

## IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS COMO OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA OU PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS CONECTADOS A LTS COM FACTS: UM COMPARATIVO COM AS TÉCNICAS TRADICIONAIS DE PROTEÇÃO

Hugo Henrique da S. Rodrigues (IC), Aurélio Luiz Magalhães Coelho (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira.

**Palavras-chave:** Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Compensador Estático de Reativo. Fuzzy. Geradores Síncronos. Linhas de Transmissão.

### Introdução

O Sistema interligado nacional conecta todo o sistema de transmissão e geração em sub-redes, desta forma aumentando a confiabilidade e flexibilidade do sistema. De forma a garantir a estabilidade das máquinas, e níveis de tensão dos barramentos, torna-se necessário o uso de determinados compensadores de reativos no sistema de transmissão devido a restrições de operação e estabilidade que impõem um limite de potência que pode ser transmitida com segurança.

Os dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) são utilizados em prol da melhora na eficiência e confiabilidade da transmissão de energia elétrica, permitindo desta forma o controle dinâmico de parâmetros como tensão, corrente, e ângulo de fase. Contudo a introdução do dispositivo na linha de transmissão altera o valor da impedância equivalente medida do sistema, conseqüentemente alterando a resposta dos métodos de proteção, que se baseiam na trajetória da impedância aferida a partir das correntes e tensões estatóricas da máquina.

Diante disso, o presente trabalho apresenta uma forma comparativa aos métodos tradicionais de proteção para perda de excitação (ANSI 40) em geradores síncronos conectados à linhas de transmissões compensadas por um SVC (*Static Var Compensator*) em um sistema IEEE 9 barras através de sua modelagem no *software* de análises de transitórios eletromagnéticos PSCAD (*Power Systems Computer Aided Design*). A nova proposta de detecção utiliza a taxa de variação ou derivada de primeira ordem da corrente de armadura RMS e potência reativa da máquina síncrona, que são utilizadas como variáveis de pertinências para o classificador Fuzzy modelado via *software* MATLAB.

### Metodologia

A perda de excitação em um gerador síncrono é caracterizada por uma redução total ou parcial das tensões nos enrolamentos de campo, de maneira que, no momento da perda de excitação, existe um aumento da velocidade rotórica na faixa de 2% a 5% da velocidade nominal quando ela opera com grande carregamento, perdendo o acoplamento magnético com o rotor. Desta forma, o gerador síncrono passa a se comportar como um gerador assíncrono, consumindo um valor demasiado de potência reativa do sistema. A Figura 1 retrata o comportamento das potências ativas e reativas durante uma perda de excitação total em um gerador síncrono.

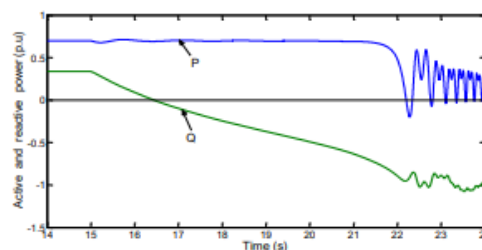


Figura 1 - Comportamento das potências do gerador em uma perda de excitação

A Figura 2 representa o sistema IEEE modelado no PSCAD onde o dispositivo FACT se encontra conectado à barra 6 do sistema. O gerador 1 conectado à barra 1 foi submetido à uma perda de excitação através da abertura do disjuntor de campo em 12 segundos.

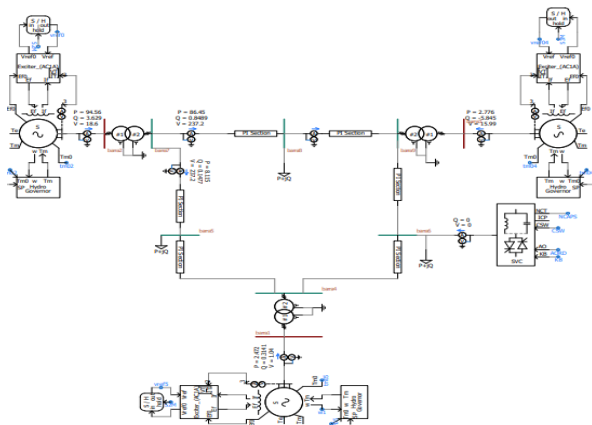


Figura 2 - Sistema IEEE 9 Barras modelado no PSCAD

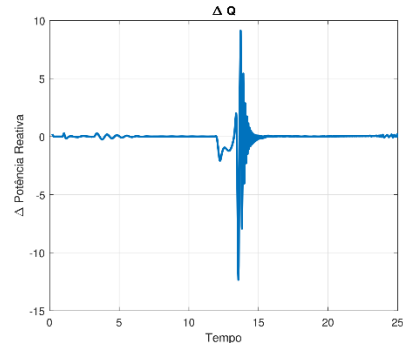


Figura 3- Comportamento da derivada da potência reativa durante uma perda de excitação.

O sistema foi submetido a quatro condições de carregamentos diferentes para analisar o comportamento da máquina, de maneira que o último carregamento é o mais pesado e crucial a estabilidade e proteção dos geradores, podendo ser visualizada pela Tabela 1, onde o número da carga corresponde à barra conectada respectivamente.

Condições de Carga	Carga 5 [MVA]	Carga 6 [MVA]	Carga 8 [MVA]
Carregamento 1	125 + j50	90 + j30	100 + j30
Carregamento 2	175 + j70	140 + j50	155 + j55
Carregamento 3	225 + j70	190 + j50	200 + j55
Carregamento 4	300 + j70	250 + j50	260 + j65

Tabela 1- Condições de carregamento do sistema

Durante uma perda de excitação parcial ou total, as variáveis oscilam constantemente, portando a derivada da curva da grandeza mensurada permite avaliar a inclinação da reta no ponto, ou seja, o quanto a grandeza se alterou durante uma perda de excitação, de modo que o sistema em condições estáveis a derivada é nula. O ponto de interesse se destaca no começo da variação, onde a potência reativa se identifica pela curva negativa caracterizada pelo consumo de reativo da máquina síncrona durante uma LOE, por outro lado a variação da corrente positiva comprova o aumento da corrente de armadura no início da perda de excitação. A figura 3 retrata a primeira derivada da potência reativa do gerador para uma perda de excitação aplicada em 12s.

O método proposto utiliza-se das taxas de variações (primeira derivada) da potência reativa e corrente de armadura do gerador síncrono em análise, ambas sendo inclusas como variáveis de pertinência de entrada para a lógica fuzzy.

A saída da fuzzy corresponde à atuação da proteção, sendo ela indicando os sinais de alarme para condições de oscilações instáveis como a perda de excitação, alarme para oscilações estáveis e sem sinal para condição de pleno funcionamento.

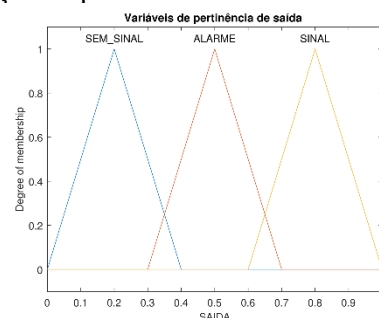


Figura 4- Saída da lógica fuzzy.

## Resultados e discussão

A Figura 5 ilustra o comportamento da potência reativa e corrente de armadura RMS do gerador 1 para uma perda de excitação total ( $E_f = 0$ ) gerada em 12s, os dados referentes se encontram em p.u na base de 100 MVA. Observa-se através da que com a inserção do SVC no sistema, as variáveis de análise são instáveis e o SVC tende a balancear a potência do barramento, influenciando diretamente na corrente do gerador, potência decai de forma instantânea após a condição de falha, e passa oscilar de forma contínua devido ao nível de carregamento e o sistema não consegue retomar o ponto de estabilidade.

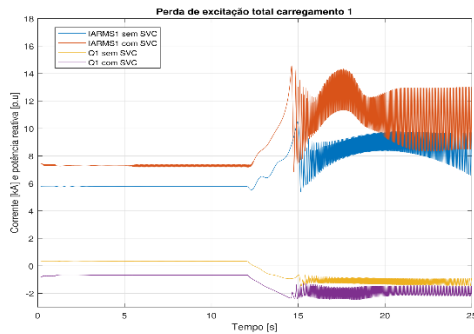


Figura 5- Comportamento da corrente de armadura RMS e potência reativa do gerador

Para as perdas de excitações totais no cenário de carregamento 1 e 2, tem-se a trajetória das impedâncias no plano R-jX representada pela Figura 6, nota-se que o SVC tende a atrasar a atuação da proteção no método tradicional devido ao mesmo empenhar para que o sistema fique em condição de equilíbrio

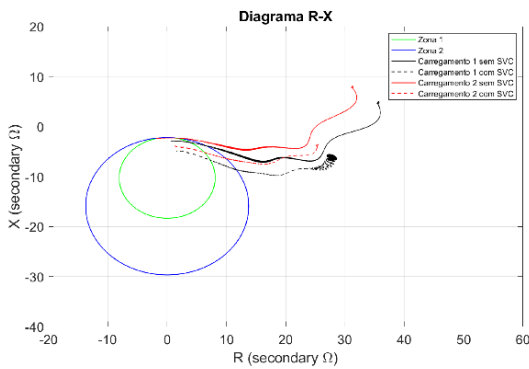


Figura 6- Trajetória da impedância para uma perda de excitação total no carregamento 1 e 2. (MHO *offset* negativo)

A comparação do método da taxa de variação somada a lógica fuzzy é feita com o método tradicional de Berdy e ao método da Rede Neural (RNA) [8] podendo assim ser visualizado a relação entre os tempos de atuação da proteção para respectivos métodos. A Tabela 2 apresenta os comparativos do sinal de TRIP em uma perda de excitação total gerada em 12s para os níveis de carregamentos abordado nesta pesquisa.

	Tempo de atuação [s]					
	Fuzzy T.V.		ANSI 40 MHO <i>offset</i> positivo		RNA	
	Sem SVC	Com SVC	Sem SVC	Com SVC	Sem SVC	Com SVC
Carregamento 1	3,15	2,75	4,73	4,93	3,18	3,22
Carregamento 2	2,87	2,32	2,82	2,91	1,5	1,81
Carregamento 3	2,08	1,65	2,10	1,99	1,5	1,67
Carregamento 4	1,62	2,45	1,61	2,15	1,55	1,67

Tabela 2- Tempos de atuação para uma TLOE Fuzzy T.V., MHO *offset* positivo e RNA

Observa-se que para os níveis de carregamentos inferiores, o método obteve um ganho positivo se comparado com o método tradicional MHO com *offset* positivo com o SVC inserido, no que tange ao sistema operando sem o compensador os tempos de atuação são similares, porém nos carregamentos 1 e 2 o método proposto identificou de forma mais efetiva a TLOE. Em comparativo com a Rede neural, os métodos se diferenciam extremamente nos resultados, visto que a RNA possui um treinamento adequado e segue um padrão de identificação, já a lógica fuzzy se baseia na derivação das grandezas mensuradas logo é inerente a variação e comportamento da potência reativa e corrente de armadura. Para os carregamentos 1 com e sem SVC, e 3 com SVC, o método apresentado obteve melhor desempenho.

Para o cenário de perda de excitação parcial ( $E_f = 0,5$ ), os testes foram feitos para o carregamento 1 tendo um tempo de resposta de 2,92s sem o SVC e 2,75s com SVC, e carregamento 3 em 2,11s sem a presença do SVC e 2,11s com a inserção do dispositivo, a trajetória da impedância é visualizada na Figura 7.

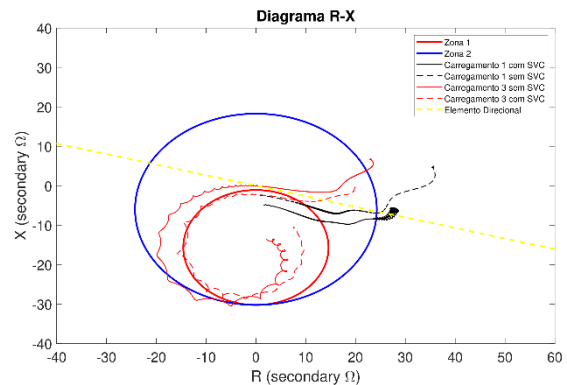


Figura 7-Trajetoória da impedância para uma perda de excitação parcial no carregamento 1 e 3 (MHO *offset* negativo)

## Conclusões

Analisando os resultados, compreende-se que para níveis de carga reduzidos a metodologia implementada da taxa de variação com a fuzzy se assemelha com a RNA e tem seu tempo de resposta melhor que a proteção tradicional, visto que mesmo após a perda de excitação, o gerador continua entregando potência ao sistema durante 4,73s e 4,93s que pode ser problemática no tocante à estabilidade do sistema, importante salientar que o método não quer nenhum treinamento como a RNA e se torna vantajoso por isto, a lógica fuzzy se adaptou bem ao se trabalhar com a taxa de variação da potência reativa e corrente de armadura RMS, identificando todas as oscilações instáveis e acionando o TRIP.

Para níveis de carregamento intermediários, a

lógica implementada de forma semelhante obteve resultados positivos em comparativo com a proteção de Berdy, com um tempo de identificação ligeiramente melhor. Os níveis superiores de carga, tal como o último carregamento, sendo o mais crítico ao sistema e ao gerador, obteve um tempo de resposta similar com a metodologia padrão, entretanto a proteção tradicional tem um tempo de resposta melhor com a inserção do SVC devido as oscilações iniciais contribuírem para um atraso da detecção via lógica fuzzy. O método apresentou resultados satisfatórios e uma alternativa viável, de modo que na proteção tradicional os dispositivos FACTS tendem a atrasar a identificação da contingência, e através dessa metodologia foi possível observar que o compensador nem sempre irá atrasar a atuação da proteção, pois ela se baseia na primeira derivada das grandezas medidas, sendo inerente à variação do sistema apenas.

### Agradecimentos

O autor expressa seus agradecimentos ao órgão de fomento FAPEMIG, responsável pelo apoio financeiro fornecido.

Genuíno agradecimento ao professor orientador Dr. Aurélio Luiz Magalhães Coelho pelo suporte, conhecimento compartilhado e oportunidade concebida.

Por fim, agradecimento à Universidade Federal de Itajubá (Campus Itabira) por prover toda estrutura para conclusão deste projeto.

### Referências

[1] ALMEIDA, Felipe Augusto Ferreira de. **Compensadores estáticos de reativos empregados em redes de baixa tensão com geradores distribuídos de energia**. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2016

[2] JÚNIOR, Gilson Soares da Silva et al. **Análise da influência de um compensador estático de reativos na operação de sistema elétrico industrial com cogeração**. Universidade Federal do Maranhão, 2008.

[3] SHI, ZP et al. **The comparison and analysis for loss of excitation protection schemes in generator protection**. In: IET. 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). [S.l.], 2012.

[4] COELHO, Aurélio Luiz Magalhães. **Um sistema integrado de testes de funções de proteção de geradores síncronos associadas aos limites de excitação de um modelo de avr implementado em ambiente de simulação digital em tempo real**. 2016.

[5] MORAIS, Adriano Peres de et al. **Avaliação do desempenho dos métodos de proteção contra a perda de excitação em geradores síncronos: uma contribuição utilizando a teoria dos conjuntos nebulosos**. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

[6] MOREIRA, TGEA et al. **Avaliação da capacidade de máxima transferência de potência em sistemas elétricos interligados via programação linear sequencial**. 2017.

[7] TANSCHKEIT, Ricardo. **Sistemas fuzzy**. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 338–353, 2004

[8] SILVA, HG et al. **Ann based impedance trajectory detection approach for loss of excitation protection of synchronous generators connected to transmission lines with svcs**. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 213, p. 108766, 2022.

[9] ONS, Operador Nacional do Sistema. **Histórico de operação anual**. Disponível em: <[https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao\\_energia.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx)>. 2021.

[10] CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: AMGH editora, 2013.

[10] CÁRDENAS, Sergio León Escalante et al. **Aspectos técnicos e econômicos da utilização dos controladores facts na operação dos sistemas de energia elétrica**. Universidade Federal do Maranhão, 2005.

[11] FRONTIN, Sergio O et al. **Equipamentos de alta tensão—prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Teixeira, v. 2000, p. 934, 2013.

[12] ABSAR, Mohammad Nurul; ISLAM, Md Fokhrul; AHMED, Ashik. **Power quality improvement of a proposed grid-connected hybrid system by load flow analysis using static var compensator**. Heliyon, Elsevier, 2023.

[13] BARRETO, Jorge M. **Inteligência artificial no limiar do século xxi: Abordagem híbrida, simbólica, conexionista e evolutiva**. Florianópolis: Duplic, v. 3, 2001.

[14] BÉRARD, J. **Ieee 9 bus system example**. 2013. Available in: <[http://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9\\_model\\_documentation\\_R0.pdf](http://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9_model_documentation_R0.pdf)>..

[15] CHATTERJEE, Soumesh; DAS, Dhruvajyoti; BHATTACHARJEE, Kuntal. **A high speed method for loss of excitation detection**. In: IEEE. 2022 IEEE Global Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GlobConPT). [S.l.], 2022.

[16] IEEE, IEEE Std. C37. **Ieee guide for ac generator protection**. IEEE New York, 2006