

Estudo do Impacto da Falha de Diodos de Pontes Retificadoras Rotativas em Geradores *Brushless*

Thiago B. Pierini.* Pedro H. A. de Oliveira.** Cláudio A. Conceição.***
Braz de J. Cardoso Filho. **** Thales A. C. Maia.*****

*Petrobras, Regap, MG. (Tel: (31)3529-4277; e-mail: thiagobp@petrobras.com.br)
** Universidade Federal de Minas Gerais, BH, MG. (e-mail pho.marconi@gmail.com)
***Petrobras, Regap, MG. (Tel: (31)3529-4092; e-mail: claudioac@petrobras.com.br).
**** Universidade Federal de Minas Gerais, BH, MG. (e-mail: braz.cardoso@ieee.org).
***** Universidade Federal de Minas Gerais, BH, MG. (e-mail: thalesmaiaufmg@gmail.com).

Abstract: Brushless synchronous generators are increasingly widespread in the installed park of industries and small power generation plants. Rotating diodes are considered the main components of the exciters that supply the field windings of these generators. The reliability and availability of power generation are strongly related to the exciter function. The difficulty of access, as they are components that rotate with the axis, makes it impossible to carry out predictive/detective maintenance. The present work presents a study of the impacts of diode failures of rotary rectifier bridges on operating voltages and currents of brushless generators, for comparison with a machine in perfect condition.

Resumo: Geradores síncronos do tipo *brushless* estão cada vez mais difundidos no parque instalado de indústrias e pequenas centrais de geração de energia. Diodos rotativos são considerados os principais componentes das excitatrizes que alimentam os enrolamentos de campo desses geradores. A confiabilidade e a disponibilidade da geração de energia estão fortemente relacionadas com a função da excitatriz. A dificuldade de acesso, por se tratar de componentes que giram com o eixo, inviabiliza a realização de manutenção preditiva/detectiva. O presente trabalho apresenta um estudo dos impactos das falhas de diodos de pontes retificadoras rotativas nas tensões e correntes de operação de geradores *brushless*, para efeito comparativo com uma máquina em perfeito estado de conservação.

Keywords: Generator, synchronous; brushless; exciters; rotating diodes.

Palavras-chaves: Gerador; síncrono; brushless; excitatriz; diodo rotativo.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de excitação de geradores síncronos foram originalmente constituídos de uma fonte de alimentação em corrente contínua (CC), anéis coletores e escovas de grafite/carbono. Inicialmente, usava-se um gerador em corrente contínua no mesmo eixo do gerador principal. Contudo, essa solução limitava o tamanho máximo do gerador principal, uma vez que havia a limitação da potência de geração CC imposta pelos comutadores (a distância entre as teclas do comutador limitava a máxima tensão CC gerável, Gomes, 2010). Além disso, essa aplicação não era adequada para situações de geração em alta velocidade (por exemplo, usinas termoeletricas).

Em seguida, foram desenvolvidos sistemas de excitação com uma fonte em corrente alternada (CA) e retificadores estáticos a diodos, fazendo-se uso dos mesmos anéis coletores e escovas. Foram propostos ainda retificadores CA/CC controlados, facilitando o controle da corrente de campo do gerador principal. Essa última solução apresentava um bom tempo de resposta, porém, como desvantagem, continuava necessitando de escovas e anéis coletores.

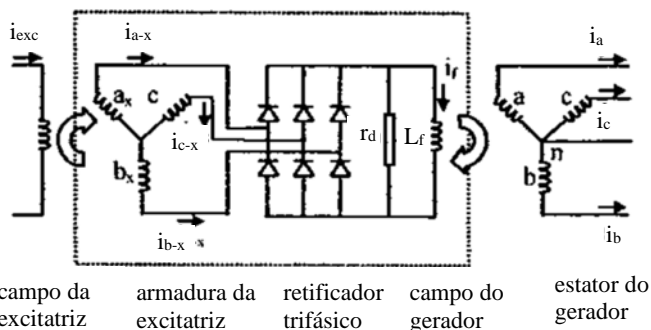
Em 1960, foi proposto pela *Westinghouse Electric Corporation* um sistema de excitação *brushless*, “sem escovas”, onde o sistema de excitação fornece tensão contínua ao circuito de campo do gerador através de pontes retificadoras rotativas (Ferguson, 1960).

Este trabalho apresenta um estudo dos impactos das falhas de diodos rotativos nas tensões e correntes geradas pelo gerador, compreendendo o comportamento das tensões e correntes envolvidas, e comparando os resultados com uma máquina em perfeito estado de conservação, com intuito de apoiar futuros trabalhos para diagnóstico preciso de falha de diodos em máquinas instaladas em indústrias e concessionárias.

2. O GERADOR SÍNCRONO *BRUSHLESS*

As figuras 1 e 2 abaixo ilustram esse sistema. Consiste em uma excitatriz CA com o enrolamento de campo fixo no estator (figura 1, ou foto real, figura 3), e um enrolamento de armadura da excitatriz que gira no mesmo eixo do gerador principal. Na saída dessa armadura da excitatriz, há uma roda de diodos rotativos com fusíveis de proteção (figura 4) montados na ponta do eixo, que retificam a tensão e alimentam

o enrolamento de campo do gerador principal através de um barramento positivo e um negativo, que passam por dentro do eixo. Por fim, tensões e correntes trifásicas geradas são induzidas na armadura do gerador (Salah, 2013). Com essa configuração, é dispensado o uso de anéis coletores e escovas rotativas, o que representa um ganho de manutenção e confiabilidade considerável. O tempo de resposta do sistema *brushless* é mais lento comparado ao do sistema com retificador controlado, devido ao retardo inerente aos circuitos indutivos e variações de fluxos. Assim, sua aplicação é restrita a sistemas de geração que não demandem tempo de resposta baixo. Porém ainda assim é recomendado para geradores até 30MVA ou pouco superiores (Gomes, 2010). Adicionalmente, é fortemente recomendado para aplicações que envolvem altas velocidades, não pelo comportamento dinâmico do sistema de excitação, mas sim por dispensar escovas e anéis coletores, que seriam extremamente demandados nestas velocidades (Zouaghi, 2001).



campo da excitatriz armadura da excitatriz retificador trifásico campo do gerador estator do gerador

Fig. 1. Diagrama esquemático da excitatriz *brushless* (Batzel et al, 2003) .

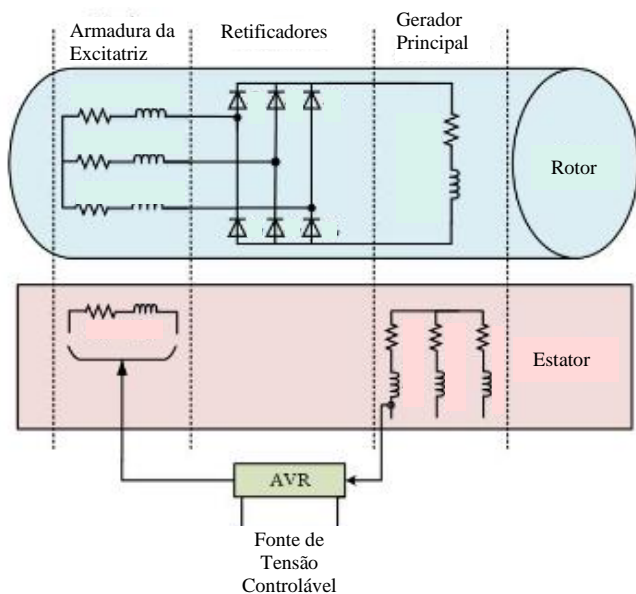


Fig. 2. Controle de tensão/reactivo em excitatriz *brushless* (Rahnama et al, 2018).

Esse tipo de geração, amplamente difundida em sistemas aeronáuticos (Cramer, 2012), vem ganhando cada vez mais espaço nas empresas de geração termoelétrica, principalmente em turbinas aeroderivadas (que envolvem altas velocidades,

devido ao processo de geração da força motriz). Com o aumento da aplicação do sistema *brushless* em geradores de grandes potências, a solução foi se tornando mais robusta e difundida.

A realização de manutenções preditivas/detectivas nos diodos rotativos para diagnosticar seu estado de funcionamento é impossibilitada pelo fato de serem partes móveis girantes. Os únicos dispositivos de proteção utilizados são fusíveis e um sensor (girante) de falta a terra do circuito rotórico, que manda um sinal luminoso para uma parte fixa e alarma em caso de falha.



Fig. 3. Exemplo de enrolamento de campo da excitatriz (Manual da Brush).



Fig. 4. Roda de diodos e fusíveis.

3. ESTADO DA ARTE

Em 1998, foi proposto um método numérico para modelar o comportamento da excitatriz de um gerador tipo *brushless* operando com diodo em falha (Zouaghi e Poloujadoff, 1998). A modelagem levou em consideração parâmetros eletromagnéticos da máquina e dos componentes eletrônicos.

Concluíram que a operação do gerador com diodo em curto é catastrófica, e que, graças a instalação de fusíveis em série com os diodos, leva a excitatriz a operar na situação de diodo aberto, cuja operação é aceitável.

Em 1999, foi feita uma análise da performance de um gerador *brushless* através da sua modelagem em regime permanente, e confirmou os resultados por experimentos práticos (Fukami *et al*, 1999).

Em seguida, foi proposto um sistema com micro-controlador para implementar o controle de tensão gerada (AVR) por geradores tipo *brushless* (McArdle *et al*, 2004). Como benefício desse tipo de controle, foi possível implementar um método não evasivo para detectar falhas nos diodos rotativos através da análise das componentes harmônicas da forma de onda da corrente de campo da excitatriz. Foi analisado também o impacto da falha do diodo em aberto na operação do gerador. Em caso de falha de um diodo, a capacidade de saída da excitatriz é reduzida, porém o gerador continua sendo capaz de fornecer potência nominal, apesar de ficar com um tempo de resposta a perturbações menor

Foi também realizado um trabalho inverso, onde estudou o impacto de transientes da armadura do gerador principal na excitatriz *brushless* (Gomes, 2010). Através de simulações no PSIM, foram determinadas as piores situações de transientes de tensão e corrente (curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, e perda de sincronismo), e os impactos nos diodos rotativos. Com os resultados, foi fornecido embasamento para as empresas projetistas de máquinas dimensionarem os diodos, que, segundo o autor, o fazem baseados em dados empíricos. O trabalho também possibilita o estudo da sensibilidade dos parâmetros do gerador nos transientes nos diodos, onde como exemplo, correntes de pico nos diodos mostraram grande sensibilidade com a dispersão da armadura e reatância de magnetização. Investigou então o impacto da tensão gerada e das correntes transientes nos diodos rotativos.

Foi também monitorada a condição dos diodos rotativos de excitatrizes tipo *brushless*, para os modos de falha de diodo aberto e diodo em curto, tanto para gerador a vazio quanto em carga (Rahnama e Vahedi, 2016). Analisou-se a FFT dos sinais disponíveis (tensões e correntes de saída da armadura do gerador, e tensões e correntes da entrada do campo da excitatriz), e conclui-se que os sinais de corrente (campo da excitatriz, e corrente de armadura do gerador) são os mais apropriados para o diagnóstico de falha em diodos.

A bibliografia relacionada é ampla em analisar a operação de geradores *brushless* em aviões, contudo, em aplicações industriais, pouco foi observado.

4. OBJETIVOS

O presente trabalho visa, por meio de simulações computacionais no Simulink®, obter o comportamento do gerador frente a falhas em aberto de diodos rotativos, e comparar os resultados com geradores sãos. Falhas em curto não serão estudadas visto que, no equipamento alvo, fusíveis de proteção ligados em série com os diodos abrem em caso de curto-circuito, o que transformaria rapidamente a falha em curto numa falha em diodo aberto. Será considerado o gerador alimentando uma carga constante, e falha em 1 e/ou 2 diodos rotativos, em regime permanente ou durante a partida da máquina.

5. SIMULAÇÕES

Foi implementado o esquema trifilar conforme mostrado na figura 5. Foram inseridos disjuntores em série com dois diodos de um mesmo ramo, D1 e D2, e cada um deles foi ajustado para abertura (ou não) em determinado tempo. Em uma janela computacional de 10 segundos, foram simuladas 6 situações de falha dos diodos, conforme relacionado na Tabela 1, e os resultados encontrados foram comparados entre si. As variáveis monitoradas neste estudo foram a corrente de campo do gerador, potência mecânica, tensão de campo do gerador, tensão de armadura do gerador, e velocidade de rotação.

Tabela 1. Simulações realizadas

Simulação	Condições
1º caso	Caso base. Nenhum dos fusíveis queima durante a janela de simulação.
2º caso	D1 = 6 segundos Apenas um dos fusíveis queima. Escolhido o tempo de 6 segundos, que é quando as variáveis do caso base já estabilizaram (simulam o regime permanente).
3º caso	D2 = 6 segundos Inversão do caso anterior, para verificar se há alteração do comportamento das variáveis medidas.
4º caso	D1 = 6 segundos D2 = 8 segundos Um dos fusíveis queima em regime permanente, e o outro fusível queima depois de 2 segundos.
5º caso	D1 = 6 segundos D2 = 6 segundos Ambos os fusíveis queimam simultaneamente em regime permanente.
6º caso	D1 = 1 segundo D2 = 1 segundo Ambos os fusíveis queimam durante o pico da tensão de campo (t=1 seg da partida).

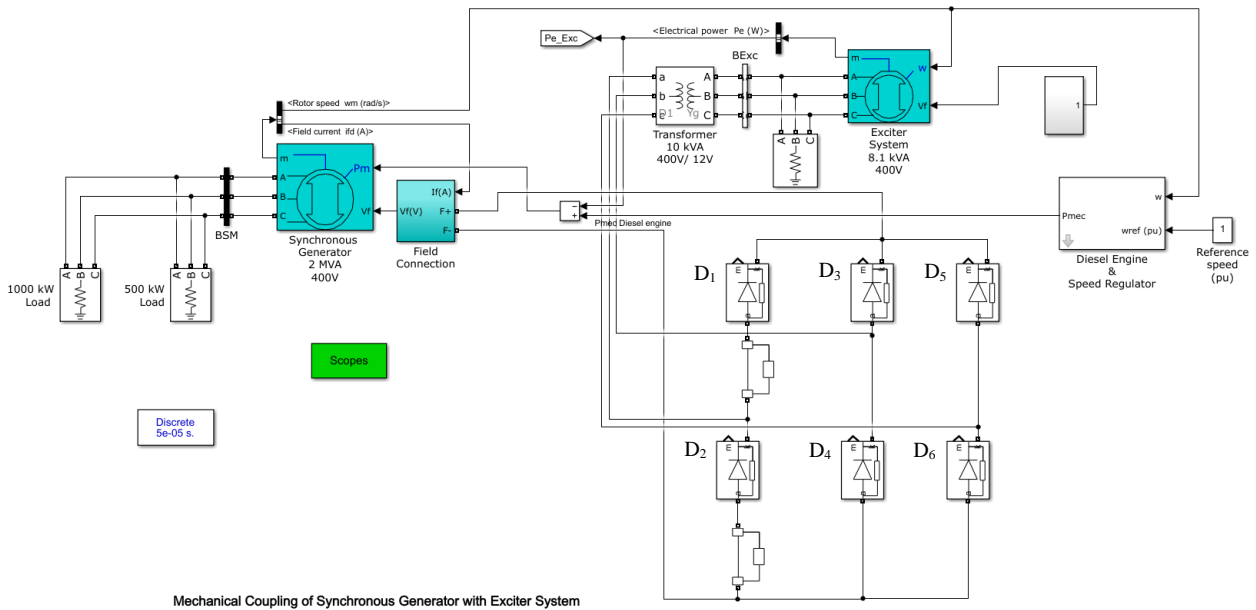


Fig. 5. Esquema implementado no Simulink®

6. RESULTADOS

Os resultados das simulações encontrados estão relacionados abaixo.

6.1 – 1º Caso – Caso base

Para simulação do caso base (simple simulation da partida da máquina e entrada em regime permanente), não foi considerada nenhuma queima de diodos rotativos. Pretende-se obter os gráficos para comparar com as próximas simulações. As figuras 6 a 10 abaixo ilustram os resultados encontrados. Podemos observar que, pelas características utilizadas na simulação, o gerador entra em regime permanente mecânico após aproximadamente 3 segundos da partida da máquina, sendo que a tensão de armadura é a que mais demora a estabilizar (5 segundos). Esse retardo já era esperado, visto os atrasos inerentes aos circuitos indutivos acoplados (campo e armadura da excitatriz, campo e armadura do gerador).

Os transitórios observados nos gráficos são explicados pela dinâmica do gerador e acionador na partida da máquina com carga elétrica.

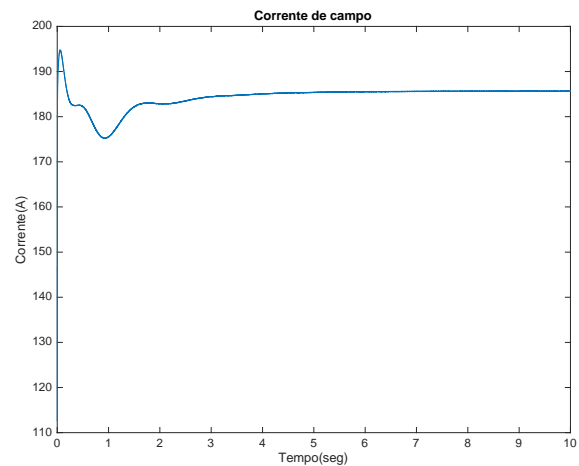


Fig. 6. Corrente de campo do gerador (caso base).

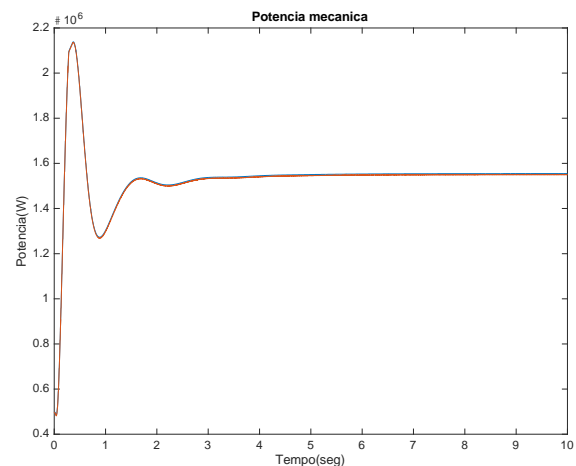


Fig. 7. Potência mecânica (caso base).

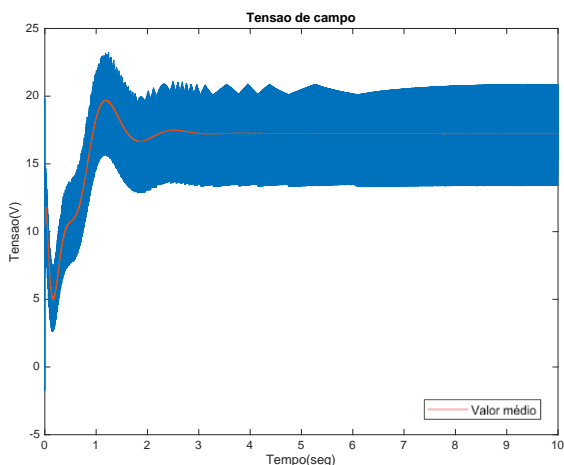


Fig. 8. Tensão de campo do gerador (caso base).

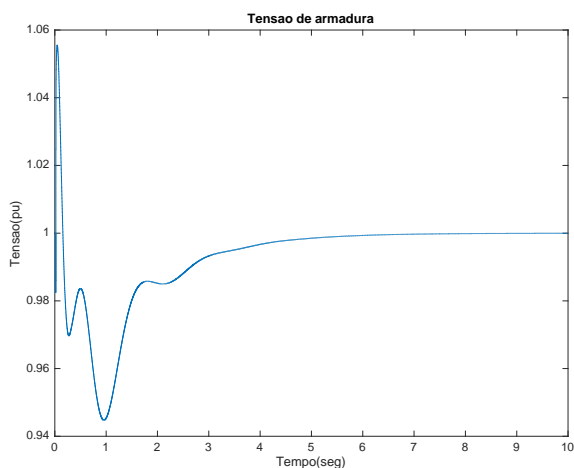


Fig. 9. Tensão da armadura do gerador (caso base).

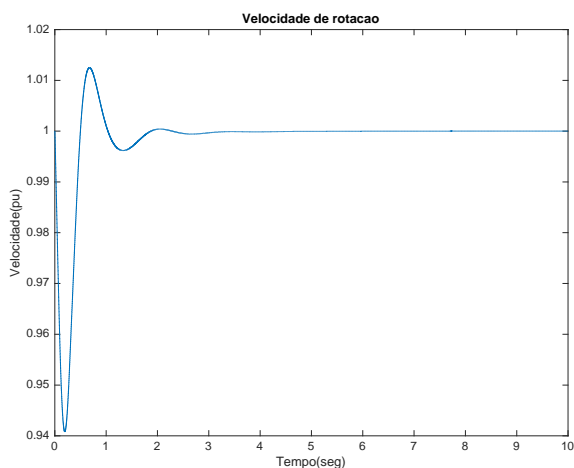


Fig. 10. Velocidade do gerador (caso base).

6.2 – 2º Caso

Para esse caso, foi simulada a queima de um diodo (em 6 segundos) após o gerador partir e entrar em regime

permanente. Os gráficos das figuras 11 a 13 ilustram o comportamento das variáveis acompanhadas.

Evidencia-se pelos gráficos apresentados que a queima de um diodo rotativo influencia em todas as variáveis analisadas. Pela figura 11, constata-se que o tempo de resposta do sistema à queima do diodo é de aproximadamente 1,2 segundo.

Observa-se na figura 12 o aumento do *ripple* da tensão de campo do gerador, impactada diretamente pela queima do diodo. Percebe-se ainda que o sistema de controle atua com sucesso no circuito de campo da excitatriz, fazendo seu valor médio corrigir.

A figura 13 ilustra o sucesso no controle da tensão de armadura de saída do gerador, novamente com o maior tempo de resposta (3 segundos), se comparado ao tempo de resposta das demais variáveis (1,2 segundo). A queda de tensão na saída durante o transitório foi pouco menos de 2%.

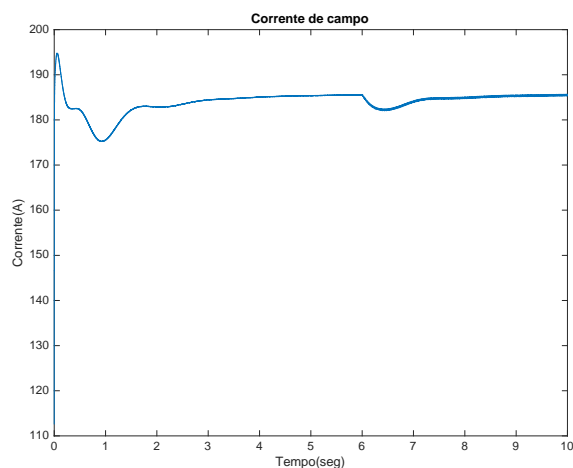


Fig. 11. Corrente de campo do gerador (2º caso).

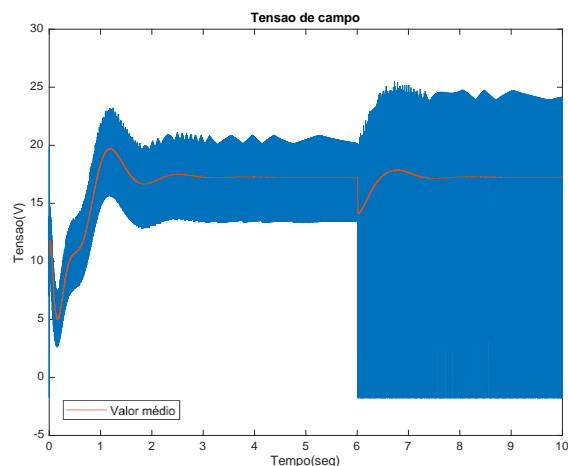


Fig. 12. Tensão de campo do gerador (2º caso).

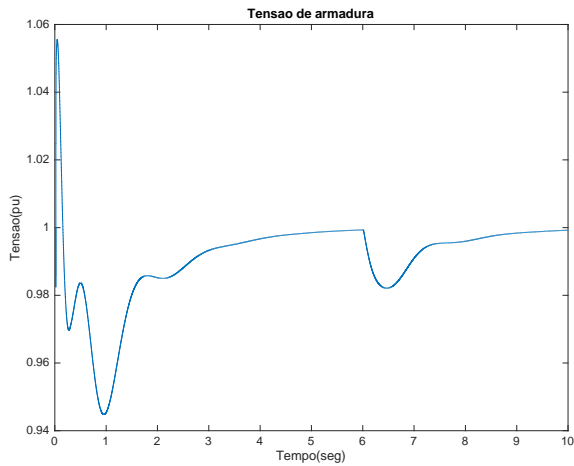


Fig. 13. Tensão de armadura do gerador (2º caso).

6.3 – 3º Caso

Para este caso, foi alterado o diodo a ser queimado (comparado ao caso anterior), sem alterar o tempo da queima. Foi constatado pelos resultados das simulações que o comportamento das variáveis monitoradas não sofreu alteração se comparado com o caso anterior. O resultado já era esperado, pois cada diodo interfere em um semiciclo da senoide de tensão (não importando se no semiciclo positivo ou negativo), não impactando no resultado.

6.4 – 4º Caso

Para a 4ª simulação, considerou-se a queima de um primeiro diodo aos 6 segundos de simulação (em regime permanente), e o segundo diodo 2 segundos após. O comportamento das variáveis é similar aos casos anteriores, com o sistema de controle atuando corretamente. Importante ressaltar que a tensão de campo do gerador recupera seu valor médio, mas fica com um valor de ripple maior após a segunda queima (figura 14).

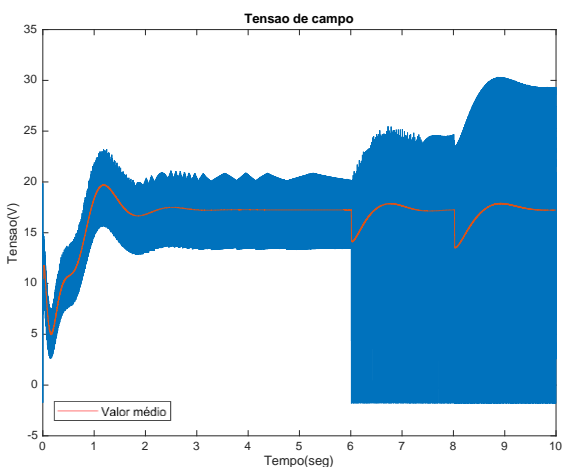


Fig. 14. Tensão de campo do gerador (4º caso).

Pelas figuras 14 e 15, é possível confirmar os resultados encontrados por McArdle, em que o tempo de resposta do sistema na queima do 2º diodo é ligeiramente superior ao tempo de resposta na queima do primeiro diodo. E agora, o afundamento da tensão de saída do gerador chega a quase 3% na queima do segundo diodo.

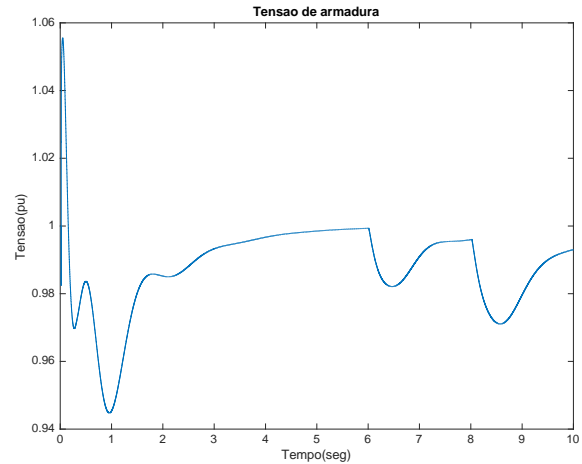


Fig. 15. Tensão de armadura do gerador (4º caso).

6.5 – 5º Caso

Para o 5º caso, foi considerada a situação da queima simultânea dos dois fusíveis de um mesmo braço do retificador aos 6 segundos de simulação. O comportamento das variáveis repete as simulações anteriores, à exceção da tensão de campo do gerador, que fica com um *ripple* maior desde o instante da queima (figura 16).

A figura 17 ilustra a tensão de saída do gerador para o 5º caso. Além do tempo de resposta de aproximadamente 4 segundos, o afundamento da tensão chega a aproximados 4,2%.

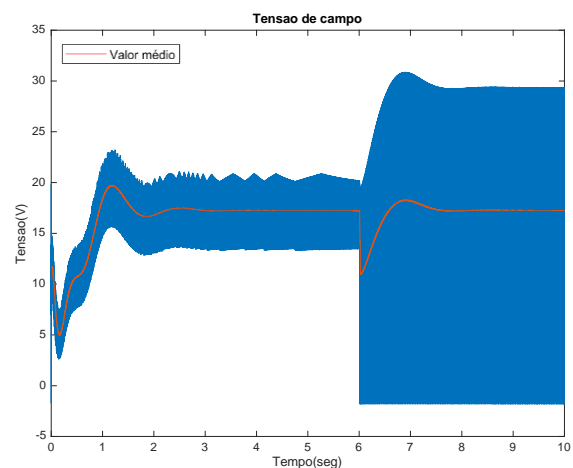


Fig. 16. Tensão de campo do gerador (5º caso).

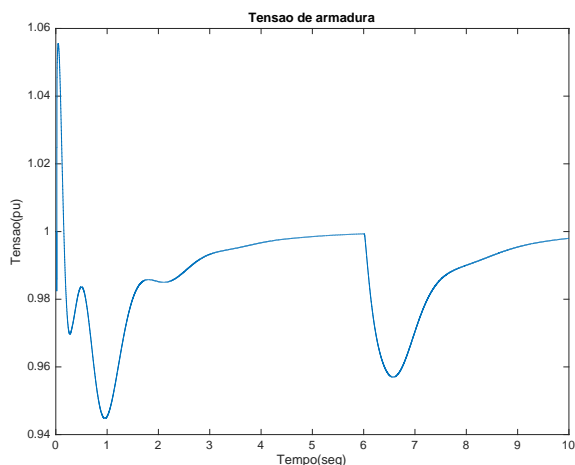


Fig. 17. Tensão de armadura do gerador (5o caso).

6.6 – 6º Caso

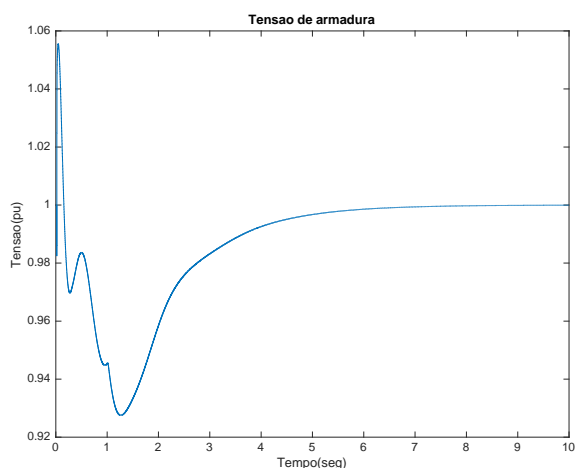


Fig. 18. Tensão de armadura do gerador (6º caso).

Para o 6º caso, foi simulada a queima simultânea dos diodos durante o pico da tensão de campo do gerador do caso 1 (em 1 segundo), pior caso, durante a partida da máquina. As variáveis recuperam-se da mesma forma. Ressalta-se o afundamento da tensão de armadura do gerador, que chega a um mínimo de 0,93pu (figura 18).

7. CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentados, constata-se que o sistema de controle de geradores síncronos do tipo *brushless* é eficaz na correção das principais variáveis do gerador em caso de queima de diodos retificadores rotativos. Considerando os limites aceitáveis pela ONS/ANEEL (Operador Nacional do Sistema Elétrico / Agência Nacional de Energia Elétrica), a variação da tensão de até 7% (pior situação, 6º caso) não chega nem a caracterizar afundamento de tensão, seja ele momentâneo ou temporário.

Pode-se concluir então que não há impacto significativo nas tensões de saída do gerador em caso de queima de até 2 diodos

rotativos. A situação para queima de mais fusíveis não foi estudada.

Porém, cabe um estudo detalhado de cada aplicação específica para atestar que a redução da tensão e tempo de resposta não impactam no processo industrial.

Pelos gráficos apresentados, o principal indicador de diodo em falha é a tensão de campo do gerador. Didaticamente, é útil analisar essa variável, contudo na prática ela é inviável, visto que o rotor, girando com a máquina, impossibilita sua medição efetiva.

Foram confirmados também os resultados prático-teóricos obtidos por McArdle [5] com falhas de diodos e tempos de resposta dos geradores.

Constata-se a robustez da operação do gerador frente a falhas dos diodos rotativos, tendo seu sistema de controle papel fundamental nesse sucesso.

REFERÊNCIAS

- T. D. Batzel, D. C. Swanson, e J. F. Defenbaugh. “*Predictive diagnostics for the main field winding and rotating rectifier assembly in the brushless synchronous generator*” in Proc. IEEE Symp. Diagnostics Elect. Machines, Power Electron Drives Conf., 2003, pp. 349-354.
- I. M. Canay. “*Determination of model parameters of synchronous machines.*” IEEE PROC., Vol. 130, Mar. 1983.
- A. M. Cramer, B. P. Loop, e D. C. Aliprantis. “*Synchronous machine model with voltage-behind-reactance formulation of stator and field windings*”. IEEE Trans. Energy Convers., vol 27, no 2, pp. 391-402, Jun. 2012.
- R. W. Ferguson, R. Herbst, R. W. Miller, “*Analytical Studies Of The Brushless Excitation System*”, AIEE Trans., Feb. 1960, pp.1815-1821.
- T. Fukami, T. Kondo, e T. Miyamoto. “*Performance analysis of a selfregulated, self-excited, brushless three-phase synchronous generator.*” IEEE 1999.
- D. R. Gomes. “*Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes brushless.*” 2010, 81 f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- D. R. Gomes, I. E. Chabu. “*Sudies on electrical stresses in rotating rectifiers for brushless excitors.*”, in 2010 9th IEEE/IAS Internation Conference on Industry Applications, INDUSCON 2010.
- H. Henao, C. Demian, e G. –A. Capolino. “*A frequency-domain detection of stator windings faults in induction machines using na external flux sensor*”. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 5, pp. 1272-1279, Set./Oct. 2003.

- W. Merhof, “*Brushless Excitation Of Synchronous Machines By Rotating Semiconductors*”, *Brown Boveri Review*, 1967, pp. 539-553.
- M. G. McArdie, D. J. Morrow. “*Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure.*” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, Issue 2, Jun. 2004, pp. 378-383.
- M. Rahnama, A. Vahedi. “*Rotary diode failure detection in brushless exciter system of power plant synchronous generator.*” In 6 th Conference on Thermal Power Plants, CTPP 2016, pp. 6-11.
- M. Rahnama, A. Vahedi, A. M. Alikhani, N. Takorabet. “*Diode open-circuit fault detection in rectifier bridge of the brushless synchronous generator.*” 2018.
- M. Salah, K. Bacha, e A. Chaari. “*Detection of brushless exciter rotating diodes failures by spectral analysis of mains output voltage.*” in 2013 International Conference on Electrical Engineering and Software Applications, ICEESA 2013, 2013, pp. 1-6.
- M. Salah, K. Bacha, A. Chaari, e M. E. H. Benbouzid. “*Brushless three-phase synchronous generator under rotating diode failure conditions.*”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 3, pp. 594-601, Sep. 2014.
- T. Zouaghi e M. Poloujadoff. “*Modeling of polyphase brushless exciter behavior for failing diode operation.*” *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 13, pp. 214, 1998.
- T. Zouaghi, M. Maguiraga e M. Poloujadoff. “*Brushless Exciter Dynamic Model Including Saturation and Multiple Commutation Overlapping Effects.*” 2001.
- P. Kundur. “*Power System Stability and Control.*”, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.

Manual da Brush.