

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INSERÇÃO DE DISPOSITIVOS FACTS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE E PROTEÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

Hiago Guimarães Silva¹ (IC), Aurélio Luiz Magalhães Coelho (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Palavras-chave: Excitação. Geradores. Impedância. Proteção. RNAs.

Introdução

As linhas de transmissão são as grandes responsáveis pelo transporte de energia em todo o sistema, porém para uma operação segura e otimizada deve-se levar em consideração seus limites térmicos, de estabilidade e sua eficiência [1]. Para operação com níveis de tensão adequados se faz necessário em alguns casos a utilização de dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), sendo esses cada vez mais presente no Sistema Elétrico de Potência (SEP), adicionando novas dinâmicas ao mesmo.

Os geradores síncronos representam grande parcela do investimento de um SEP [2], sendo responsável por suprir grande parte da potência ativa dos consumidores através de vários tipos de geração, como hidrelétricas, termelétricas e eólicas. Por ser um ativo de grande importância e de alto custo, sua continuidade de operação deve ser preservada, porém de modo seguro, sem expor a máquina a condições perigosas de operação. Vários fatores como LOE (*Loss of Excitation*), faltas, rejeições e aumento de carga podem levar a máquina a sair de sincronismo com a rede, e consequentemente perder sua estabilidade, sendo assim as proteções dessas máquinas devem prever e proteger esse ativo dessas contingências [3].

Na literatura há estudos que retratam a proteção de linhas de transmissão compensadas por FACTS, como abordado por [4], porém os efeitos nas proteções de geradores síncronos não são explorados. Estudos realizados por [5] abordam sobre o desempenho da proteção ANSI 40, porém não exploram o efeito da inserção de dispositivos FACTS e técnicas utilizando Rede Neural Artificial (RNA).

Devido a importância dos geradores no sistema, é realizada a modelagem do sistema IEEE 9 barras no software de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC, sendo esse sistema composto de três unidades geradoras, três transformadores, seis linhas de transmissão e um *Static Var Compensator* (SVC) em uma das barras do sistema, com o objetivo verificar o impacto da dinâmica da inserção do FACTS no

desempenho da proteção tradicional de perda de excitação de duplo *offset* negativo, e a proteção utilizando uma RNA. Os níveis de tensão e ângulo das barras e máquinas síncronas são determinados através do estudo de fluxo de potência no software ANAREDE do CEPEL, onde os dados de corrente e tensão exportados pelo PSCAD são tratados no MATLAB para análise do desempenho das técnicas de proteção.

Metodologia

O sistema utilizado para a análise do transiente eletromagnético no software PSCAD se trata do modelo IEEE 9 barras [6], conforme ilustra a Figura 1. Para análise das contingências de perda de excitação com a presença do FACTS, conecta-se o SVC na barra 6 do sistema.

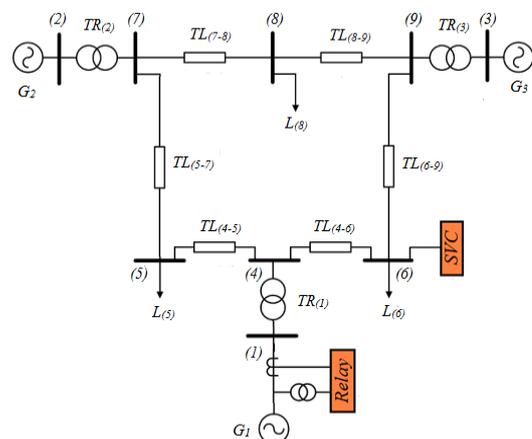


Figura 1 – Sistema IEEE 9 barras.

O estudo de fluxo de potência para determinação das condições iniciais do estudo de transitórios no PSCAD foi realizado no software ANAREDE, versão acadêmica. Foram simuladas 4 condições de cargas, que representam as condições necessárias para as análises da contingência de perda de excitação no gerador 1, conforme apresenta a Tabela 1, de modo a verificar a dinâmica do sistema para cada condição. As barras 4, 5 e 8 são definidas como barras de carga.

Tabela 1 – Condições de carregamento do Sistema.

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

O método de parametrização utilizado para implementação na RNA, se baseia em uma proteção de duas zonas localizadas no 3º e 4º quadrante, sendo uma de atuação instantânea e outra de atuação temporizada (1 s). A RNA implementada no software MATLAB possui duas entradas, baseadas no valor de resistência e reatância medidas a partir da impedância vista pelo relé.

Na Figura 2 é ilustrada a topologia da RNA implementada no MATLAB para comparação com a proteção ANSI 40 tradicional. A RNA possui 2 entradas, 10 neurônios na camada intermediária e 3 neurônios na saída.

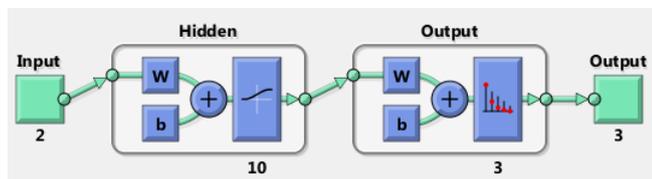


Figura 2 – RNA implementada no MATLAB.

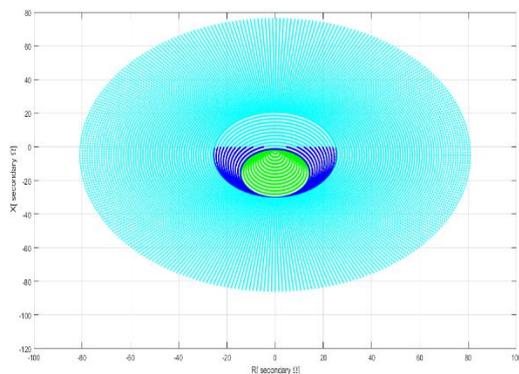


Figura 3 – Sistema IEEE 9 barras.

A camada de saída com 3 neurônios representa cada zona ilustrada na Figura 3, correspondente a zona de não atuação (ciano), atuação em zona 2 temporizada (azul), e atuação em zona 1 instantânea (verde).

As saídas binárias são utilizadas como entradas

para o bloco implementado no MATLAB para cálculo do tempo de atuação. A Figura 4 ilustra o algoritmo desenvolvido em MATLAB para detectar a atuação da proteção.

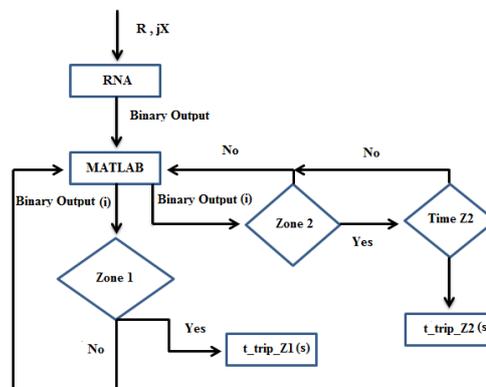


Figura 4 – Algoritmo desenvolvido no MATLAB.

A entrada do algoritmo desenvolvido são as saídas binárias da RNA. Cada saída definida pelo termo “i” é analisada e verificada para determinação da sua zona de atuação. Se a saída binária indica atuação em zona 1, a atuação será instantânea, e o MATLAB retorna o tempo de atuação. Se a saída binária indica atuação em zona 2, a temporização da segunda zona é iniciada, seguida do tempo de atuação. Caso a impedância saia da zona 2 de atuação antes da temporização definida para a segunda zona, o ciclo se reinicia para a análise da próxima saída binária.

Resultados e discussão

As Figuras 5 e 6 ilustram as trajetórias de impedância no plano R-X, em valores secundários para eventos de PLOE (*Partial Loss of Excitation*), considerando a proteção definida por [7], denominada de ANSI 40 com duplo *offset* negativo.

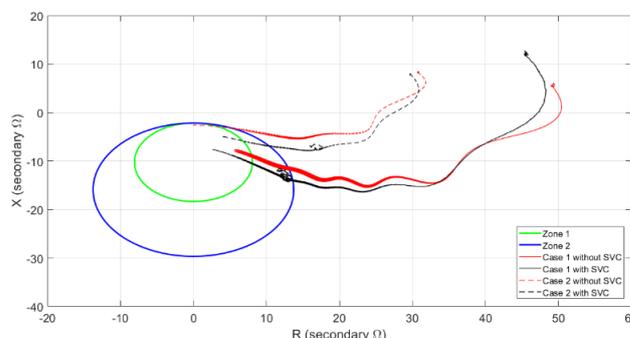


Figura 5 – Trajetória das impedâncias com e sem SVC, para os casos 1 e 2 com PLOE.

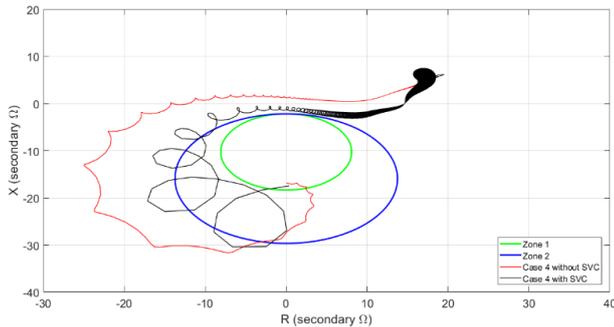


Figura 6 – Trajetória das impedâncias com e sem SVC, para o caso 4 com PLOE.

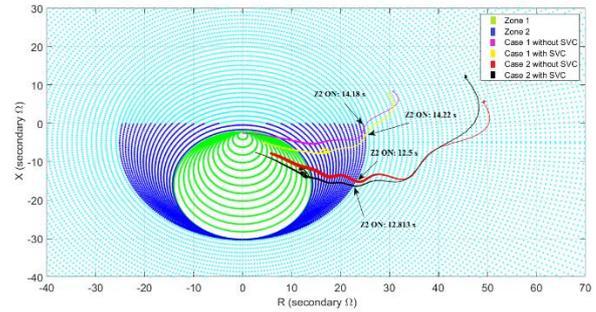


Figura 7 – Trajetória das impedâncias com e sem SVC, para os casos 1 e 2 com PLOE.

O SVC promove atrasos nas trajetórias das impedâncias até as zonas de atuação. O caso 2 apresentou o menor atraso entre os casos simulados, porém o caso 4 possui um atraso maior que 0,5 s. Para os casos 1 e 2 a proteção foi sensibilizada com as trajetórias das impedâncias entrando pela direita das zonas de atuação, como ilustra a Figura 5. No caso 4 a trajetória da impedância não entra nas zonas de atuação pelo lado direito, mas pelo lado esquerdo, atravessando o centro elétrico do sistema, demonstrando que a máquina já havia perdido sincronismo antes da proteção ANSI 40 atuar.

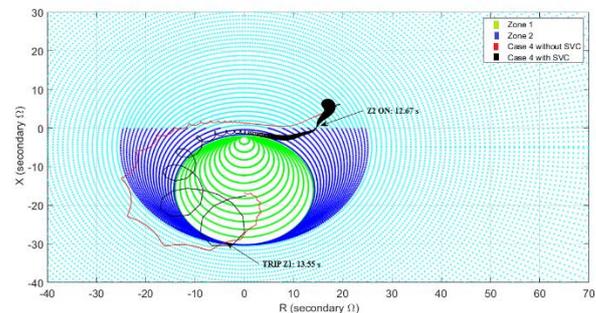


Figura 8 – Trajetória das impedâncias com e sem SVC, para o caso 4 com PLOE.

Os resultados apresentados demonstram que o carregamento inicial do gerador síncrono interfere significativamente na característica da trajetória da impedância. A presença do SVC também apresenta grande interferência, deslocando as trajetórias das impedâncias para baixo no eixo imaginário do plano R-X, e isso pode ser aproveitado para uma melhoria dos tempos de atuação dessa característica, o que é explorando na proteção baseada na RNA.

A Tabela 2 apresenta os tempos de atuação (TRIP), o tempo de sensibilização da zona 2 (Z2 ON), e a zona no qual ocorreu a atuação (Z TRIP).

As trajetórias das impedâncias para a proteção baseada na RNA são ilustradas nas Figuras 7 e 8. O método baseado na utilização da RNA promove um padrão definido de atuação quando o sistema tem a presença de um SVC. Para o caso 1 a proteção apresentou atuação em zona 2, e o SVC gerou atrasos de atuação. No caso 2 o SVC promoveu um atraso de 313 ms na atuação da proteção, atuando em zona 2. Os casos 3 e 4 também sofreram atrasos na presença do FACTS, atuando em zona 2. No caso 4 para o sistema sem FACTS, a proteção atuou em zona 1, pois a trajetória da impedância se moveu rapidamente para o lado esquerdo do plano R-X, entrando posteriormente na zona 2, quando a máquina já havia perdido estabilidade, porém não completando a temporização da segunda zona de atuação.

Tabela 2 – Atuação da proteção baseada na RNA.

Caso	SVC	Z2 ON (s)	TRIP (s)	Z TRIP
1	OFF	14.18	15.18	Zone 2
	ON	14.22	15.22	Zone 2
2	OFF	12.50	13.50	Zone 2
	ON	12.813	13.813	Zone 2
3	OFF	12.51	13.5	Zone 2
	ON	12.627	13.627	Zone 2
4	OFF	12.79	13.55	Zone 1
	ON	12.67	13.67	Zone2

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos tempos de atuação dos dois métodos, e a comparação entre esses tempos, de modo a validar a metodologia implementada. Os tempos de atuação para o método tradicional de duplo *offset* negativo são definidos na coluna “TRIP ANSI”, e os tempos de atuação para o método utilizando RNA são definidos na coluna “TRIP RNA”.

Em todos os casos de carregamento, a detecção utilizando RNA apresentou tempos de atuação melhores que o método tradicional de duplo *offset* negativo de duas

zonas, sendo que no caso 1 essa diferença com e sem o SVC superou 1,5 s.

não há a presença de região de atuação.

Tabela 3 – Comparação entre os tempos de atuação.

Caso	SVC	TRIP ANSI (s)	TRIP RNA (s)	Δ TRIP ANSI – RNA (s)
1	OFF	16.73	15.18	1,55 s
	ON	16.93	15.22	1,71 s
2	OFF	14.82	13.50	1,32 s
	ON	14.91	13.813	1,10 s
3	OFF	14.10	13.50	0,60 s
	ON	13.99	13.627	0,37 s
4	OFF	13.61	13.55	0,06 s
	ON	14.15	13.67	0,48 s

Embora a RNA seja treinada utilizando parametrizações de zonas de proteção no plano R-X, o ajuste escolhido acomoda melhor as trajetórias das impedâncias no caso de LOE, permitindo a sensibilização da zona 2 em um tempo menor quando comparado ao método tradicional, sem interferir na operação em regime permanente do gerador síncrono.

Conclusões

As simulações realizadas demonstram que a presença do SVC possibilita para a máquina um período extra de injeção de potência ativa, sem que ocorra a perda de estabilidade angular, se comportando como uma fonte de reativo para o gerador síncrono, que no momento da LOE passa a operar de forma assíncrona, consumindo grande quantidade de potência reativa do sistema. Outra análise importante retirada das simulações, é que a trajetória da impedância em casos de LOE com a presença do SVC é deslocada para baixo no eixo imaginário do plano R-X, representando justamente o aumento do consumo de potência reativa do gerador síncrono.

O método tradicional da proteção ANSI 40 de duplo *offset* negativo não comporta as trajetórias de impedância em condições de grande carregamento, como visto no caso 4. A proteção utilizando a RNA possibilita a sensibilização em segunda zona das trajetórias não sensibilizadas pela proteção tradicional, principalmente pelo fato da geometria da parametrização utilizada ocupar um espaço estratégico no 4º quadrante do plano R-X, justamente onde a maioria das trajetórias de LOE com e sem SVC adentram. Esse ganho de sensibilização da RNA promove a proteção um tempo mais rápido de atuação quando comparado ao método tradicional de duplo *offset* negativo, sem perder a seletividade para operação sobreexcitada em regime, pois no 1º quadrante

Agradecimento

Agradeço primeiramente o professor Aurélio Luiz Magalhães Coelho pela oportunidade de participar dos trabalhos realizados e pela amizade e conhecimentos compartilhados durante a orientação do projeto.

Aos amigos Victor Miguel e Braen Gleiser pelos conhecimentos concedidos para o desenvolvimento da pesquisa. Ao CNPQ pelo apoio financeiro concedido, e a UNIFEI por proporcionar toda estrutura para realização do projeto.

Referências

- [1] KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994. 1167 p.
- [2] COELHO, Aurélio Luiz Magalhães *et al.* A Test-Bed for Researching the Interactions of Underexcitation and Overexcitation Limiters of Synchronous Generators with Protection Functions. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 55, n. 6, p. 5717-5726, 2019.
- [3] SILVA, Hiago Guimarães; COELHO, Aurélio Luiz Magalhães; FARIA, Ivan Paulo; ARAÚJO, Braen Gleiser. ANN Based impedance trajectory detection approach for loss of excitation protection of synchronous generators connected to transmission lines with SVCs. Electric Power Systems Research (EPSR), 2022.
- [4] GONÇALVES, David do Nascimento. Performance of the Distance Relay in TCSC Compensated Transmission Lines. 2007. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] ELSAMAHY, Mohamed *et al.* Impact of Midpoint STATCOM on Generator Loss of Excitation Protection. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 29, n. 2, 2014.
- [6] BÉRARD, J.P. IEEE 9 Bus System Example. 2017. Disponível em: <http://www.kios.ucy.ac.cy>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- [7] BERDY, John. Loss of Excitation Protection for Modern Synchronous Generators. IEEE Transactions, v. PAS-94, n. 5, p. 1457-1463, 1975.