

PERDA DE SINCRONISMO EM GERADORES SÍNCRONOS CONECTADOS A LTS COM FACTS: UM MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO PELA DERIVADA DA POTÊNCIA

Willian Ferraz Gobira Araújo¹(IC), Aurélio Luiz Magalhães Coelho (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira

Palavras-chave: Derivada da Potência. Geradores Síncronos. Perda de Sincronismo. Potência Elétrica. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.

Introdução

No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) é responsável por integrar os subsistemas de cada região em uma única malha elétrica, garantindo maior flexibilidade e eficiência na transmissão de energia. A incorporação de dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) trouxe avanços significativos no controle dinâmico de variáveis críticas, como tensão, impedância e fluxo de potência em linhas de transmissão de alta tensão, contribuindo para a estabilidade e otimização do sistema. Contudo, ao alterar as variáveis de tensão e corrente do sistema, a incorporação dos dispositivos FACTS ao sistema pode afetar a dinâmica dos dispositivos a montante do sistema, como é caso dos geradores síncronos [1].

A principal fonte de geração de energia no Brasil é proveniente das usinas hidrelétricas (UHEs), nas quais os geradores síncronos desempenham um papel fundamental [2]. O correto funcionamento desses geradores é vital para garantir a continuidade da operação do sistema. Assim, quando os geradores estão sujeitos a severas oscilações de potência, necessitam da atuação da sua proteção para resguardar a sua integridade e do sistema ao qual está conectado. Assim sendo, a proteção contra perda de sincronismo (Função ANSI 78 ou do inglês *Out-of-step Protection*) promovendo a separação do sistema do gerador quando este está em vias de perder a estabilidade [3]. Portanto, é imperativo que os sistemas de proteção dos geradores síncronos sejam configurados para atuar em tais condições, assegurando a manutenção do sincronismo com as demais unidades geradoras do SIN.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo investigar a resposta da função de proteção contra perda de sincronismo (ANSI 78) em geradores síncronos conectados a uma linha de transmissão (LT) compensada por um dispositivo FACTS do tipo compensador estático de reativos (SVC - *Static Var Compensator*). Para tanto, o sistema teste IEEE 9 Barras é adaptado para representar esta configuração no software PSCAD. Um método analítico alternativo para detecção de perda de sincronismo, fundamentado na derivada da potência ativa e reativa, é adaptado de [3] e implementado no *software* MATLAB (*MATrix Laboratory*), a partir dos dados do sistema simulado no PSCAD (*Power Systems Computer*

Aided Design). Este método é comparado com as abordagens tradicionais de proteção contra perda de sincronismo, que se baseiam na trajetória da impedância aparente [4] medida nos terminais do gerador.

A relevância deste estudo advém do crescente uso de dispositivos FACTS em linhas de transmissão, o que pode comprometer a precisão e a confiabilidade de sistemas de proteção baseados em características de impedância. A inserção de dispositivos FACTS altera os valores de amplitude e ângulo das tensões e correntes do sistema, e, conseqüentemente, a impedância aparente medida pelos relés. Isso pode impactar negativamente o desempenho das proteções que utilizam a característica de impedância para a detecção de condições anormais, como é o caso da proteção contra a perda de sincronismo (ANSI 78).

Dado o cenário descrito, a investigação de novas técnicas de proteção em sistemas que integram dispositivos FACTS tem se tornado um tema de crescente relevância em pesquisas científicas, especialmente no contexto de proteção contra perda de sincronismo em geradores síncronos, a partir da proposição de alternativas às abordagens convencionais, como aqui explorado.

Metodologia

A Figura 1 apresenta uma representação do sistema IEEE 9 barras [5] que foi modelado no *software* PSCAD, onde o dispositivo SVC [6], está conectado à barra 6. O gerador 1, vinculado à barra 1, foi submetido a uma condição de curto-circuito trifásico, seguido do desligamento de uma das linhas após a barra 4. As simulações foram realizadas com duração de 12 segundos e uma taxa de amostragem de 250 μ s. Essas simulações foram realizadas para avaliar três condições distintas de carregamento, a fim de analisar o comportamento dinâmico do gerador diante da perda de sincronismo. Na Tabela 1 podem ser visualizados os dados de carregamento, sendo as barras 5, 6 e 8 as barras de carga do sistema.

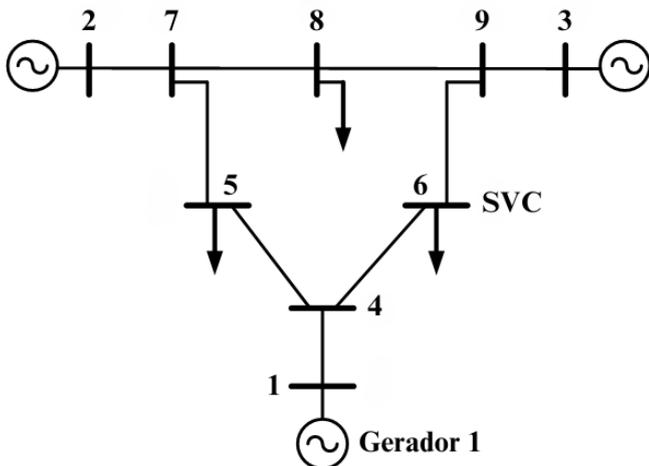


Figura 1 – Sistema IEEE 9 barras modificado [7]

A técnica de proteção contra perda de sincronismo $dPxdQ$ (derivada da potência ativa x derivada da potência reativa) foi adaptada de [3] ao para monitorar o comportamento do gerador 1, conforme mostrado na Figura 1. O método utiliza como entradas os valores de potência ativa e reativa desse gerador, extraídos por meio dos dados de saída gerados pelo PSCAD. Para coletar esses dados, foi utilizado o bloco *Multimeter*, que monitora a potência ativa e reativa do gerador 1 em diferentes cenários simulados no sistema IEEE 9 barras, com e sem a presença do SVC na barra 6.

	Barra 5 [MVA]	Barra 6 [MVA]	Barra 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

Tabela 1 - Condições das barras de carga do sistema IEEE 9 Barras

O fluxograma deste método pode ser visualizado na Figura 2.

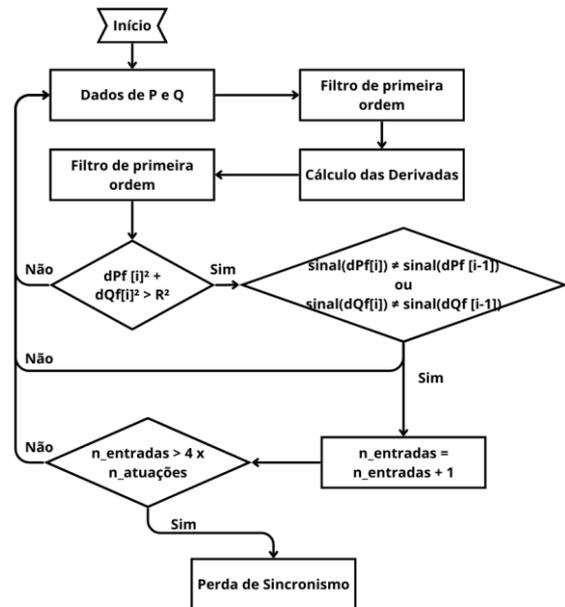


Figura 2 – Fluxograma do método proposto

Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 2, os dados brutos de potência obtidos do PSCAD passaram por um filtro de primeira ordem, cuja função é atenuar oscilações que não correspondem a transitórios eletromecânicos típicos, considerando que o sistema foi submetido a perturbações como curto-circuito, desligamento de linha e perda de excitação. Em seguida, as derivadas dessas potências foram calculadas utilizando a função nativa *diff* do MATLAB, com o valor de $h = 0,00025$ s, correspondente ao intervalo de amostragem dos dados. Após o cálculo das derivadas, os resultados foram novamente filtrados para suavizar eventuais ruídos.

Com as derivadas filtradas, foi implementado um algoritmo em laço de repetição para analisar cada amostra. Inicialmente, verifica-se se a soma dos quadrados das derivadas da potência ativa (dP) e reativa (dQ) supera um valor de ajuste R^2 , estabelecido com base em cenários instáveis. Caso essa condição seja satisfeita, o algoritmo verifica se houve troca de sinal em dP ou dQ . A inversão de sinais indica que as derivadas cruzaram os eixos dP e dQ , o que ocorre quatro vezes por oscilação durante uma condição de instabilidade. Sempre que essa inversão é detectada, uma variável de checagem é incrementada. O número de inversões detectadas ao longo do tempo é utilizado para determinar o ponto de atuação da proteção contra perda de sincronismo. Esse valor deve ser coordenado com as outras proteções do sistema, uma vez que a proteção do gerador deve ser a última a atuar, permitindo que outras proteções sejam acionadas primeiro para mitigar a perda de carga antes do desligamento da geração.

Resultados e discussão

A Figura 3 ilustra o comportamento das potências ativa e reativa do gerador 1 durante a ocorrência de um curto-circuito trifásico aplicado na barra do gerador, seguido do desligamento da linha correspondente à barra 5. Os dados estão representados em p.u. (por unidade) com base em 100 MVA. O curto-circuito e o desligamento da linha ocorrem aos 6 segundos após o início da simulação.

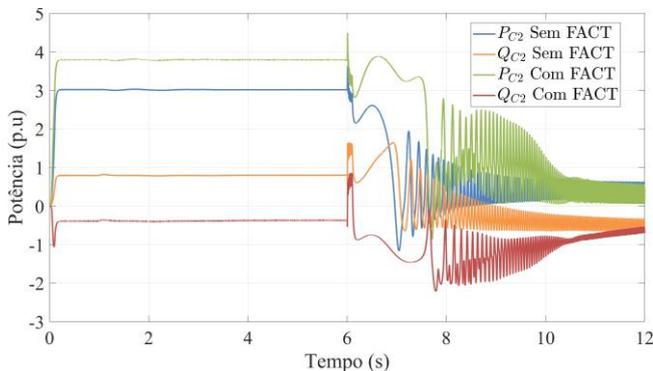


Figura 3 – Potências do sistema durante a oscilação

Sem a presença do SVC, observa-se uma queda quase instantânea da potência ativa logo após a contingência, o que leva à perda de estabilidade da máquina. Isso demonstra que o sistema não possui capacidade de resposta rápida o suficiente para sustentar a operação do gerador após a falha.

Por outro lado, na presença do SVC, o gerador 1 consegue manter a entrega de potência ativa por um período mais prolongado após a contingência. No entanto, a potência ativa começa a decair gradualmente até que a máquina perca estabilidade. Esse comportamento ocorre porque, durante a contingência, a máquina síncrona tende a operar como um gerador assíncrono, devido ao consumo de potência reativa pelo sistema, que se torna mais pronunciado com a adição do SVC, que atua como uma fonte adicional de suporte reativo. Mesmo com essa ajuda temporária, o sistema eventualmente atinge um ponto em que a estabilidade não pode mais ser mantida.

Na Figura 4, são apresentadas as derivadas das potências ativa (dP) e reativa (dQ) para o cenário de carregamento 2, comparando os casos com e sem a presença do dispositivo FACTS, especificamente o SVC. Durante a oscilação instável, observa-se claramente que há duas inversões em dP e duas em dQ por ciclo de oscilação, resultando em um total de quatro inversões por ciclo, como esperado para condições de instabilidade.

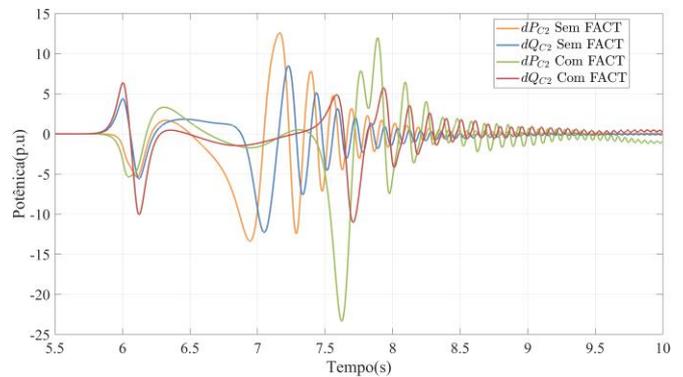


Figura 4 – Derivadas das potências ativas e reativa

No entanto, um aspecto relevante é que, com o SVC em operação, o comportamento da dP se diferencia do padrão observado no sistema sem o SVC. Nesse caso, a oscilação de dP não cruza o eixo, ou seja, não ocorre a troca de sinal. Esse comportamento é prejudicial ao método $dPxdQ$, pois a ausência de troca de sinal dificulta a contagem adequada das oscilações instáveis, retardando a detecção da perda de sincronismo.

Essa observação indica que, embora o SVC possa fornecer suporte adicional ao sistema durante uma contingência, ele também modifica o padrão de oscilação das potências, o que pode afetar a eficácia de métodos baseados em derivações, como o $dPxdQ$. Esse fenômeno deve ser levado em consideração ao ajustar os parâmetros do método para situações em que dispositivos FACTS estão presentes.

Para uma comparação mais abrangente do método $dPxdQ$, é possível avaliar os tempos de identificação de perda de sincronismo em relação a outras técnicas previamente analisadas neste projeto de pesquisa. Esses métodos incluem a proteção tradicional ANSI 78 e o uso de um classificador Fuzzy [8]. A Tabela 2 apresenta os tempos de atuação dos três métodos – $dPxdQ$, ANSI 78 e o classificador Fuzzy – testados para diferentes condições de carregamento (1 a 3).

	$dPxdQ$	ANSI78[8]	Classificador Fuzzy [8]
	TRIP[s]	TRIP[s]	TRIP[s]
Carregamento 1 sem SVC	2,073	2,685	2,701
Carregamento 1 com SVC	NO TRIP	2,689	2,65
Carregamento 2 sem SVC	1,9212	2,45	2,41
Carregamento 2 com SVC	2,8172	2,009	1,7
Carregamento 3 sem SVC	1,6958	1,983	1,96
Carregamento 3 com SVC	2,1883	1,592	1,55

Tabela 2 - Tempos de atuação $dPxdQ$, ANSI 78 e Classificador Fuzzy

Na Tabela 2 é possível observar o impacto do SVC sobre os tempos de identificação do método $dPxdQ$.

Quando o sistema opera sem o SVC, as oscilações instáveis nas derivadas de potência ativa e reativa cruzam os eixos de referência, indicando claramente a perda de sincronismo do gerador. Nesses casos, o método dPxdQ funciona de forma eficaz, detectando rapidamente a instabilidade.

No entanto, com a inserção do SVC, que influencia a potência do sistema, o método perde parte de sua eficácia. O SVC estabiliza temporariamente o fluxo de potência, o que altera o comportamento das derivações, impedindo que as oscilações cruzem o eixo como esperado. Esse efeito retarda o tempo de atuação do método dPxdQ, aumentando o período necessário para a detecção da perda de sincronismo. Em alguns casos, como no carregamento 1, o método pode até falhar em atuar, devido à estabilização proporcionada pelo SVC, que disfarça os sinais típicos de instabilidade no sistema.

Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que o método dPxdQ é uma alternativa eficaz para a proteção contra perda de sincronismo. Por ser baseado em valores de potência ativa e reativa, o método evidenciou a influência dos dispositivos FACTS no sistema, observando-se um leve atraso na identificação da perda de sincronismo com a inserção do SVC. No entanto, esse atraso é aceitável, já que a proteção de perda de sincronismo do gerador deve ser a última a atuar, permitindo que outras proteções do sistema entrem em ação primeiro, evitando desligamentos generalizados.

Sem o SVC, o método apresentou desempenho comparável ao de técnicas tradicionais e de inteligência artificial, mostrando-se robusto e eficiente. Outro destaque é que o método dPxdQ não requer treinamento, e o uso de um cálculo numérico simples para a derivada de primeira ordem não compromete o desempenho, mesmo em relés numéricos modernos. Além disso, a técnica demanda apenas variáveis locais, como tensão e corrente, que podem ser obtidas de maneira simples via TC e TP, o que facilita sua implementação e confiabilidade operacional.

Agradecimentos

O autor expressa seus agradecimentos ao órgão de fomento PIBIC, pelo apoio financeiro fornecido. Agradecimento ao professor orientador Dr. Aurélio L pelo suporte compartilhado e oportunidade concebida. Por fim, agradecimento à Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira por prover toda estrutura para conclusão deste projeto.

Referências

- [1] CHAPMAN, Stephen, J. **Fundamentos de máquina elétricas**, 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora LTDA., 2013.
- [2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2023: ano base 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. 274 p.
- [3] OLIVEIRA, R. A. **Proteção contra Perda de Sincronismo de Geradores Síncronos baseada na Derivada da Potência Elétrica**. Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2022.
- [4] REIMERT, D. **Protective relaying for power generation systems**. CRC press, 2006.
- [5] BÉRARD, J. P. **IEEE 9 Bus System Example**. 2013. Disponível em: https://www2.kios.ucy.ac.cy/testsystems/wp-content/uploads/2020/03/IEEE9_model_documentation_R0.pdf. Acesso em outubro de 2024.
- [6] H.G. Silva, A.L.M. Coelho, I.P. Faria, B.G. Araujo, **ANN based impedance trajectory detection approach for loss of excitation protection of synchronous generators connected to transmission lines with SVCs**, Electric Power Systems Research, Volume 213, 2022, 108766, ISSN 0378-7796.
- [7] Song, Yue & Hill, David & Liu, Tao. (2015). **Small-disturbance angle stability analysis of microgrids: A graph theory viewpoint**. 10.1109/CCA.2015.7320633.
- [8] Rodrigues, Hugo Henrique da Silva. **Uma abordagem baseada em classificador fuzzy para proteção de perda de excitação e sincronismo de geradores síncronos conectados à LTs com SVCs**. 2024. 11f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2024.