

INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO NA PERDA DE SINCRONISMO DE GERADORES SÍNCRONOS

Luccas Tadeu Farnezes Soares¹, Arthur Costa de Souza²

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI Campus Itabira, Itabira, Brasil
(lucastadeu@unifei.edu.br)

²Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI Campus Itabira, Itabira, Brasil

Resumo: Os geradores síncronos são equipamentos importantes para a correta funcionabilidade de um sistema elétrico de potência. Nesse sentido, manter sua conexão com a rede elétrica torna-se essencial, mesmo diante de transitórios que possam ocorrer e que tenham tendência de levar a máquina para uma situação de perda de sincronismo. Dessa maneira, é extremamente importante a análise destas máquinas perante a estas situações. Principalmente no que se relaciona ao tipo de sistema de excitação empregado, já que este exerce grande influência no comportamento da máquina. Portanto, este trabalho visa apresentar um estudo computacional no *software Matlab/Simulink* para determinação da influência dos sistemas de excitação na perda de sincronismo de geradores síncronos. Para isso, foi implementado computacionalmente um sistema de potência contendo um barramento infinito e uma máquina síncrona conectada ao mesmo através de duas linhas de transmissão. Foi avaliado o comportamento da máquina para um curto-circuito trifásico franco próximo à unidade geradora, foi variado o sistema de excitação para verificação dos modos de operação do sistema. Notou-se que o sistema de excitação estático proporcionou maior estabilidade para máquina quando comparado aos outros tipos de sistemas.

Palavras-chave: Perda de sincronismo; Sistemas de excitação; Geradores síncronos.

INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de potência, de maneira generalizada, é composto por três unidades principais, são elas: geração, transmissão e distribuição da energia elétrica (MONTICELLI; GARCIA, 2011). Em relação à unidade de geração, normalmente são empregadas máquinas síncronas, as quais possuem seus enrolamentos de armadura ou estatóricos interconectados por meio da rede elétrica. Sendo assim, para que esta conexão seja realizada de maneira adequada, ou seja, sem transitórios em regime permanente, deve-se estabelecer uma relação correta entre nível de tensão, frequência e ângulo de fase entre as conexões, logo, deve-se manter um sincronismo entre as máquinas do sistema (ANDERSON; FOUAD, 2003). Entretanto, as máquinas síncronas, em especial os geradores síncronos, durante seu funcionamento podem estar sujeitos à inúmeras situações que o seu sincronismo com a rede elétrica pode ser afetado.

A perda de sincronismo de um gerador síncrono é caracterizada quando, durante sua operação normal ocorre um evento transitório que leva seu ângulo de carga a excursionar de forma intensa, impossibilitando a retomada ao seu valor de origem ou a um valor estável. Esta excursão do ângulo de carga provoca grandes esforços eletromecânicos na máquina, já que durante este evento grandes quantidades de potência

ativa e reativa são trocadas entre gerador e rede elétrica, envolvendo assim elevados valores de corrente (OLIVEIRA, 2022).

Entre as situações em que podem levar a um gerador perder o seu sincronismo com a rede elétrica pode-se citar: curtos-circuitos, desconexão de linhas de transmissão ou de outros geradores ou entrada de grandes blocos de carga no sistema (GONTIJO; COELHO; IZIDORO; FARIA, 2020).

A unidade geradora, além da máquina síncrona (estator e rotor), é composta por um sistema de excitação. Este sistema tem como objetivo prover energia elétrica em corrente contínua (c.c) para o campo da máquina, isto é, no enrolamento do rotor (CHAPMAN, 2013), estabelecendo assim, um acoplamento magnético entre rotor e estator da máquina síncrona.

Tendo em vista que o fenômeno de perda de sincronismo relaciona-se diretamente com uma excursão elevada do ângulo de carga da máquina e consequentemente com a tendência de desacoplamento magnético entre estator e rotor, o sistema de excitação do gerador tem fundamental importância para manutenção deste acoplamento. Já que se pode aumentar ou diminuir este acoplamento magnético através da corrente de campo da máquina a qual é provida pelo sistema de excitação.

Nesse sentido, é essencial realizar o estudo e análise da influência dos sistemas de excitação em situações em que o gerador síncrono está sujeito à perda de sincronismo. Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo acerca da influência do sistema de excitação no fenômeno de perda de sincronismo da máquina. Para isso, foram realizadas simulações computacionais utilizando o *software Matlab/Simulink* de um sistema de potência contendo uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de um transformador e duas linhas de transmissão. Foram analisadas situações da máquina operando com quatro diferentes tipos de sistema de excitação, as quais serão detalhadas ao longo do trabalho. Para representação do transitório, foram realizadas análises de curto-circuito francos trifásicos com subsequente abertura de uma das linhas de transmissão.

SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Os sistemas de excitação para máquinas síncronas podem ser classificados em três categorias, as quais são: sistemas de excitação de corrente contínua, sistemas de excitação de corrente alternada e sistemas de excitação estáticos (IEEE, 2016). A categorização supracitada é um critério estabelecido que se relaciona com a fonte de energia para o sistema de excitação.

Nesse sentido, os sistemas de excitação em corrente contínua, geralmente, utilizam um gerador de corrente contínua acoplado ao eixo do gerador síncrono. Quando este último entra em movimento, é gerada energia para o sistema de excitação da máquina principal. Um esquemático genérico deste sistema pode ser visualizado na Figura 1.

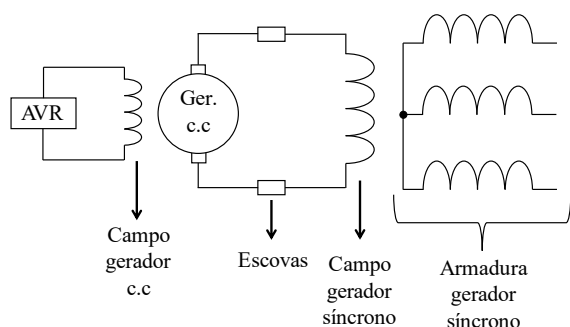


Figura 1. Sistema de excitação c.c.

Já os sistemas de excitação em corrente alternada, geralmente utilizam um gerador alternado, também conectado ao eixo do gerador principal, sendo que quando este entra em movimento, gera-se a energia de excitação da máquina síncrona. Por gerar em corrente alternada (c.a), faz-se necessário um sistema de retificação para converter esta energia em c.c. e por conseguinte, alimentar o campo da máquina. O sistema retificador utilizado pode ser do tipo diodos rotativos, no caso de sistemas de excitação *brushless*,

conforme visto na Figura 2, tal sistema é distinto da excitação do tipo c.c, a qual utiliza um comutador no gerador c.c.

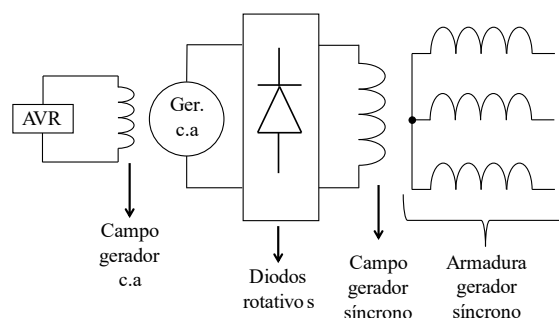


Figura 2. Sistema de excitação c.a.

Por conseguinte, os sistemas de excitação estáticos não utilizam máquinas rotativas para prover a energia de excitação para a máquina síncrona. Nestes sistemas, é comum a utilização da própria tensão terminal do gerador síncrono ou a utiliza-se um barramento auxiliar da usina de geração, ambos em corrente alternada, para prover a energia de excitação. Tendo em vista que a fonte utilizada é c.a, torna-se necessária a utilização de um sistema de retificação, o qual normalmente é composto por uma ponte de tiristores totalmente controlada. A corrente de excitação é injetada no enrolamento de campo da máquina síncrona através de anéis coletores instalados no eixo da máquina síncrona. Um esquemático deste sistema pode ser visualizado na Figura 3.

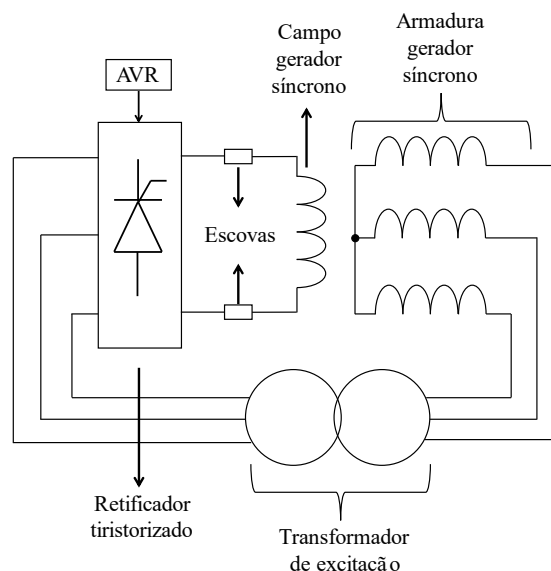


Figura 3. Sistema de excitação estático.

Além dos dispositivos supracitados, os sistemas de excitação também são compostos por controladores (*Automatic Voltage Regulator – AVR*), limitadores como: (*Over Excitation Limiter – OEL*), (*Under Excitation Limiter – UEL*), (*Stator Current Limiter –*

SCL) e sinais complementares, tais como: (*Power System Stabilizer - PSS*) e compensador de carga (IEEE, 2016). Neste trabalho, os limites supracitados não serão considerados, haja vista que sua influência se dá para períodos relativamente grande de análise de tempo. Dessa maneira, a seguir, nas Figuras 4, 5 e 6 são apresentados o diagrama de blocos para representação dos três sistemas de excitação que serão utilizados neste trabalho para realização dos estudos. O quarto sistema de excitação, conforme citado na introdução, refere-se à máquina operando com excitação constante, sem implementação de um AVR.

Todas as variáveis, bem como seus valores recomendados foram definidos de acordo com prática recomendada do IEEE para modelagem de sistemas de excitação em estudos de estabilidade de sistemas elétricos (IEEE, 2016). Os sistemas de excitação utilizados neste trabalho são: DC1C (Excitação de corrente contínua), AC1C (Excitação de corrente alternada) e ST1C (Excitação estática).

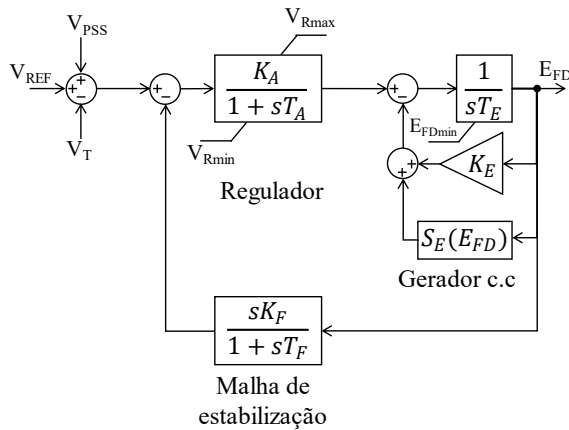


Figura 4. Diagrama de blocos do sistema de excitação DC1C.

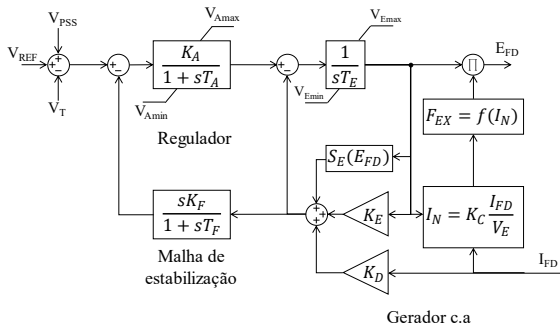


Figura 5. Diagrama de blocos do sistema de excitação AC1C.

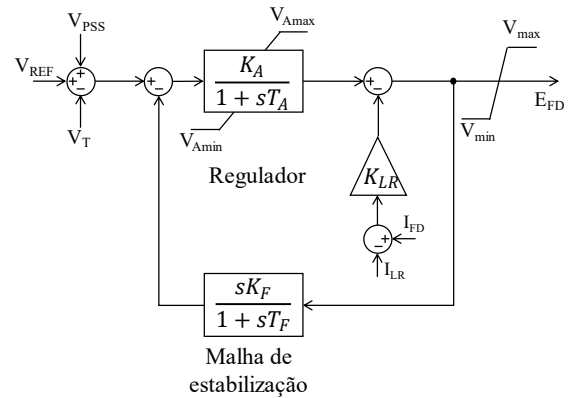


Figura 6. Diagrama de blocos do sistema de excitação ST1C.

CRITÉRIO DE ÁREAS IGUAIS PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

O critério de áreas iguais é uma ferramenta independente do tempo para determinação da estabilidade transitória de máquinas síncronas (MENDES, 2006). Considerando o sistema demonstrado na Figura 7 sem perdas e sem amortecimento, pode-se escrever a Equação 1:

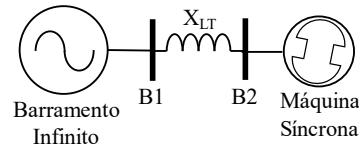


Figura 7. Esquemático de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão.

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e) \quad (1)$$

Onde δ é o ângulo de carga da máquina, ω_s é a velocidade síncrona da máquina, H é sua constante de inércia, P_m é a potência mecânica provida pela turbina e P_e é a potência elétrica despachada pela máquina. A partir da Equação 1, pode-se escrever a Equação 2:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{\omega_s}{2H} \int_{\delta_0}^{\delta_{max}} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2)$$

Onde δ_{max} e δ_0 são os ângulos máximo e inicial da máquina durante o transitório. O termo da potência mecânica menos a potência elétrica pode ser entendida como uma potência acelerante.

Portanto, para um critério de estabilidade, em que não ocorra variação do ângulo de carga, deseja-se que o termo $\frac{d\delta}{dt}$ seja nulo. Por conseguinte, para que este

termo se anule é necessário que a potência acelerante também seja nula. Isso significa que toda a energia fornecida pela máquina primária, através da potência mecânica deve ser transferida para rede através da potência elétrica, mantendo assim o sincronismo da máquina e a estabilidade do ângulo de carga. De maneira gráfica pode-se aplicar o critério através da curva típica de potência elétrica em função do ângulo de carga da máquina síncrona, a qual é demonstrada na Figura 8.

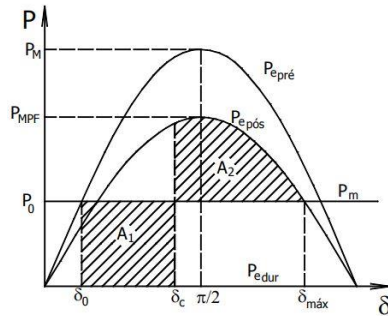


Figura 8. Critério de áreas iguais de forma gráfica.
Fonte: (MENDES,2006)

Na Figura 8, pode-se notar duas áreas sombreadas. Estas áreas correspondem à integral entre a curva de potência mecânica e a curva de potência elétrica. De maneira geral, a máquina não perderá o sincronismo se a área 1 for menor ou igual à área 2.

Através do critério de áreas iguais torna-se possível determinar o ângulo de carga crítico da máquina síncrona. Este ângulo, quando ultrapassado, resulta na perda de sincronismo da unidade geradora. Calculando-se a integral das áreas 1 e 2 e igualando-as tem-se:

$$\delta_c = \cos^{-1} \frac{P_m(\delta_{max} - \delta_0) + P_{mpf} \cos(\delta_{max})}{P_{mpf}} \quad (3)$$

Neste caso o tempo crítico (t_c) para eliminação da falta é dado por:

$$t_c = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (4)$$

Onde P_m é a potência mecânica fornecida pela máquina primária, δ_{max} é o ângulo máximo de intersecção entre a potência mecânica e a potência elétrica pós falta, P_{mpf} é a potência elétrica máxima pós-falta e H é a constante de inércia da máquina.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a obtenção dos resultados computacionais foi implementado no software Matlab/Simulink a rede demonstrada na Figura 9. Pode-se observar nesta

figura que a máquina síncrona é conectada a um barramento infinito através de um transformador elevador e duas linhas de transmissão operando em paralelo. Os dados do sistema podem ser verificados na Tabela 1.

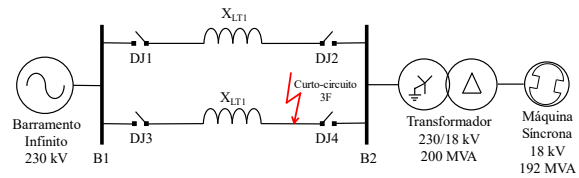


Figura 9. Diagrama unifilar do sistema em análise.

Tabela 1. Valor dos parâmetros utilizados.

Parâmetro	Valor
Linhas de transmissão	
X_{LT1}	0,768 pu
X_{LT2}	0,768 pu
Transformador	
X_T	0,096 pu
Máquina Síncrona	
X_d	1,81 pu
X'_d	0,3 pu
X''_d	0,23 pu
X_q	1,76 pu
X'_q	0,65 pu
X''_q	0,25 pu
X_l	0,15 pu
R_s	0,0026 pu
T'_{do}	8 s
T''_{do}	0,03 s
T'_{qo}	1 s
T''_{qo}	0,07 s
H	3,302 s

A partir da rede demonstrada na Figura 9, foram analisados quatro estudos de caso. Para todos eles analisou-se o comportamento da máquina síncrona para um curto-circuito trifásico, franco, no início da linha de transmissão 2 com posterior abertura dos disjuntores 3 e 4, a diferença entre os casos analisados encontra-se no sistema de excitação empregado na unidade geradora síncrona. Para o primeiro caso, a excitação foi mantida constante. Os três subseqüentes foram analisados para sistemas de excitação c.c, c.a e estático.

O tempo de atuação do sistema de proteção e consequentemente, o tempo de permanência do curto-circuito foram determinados através do tempo crítico para eliminação da falta. Nesse sentido, foi aplicado o critério de áreas iguais de maneira gráfica para o sistema em análise, o qual pode ser visualizado na Figura 10. É válido ressaltar que a máquina síncrona operava como um elemento PV, ou seja, despachava potência ativa e controlava a tensão no lado de baixa do transformador. A potência despachada pré-falta era de 154 MW, correspondente à aproximadamente 80% de carregamento da máquina. Este carregamento foi escolhido pois representa condição de operação relativamente perigosa para a máquina síncrona.

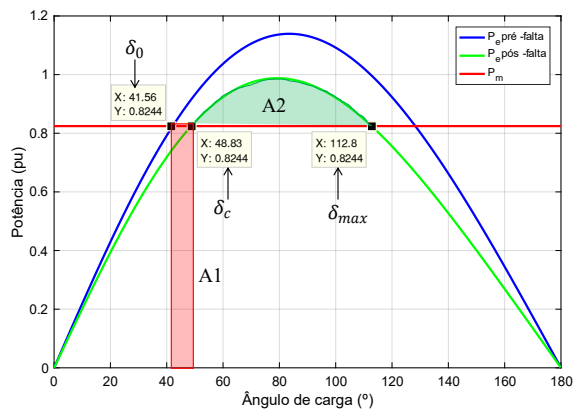


Figura 10. Critério gráfico das áreas iguais aplicado ao sistema em análise.

A partir da aplicação do critério das áreas iguais, com a obtenção do ângulo de carga crítico (δ_c), determinou-se através da Equação 3 o tempo máximo de atuação da proteção. O tempo máximo de atuação da proteção para eliminação do curto-circuito e retirada da LT2 foi calculado em aproximadamente 73 ms após a ocorrência da falta. Nos casos em análise, será utilizado este tempo para determinação se haverá ou não perda de sincronismo da máquina.

Por conseguinte, na Figura 11 é demonstrado o ângulo de carga da máquina síncrona com os sistemas de excitação analisados e um tempo de eliminação da falta de 70 ms.

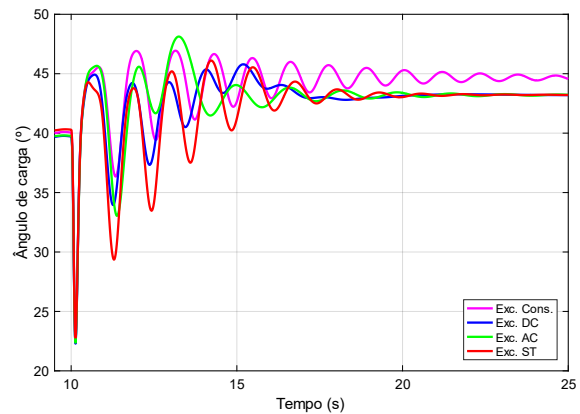


Figura 11. Ângulo de carga da máquina síncrona para o tempo de eliminação da falta de 70 ms.

Em análise à Figura 11, é possível observar que para todos os casos, na situação pré-falta, o gerador tem sua operação com ângulo de carga próximo de 40°, conforme demonstrado no critério de áreas iguais. No instante de 10 s ocorre a falta e sua eliminação após 70 ms. Observa-se que o ângulo de carga excursions e se estabiliza em um ângulo menor que o ângulo crítico (48,83°), sendo que para os casos com sistema de excitação modelado houve a estabilização em um ângulo menor quando comparado com o sistema com excitação constante. Esta estabilização em um ângulo de carga menor, deve-se à potência elétrica de excitação que pode ser fornecida pelo sistema de excitação ao variar a tensão de campo e consequentemente a tensão induzida, conforme pode-se observar na Figura 12.

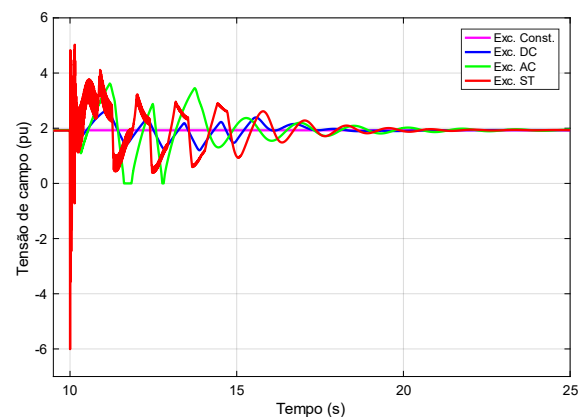


Figura 12. Tensão de campo da máquina síncrona para o tempo de eliminação da falta de 70 ms.

Nota-se na Figura 12 que na ocorrência do transitório ocorre a variação da tensão de campo da máquina. Esta variação implica em um fornecimento extra de potência elétrica, conforme dado pela Equação 5.

$$P_e = \frac{VE}{X_d} \sin(\delta) + P_e(\text{relutância}) \quad (5)$$

Onde P_e é a potência elétrica despachada pela máquina, V é a tensão do barramento de conexão da máquina, X_d é a reatância de eixo direto da máquina, δ é o ângulo de carga da máquina e $P_e(\text{relutância})$ é a potência elétrica de relutância a qual não depende da tensão induzida. Tendo em vista que a tensão E é diretamente proporcional à tensão de campo, quando aumenta-se a excitação da máquina, está também aumentando a potência de excitação da mesma ou vice-versa.

Além da tensão de campo e do ângulo de carga foi analisado o fluxo de potência ativa e reativa no instante do transitório, o qual pode ser visto na Figura 13.

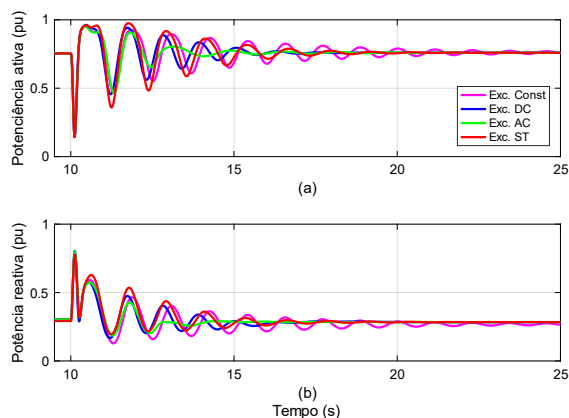


Figura 13. Potência ativa (a) e reativa (b) da máquina síncrona para o tempo de eliminação da falta de 70 ms.

Observa-se na Figura 13 que para todos os tipos de excitação analisados as potências ativas e reativa em regime permanente possuem os mesmos valores, entretanto, para os casos em que os sistemas de excitação são empregados ocorre variações de potência mais elevadas, quando comparado com o sistema de excitação constante.

A seguir, serão demonstrados os resultados obtidos para um tempo de eliminação de falta de 71 ms. Apesar do tempo empregado ser 2 ms menor que o tempo crítico calculado, nas simulações foram observados que para o tempo de 73 e 72 ms, o sistema ainda mantinha o sincronismo. Assim, empregou-se o tempo de 71 ms como tempo crítico. Nesse sentido, na Figura 14 é demonstrado o ângulo de carga da máquina síncrona para o tempo de eliminação da falta de 71 ms.

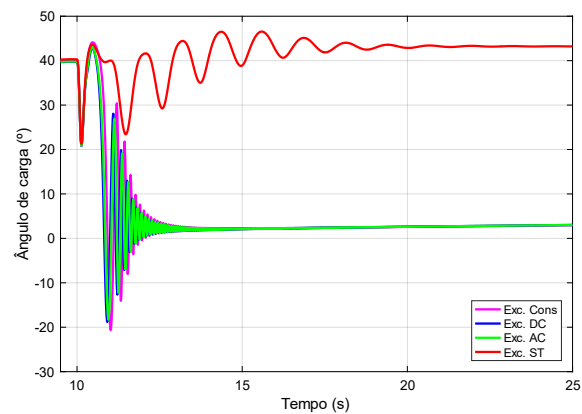


Figura 14. Ângulo de carga da máquina síncrona para o tempo de eliminação da falta de 71 ms.

Nota-se que para todos os sistemas de excitação, exceto o sistema estático, a máquina perde o sincronismo com a rede elétrica para um tempo de eliminação de falta de 71 ms. Apesar da grande excursão do ângulo de carga para o caso da máquina síncrona com sistema de excitação estático, ocorre a sua estabilização, consequentemente a máquina mantém o sincronismo.

O desempenho para o caso da utilização da excitação estática se deve à sua rápida dinâmica e ganho relativamente elevado, o que permite a variação da tensão de campo de forma rápida, portanto, fortalecendo o acoplamento magnético entre rotor e estator, impedindo assim, a perda de sincronismo entre estes dois campos. A rapidez do sistema de excitação estático, deve-se principalmente, à não utilização de máquinas elétricas para prover energia de excitação, consequentemente, constantes de tempo menores são observadas neste modelo de excitação.

A seguir, é demonstrada a tensão de campo da máquina síncrona para os casos analisados.

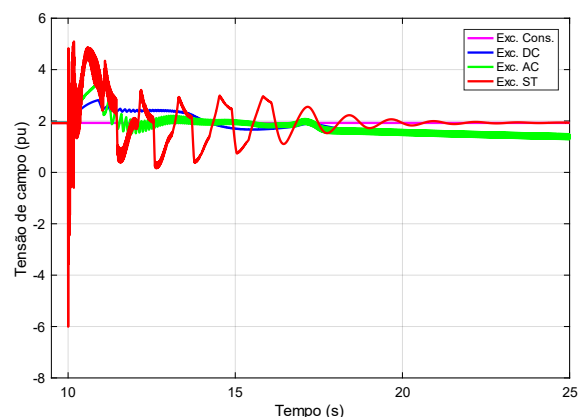


Figura 15. Tensão de campo da máquina síncrona para o tempo de eliminação da falta de 71 ms.

Analisando-se a Figura 15 observa-se que para o caso de excitação estática ocorre a variação da tensão de campo de forma mais abrupta, principalmente nos



instantes subsequentes ao transitório. Esta variação contribui para o provimento de estabilidade para a máquina síncrona, mantendo-se assim seu sincronismo. Em outras análises foi verificado que a máquina operando com excitação estática perde seu sincronismo para um tempo de atuação de 80 ms.

Por fim, na Figura 16 são demonstradas as potências ativas e reativa na máquina durante o transitório.

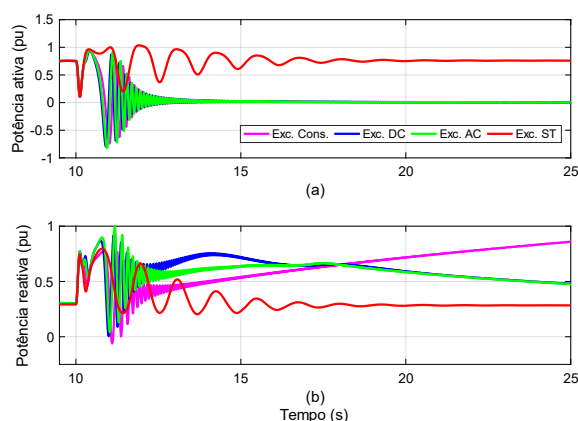


Figura 16. Potência ativa (a) e reativa (b) da máquina síncrona para o tempo de eliminação da falta de 71 ms.

Verificando-se a Figura 16, nota-se que ocorre a variação abrupta tanto da potência ativa quanto da potência reativa, entretanto, somente para o caso da excitação estática há a estabilização do fluxo de potência da máquina. Nota-se também que logo após a ocorrência da falta, a potência ativa fornecida pela máquina no caso da utilização da excitação estática mantém-se relativamente estável, enquanto os demais casos ocorre a reversão do fluxo de potência, levando a máquina a perder o sincronismo.

CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado, foi possível verificar a influência dos sistemas de excitação na perda de sincronismo do gerador síncrono perante um transitório elevado, curto-circuito trifásico franco. Para obtenção dos resultados, foi implementado no *software Matlab/Simulink* de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de linhas de transmissão. Foi utilizado o critério de áreas iguais para determinar os limites de estabilidade do sistema.

Foi verificado no estudo que a utilização de sistemas de excitação pode auxiliar na estabilidade da máquina, entretanto, para os sistemas de excitação que utilizam máquinas elétricas rotativas, foi verificada a perda de sincronismo da máquina no estudo de caso analisado. Nesse sentido, o sistema de excitação estático foi o que apresentou melhor desempenho, já que para as mesmas condições de análise ele foi capaz de manter o sincronismo com a rede elétrica após o transitório.

Dessa forma, ressalta-se que o sistema de excitação estático é o mais adequado para prover estabilidade para o gerador síncrono, já que este sistema é capaz de prover resposta rápida e intensa frente à transientes que possam levar a máquina para uma perda de sincronismo.

AGRADECIMENTOS

Registram-se aqui os agradecimentos à UNIFEI pelo suporte financeiro da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A.. *Power System Control and Stability*. 2. ed. Califórnia: Ieee Press, 2003.
- CHAPMAN, Stephen J.. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013.
- GONTIJO, Felipe Prudente Peres; COELHO, Aurélio Luiz Magalhães; IZIDORO, Sandro Carvalho; FARIA, Ivan Paulo de. Aplicação de método inteligente para classificação da perda de sincronismo em geradores síncronos. *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020*, [S.L.], v. 1, n. 1, 14 ago. 2020. Sbabra. <http://dx.doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2306>.
- IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," in *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, vol., no., pp.1-207, 26 Aug. 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7553421.
- MENDES, P. P. C., "Apostila de Estabilidade de Sistemas Elétricos," UNIFEI, 2006.
- MONTICELLI, Alcir; GARCIA, Ariovaldo. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011.
- OLIVEIRA, Robson Almir de. *Proteção contra perda de sincronismo de geradores síncronos baseada na derivada da potência elétrica*. 2022. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-27052022-081651/pt-br.php>. Acesso em: 01 maio 2024.