

ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

Mateus Camargo Franco, Eduardo Machado dos Santos, Alex Itczak, Arian Rodrigues Fagundes, Artur Henrique Rodrigues
Universidade Federal do Pampa
Alegrete-RS, Brasil.

mateusfranco1998@hotmail.com, eduardosantosufsm@hotmail.com, alex.itczak@gmail.com, a.rodriguesfagundes@gmail.com, artur.ar.10@gmail.com

Abstract— The synchronous generator is a voltage source with constant frequency that provide power for a load. The voltage and current levels at the generator terminals are related to the excitation system that provides direct current, inducing a magnetic field, in the windings of the generator. Under-excitation of the generator can lead to serious problems, such as the sinking of voltage at terminals, loss of capacity to generate active power, heating of the machine and consumption of reactive power. In this way, it is necessary to study and develop methodologies that protect the machine against these undesirable problems. Thus, the present study intends to demonstrate a technique of detection of total loss of excitation in synchronous generators. The technique is based on the extraction of wraps from the current and voltage signals at the generator terminals through a morphological filter.

Keywords— Active Power, Loss of Excitation, Morphological Filter, Synchronous Generator and Wraps.

I. INTRODUÇÃO

Os geradores síncronos são caracterizados por serem máquinas capazes de fornecer potência elétrica em frequência constante. O termo síncrono faz referência ao sincronismo entre a velocidade mecânica de rotação do gerador e a frequência elétrica produzida. Devido a essa característica de sincronismo os geradores síncronos são comumente empregados em centrais geradoras de eletricidade [1].

Nos geradores síncronos, o campo magnético é produzido no rotor. O rotor pode ser projetado com ímãs permanentes ou podem ser magnetizados por um circuito de corrente contínua, dito circuito de campo ou de magnetização. Quando o rotor é eletromagnetizado, ele se torna sujeito a problemas de perda de excitação (PE) devido à possíveis problemas no circuito de campo.

O circuito de campo do rotor dos geradores síncronos pode reportar problemas como curto-circuito, atuação indevida dos disjuntores de campo e faltas de alimentação. As perdas parciais ou totais de excitação podem implicar em danos permanentes na máquina síncrona quando estes perduram por um longo período de tempo, devido ao sobreaquecimento dos enrolamentos e elevação de velocidade nominal da máquina.

Devido a sua importância para o sistema elétrico de potência (SEP), os geradores síncronos devem possuir uma

proteção robusta e eficaz [2]. Assim, eles não devem ser desconectados da rede por motivos indevidos, devendo possuir proteções que impeçam o seu funcionamento de maneira adequada, já que tal efeito pode resultar em problemas no sistema elétrico de potência. Quando os geradores encontram-se em paralelismo e uma ou mais das máquinas passam por condições de perda de excitação, as máquinas em plena operação devem suprir a demanda das que se encontram em falha, bem como injetar os reativos que estas ocasionalmente passam a demandar. Tal efeito implica em sérios problemas ao SEP, pois pode resultar em afundamentos de tensão e distorção de fluxo de potência.

Com base nos problemas causados pela perda de excitação desenvolveu-se uma metodologia onde o estudo é direcionado para a proteção do gerador sob condições de falhas no seu sistema de magnetização que resultam na perda parcial ou total de excitação. O estudo é baseado na análise morfológica de sinais de corrente e tensão, com a utilização de filtros morfológicos de extração de envoltórias (FMEE) [4]. Outra vertente de atuação da metodologia, é a percepção e diferenciação de quando há presença de perda parcial ou total de excitação, fazendo com que a proteção da máquina tenha um melhor diagnóstico para atuar.

A técnica desenvolvida para a detecção da perda de excitação também foi comparada com outra técnica recentemente proposta na literatura especializada, que tem como base a variação da potência reativa e tensão terminal da máquina síncrona quando esta se encontra sobre efeitos de perda de excitação. Os dados utilizados foram obtidos no software de simulação DigSilent® e foram computados no Matlab®.

II. EFEITOS DA PERDA DE EXCITAÇÃO

O sistema de excitação das máquinas síncronas é o responsável por fornecer corrente contínua aos enrolamentos de campo. Através desse sistema, consegue-se regular a tensão terminal da máquina. De acordo com [3], o sistema de excitação também assegura os limites da máquina síncrona e contribui para a estabilidade do sistema.

Falhas no sistema de excitação podem comprometer a integridade da máquina síncrona. Os efeitos da perda de excitação nos geradores síncronos são: Consumo de potência

reativa, aquecimento dos enrolamentos, afundamento de tensão, elevação das correntes e redução de potência ativa gerada. Estes efeitos são provenientes do enfraquecimento do acoplamento magnético entre rotor e estator, fato que influencia na elevação de velocidade da máquina.

O enfraquecimento do acoplamento magnético entre rotor e estator faz com que a máquina opere em velocidade diferente da nominal, devido a existência do ajuste de velocidade. O ajuste de velocidade representa um controle que é regulado de forma que se garanta que uma mesma quantidade de potência mecânica seja entregue pela máquina.

Desta forma, o sistema de excitação é de extrema importância para o funcionamento das máquinas síncronas, fazendo-se necessário a presença de sistemas de proteção que permita a sua integridade.

III. PROTEÇÃO DOS GERADORES SÍNCRONOS

Os geradores síncronos são de extrema importância para o sistema elétrico de potência em que estão inseridos. Desta maneira, necessitam de proteções que permita o seu pleno funcionamento, conforme citado anteriormente. As proteções empregadas nos geradores síncronos devem garantir que a máquina esteja operando de maneira adequada e que elas não sejam retiradas de operação de maneira indevida. Desta forma, de acordo com [2] o sistema de proteção dos geradores síncronos deve atender os seguintes requisitos e características:

- Evitar a ocorrência de defeitos;
- Na ocorrência de defeitos, minimizar os danos recorrentes;
- Não atuar para faltas além da zona de atuação;
- Limitar a corrente de defeito fase-terra para valores que os equipamentos suportem;
- Operar com extrema rapidez para defeitos internos ao gerador.

Portanto, o FMEE visa atender os requisitos citados e aplica-los na análise das perdas parciais ou totais de excitação de geradores síncronos, permitindo uma proteção robusta e eficaz.

IV. METODOLOGIA

As metodologias expostas neste artigo foram analisadas sob o sistema teste da Fig.1, onde obteve-se os resultados para a realização das comparações. O sistema foi executado no software DigSilent Power Factory®, onde foram simuladas as perdas parcial e total de excitação de um gerador síncrono de 500 MVA. Os casos simulados para a perda parcial de excitação foram: 0%, 50% e 90% do valor nominal em p.u. de tensão do circuito de campo.

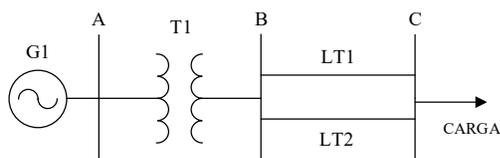


Fig 1. Sistema teste.

Nas simulações, foram observados o comportamento da Barra A da Fig.1, bem como as potências ativas e reativas da máquina síncrona, devido ao fato que essas grandezas apresentam alterações à medida que a máquina passa por eventos de subexcitação. Nas simulações os efeitos de perda parcial ou total de excitação iniciam a partir dos 0.2s.

Conforme a Fig.1 o sistema teste é composto pelo gerador síncrono, transformador e duas linhas de transmissão (LT1 e LT2). Os parâmetros e especificações que configuram estes equipamentos podem ser encontrados nas Tabelas I, II, III, IV e V. Onde a Tabela I, Tabela II e Tabela III, representam as especificações, parâmetros e carregamentos do Gerador Síncrono, a Tabela IV demonstra as características do Transformador e a Tabela V os parâmetros das linhas de transmissão.

Tabela I. Especificações do Gerador Síncrono

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

Tabela II. Parâmetros do Gerador Síncrono

Parâmetros	Gerador Síncrono 500 MVA	Parâmetros	Gerador Síncrono 500 MVA
X_d (p.u.)	1.60	$T'd_0$ (s)	6.10
$X'd$ (p.u.)	0.48	$T''d_0$ (s)	0.1050
$X''d$ (p.u.)	0.30	$T'q_0$ (s)	0.1800
X_q (p.u.)	0.95	H(s)	4.00
X_2 (p.u.)	0.2860	PS-1.0 (p.u.)	0.1833
X_0 (p.u.)	0.11	PS-1.2 (p.u.)	0.3333

Tabela III. Carregamento do Gerador Síncrono

Carregamento	Gerador 500 MVA
25%	120 + j35 MVA
50%	240 + j70 MVA
75%	360 + j105 MVA
100%	480 + j140 MVA

Tabela IV. Parâmetros das Linhas de Transmissão

Parâmetros	Linhas de Transmissão
V (kV)	500
Z1, Z2 (Ω)	0.0212 + j0.1162
Z0 (Ω)	0.0848 + j0.4650
B1, B2 (μS)	72.2566
B0 (μS)	72.4451

Tabela V. Parâmetros do Transformador

Parâmetro	Transformador
S (MVA)	550
V (kV)	13.8/500
X (p.u.)	0.19

Com as simulações conseguiu-se um banco de dados, os quais foram processados através do FMEE para os respectivos sinais de tensão e corrente do terminal da máquina, para os quais a metodologia proposta pôde classificar os casos de perdas de excitação como parcial ou total.

A. Utilizando o Filtro Morfológico de Extração de

Envoltórias (FMEE) para a detecção de perdas parcial e total de excitação.

A metodologia proposta utiliza operadores morfológicos de dilatação e erosão para a detecção de perdas parcial e total de excitação. A detecção é baseada na diferenciação das envoltórias superiores e inferiores dos sinais de corrente e tensão processados que foram extraídos pelo filtro morfológico [5][6].

Os valores de corrente e tensão são processados pelo filtro em uma janela móvel que contém N/6 amostras, sendo N o número de amostras por ciclo, conforme (1). A variável 'n' representa a amostra atual, enquanto 'x0' representa o primeiro termo da janela e é descartado a medida que novas amostras são inseridas, quando um nova amostra é inserida os termos são deslocados para a esquerda do vetor referente a janela móvel, onde o termo 'xn' representará a amostra atual.

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

Em cada janela obtida são aplicados os operadores de dilatação e erosão, que foram modificados para a extração de envoltórias dos sinais de corrente e tensão. Como forma de não se alterar os valores de máximo e mínimo dos sinais processados, adotou-se que o elemento estruturante (SE) será nula. Assim, determina-se (2) e (3), onde (2) foi obtida através do operador de dilatação, enquanto (3) através do operador de erosão:

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

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

Onde a janela móvel (W) pode ser referente tanto ao sinal de corrente quanto ao de tensão, dependendo apenas do direcionamento da análise. Através de (2) e (3) consegue-se determinar um sinal Y(n), que é extraído através da média

aritmética entre a soma dos valores de erosão e dilatação, demonstrado em (4).

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

Os valores de Y(n) são divididos em valores maiores que zero e menores que zero, onde os valores maiores que zero representam a pré-envoltória superior do sinal analisado, enquanto que os valores menores que zero representam a pré-envoltória inferior. Como maneira de se evitar oscilações numéricas decorrentes da amostragem, os valores numéricos são realocados em uma nova janela móvel W2(n), que possui comprimento de 5 ciclos (5*N) e é atualizada da mesma maneira que W1(n) [6]. Desta forma, (5) e (6) definem as envoltórias superior e inferior, respectivamente. Sendo válido ressaltar que os sinais podem ser referentes a tensão ou corrente.

$$EnvSuperior(n) = \max[W_2superior(n)] \quad (5)$$

$$EnvInferior(n) = \max[W_2inferior(n)] \quad (6)$$

A partir das envoltórias extraídas pelo filtro morfológico, a metodologia é capaz de classificar o evento no qual o gerador se encontra. Desta maneira, através das envoltórias obtidas pelo filtro consegue-se determinar as perdas parciais ou totais de excitação. Para tal classificação, faz-se necessário a utilização das 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 constantes diferentes. Quando à ocorrência de eventos de PE parcial ou total, temos que se o sinal analisado for a corrente, quando $\Delta DifEnv(n) > 1 \times 10^{-7}$, haverá a classificação de perda de excitação da máquina. Entretanto, quando analisa-se o sinal de tensão, a classificação de perda de excitação será realizada quando $\Delta DifEnv(n) < -1 \times 10^{-7}$. Ambos os casos devem ser confirmados por pelo menos 10 ciclos [6].

A metodologia foi implementada no software Matlab®, onde foi considerado uma taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo. Foram testados casos de perda parcial e total de excitação para um carregamento de 100% para máquina síncrona.

B. Características da Metodologia comparada.

A metodologia comparada utiliza as variações de potência reativa e tensão terminal para a detecção de perda de excitação, conforme abordado em [7]. Trata-se de um estudo recente que demonstrou êxito na identificação de eventos de perda de excitação nos geradores síncronos. A metodologia 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 demonstraram um comportamento específico.

O processo para a detecção de perda de excitação ocorre basicamente sobre a análise da equação (9). Nessa equação calcula-se a LOEI (Loss of excitation index) onde são determinadas amostras de perda de excitação com base na

variação da potência reativa Q e tensão terminal V_t , a constante 10^5 é utilizada para tornar a amostra mais visível. O termo ‘k’ representa a k-ésima amostra [7].

$$LOEI = 10^5 \times [Q^{(k)} - Q^{(k-1)}] \times [V_t^{(k)} - V_t^{(k-1)}] \quad (9)$$

A perda de excitação é detectada quando a LOEI é repetida por 8 vezes e é maior que o valor limite de ajuste, denominado Th. Esse ajuste é um parâmetro mínimo para que a LOEI seja caracterizada como crítica e possa ser contabilizada como uma amostra. É válido ressaltar que em sua tese original tal proposta era analisada em um sistema que operava em 50 Hz, onde considerava-se então que a LOEI fosse repetida por 10 amostras, entretanto, neste trabalho a análise é feita sobre um sistema em 60 Hz, desta forma, foi considerado um número mínimo de amostras igual a 8. Outro critério para a detecção da perda de excitação é a tensão terminal V_t . A metodologia afirma que para a existência da LOEI a tensão terminal deve ser inferior a 0.95 p.u [7].

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são analisados os resultados obtidos com a metodologia baseada no FMEE. Depois os resultados são comparados com aqueles obtidos pela metodologia abordada em [7].

A. Perda de total de excitação em um gerador síncrono de 500 MVA operando com 100% de carregamento.

Na Fig. 2, observa-se o sinal de corrente nos terminais do gerador, esse sinal é analisado sob influência de uma perda total de excitação da máquina. Analisa-se um crescimento da envoltória até o regime permanente. No sinal de tensão, exposto na Fig. 3, pode-se observar um decremento nas envoltórias até o seu regime permanente.

Então, os sinais apresentados nas Figs. 2 e 3 são processados pelo FMEE. A partir do processamento, conseguem-se os sinais apresentados nas Figs. 4 e 5. Nessas Figuras, observa-se as envoltórias superior e inferior dos sinais de correntes e tensão, respectivamente.

Quando realiza-se a diferença entre as envoltórias superior e inferior do sinais de corrente e tensão, obtêm-se os gráficos apresentados nas Figs. 6 e 7, respectivamente. Esses sinais são obtidos pela subtração algébrica da envoltória superior pela inferior do sinal, que são calculadas de acordo com a metodologia proposta.

As Figs. 8 e 9 apresentam as diferenças entre as amostras para os primeiros 10 ciclos dos sinais de tensão e corrente. Nas referidas Figuras, pode-se observar que ambas as envoltórias satisfazem as condições de classificação do evento como perda de excitação, assim, confirmando que o filtro morfológico classifica o transitório corretamente.

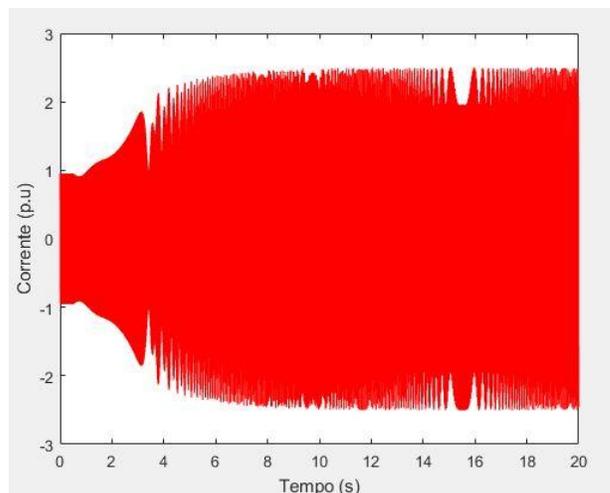


Fig 2. Sinal de corrente senoidal para uma perda total de excitação em um gerador de 500 MVA.

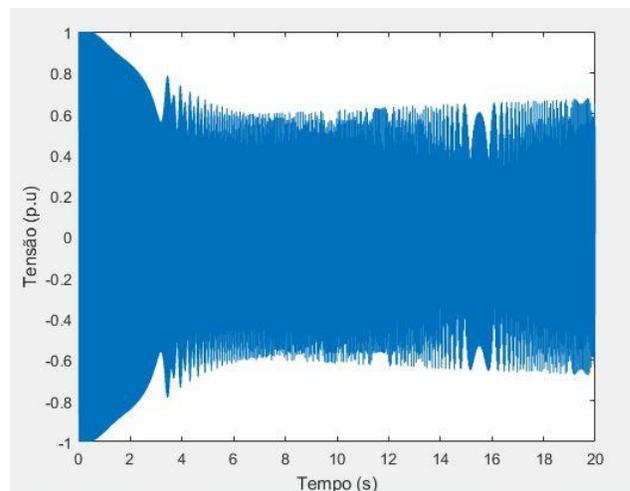


Fig 3. Sinal de tensão senoidal para perda total de excitação em um gerador de 500MVA

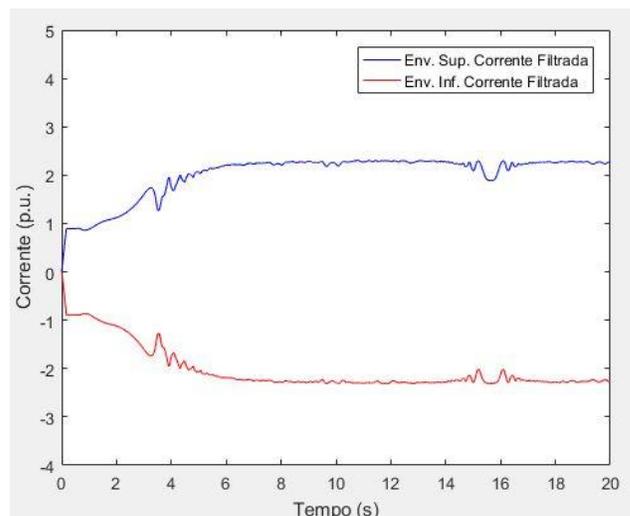


Fig 4. Envoltórias Superior e Inferior do sinal de corrente.

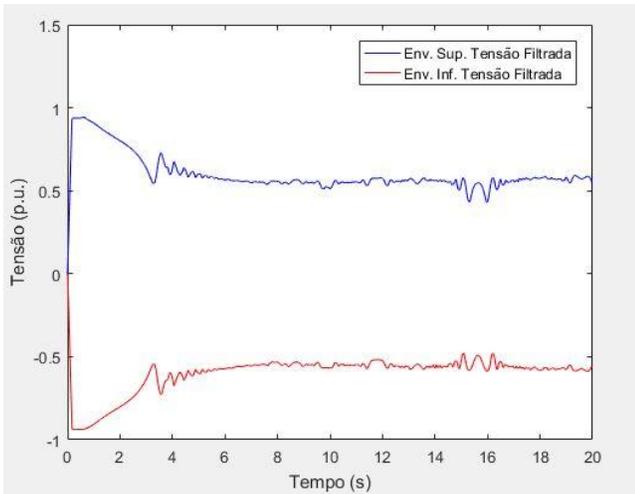


Fig 5. Envolvórias Superior e Inferior do sinal de tensão.

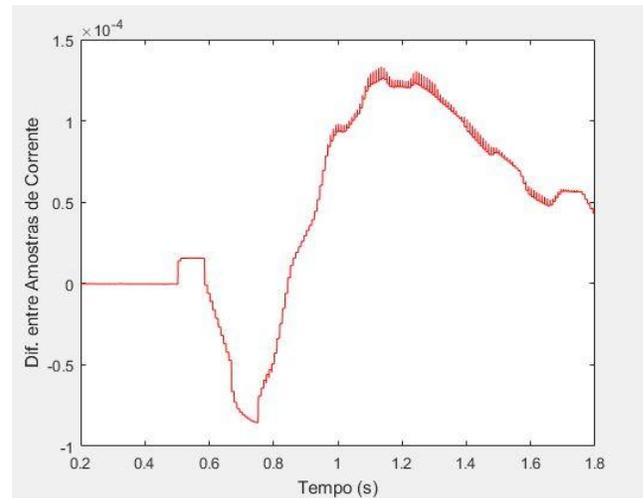


Fig 8. Diferenças entre amostras de Corrente.

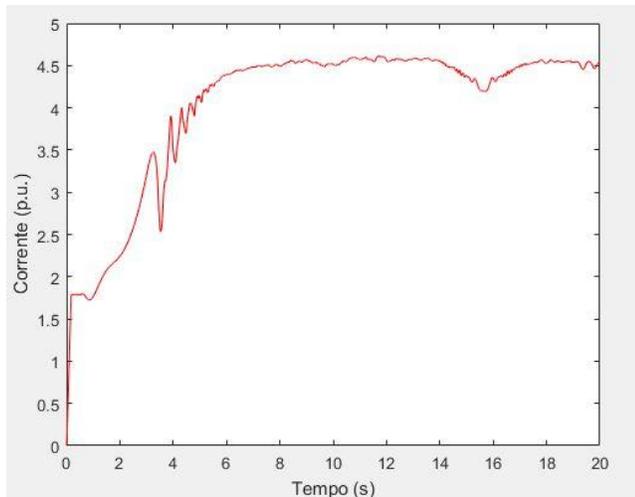


Fig 6. Diferença das envoltórias da corrente para perda total de excitação.

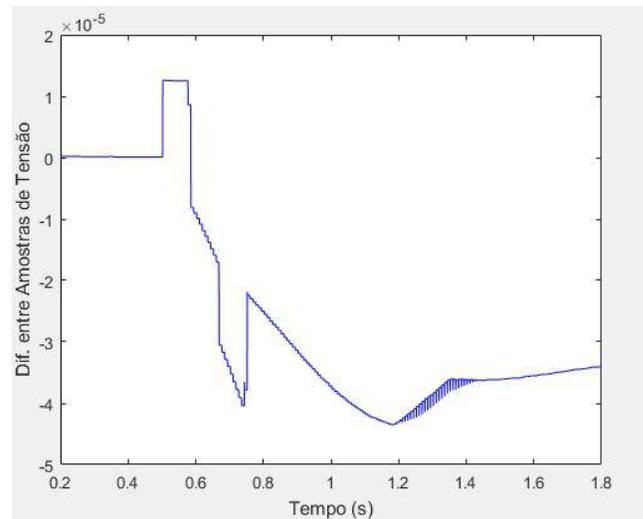


Fig 9. Diferenças entre as amostras de Tensão.

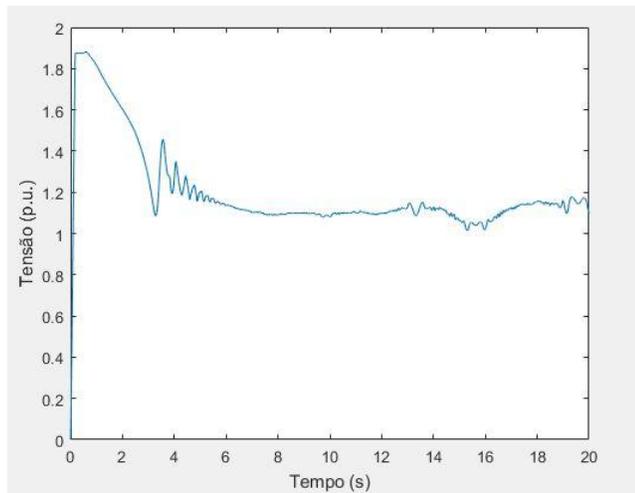


Fig 7. Diferença das envoltórias da tensão para perda total de excitação.

Na Tabela VI, temos o tempo de detecção e atuação da metodologia do Filtro Morfológico de Extração de Envolvórias para um gerador de 500 MVA, operando sob condições de perda total de excitação e 100% de carregamento.

Tabela VI. Tempo de atuação para perda total de excitação.

Carga	Excitação (p.u.)	Deteção de Possível PE (s)	Confirmação após Possível Deteção (s)	Tempo Acumulado (s)
100%	0	0.5858	0.3415	0.9273

Nas Figs. 10 e 11 pode-se observar o comportamento da técnica baseada na variação da potência reativa, bem como os momentos de detecção da LOEI. Pode ser observado na Fig. 10 a variação abrupta da potência reativa que representa uma das consequências da perda de excitação nos geradores síncronos. Na Fig. 11 é demonstrado as amostras dos eventos de perda de excitação. Foi utilizado um ajuste Th igual a 35 para os dados obtidos.

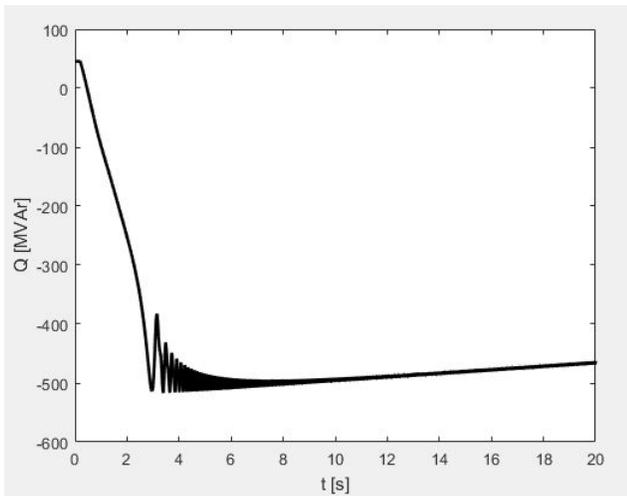


Fig 10. Comportamento da potência reativa na máquina.

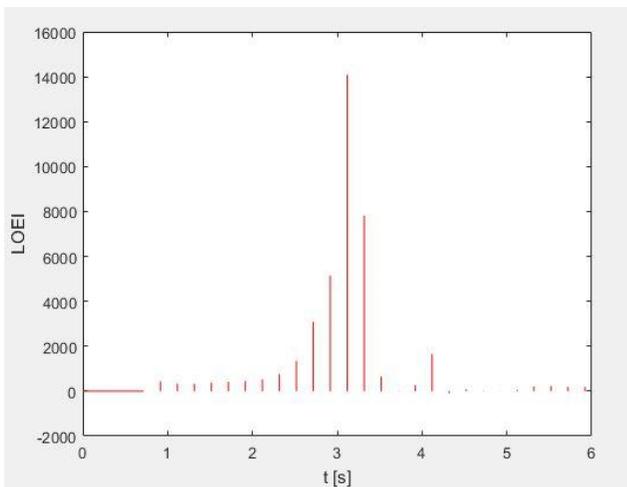


Fig 11. Detecção de LOEI.

B. Análise das metodologias para perdas parcial e total de excitação em um gerador de 500MVA com 100% de carregamento.

Sabe-se que além da perda total de excitação outro problema indesejável para os geradores síncronos é a perda parcial de excitação, este problema ocorre quando a tensão de excitação da máquina é menor que 1 p.u. e maior que 0 p.u.. Desta maneira, as proteções também devem atuar para esses casos, pois a perda parcial de excitação trata-se de um evento que pode causar danos à máquina. Sendo assim, na Tabela VII temos os tempos de classificação e atuação das metodologias analisadas para casos de 0, 0.5 e 0.9 p.u. da tensão de excitação.

De acordo com a Tabela VII pode-se observar que o tempo de atuação para a proteção baseada no FMEE é menor que o apresentado pela metodologia comparada. Desta forma, o FMEE demonstra-se uma técnica eficaz para a detecção de perdas parcial e total de excitação da máquina, o que poderia evitar o sobreaquecimento e demais problemas relacionados a sua subexcitação, permitindo uma vida útil maior para a máquina. O maior tempo de atuação da técnica baseada na

variação da potência reativa pode estar relacionado com o tempo de espera para a detecção do evento da perda de excitação devido a taxa de amostragem dos valores como tensão terminal e potência reativa.

Tabela VII. Comparação entre os tempos de atuação das metodologias

Atuação	FMEE		Metodologia Comparada
Caso	Classificação	tclassificação (s)	tatuação (s)
PE 0 p.u.	PE	0.9273	2.3172
PE 0.5 p.u.	PE	0.9271	2.4793
PE 0.9 p.u.	PE	0.9271	2.7729

VI. CONCLUSÃO

Tendo-se em vista os resultados alcançados, conclui-se que o FMEE demonstrou ser uma metodologia eficaz já que detecta as perdas parcial e total de excitação de maneira eficiente, atuando de forma mais rápida do que a técnica proposta em [7]. A metodologia baseada no FMEE permite que a máquina seja desconectada de forma rápida quando ocorre a detecção de perda de excitação. Com isso, eleva-se a vida útil do gerador síncrono e a confiança do sistema elétrico de potência. Desta maneira, trata-se de uma técnica promissora, tendo em vista que em outras oportunidades [4] e [6], ela também foi capaz de distinguir oscilações estáveis de potência das perdas parcial e total de excitação, o que evitaria uma atuação indevida do sistema de proteção.

REFERÊNCIAS

- [1] Chapman, Stephen J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5. ed. New York: 2013.
- [2] J. Mamede Filho; Mamede, D.R. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [3] Kundur, Prabha. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [4] Gabe, Jackson. "Filtro Morfológico de Extração de Envoltória para a Proteção Contra a Perda de Excitação do Gerador Síncrono". Unipampa, 2014.
- [5] Wu, Q. H; Lu, Z.; Ji, T. Y. Protective relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology. Springer, London, UK, 2009.
- [6] Itczak, Alex. "Análise de metodologia para detecção de perda total de excitação em geradores síncronos sob condição de perda parcial de campo". Unipampa, 2016.
- [7] Amini, M., Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M.: " A novel approach to detect the synchronous generator loss of excitation", IEEE, 2015, pp 1429-1438