulador de tensão AC1A. Para esta configuração, o controlador do regulador de tensão automático é um controlador proporcional, responsável pelo controle da tensão terminal (V_t). A Fig. 2 apresenta o primeiro sistema.

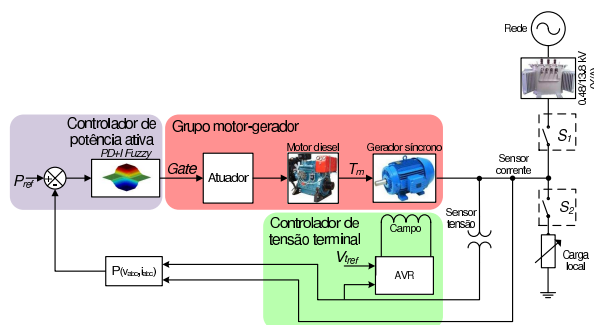


Figura 2: Diagrama referente ao sistema com controle de tensão terminal do AVR.

A segunda topologia de sistema é exibida na Fig. 3. Nesta topologia, o AVR é colocado em série com um controlador que, além de regular a tensão nos terminais do gerador, regula também a potência reativa por meio de uma malha externa. Neste trabalho será utilizado dois controladores para a topologia 2, um controlador clássico PI e um controlador coordenado fuzzy PD+I (CCFPD+I).

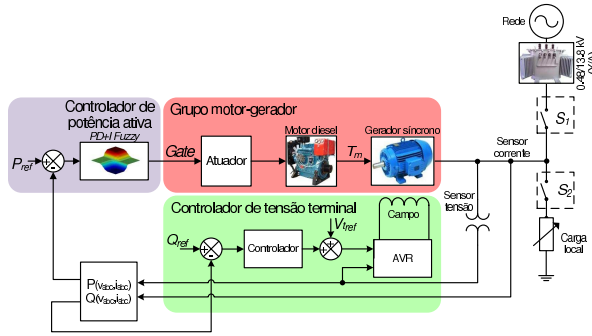


Figura 3: Diagrama referente à segunda topologia de sistema com controle de potência reativa através da referência de tensão terminal.

Por último, a terceira topologia do sistema é apresentada na Fig. 4 e um controlador coordenado fuzzy PD+I é inserido no modelo da AC1A, como é exibido na Fig. 5, resultando em um AVR coordenado (AVR-C) que controla tanto a tensão terminal quanto a potência reativa nos terminais da GD.

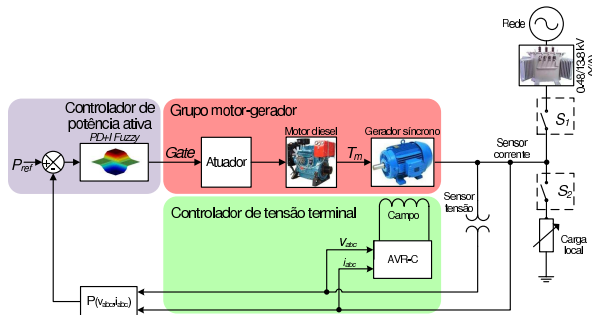


Figura 4: Diagrama referente à terceira configuração de sistema com controle de tensão terminal e potência reativa.

A excitatriz do modelo AC1A, o AVR e o AVR-C foram configurados com parâmetros conforme exemplo disposto em IEEE Std 421.5 (2005).

2.2 Controlador clássico PI

O controlador PI, utilizado para comparação de desempenho com os controladores fuzzy, foi retirado de IEEE Std 421.5 (2005) e é denominado “Controlador VAR tipo II”. O controlador PI possui saturadores anti *wind-up* na ação do bloco integrador. Os limites de excitação foram configurados respeitando os limites de fornecimento de potência reativa dada pela ficha técnica do gerador (-446 kVAR e 892 kVAR). Caso algum dos limites de potência reativa fosse atingido, a condição de limite de excitação é dada como verdadeira e o integrador do PI pára de somar até que a condição de limite seja falsa novamente. Os ganhos proporcional e do integrador são, respectivamente, 0,09 e 2 e o módulo do valor limite da tensão de saída

para a referência do AVR é 0,1 pu.

3 Estratégia de controle fuzzy para o GMG

A superfície fuzzy utilizada, assim como as estruturas do tipo fuzzy PD+I das malhas de controle deste trabalho são detalhadas em Neves et al. (2012).

3.1 Controle de potência ativa

O controlador fuzzy PD+I para potência ativa do GMG é representado pela Fig. 6. Neste caso, a saída do controlador fornece o sinal de atuação para a válvula de combustível (*Gate*) conforme pode ser observado pela Fig. 1.

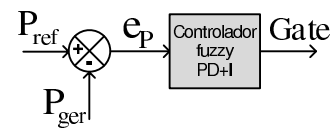


Figura 6: Diagrama de controle da potência ativa.

3.2 Controlador de tensão terminal e potência reativa

A potência reativa e a amplitude da tensão nos terminais da máquina são controladas por meio da alteração da excitação de campo do gerador síncrono. Para esta aplicação são utilizadas duas malhas de controle interligadas que são apresentadas na Fig. 7.

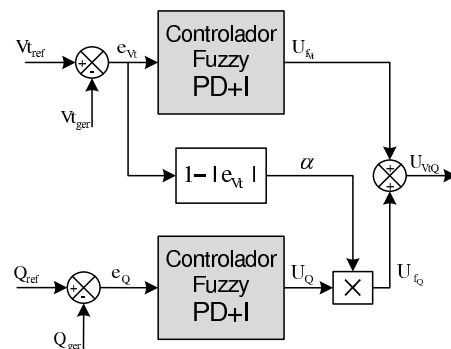


Figura 7: Diagrama de controle de coordenado para potência reativa e tensão terminal.

A malha de controle superior é responsável pelo controle da tensão terminal do gerador e a malha inferior pelo controle da potência reativa produzida no gerador síncrono. A soma dos dois sinais de saída das duas malhas de controle resultam na ação de controle do controlador coordenado de tensão terminal e potência reativa (Neves et al., 2012).

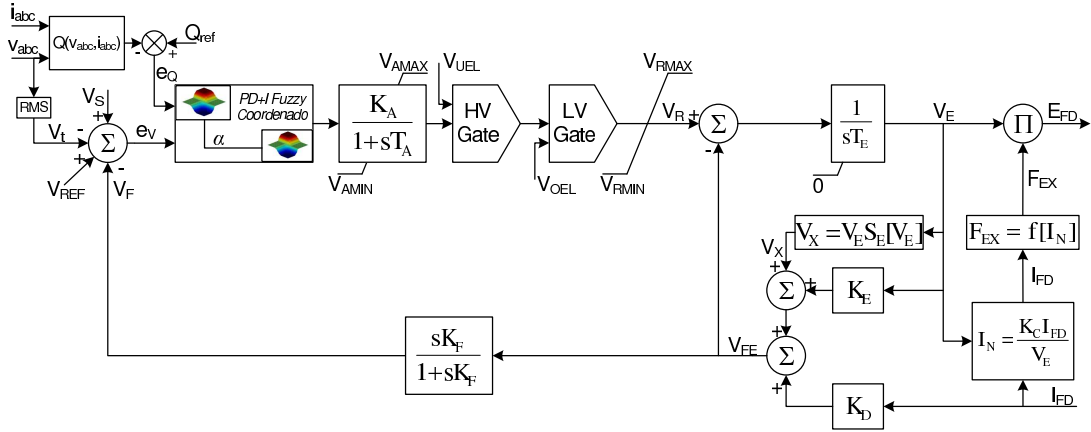


Figura 5: Diagrama de blocos do controlador coordenado fuzzy PD+I inserido no modelo da excitatriz AC1A, AVR-C.

4 Descrição dos eventos

Os cenários são iniciados com a GD desconectada da rede de distribuição. A GD inicia o processo de sincronismo levando em torno de 5 a 7 segundos para ser realizado. Neste instante a GD é conectada à rede de distribuição. Logo após ocorrer a conexão com a rede de distribuição, inicia-se a transferência de potência em rampa com inclinação de 0,1 pu/s até atingir 0,3 pu, aproximadamente 330 kW.

Quando a simulação alcança 10 s ocorre a conexão do MIT, que é conectado a vazio e, após 1 s, é adicionado um torque em rampa a uma taxa de 0,3 pu/s ao eixo da máquina até alcançar 1 pu. Aos 20 s o motor é desconectado do sistema. A carga RLC é conectada ao barramento da GD aos 30 s e desconectada aos 40 s. O retificador não controlado trifásico é conectado aos 50 s da simulação e desconectado aos 60 s.

5 Resultados dos Cenários Simulados

As simulações foram realizadas no *software Power Systems CAD/Electro-magnetic Transients including DC* (PSCAD/EMTDC). O passo de tempo da simulação é 75 μ s.

Os cenários de simulação foram definidos como:

- Cenário 1: topologia 1, somente AVR;
- Cenário 2: topologia 2, com controlador PI VAR tipo II;
- Cenário 3: topologia 2, com CCFPD+I;
- Cenário 4: topologia 3, AVR-C;

Os resultados do Cenário 1 são apresentados nas Figs. 8 e 9. Neste resultado há um erro de regime na tensão terminal pois o controlador é apenas proporcional e não há controle de reativo. A potência reativa aumenta ou diminui de acordo

com o balanço de potência do sistema para que a tensão terminal seja ajustada pela GD.

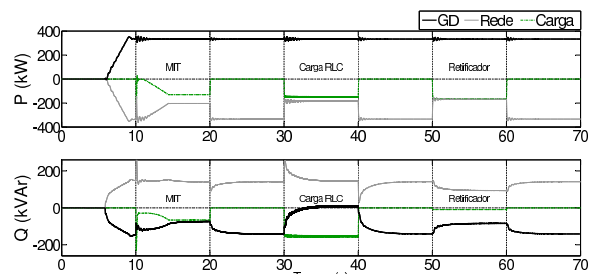


Figura 8: Cenário 1: Potência ativa e reativa.

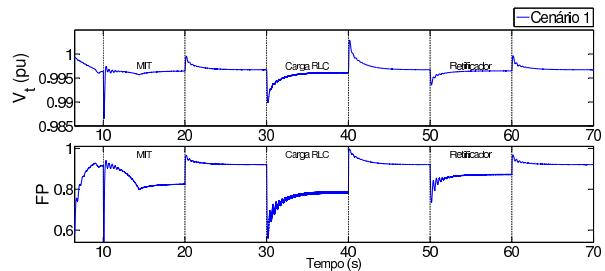


Figura 9: Cenário 1: Tensão terminal e fator de potência.

Os resultados dos Cenários 2, 3 e 4 são para quando há controle de tensão terminal e potência reativa com a referência da potência reativa igual a potência reativa requisitada pelas cargas locais. As Figs. 10, 11, 12 e 13 apresentam as respostas destes cenários.

Nos três cenários, a potência reativa fornecida pela GD às cargas sempre alcançam o valor de referência, porém o Cenário 2 (controlador PI) é o mais lento na acomodação do sistema. Os sobressinais no Cenários 3 e 4 são praticamente os mesmos, mas são menores do que dos cenários anteriores. O distúrbio de potência reativa no

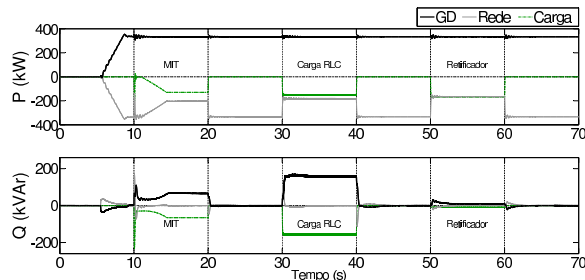


Figura 10: Cenário 2: Potência ativa e reativa.

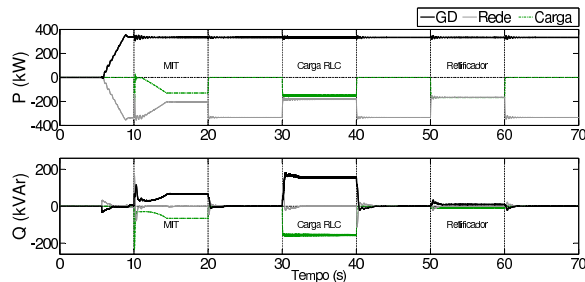


Figura 11: Cenário 3: Potência ativa e reativa.

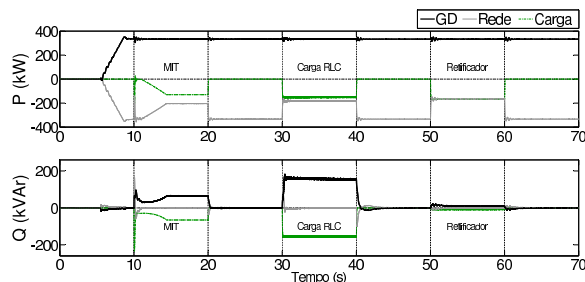


Figura 12: Cenário 4: Potência ativa e reativa.

momento da conexão da GD com a rede de distribuição foi menor no Cenário 4, depois no Cenário 3 e por último no Cenário 2. O mesmo distúrbio foi extinto mais rápido na mesma ordem de cenários.

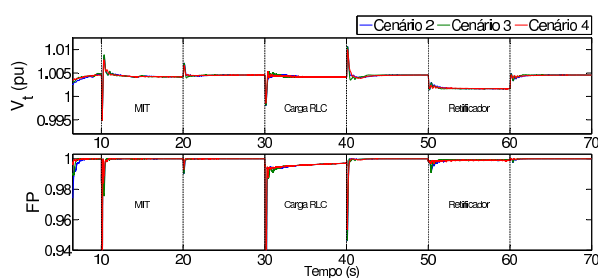


Figura 13: Comparação da tensão terminal e fator de potência para os Cenários 2, 3 e 4.

A Fig. 13 apresenta a comparação entre a tensão terminal e o fator de potência para os três cenários. A tensão terminal alcança valores acima de 1 devido à troca de reativo da GD com a rede. Os Cenários 3 e 4 são mais rápidos para estabilizar

a tensão do que o Cenário 2. A velocidade dos controladores também é mostrada na comparação do fator de potência nos três cenários.

De maneira geral, para ambos os casos em que há controle da geração de potência reativa, o AVR-C (Cenário 4) apresentou melhor resposta diante os eventos considerados neste trabalho. Este fato é explicado pela posição do controlador na malha de controle. Como o controlador do Cenário 4 está interno na estrutura da excitatriz, é esperado que ele seja mais rápido do que os controladores que atuam sobre a referência que outro controlador seguirá.

As curvas de potência ativa de todos os cenários foram idênticas pois em todos os cenários foram utilizados o mesmo controlador de potência ativa apresentado na Seção 3.1. As oscilações presentes nas curvas acontecem devido à variação da tensão terminal decorrente da entrada ou saída de carga.

6 Conclusões

A superfície fuzzy se mostrou versátil para o controle das variáveis da planta. A mesma superfície, utilizada para potência reativa e tensão terminal, foi capaz de controlar a potência ativa que o sistema fornecia para a rede de distribuição.

O controlador fuzzy PD+I teve tempos de acomodação e sobressinais iguais ou menores nos eventos demonstrados quando comparados com o controlador PI. Os cenários com o CCFPD+I e o AVR-C foram mais eficientes do que o controlador PI. A maior variação nos níveis de tensão foi registrado para o controlador de tensão do Cenário 1, cerca de 1,5 % quando houve a conexão do MIT, respeitando ainda os limites de variação de tensão propostos pela ANEEL (ANEEL, 2007). Dentre os outros cenários, a maior variação de tensão também ocorreu na entrada do MIT, chegando a 1,0 % nos Cenários 2 a 4.

O uso do CCFPD+I é recomendado quando é necessário o controle da potência reativa fornecida pelo gerador sem fazer modificações no sistema de excitação, desde que o mesmo tenha uma entrada auxiliar ou seja possível alterar a tensão de referência. Caso seja possível modificar a estrutura da excitatriz, o AVR-C pode ser utilizado para obter um melhor desempenho. As estruturas de controladores fuzzy podem ser aplicadas em outros portes de geradores síncronos sendo necessário somente a sintonia dos ganhos das topologias apresentadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pelo auxílio 2011/02170-5, à CAPES e CNPq pelas bolsas concedidas.

Referências

- ANEEL (2007). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 8.
- Best, R. J., Member, S., Morrow, D. J., McGowan, D. J. and 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. and 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.
- Boldea, I. and Nasar, S. (1999). *Electric Drives*, CRC Press, Boca Raton.
- Bulic, N., Sumina, D. and 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.
- Chambers, K., McGowan, D. and Morrow, D. (2007). A digital load relief scheme for a diesel generating set, *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007*, Tampa, pp. 1–7.
- Cooper, A., Morrow, D. and Chambers, K. (2010). Development of a diesel generating set model for large voltage and frequency transients, *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010*, Minneapolis, pp. 1–7.
- Eker, M. K. and Altas, I. H. (2007). A fuzzy voltage regulator (FVR) for a stand-alone synchronous generator, *Electric Power Components and Systems* **35**(4): 429–443.
- Gunes, M. and Dogru, N. (2010). Fuzzy control of brushless excitation system for steam turbogenerators, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **25**(3): 844–852.
- 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 421.5 (2005). Approved IEEE recommended practice for excitation systems for power stability studies (superseded by 421.5-2005).
- Kennedy, J., Best, R., Morrow, D. and Fox, B. (2010). Performance evaluation of biodiesel fuelled electrical generation, *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010*, Minneapolis, pp. 1–7.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York.
- McGowan, D., Morrow, D. and 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.
- Neves, R., Reis, G., Aguiar, C., Machado, R. and 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.
- Rashed, M., Elmitwally, A. and 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. and Kishor, N. (2010). Dynamic modeling and control of renewable energy based hybrid system for large band wind speed variation, *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010*, Gothenburg, pp. 1–6.