

FILTRO MORFOLÓGICO DE EXTRAÇÃO DE ENVOLTÓRIAS PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

Mateus Camargo Franco ¹

Alex Itczak ²

Artur Henrique Rodrigues ³

Marcel da Cruz Stalter ⁴

Humberto Hasselein ⁵

Eduardo Machado dos Santos ⁶

Resumo:

O gerador síncrono trata-se de um elemento capaz de fornecer potência elétrica com frequência constante. Por esta característica os geradores síncronos são muito utilizados nas centrais de geração de energia, pois apresentam fácil ajuste da frequência elétrica de operação do sistema. Devido a sua importância para o sistema elétrico de potência (SEP) os geradores síncronos devem funcionar de maneira ininterrupta atendendo as demandas das cargas. Um dos problemas que podem atrapalhar o seu funcionamento são as possíveis falhas do seu sistema de excitação, que é o responsável por magnetizar o rotor da máquina, tornando-o um eletroímã que induz tensão nos enrolamentos do estator. O sistema de excitação é alimentado pelo circuito de campo (Também conhecido como circuito de magnetização), este circuito realiza a magnetização do núcleo do rotor alimentando os seus enrolamentos com corrente contínua. As falhas no sistema de excitação ocorrem devido à problemas no circuito de campo e podem comprometer a integridade da máquina, podendo leva-la à danos permanentes. Entre os efeitos negativos que a perda de excitação pode causar nos geradores síncronos encontra-se o consumo de reativos, afundamento de tensão e aumento de corrente terminal, distorção de fluxo de potência, redução de potência ativa e perda de sincronismo, o último devido à perda do acoplamento magnético entre rotor e estator elevando a velocidade da máquina. Sendo assim, buscando uma forma de detectar os eventos de perda de excitação nos geradores síncronos o presente trabalho demonstra uma metodologia capaz de identificar e atuar para tais eventos de maneira eficiente, mitigando os possíveis danos à máquina. A metodologia é baseada no Filtro Morfológico de Extração de Envoltórias (FMEE) e utiliza operadores morfológicos de dilatação e erosão para a análise dos sinais de corrente e tensão dos terminais da máquina. O estudo foi realizado sob especificações de um gerador síncrono de 500 MVA e os cálculos e simulações foram desenvolvidas nos softwares Matlab ® e DigSilent Power Factory ®.

Palavras-chave: Gerador Síncrono; Perda de Excitação; Envoltórias, Detecção.

Modalidade de Participação: Iniciação Científica

FILTRO MORFOLÓGICO DE EXTRAÇÃO DE ENVOLTÓRIAS PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

¹ Aluno de graduação. mateusfranco1998@hotmail.com. Autor principal

² Aluno de pós-graduação. alex.itczak@gmail.com. Co-autor

³ Aluno de graduação. artur.ar.10@gmail.com. Co-autor

⁴ Aluno de pós-graduação. marcelstalter@gmail.com. Co-autor

⁵ Aluno de graduação. betounipampaea@gmail.com. Co-autor

⁶ Docente. eduardosantosufsm@gmail.com. Orientador

FILTRO MORFOLÓGICO DE EXTRAÇÃO DE ENVOLTÓRIAS PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

1 INTRODUÇÃO

No sistema elétrico de potência (SEP), os geradores são os elementos de maior relevância, pois através deles é possível a geração de energia elétrica que é levada até os consumidores finais. Desta forma, é de suma importância garantir que estes equipamentos funcionem de maneira adequada, sem que ocorram desligamentos desnecessários. Segundo MAMEDE FILHO (2011), devido a sua importância para o SEP, os geradores devem possuir proteções robustas de forma que seja mantida a sua integridade e que as proteções nunca atuem de maneira indevida, ou seja, em momentos oportunos onde não haveria necessidade de desconexão da rede. Nos geradores síncronos o seu sistema de excitação deve ser mantido em plenas condições, pois ele é o responsável pela produção de fluxo magnético no rotor da máquina, tornando o rotor um eletroímã que induz tensão nos enrolamentos do estator. (CHAPMAN, 2013)

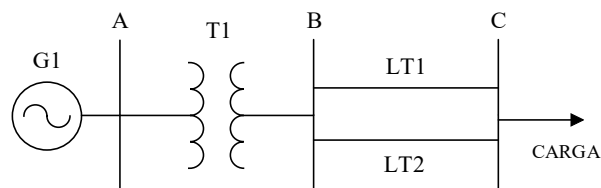
O sistema de excitação das máquinas síncronas é o responsável por fornecer corrente contínua aos enrolamentos de campo. Falhas no sistema de excitação podem comprometer a integridade da máquina síncrona, pois causam enfraquecimento do acoplamento magnético entre rotor e estator, influenciando na elevação de velocidade da máquina, podendo levá-la a danos permanentes. Outros efeitos da perda de excitação nos geradores síncronos são: consumo de potência reativa, aquecimento dos enrolamentos, afundamento de tensão terminal, aumento da corrente e redução de potência ativa gerada.

Buscando uma forma de inibir os danos causados à máquina devido às perdas de excitação, o trabalho apresenta uma metodologia de detecção para esses eventos. A metodologia proposta é baseada em análises dos sinais de corrente e tensão terminal do gerador. A detecção é realizada através da análise das envoltórias superior e inferior coletadas dos sinais pelo Filtro Morfológico de Extração de Envoltórias (FMEE). Também é realizada uma comparação entre o desempenho da metodologia proposta e de outra técnica recentemente divulgada que tem como base a variação da tensão terminal e a potência reativa (WU et. al, 2009; AMINI et. al, 2015)

2 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste artigo foi aplicada no sistema teste da Figura 1. Foram simulados casos de 0,5, 0,2 e 0 p.u da tensão nominal do sistema de excitação de um gerador síncrono de 500MVA, operando com 100% de carregamento. As simulações dos eventos de perda de excitação foram realizadas no software DigSilent PowerFactory®, onde a falha no sistema de excitação passa a ocorrer a partir de 0,2 segundos após o início da simulação. Os parâmetros referente às linhas de transmissão, gerador e transformador, podem ser encontrados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4.

Figura 1 - Sistema teste utilizado.



Fonte: do autor, 2018.

Tabela 1: Especificações do Gerador Síncrono

Especificações			
Tipo de Rotor	Polo Liso	Frequência de Operação (Hz)	60
Potência Nominal (MVA)	500	Tensão Terminal (kV)	13.8
Fator de Potência	0.96	Ligação	YN

Fonte: do autor, 2018.

Tabela 2: Parâmetros do Gerador Síncrono

Parâmetros do Gerador Síncrono			
Xd (p.u.)	1.6000	T'd0 (s)	6.1000
X'd (p.u.)	0.4800	T''d0 (s)	0.1050
X''d (p.u.)	0.3000	T'q0 (s)	0.1800
Xq (p.u.)	0.9500	H (s)	4.0000
X2 (p.u.)	0.2860	PS - 1 (p.u.)	0.1800
X0 (p.u.)	0.1100	PS - 1.2 (p.u.)	0.3333

Fonte: Gabe, 2014.

Tabela 3: Parâmetros das Linhas de Transmissão e Transformador

Parâmetros das Linhas de Transmissão		Parâmetros do Transformador	
V (kV)	500	S (MVA)	550
Z1, Z2 (Ω)	0.0212 + j0.1162		
Z0 (Ω)	0.0848 + j0.4650	V (kV)	13.8/ 500
B1, B2 (μ S)	72.2566		
B0 (μ S)	72.4451	X (p.u.)	0.19

Fonte: do autor, 2018.

A metodologia proposta utiliza operadores morfológicos de dilatação e erosão para a detecção de perdas parciais e totais de excitação. A detecção dos eventos de perdas de excitação é realizada com base no comportamento dos sinais de corrente e tensão. Os valores de corrente e tensão são processados pelo FMEE em uma janela móvel de $N/6$ amostras, onde N representa o número de amostras por ciclo. Os eventos de perdas de excitação são detectados através das diferenças entre as envoltórias superiores e inferiores dos sinais processados. Em (1), tem-se uma representação da janela móvel das amostras. (WU et. al, 2009; ITCZAK, 2016).

$$W_1(n) = [x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (1)$$

A variável 'n' representa a amostra atual, enquanto 'x₀' representa a posição do primeiro termo da janela que é descartado à medida que novas amostras são inseridas. Quando novas amostras são inseridas os termos deslocam-se para a esquerda, onde 'x_n' se torna a posição da amostra atual. Para cada janela obtida, são aplicados os operadores morfológicos

de dilatação e erosão, que foram adaptados para a extração das envoltórias dos sinais de corrente e tensão. Como forma de não alterar os valores de máximo e mínimo dos sinais processados, adotou-se que o elemento estruturante (SE) nulo. Com isso, determina-se (2) e (3), sendo (2) obtida através do operador de dilatação e (3) através do operador de erosão.

$$W_1 \oplus (n)SE = \max W_1(n) \quad (2)$$

$$W_1 \ominus (n)SE = \min W_1(n) \quad (3)$$

Os sinais de corrente e tensão podem ser representados pela mesma janela móvel 'W', dependendo apenas o direcionamento da análise, que pode ser destinado para a análise da envoltória superior ou inferior dos sinais obtidos. Através de (2) e (3) consegue-se determinar um sinal Y(n) demonstrado em (4), que é extraído através da média aritmética entre a soma dos valores de erosão e dilatação.

$$Y(n) = \frac{1}{2}[W_1 \oplus (n)SE - W_1 \ominus (n)SE] \quad (4)$$

Através dos valores de Y(n) consegue-se determinar a pré-envoltória do sinal analisado. Quando Y(n) é maior que zero, tem-se a pré-envoltória superior e quando é menor que zero, tem-se a pré-envoltória inferior. Como forma de evitar oscilações numéricas decorrentes da amostragem, os valores são realocados em uma nova janela móvel $W_2(n)$, que apresenta um comprimento equivalente a 5 ciclos ($5 \cdot N$) e é atualizada da mesma forma que (1). Desta maneira, as equações (5) e (6) demonstram a envoltória superior e inferior do sinal analisado (Corrente ou Tensão), respectivamente (ITCZAK, 2016).

$$EnvSuperior(n) = \max[W_2^{superior}(n)] \quad (5)$$

$$EnvInferior(n) = \max[W_2^{inferior}(n)] \quad (6)$$

A partir das envoltórias superior e inferior determinadas pelo FMEE, é possível realizar a classificação do evento de perda de excitação. Para a realização da classificação utilizam-se as Equações (7) e (8).

$$DifEnv(n) = EnvSuperior(n) - EnvInferior(n) \quad (7)$$

$$\Delta DifEnv(n) = \Delta DifEnv(n) - \Delta DifEnv(n-1) \quad (8)$$

As classificações são padronizadas através de determinados intervalos. Quando o sinal analisado é o de corrente a classificação da perda de excitação ocorre quando a Equação (8) apresentar um resultado maior que 1×10^{-7} . Já para o sinal de tensão, a classificação da perda de excitação ocorre quando a Equação (8) apresenta um resultado menor que -1×10^{-7} . Para a realização da classificação, ambos os casos devem se repetir por pelo menos 10 ciclos. A metodologia foi implementada no software Matlab®, onde foi considerado uma taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo (ITCZAK, 2016).

A metodologia comparada utiliza as variações de potência reativa e tensão terminal para a detecção de perda de excitação. Trata-se de um estudo recente que demonstrou êxito na identificação de eventos de perda de excitação nos geradores síncronos. A metodologia proposta por AMINI et al. (2015) é baseada na influência do sistema de excitação de um gerador síncrono em sua tensão terminal e potência reativa, onde nos casos de perda de excitação esses parâmetros demonstram um comportamento específico, conforme pode ser visto no trabalho do autor.

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

A metodologia baseada no FMEE realiza a detecção de perda de excitação através das envoltórias dos sinais de corrente e tensão do terminal da máquina. Desta maneira, a análise desses parâmetros é importante para os critérios da metodologia. Considerando um sistema teste conforme o apresentado na Figura 1, pode ser observado nas Figuras 2 e 3 os sinais de corrente e tensão do terminal da máquina quando ocorre o evento de perda total de excitação.

Figura 3: Sinal de Corrente.

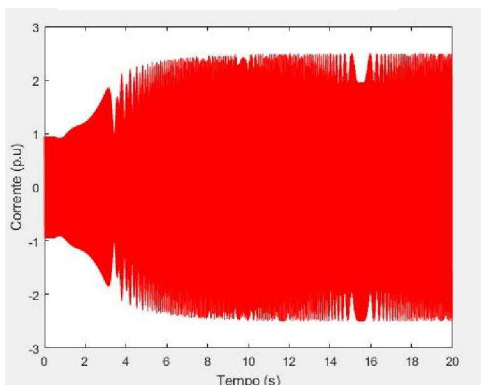
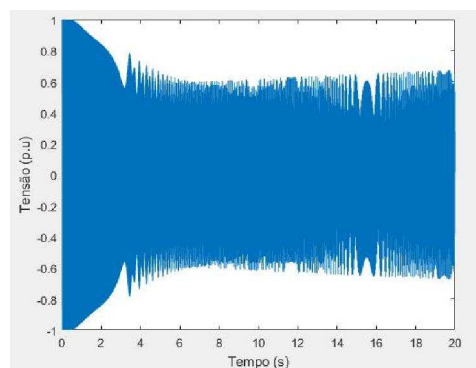


Figura 2: Sinal de Tensão.



Fonte: do autor, 2018.

Nessas Figuras, observa-se que, à medida que ocorre o afundamento da tensão devido aos efeitos da perda de excitação, a corrente terminal da máquina se eleva. Com isso, através desse comportamento característico das formas de onda, são analisados os parâmetros que influenciam nos critérios de detecção da anormalidade do sistema de excitação do gerador. Após o processamento dos sinais do terminal da máquina, são extraídas as envoltórias superior e inferior. Desta forma, nas Figuras 4 e 5 observam-se essas envoltórias dos sinais de corrente e tensão.

Figura 4: Envoltórias Superior e Inferior do Sinal de Corrente

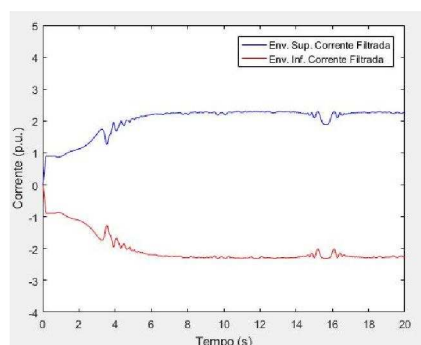
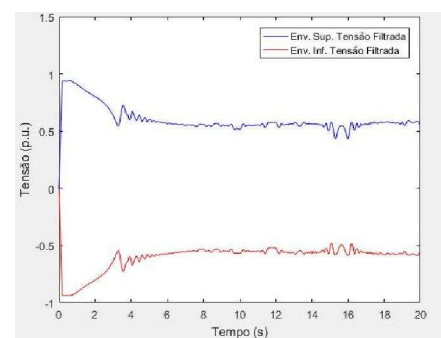


Figura 5: Envoltórias Superior e Inferior do Sinal de Tensão



Fonte: do autor, 2018.

Em seguida é obtida a diferença entre as envoltórias dos sinais, aplicando-se a Equação 7. Com a determinação das diferenças entre as envoltórias, realiza-se o cálculo

conforme a Equação 8. Essa equação determina o resultado final para a detecção da perda de excitação na máquina síncrona, conforme os critérios já mencionados. Desta maneira, foram considerados casos de 0,5, 0,25 e 0 p.u. da tensão do sistema de excitação. Os resultados para a detecção desses eventos de perda de excitação encontram-se na Tabela 5. Também, na mesma tabela é demonstrado o tempo de atuação da metodologia de AMINI et al. (2015).

Tabela 4: Detecção de perdas total e parcial de excitação

Atuação	FMEE		Metodologia Comparada
Caso	Classificação	T. Classificação (s)	T. Atuação (s)
PE 0 p.u.	PE	0.9273	2.6505
PE 0.2 p.u.	PE	0.9354	2.8142
PE 0.5 p.u.	PE	0.9271	3.2165

Fonte: do autor, 2018.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, com base nos resultados alcançados, o FMEE apresentou tempo de atuação satisfatório para a detecção de eventos de perda de excitação. A rapidez na detecção desses eventos pode evitar danos à máquina, tais como o sobreaquecimento, perda de sincronismo e demais problemas relacionados à falha do seu sistema de excitação. Sendo assim, a metodologia proposta permite que a máquina seja desconectada rapidamente após a detecção de eventos de perda de excitação.

REFERÊNCIAS

- MAMEDE FILHO, J. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio Grande do Sul: McGraw-Hill, 2013.
- AMINI, M., DAVARPANAH, M., SANAYE-PASAND, M.: **A novel approach to detect the synchronous generator loss of excitation**. IEEE, 2015, pp 1429-1438.
- ITCZAK, A. **Análise de metodologia para detecção de perda total de excitação em geradores síncronos sob condição de perda parcial de campo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pampa, 2016.
- GABE, J. **Filtro Morfológico de Extração de Envoltória para a Proteção Contra a Perda de Excitação do Gerador Síncrono**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pampa, 2014.
- WU, Q. H; LU, Z.; JI, T. Y. **Protective relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology**. SPRINGER, LONDON, UK, 2009.