

## COMPARAÇÃO DA RESPOSTA DE MÉTODOS TRADICIONAIS E BASEADOS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO E PERDA SINCRONISMO DE GERADORES SÍNCRONOS CONECTADOS A LTS COM DISPOSITIVOS FACTS

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

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – Campus Campus Theodomiro Carneiro Santiago (Itabira)

**Palavras-chave:** Estabilidade de sistemas. Fuzzy. Sistemas elétricos de potência. Proteção de geradores síncronos. Derivada numérica

### Introdução

Com o avanço da eletrônica de potência, se fez possível o controle rápido e contínuo da impedância vista pelo sistema através de capacitores e indutores chaveados a tiristores, compondo assim o SVC (*Static Var Compensator*), um modelo de FACTS que é explorado neste trabalho. Embora benéfico, o dispositivo SVC opera na dinâmica de grandezas importantes para o sistema, tais como a corrente e a tensão dos barramentos, alterando assim a resposta tradicional da proteção. Essas alterações se estendem as tensões e correntes estatóricas de um gerador síncrono conectado à sistemas com FACTS. Neste caso, a impedância no plano RX, utilizada para identificação da perda de excitação (LOE, acrônimo do inglês *Loss of Excitation*) pode ter sua trajetória alterada. Assim, as máquinas devem ser devidamente protegidas, de forma a serem retiradas do sistema perante quaisquer condições anormais de operação que possam acarretar extensões de danos, ou interrupção indesejada do sistema.

Nesta conjuntura, o presente trabalho apresenta uma alternativa complementar aos métodos tradicionais de proteção contra perda de excitação (ANSI 40) e de sincronismo (ANSI 78) de geradores síncronos. Através dos valores rms de corrente de armadura e da potência reativa do gerador, os dados são tratados, filtrados e aplicados a uma proposta de detecção de perda de excitação que utiliza a taxa de variação, ou derivada de primeira ordem, destas grandezas que são utilizadas como variáveis de pertinências para um método classificador Fuzzy. Este método é analisado para sistemas com e sem a presença de SVCs.

### Metodologia

A perda de excitação de um gerador síncrono é caracterizada por uma redução total ou parcial das

tensões nos enrolamentos de campo, podendo ser provocada por curto-circuito nos enrolamentos, abertura accidental no disjuntor de campo, falhas de diodos na ponte retificadora que alimenta o circuito de campo, dentre outros. Durante a perda de excitação o gerador síncrono passa a se comportar como um gerador assíncrono, consumindo um valor demasiado de potência reativa do sistema, além de uma queda das tensões terminais do mesmo.

Por outro lado, durante uma condição de perda de sincronismo há uma grande variação na corrente e na tensão com relação à frequência da máquina afetada, a amplitude de corrente e a frequência de operação acima do valor nominal podem resultar em stress dos enrolamentos e torques pulsantes, consequentemente provocando vibrações mecânicas que podem ser prejudiciais ao gerador.

O sistema IEEE 9 barras, visualizado pela Figura 1, foi utilizado para realização das análises e validação da metodologia proposta.

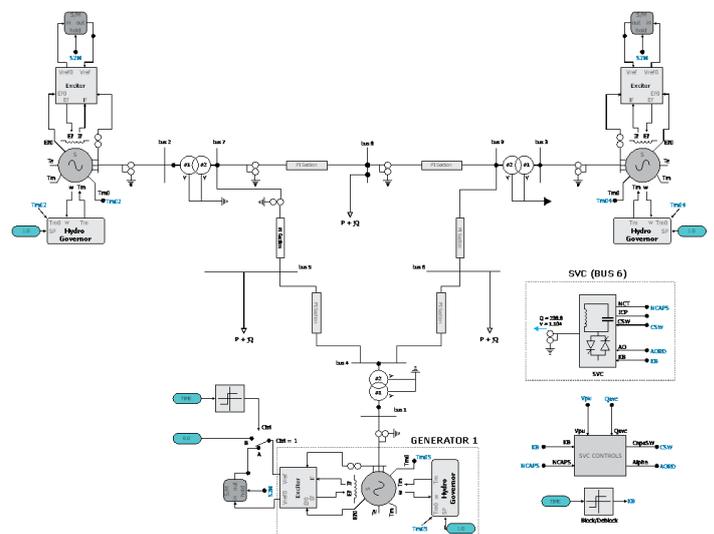


Figura 1 - Sistema IEEE 9 Barras modelado no PSCAD.

A perda de sincronismo e excitação são aplicadas ao gerador que está localizado no barramento 1, onde o gerador é responsável por suprir maior parte de potência ativa e reativa do sistema, desta forma é de se esperar que quaisquer oscilações induzidas no último carregamento sejam mais cruciais para a estabilidade, devido ao elevado carregamento.

Foram realizadas simulações em três níveis de carga, para análise das respectivas proteções, é visualizado pela Tabela 1.

Tabela 1- Níveis de carregamento do sistema

Carregamento	Carga 5 (p.u)	Carga 6 (p.u)	Carga 8 (p.u)
Leve	0,25 + 0,09j	0,18 + 0,059j	0,20 + 0,06i
Média	0,35+ 0,13j	0,27 + 0,1j	0,30 + 0,11j
Pesada	0,44 + 0,14j	0,37 + 0,1j	0,41 + 0,11j

A inferência fuzzy para perda de excitação foi parametrizada no *software* MATLAB para identificação da perda de excitação, possuindo duas variáveis de entrada, sendo elas: a taxa de variação (primeira derivada) da potência reativa ( $\Delta Q$ ) e corrente de armadura RMS do gerador síncrono ( $\Delta IA$ ). Desta forma existe três funções de pertinências que descrevem o comportamento de cada variável, nomeadas por *LOW-LOE*, *MEDIUM-LOE*, e *HIGH-LOE*, de modo que possa ser analisado o comportamento da derivada das variáveis durante uma perda de excitação, positiva, negativa e zero. Através da Figura 2 é representado as entradas e saídas do classificador.

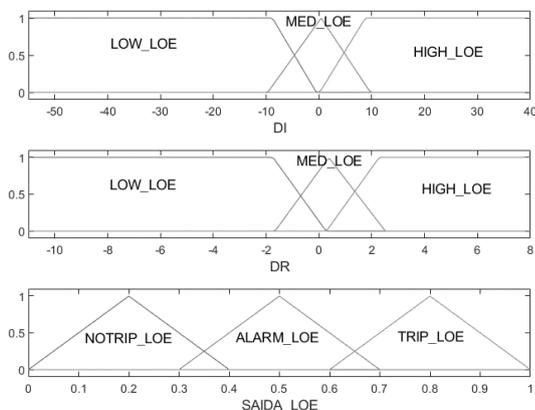


Figura 2 - Classificador fuzzy para perda de excitação.

De forma semelhante, o classificador fuzzy para perda de sincronismo foi parametrizado no MATLAB, nas entradas emulam-se os valores dos *blindings* na função de pertinência de entrada, sendo elas, os valores que a impedância se encontra no plano R e jX. Outra entrada é definida de *pickup*, e se refere ao valor de parametrização da zona circular de proteção (zona 1), desta forma a lógica implementada só poderá atuar caso o valor da impedância ultrapasse ambos os valores de *blindings* e esteja dentro da zona de atuação. É visualizado na Figura 3 as entradas e saídas do classificador fuzzy para perda de sincronismo.

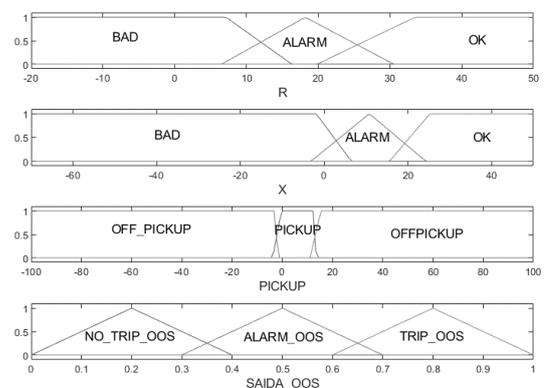


Figura 3 - Classificador Fuzzy para perda de sincronismo.

As saídas de ambos classificadores correspondem a atuação da proteção na metodologia proposta, sendo elas: **TRIP** quando há reconhecimento da contingência; **ALARM** em iminência da falha, ou seja, o sistema está encaminhando para uma LOE/OOS; e, por fim, **NO TRIP**, quando o sistema está em equilíbrio e operando de forma contínua, sem falhas.

Para comparação da metodologia proposta, foi realizado sistema realizado um teste físico com relés no laboratório de proteção de sistemas elétricos de potência na UNIFEI, sendo constituída por uma mala de teste, um computador e um relé de proteção, todos conectados via rede através do protocolo ethernet, utilizando um cabo RJ45. Através da simulação efetuada no PSCAD foram exportados os sinais COMTRADE de tensão e corrente terminais da máquina para avaliar as funções ANSI 40 e 78 no relé de teste.

### Resultados e Discussões

As análises foram realizadas considerando uma perda de excitação total ( $E_f = 0$ ) em 6s de simulação, foi considerado o mesmo cenário para testes da função

contra perda de sincronismo e excitação, se tratando de uma oscilação instável de potência. Foram simuladas as condições de carregamento abordadas na Tabela 1 na presença do SVC e sem a inserção do dispositivo no barramento 6 do sistema.

Para o cenário de perda de excitação total, é efetuada a abertura do disjuntor de campo conectado ao sistema de excitação do gerador 1 presente na barra 1 do sistema. A Figura 4 retrata o comportamento da corrente de armadura RMS do gerador em análise durante uma perda de excitação iniciada em 6 segundos. Observa-se que após a abertura do disjuntor de campo a corrente tem uma elevação inicial e posteriormente oscila de forma contínua, acima do seu valor nominal.

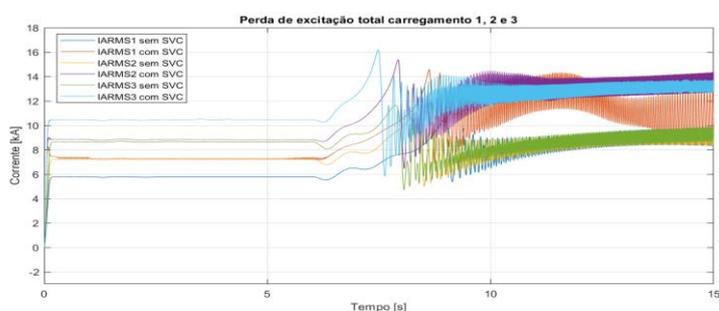


Figura 4 - Comportamento da corrente de armadura rms para uma LOE (carregamento 1, 2 e 3)

A Figura 5 ilustra o comportamento dos valores da potência reativa do gerador nas condições de pré, durante e pós uma LOE, onde a potência reativa decai de forma significativa. Após a perda de excitação, nota-se que a mesma assume valores negativos, reiterando o comportamento assíncrono do gerador, consumindo desta forma a potência reativa. Observa-se que na operação do SVC, o sistema tem um comportamento oscilatório mais intenso durante uma LOE, visto que o dispositivo continua a injeção de reativo no sistema em prol do controle de tensão no barramento e injeção de potência ativa pelo gerador. Entretanto o controle não perdura e a máquina perde a estabilidade aproximadamente em 8 segundos.

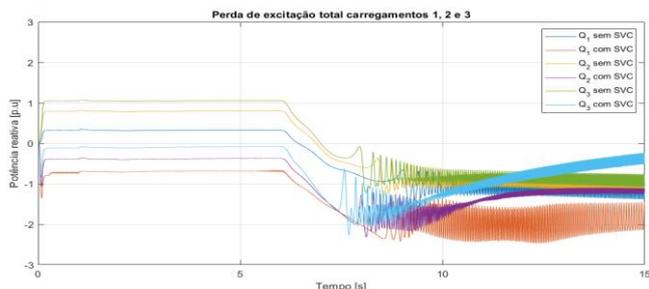


Figura 5 - Comportamento da potência reativa para uma LOE (carregamento 1, 2 e 3)

A Figura 6 retrata o comportamento da proteção ANSI40 com *offset* positivo para os mesmos cenários de perda de excitação citados anteriormente. Observa-se que para os níveis de carregamentos simulados, a proteção de *offset* positivo tem um comportamento mais acurado, podendo identificar a contingência de forma mais rápida.

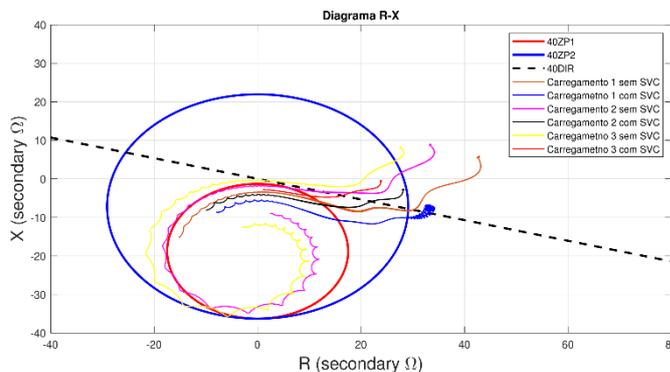


Figura 6 - Trajetória da impedância ANSI40 (*offset* positivo) na ocorrência de uma LOE

A Tabela 2 retrata os tempos de atuação para a função de proteção ANSI40 com *offset* positivo, negativo e da metodologia proposta com o classificador fuzzy, para fins comparativos, a metodologia fuzzy implementada foi comparada com a resposta das funções tradicionais de proteção contra perda de excitação com duas zonas.

Tabela 2 - Tempos de atuação ANSI 40 e classificador Fuzzy para LOE

	ANSI40 offset positivo	ANSI40 offset negativo	Fuzzy
Carregamentos	40Z1 (s)	40Z1(s)	40Z1(s)
1 sem SVC	2,90	2,98	2,90
1 com SVC	2,24	2,63	2,51
2 sem SVC	2,25	2,15	2,28
2 com SVC	1,78	1,93	1,81
3 sem SVC	2,10	2,61	1,85
3 com SVC	1,47	1,73	1,39

A perda de sincronismo foi analisada após o gerador perder a excitação em 6s, uma vez que a subexcitação é uma das principais causas da perda de sincronismo. O fluxo magnético reduz e a rotação da máquina se eleva, consequentemente as correntes, tensões e potências no barramento oscilam continuamente.

A Figura 7 retrata o comportamento da impedância na proteção ANSI78 configurada no modelo de *blinder* simples, onde o elemento 78Z1 é a zona 1, onde a

proteção pode atuar somente se a impedância estiver localizada dentro desta região, os elementos 78R1 e 78R2 descrevem os *blindings*, de forma que a proteção atue quando a impedância passe por ambos os elementos em qualquer direção. Nota-se que após a perda de excitação, a impedância aparente toca ambos *blindings* para ambos carregamentos simulados.

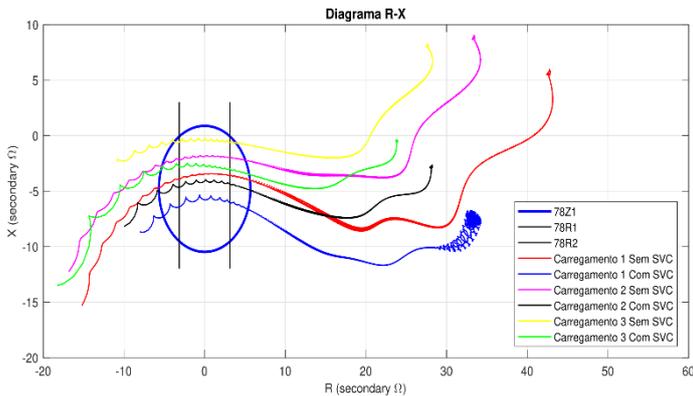


Figura 7 - Trajetória da impedância durante uma perda de sincronismo

A Tabela 3 retrata o tempo de atuação da função de proteção ANSI78 *blindings* simples e o classificador fuzzy

Tabela 3 - Tempos de atuação ANSI78 e Classificador Fuzzy

	ANSI 78	Fuzzy
	OOS (s)	TRIP (s)
1 sem SVC	2,68	2,70
1 com SVC	2,68	2,65
2 sem SVC	2,45	2,41
2 com SVC	2,00	1,97
3 sem SVC	1,98	1,96
3 com SVC	1,59	1,55

### Conclusões

Analisando os resultados apresentados, observa-se que o método implementado baseado no classificador fuzzy teve um desempenho satisfatório na detecção da perda de excitação. Quando comparado com as características tradicionais de proteção contra perda de excitação, notou-se que a lógica fuzzy apresentou tempos ligeiramente mais rápidos para cenários de carregamento mais elevados. Em alguns níveis inferiores de carregamento, a proteção tradicional tem um tempo de resposta melhor com a inserção do SVC, devido as oscilações iniciais contribuir para um atraso da detecção via lógica fuzzy.

No que tange a proteção de perda de sincronismo, observou-se que o método abordado foi semelhante à

proteção tradicional, sendo eficaz na maioria dos cenários simulados, tendo um tempo de resposta maior que a proteção tradicional somente no carregamento 1 sem o SVC.

O método apresentou resultados satisfatórios e uma alternativa viável. Através deste estudo foi possível observar que o compensador nem sempre irá atrasar a atuação da proteção, bem como no método tradicional, tal qual na metodologia alternativa, auxiliando assim a detecção das contingências em tempo esperado.

### Agradecimentos

O autor expressa seus agradecimentos ao órgão de fomento Fapemig, responsável pelo apoio financeiro fornecido. Agradeço também 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] 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, p. 6, 2023.

[2] ALMEIDA, Felipe Augusto Ferreira de. Compensadores estáticos de reativos empregados em redes de baixa tensão com geradores distribuídos de energia. Universidade Estadual Paulista (Unesp), p. 41, 2016.

[3] BERDY, John. Loss of excitation protection for modern synchronous generators. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 94, n. 5, p. 1457–1463, 1975.

[4] BÉRARD, J. IEEE 9 bus system example. 2013. Disponível em: [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). Acesso em: jul. 2020.

[5] BORDEIRA, Bernardo Rocha. Simulação e avaliação dos esquemas de proteção de geradores síncronos contra perda de sincronismo. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, setembro de, p. 42, 2011.

[6] 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. p. 1–6.

[7] **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. Universidade Federal de Itajubá. Tese de Doutorado, 2016.

[8] **DUTRA, V. M. P.; COELHO, A. L. M.; BARACHO, F. R. A. C.; FARIA, I. P.; ARRUDA, E. F.** Influência da inserção do dispositivo STATCOM na proteção contra perda de excitação de geradores: Uma contribuição utilizando a lógica fuzzy. IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (IX SBSE), Anais do IX SBSE, 2022.

[9] **FILHO, J. P. G. S.; FARIA, I. P.; COELHO, A. L. M.; ARRUDA, E. F.; LOPES, G. P.** Efeitos da inserção de SVC e TSC na estabilidade angular transitória e na proteção contra perda de excitação de máquinas síncronas. IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (IX SBSE), Anais do IX SBSE, 2022.

[10] **HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Laszlo.** Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2000.

[11] **LEAL, Mariana Garcia.** Proteção contra perda de sincronismo utilizando sincrofasores–aplicação no sistema Acre-Rondônia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

[12] **MAHAMED, Behnam; ZHU, Jian Guo.** A novel approach to detect symmetrical faults occurring during power swings by using frequency components of instantaneous three-phase active power. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 27, n. 3, p. 1368–1376, 2012.

[13] **SONG, Yue; HILL, David J.; LIU, Tao.** Small-disturbance angle stability analysis of microgrids: A graph theory viewpoint. In: IEEE. 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA). [S.l.], 2015. p. 201–206.

[14] **ZADEH, Lotfi Asker; KLIR, George J.; YUAN, Bo.** Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers. [S.l.]: World Scientific, 1996. v. 6