

Análise de Falhas Elétricas em um Gerador Síncrono de Velocidade Variável Controlado por Conversor *Back-to-back* de Três Níveis

Rodolfo V. Rocha^{*,**}, Renato M. Monaro^{*}

^{*} *Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP (e-mail: monaro@usp.br)*

^{**} *Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Mato Grosso, MT (e-mail: rodolfo.rocha@ufmt.br).*

Abstract: The contribution of variable-speed generators in modern electrical systems has grown, mainly due to the installation of wind turbines. These generators use different configurations of electrical machines and electronic converters, one of the main ones being the combination of synchronous generators and three-level bi-directional voltage source inverters. One of the points that must be evaluated is their operation during the occurrence of electrical faults. Within this context, this article aims to present an analysis of electrical faults in salient-pole synchronous generators controlled by back-to-back three-level Neutral Point Clamped converters. A simulation performed on the Simulink software, in which electrical faults were defined on a variable-speed setup, was used as case study. It was noted that faults directly affect the behavior of the variable-speed generator and that differences in measured variables can be used to distinguish between faults occurring on the grid or generator side.

Resumo: A contribuição de geradores de velocidade variável nos sistemas elétricos modernos tem crescido, principalmente devido à instalação de turbinas eólicas. Esses geradores usam configurações distintas de máquinas elétricas e conversores eletrônicos, sendo uma das principais a combinação de geradores síncronos e inversores de tensão bidirecionais de três níveis. Um dos pontos que devem ser avaliados é a operação destes durante a ocorrência de falhas elétricas. Dentro desse contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma análise de falhas elétricas em geradores síncronos de polos salientes controlados por conversores *back-to-back* de três níveis do tipo *Neutral Point Clamped*. Como caso de estudo foi utilizada uma simulação usando o *software* Simulink, na qual foram definidas falhas elétricas. Notou-se que as falhas afetam diretamente o comportamento do gerador de velocidade variável e que as diferenças nas variáveis medidas podem ser usadas para distinguir entre falhas que ocorrem no lado da rede ou do gerador.

Keywords: Synchronous generator; variable-speed; full-scale; back-to-back; three-level converter; faults.

Palavras-chaves: Gerador síncrono; velocidade variável; escala completa; back-to-back; conversor de três níveis; falhas.

1. INTRODUÇÃO

Geradores síncronos (GS) têm sido extensivamente empregados para conversão eletromecânica de energia em centrais hidroelétricas e termoelétricas, nas quais operam sob velocidade fixa. Na última década esses também têm sido usados como geradores de velocidade variável em fontes de energia complementares, principalmente em turbinas eólicas modernas (Boldea, 2016). Geradores Síncronos de Polos Salientes (GSPS) e Geradores Síncronos de Ímã Permanente (GSIP) são os mais empregados nas aplicações em que é necessário elevado número de polos (Letcher, 2017). A maioria desses são trifásicos, mas o uso de mais fases é relativamente comum.

A conexão do GS de velocidade variável a um sistema elétrico CA com frequência fixa requer conversão

CA/CC/CA, que normalmente é realizada por dois inversores de quatro quadrantes operando como fontes de tensão e interligados pelos terminais CC (Letcher, 2017). Conversores CA/CA do tipo matriz, ou *Matrix Converters* (MCs), não são adequados para uso em aplicações com geradores de velocidade variável porque estes exigem um mínimo de reserva de energia no *link* CC para lidar com as variações de fonte e carga (Kolar et al., 2011; Friedli et al., 2012).

Devido à sua construção, operação e controle simples, os inversores de dois níveis são os mais usados em praticamente todas as faixas de potência (Boldea, 2017). Por esse motivo, são amplamente empregados em turbinas eólicas de velocidade variável (Mihet-Popa et al., 2007; Yaramasu et al., 2015). Entretanto, seu uso não é recomendado para tensões elevadas, uma vez que as chaves devem suportar

toda a tensão do barramento CC. Uma das formas de lidar com isso é através do uso de conversores com mais de dois níveis, como o de três níveis, no qual metade da tensão do barramento CC é aplicada sobre as chaves (Yazdani and Iravani, 2010). Além de reduzir o nível de tensão que cada chave deve suportar, as formas de onda de tensão alternadas são mais próximas de uma senoide do que as produzidas por um conversor de dois níveis (Hasan et al., 2017).

Algumas topologias de conversor de três níveis foram propostas (Attaianese et al., 2010; Hasan et al., 2017), sendo que os mais usados são do tipo *Neutral Point Clamped* (NPC). Os conversores NPC de três níveis têm sido estudados para aplicações em sistemas de geração renováveis (Abbes and Belhadj, 2012; Malakondareddy et al., 2019). A principal é em turbinas eólicas de velocidade variável (Yazdani and Iravani, 2006; Obeidat et al., 2012; Seixas et al., 2014), mas também é usado em plantas de armazenamento de energia por bombeamento (*pumped-hydro*) (Selvaraj et al., 2018).

Portanto, tais conversores têm grande potencial de uso nos sistemas de geração sob velocidade variável. Isso tem motivado estudos sobre estratégias de modulação PWM e controle específicos (Abbes and Belhadj, 2012; Rojas et al., 2017; Hasan et al., 2017; Umbría et al., 2014; Porru et al., 2018), inclusive para aplicação em geradores de velocidade variável usados em turbinas eólicas (Zhang et al., 2017).

Outro ponto importante a ser considerado na operação desses conversores é o seu comportamento sob faltas elétricas. Jung and Suh (2019) avaliou o controle de desbalanceamento das tensões CC de um conversor conectado a uma rede trifásica desequilibrada pela ocorrência de faltas, mas não trata o uso do conversor num gerador de velocidade variável, então não é considerado o conversor ligado ao gerador. De forma geral, trabalhos que avaliam a ocorrência de faltas elétricas no lado da máquina, usam como caso de estudo conversores de dois níveis Jeong et al. (2017); Zheng et al. (2011); Hang et al. (2015).

Dentro desse contexto, o presente trabalho propõe a simulação de um GSPS de velocidade variável conectado à uma rede elétrica por um conversor *back-to-back* de três níveis para avaliar como este se comporta sob cenários de falta, considerando que estas ocorram tanto no lado da rede quanto no lado do gerador. Para isso, foram implementados os controles necessários para garantir a operação do gerador e conversores, e estes foram testados sob condições nominais e faltosas.

O texto está dividido da seguinte forma: na Seção II é apresentada uma revisão sobre os sistemas de geração sob velocidade variável que usam máquina síncrona, detalha a construção e características do conversor de três níveis tipo NPC e os algoritmos de controle necessários para sua operação; a Seção III descreve a simulação realizada e os cenários de falta considerados, descrevendo todos os parâmetros necessários; a Seção IV apresenta os resultados obtidos e uma discussão baseada neles; finalmente, na Seção V são apresentadas as conclusões obtidas e algumas considerações finais são feitas.

2. GERADORES SÍNCRONOS DE VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONVERSORES DE TRÊS NÍVEIS

Para ligação do gerador à rede, dois inversores são ligados em configuração *back-to-back*: um conversor ligado ao gerador, o outro ao sistema e os seus barramentos CC são conectados, como ilustrado na Fig. 1. GSPSs também exigem controle do campo do rotor, o qual é feito por uma fonte de tensão CC controlada.

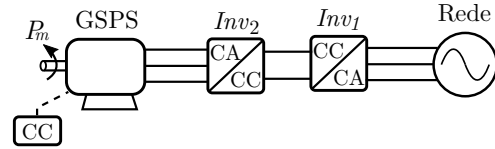


Figura 1. Topologia de um gerador síncrono de velocidade variável.

Conversores CC/CA de dois níveis são os mais usados mas, para aplicações de elevada tensão e potência, devem ser usados conversores com três ou mais níveis.

2.1 Conversor de três níveis tipo NPC

A Fig. 2 ilustra de forma detalhada um inversor de três níveis do tipo NPC com três braços. Este tem quatro chaves e dois diodos por braço para definição dos três níveis de tensão: $+V_{CC}$, 0 e $-V_{CC}$ (Yazdani and Iravani, 2010).

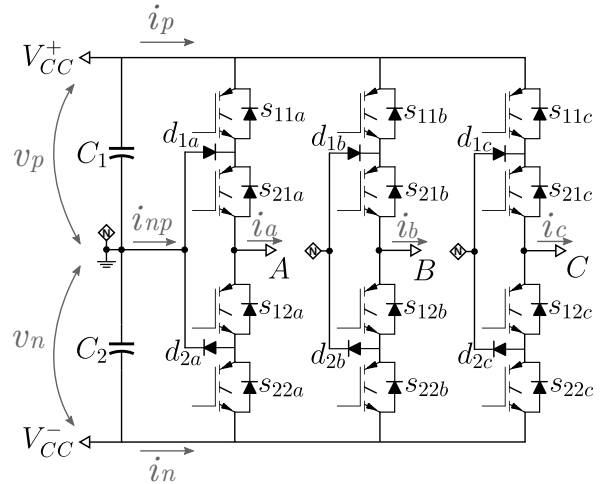


Figura 2. Conversor DC/AC de três níveis tipo NPC.

As correntes no lado CC do conversor NPC, indicadas na Fig. 2, são dadas em (1). Essas dependem dos sinais de chaveamento (s_{11x} e s_{22x}) e das correntes do lado CA (I_{abc}).

$$\begin{aligned} i_p(t) &= s_{11a}(t)i_a(t) + s_{11b}(t)i_b(t) + s_{11c}(t)i_c(t); \\ i_n(t) &= s_{22a}(t)i_a(t) + s_{22b}(t)i_b(t) + s_{22c}(t)i_c(t); \\ i_{np}(t) &= [i_a(t) + i_b(t) + i_c(t)] - [i_p(t) + i_n(t)]; \end{aligned} \quad (1)$$

A corrente de neutro do conversor (i_{np}), como mostrada em (1), depende das correntes I_{abc} e das funções de chaveamento de cada braço. Sob condições normais, a corrente pode ser simplificada pela expressão (2) (Yazdani

and Iravani, 2010), onde: \hat{m} e \hat{i} são, respectivamente, o módulo das modulantes e das correntes CA; γ é o fator de potência em que o conversor está operando; $\omega = 2\pi f$, e $\zeta = \pi - \tan^{-1}(1.5\tan(\gamma))$.

$$i_{np}(t) = \left(\frac{4\hat{m}\hat{i}\sqrt{9-5\cos^2\gamma}}{5\pi}\right)\cos(3\omega t + \zeta) \quad (2)$$

Portanto, quando o conversor opera com as correntes CA e tensões CC equilibradas, a componente harmônica predominante na corrente i_{np} é a terceira. A amplitude dessa componente está diretamente relacionada às das correntes de linha e do fator de potência em que o conversor está operando. Desequilíbrios entre V_p e V_n causam valor médio diferente de zero em i_{np} , enquanto desequilíbrios nas correntes CA mudam o conteúdo harmônico desta (Jung and Suh, 2019).

2.2 Controle dos conversores de três níveis

O controle dos conversores *back-to-back* é dividido em controle do conversor ligado à rede e controle do conversor ligado ao gerador. Normalmente são feitos usando transformada *abc/dq* e controladores do tipo Proporcional-Integral (PI) (Quéval and Ohsaki, 2012; Teodorescu et al., 2011; Wu et al., 2011).

A Fig. 3 ilustra o diagrama de blocos do controle do conversor ligado à rede. O controle orientado a tensão é o mais empregado (Teodorescu et al., 2011) e tem como objetivo a regulação da tensão no lado CC através do fluxo de potência ativa no lado CA, o qual é definido pela corrente de eixo direto (I_d). Para tanto, a tensão medida no lado CC é comparada ao valor de referência V_{CCnom} , calculado conforme (3) usando a máxima tensão de linha prevista para o lado CA (V_{ll}); o erro é usado pelo PI_1 para dar a corrente I_d de referência.

$$V_{CCnom} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}}V_{ll} \quad (3)$$

A corrente I_q está relacionada ao fluxo de potência reativa no lado CA e, na maioria dos casos é controlada para que permaneça nula. Os erros entre as correntes medidas e as de referência são usados pelos controladores PI_2 e PI_3 para dar as tensões dq necessárias para o controle das correntes dq . As saídas dos controladores PI_2 e PI_3 são desacopladas, transformadas em tensões *abc*, que são usadas para definir os pulsos de disparo das chaves através de modulação por largura de pulsos, em inglês *Pulse-Width Modulation* (PWM).

O controle orientado ao campo é o mais usado para o conversor conectado ao gerador e tem como principal objetivo a regulação da velocidade deste através das correntes de estator e de campo (Yazdani and Iravani, 2010). A Fig. 4 apresenta o diagrama de blocos desse controle. A velocidade mecânica do rotor do gerador é medida por um *encoder* instalado em seu eixo, convertida para elétrica e comparada ao valor de referência, o qual normalmente é dado pelo algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência. O erro entre velocidade medida e de referência é usado pelo PI_5 para dar a corrente I_q de referência.

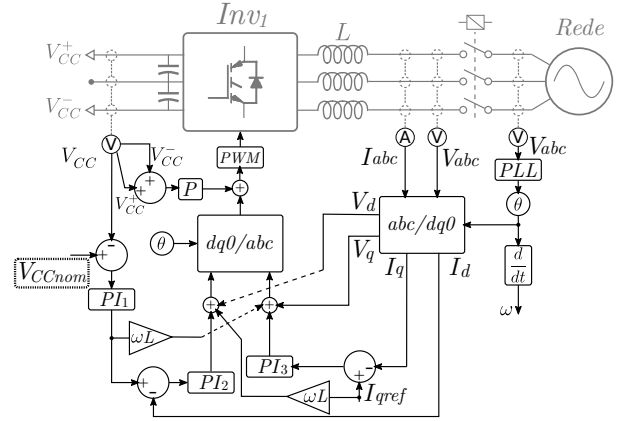


Figura 3. Controle do conversor ligado à rede.

Com relação à corrente I_d , essa pode ser controlada para que seja nula, o que dá uma relação linear entre I_q e torque do gerador, ou pode ter valores não nulos a fim de maximizar a relação entre torque e corrente (Wu et al., 2011). PI_6 e PI_7 são usados para calcular as tensões necessárias para o controle das correntes dq , enquanto PI_4 é usado para controle da corrente de campo do GSPS.

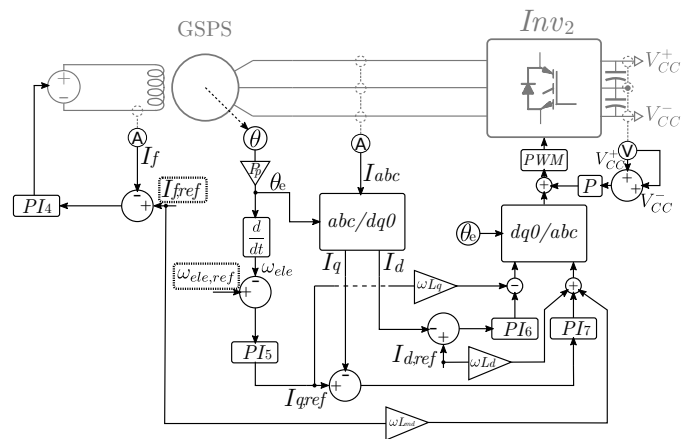


Figura 4. Controle do conversor ligado ao gerador.

Inversores de três níveis do tipo NPC também exigem controle de desequilíbrio de tensão CC. Portanto, este controle foi usado nos dois conversores, como ilustrado nas Figs. 3 e 4. O controle de desequilíbrio atua no valor médio das modulantes usadas no PWM como forma de compensar eventuais diferenças entre V_{CC}^+ e V_{CC}^- , ambas medidas em referência ao neutro do NPC. Foi usado como referência o método apresentado por Yazdani and Iravani (2010), o qual emprega um controlador do tipo proporcional (P) com saída limitada entre ± 0.1 .

3. SIMULAÇÃO DE FALTAS ELÉTRICAS

As análises de faltas no GSPS de velocidade variável com conversor *back-to-back* de três níveis foram feitas a partir de resultados obtidos por simulação numérica, utilizando o *software* Simulink. Para facilitar a reprodução desta, foram usados blocos de funções disponíveis nas versões institucionais. Os parâmetros do gerador, da rede e dos conversores empregados estão descritos na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros do gerador, da rede e dos conversores usados na simulação.

Gerador					
S_{nom}	10,2 kVA	V_{nom}	460 V	f_{nom}	60 Hz
ω_{nom}	1800 rpm	$I_{f nom}$	9 A	R_s	1,62 Ω
L_l	4,56 mH	L_{md}	108,6 mH	L_{mq}	51,67 Ω
R_f	1,163 Ω	L_{if}	11,43 mH	R_{kd}	3,66 Ω
R_{kq}	4,752 Ω	L_{ikd}	9,167 mH	L_{ikq}	10 mH
J	92 g.m ²	F	0,01 N.m.s	P_p	2

Rede		
V_{nom}	440 V	S_{cc} 100 kVA f_{reqnom} 60 Hz

Conversores		
f_{pwm}	10 kHz	C_{CC} 1000 μ F L_{rede} 50 mH

O controle do conversor ligado à rede foi implementado conforme o diagrama da Fig. 3. Para esse controle, a tensão V_{CCnom} foi calculada a partir de (3) e, para evitar saturação da modulante usada para PWM, foi aplicado um fator, resultando em $V_{CCnom} = 1000 V$. Para atenuar as oscilações de corrente devido ao chaveamento do conversor, foi usado um filtro indutivo (L_{rede}).

Para o controle do conversor conectado ao gerador, foi considerado o diagrama da Fig. 4. A corrente de campo do GSPS foi regulada em seu valor nominal (9 A) e, para controle das correntes dq , foi considerado $I_{d,ref} = 0A$ e $I_{q,ref}$ dado pelo controlador PI de velocidade. A velocidade é regulada em um valor de referência constante, uma vez que o foco do estudo não é maximização da potência gerada. Adicionalmente, como o objetivo é análise de faltas elétricas em um GSPS de velocidade variável, o sistema mecânico não foi modelado e a potência mecânica definida diretamente.

Os controladores PI indicados nas Figs. 3 e 4 são ajustados conforme o método simétrico ótimo descrito em Quéval and Ohsaki (2012). Considerando a função de transferência do PI como (4), os valores obtidos para os ganhos K_p e K_i estão descritos na Tab. 2.

$$H_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

Tabela 2. Parâmetros dos controladores PI_n .

	PI_1	PI_2	PI_3	PI_4	PI_5	PI_6	PI_7	P
K_p	0.5	50	50	10	0.5	50	30	0.005
K_i	15	1000	1000	90	10	4800	3800	-

3.1 Definição dos casos de falta

A Fig. 5 ilustra os casos de falta considerados. Foram definidos três:

- (1) Falta monofásica próxima ao conversor ligado à rede;
- (2) Falta bifásica, sem envolvimento de Terra, próxima ao conversor ligado à rede;
- (3) Falta monofásica próxima ao conversor ligado ao gerador;

Nas simulações desses casos de falta, considerou-se que as faltas ocorreram a partir do instante $t = 1 s$ e que não houve atuação dos dispositivos de proteção pertinentes, a

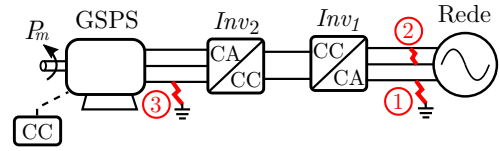


Figura 5. Diagrama simplificado das faltas elétricas consideradas.

fim de permitir análise dos regimes transitório e permanente devido à cada falta. Os três casos de faltas foram realizados adotando resistência de falta igual a $1m\Omega$. Para facilitar a comparação entre os efeitos de cada um dos casos, estes foram realizados com as mesmas condições de operação: $P_{mec} = 5000W$ e $\omega_{ele,ref} = 377rad/s$. Com relação ao aterramento, considerou-se que gerador e conversores estão isolados.

4. RESULTADOS

A partir da simulação descrita na seção anterior, foram obtidas as formas de onda e variáveis de controle dos conversores e gerador.

4.1 Controle

Primeiramente foram realizados testes de variação de potência mecânica aplicada no GSPS para avaliar o comportamento do sistema de controle do conversor *back-to-back*. A Fig. 6 ilustra as respostas obtidas para os controles de velocidade e correntes dq do conversor conectado ao gerador. Nota-se que, a cada variação de potência mecânica, a corrente I_q do gerador deve mudar para regular a velocidade no valor de referência dado. A corrente I_q negativa indica um fluxo de potência ativa no sentido gerador \rightarrow conversor.

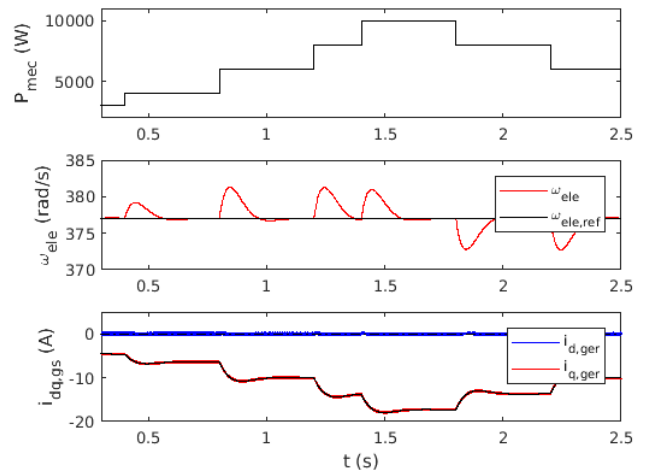


Figura 6. Respostas dos controles do conversor do gerador para variações de potência mecânica.

Por outro lado, a Fig. 7 ilustra as respostas do controle do conversor ligado à rede e o fluxo de potência ativa resultante dos degraus de potência mecânica e das ações dos controles. A cada variação de potência mecânica, a tensão V_{CC} é perturbada e, para mantê-la regulada no valor definido como referência, os controles das correntes

dq atuam para alterar o fluxo de potência ativa entre conversor e rede. A potência entregue à rede é menor que a mecânica aplicada devido às perdas no gerador, conversores e filtros.

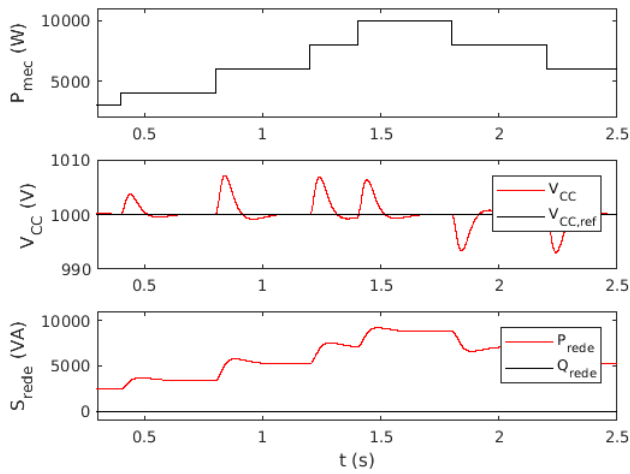


Figura 7. Controle de V_{CC} e fluxo de P e Q no conversor da rede.

4.2 Caso 1

O primeiro caso consiste em uma falta monofásica no lado CA do conversor ligado à rede, mais especificamente, entre o filtro L_{rede} e o ponto de conexão com o equivalente da rede. A partir dos resultados apresentados na Fig. 8, é possível concluir que esse tipo de falta não perturba a velocidade e as correntes dq do gerador. Em contrapartida, a corrente de neutro do conversor NPC ligado ao gerador ($I_{np,gs}$) muda, antes da ocorrência da falta ela tem a característica descrita na seção 2.2 e, após, surgem componentes harmônicas além da terceira. Essa mudança em $I_{np,gs}$ deve-se ao efeito da falta na tensão V_{CC} , apresentada na Fig. 9.

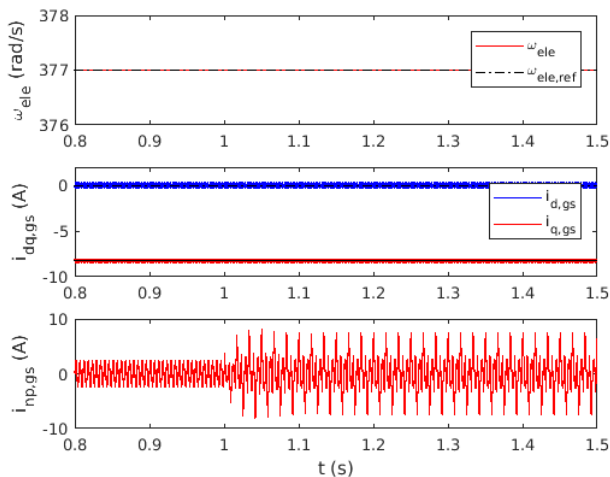


Figura 8. Velocidade do gerador e correntes do respectivo conversor NPC durante o primeiro caso de falta.

A Fig. 9 apresenta os efeitos da falta considerada nas variáveis medidas do conversor conectado à rede. A falta causa

uma perturbação na tensão V_{CC} , de forma que o controle atua para regular esta em seu valor nominal, e oscilações com frequência igual ao dobro da componente fundamental da rede. A componente de segunda harmônica também é verificada nas correntes dq da rede. Assim como para o conversor do gerador, a corrente $I_{np,rede}$ também foi afetada pela falta.

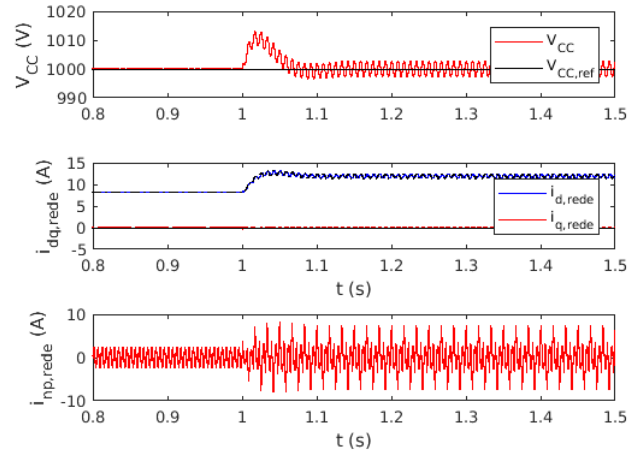


Figura 9. V_{CC} e correntes do conversor NPC ligado à rede durante o primeiro caso de falta.

4.3 Caso 2

No segundo caso foi considerada uma falta bifásica, sem envolvimento com Terra, no mesmo local do primeiro caso. Como mostra a Fig. 10, essa condição de falta também não afeta a velocidade e correntes dq do gerador. Como no primeiro caso, a corrente $I_{np,gs}$ é afetada pelas oscilações na tensão V_{CC} .

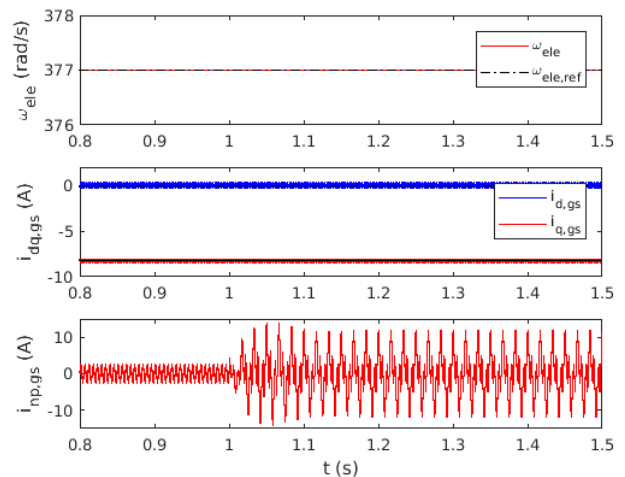


Figura 10. Velocidade do gerador e correntes do respectivo conversor NPC durante o segundo caso de falta.

As perturbações nas variáveis medidas do conversor ligado à rede foram semelhantes às verificadas no primeiro caso, mas com maiores magnitudes, como mostra a Fig. 11. As oscilações nas tensões e correntes também têm comportamento de segunda harmônica da frequência da rede mas as

amplitudes dessas são maiores que no primeiro caso, uma vez que a falta é bifásica.

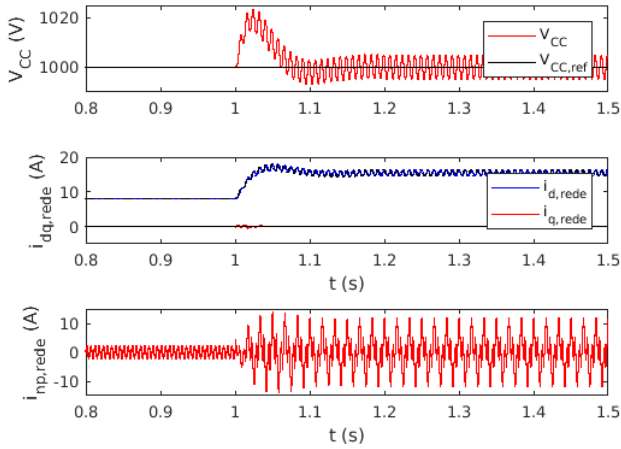


Figura 11. V_{CC} e correntes do conversor NPC ligado à rede durante o segundo caso de falta.

4.4 Caso 3

Diferente dos dois primeiros casos, o terceiro consiste em uma falta no lado CA do conversor ligado ao gerador. Neste caso, como mostra a Fig. 12, a velocidade do gerador é perturbada e o controle atua para mantê-la no valor de referência, aumentando a corrente I_q . Além disso, surgem componentes harmônicas de segunda ordem nas correntes dq do gerador, que refletem em oscilações de mesma ordem na velocidade.

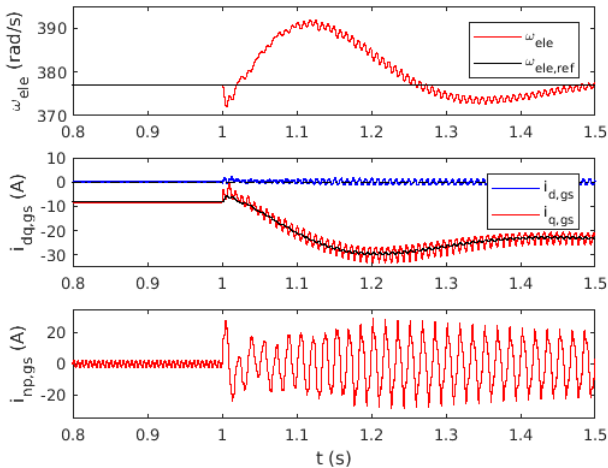


Figura 12. Velocidade do gerador e correntes do respectivo conversor NPC durante o terceiro caso de falta.

A corrente $I_{np,gs}$ tem comportamento distinto do verificado para os dois primeiros casos. Nota-se que, antes da falta, esta tem apenas a componente de terceira harmônica e, após a falta, passa a ter a primeira harmônica como predominante.

As alterações na velocidade e correntes dq do gerador afetam o comportamento do conversor ligado à rede, como

ilustrado na Fig. 13. Nota-se que a tensão V_{CC} é perturbada, uma vez que o fluxo de potência ativa proveniente do gerador muda, e isso faz com que o controle atue mudando as correntes dq da rede. É importante destacar que, devido ao local em que a falta ocorre, a corrente I_q do gerador aumenta para 30 A e a corrente I_d da rede é reduzida, uma vez que parte da potência gerada é dissipada na falta no lado do gerador. V_{CC} e $I_{dq,rede}$ também apresentam oscilações com característica de segunda harmônica. A corrente $I_{np,rede}$ tem comportamento idêntico ao da $I_{np,gs}$.

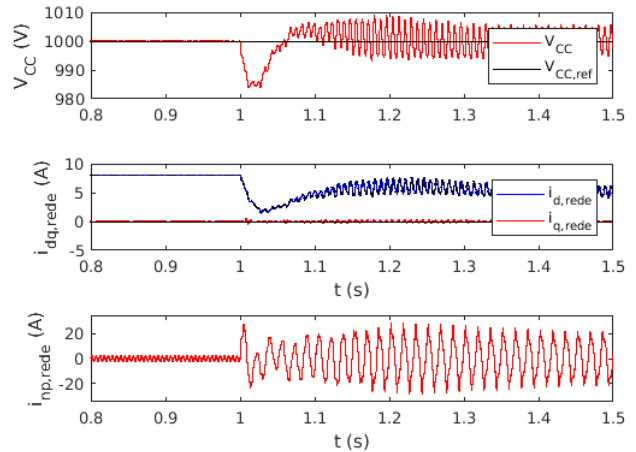


Figura 13. V_{CC} e correntes do conversor NPC ligado à rede durante o terceiro caso de falta.

Os dois primeiros casos considerados mostram que, faltas monofásicas no lado rede afetam diretamente a tensão no barramento CC, as correntes dq e a corrente I_{np} do conversor ligado à rede. Por outro lado, a velocidade e correntes dq do gerador não são alteradas, o que mostra que faltas no lado da rede que não impedem o fluxo de potência (como fazem as faltas trifásicas) não se manifestam no gerador. Com exceção para a corrente $I_{np,gs}$, que tem comportamento idêntico ao da $I_{np,rede}$, a qual é alterada devido às oscilações em V_{CC} . O mesmo resultado foi verificado para uma falta bifásica sem envolvimento com Terra, com a diferença nas magnitudes das perturbações e oscilações.

Para o terceiro caso, no qual a falta aconteceu no lado do gerador, foi verificado comportamento distinto dos casos anteriores. A ocorrência da falta monofásica afetou diretamente a velocidade e correntes do gerador. Além do aumento em I_q surgiram oscilações com o dobro da frequência elétrica em que o gerador opera, estas também apareceram na velocidade. Estas oscilações devem-se ao desequilíbrio provocado pela falta, causando componentes de sequência negativa no torque eletromagnético do gerador, as quais se manifestam como segunda harmônica. Diferentemente dos primeiros casos, a falta no lado do gerador também provoca perturbações e oscilações no conversor ligado à rede, as quais se manifestam na tensão CC e correntes dq da rede.

Em relação às correntes $I_{np,gs}$ e $I_{np,rede}$, nota-se que a falta do lado do gerador causa uma componente de primeira harmônica, sendo que sem a falta a terceira harmônica é a dominante nestas correntes. Por outro lado, a mudança não é tão expressiva para faltas na rede. Isso indica que

o nível dessa componente nas correntes I_{np} podem servir como indicativo do lado em que falta ocorre.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs uma análise sobre geradores síncronos de velocidade variável controlados por conversores de três níveis quando estes são submetidos a faltas elétricas no lado da rede e do gerador. Ressalta-se que o sistema de controle dos conversores afeta o comportamento geral do sistema, sendo que neste caso foram adotados o controle orientado a tensão para o da rede e orientado ao campo para o gerador, ambos implementados em coordenadas dq usando controladores tipo PI. Apesar de existirem outras estratégias de controle, estas são as mais encontradas em publicações na área.

De forma geral, nota-se que a ocorrência das faltas elétricas consideradas causam perturbações nas variáveis medidas do gerador e dos conversores. Além do mais, as mudanças no circuito resultante das faltas consideradas causam desequilíbrios, que por sua vez geram oscilações com característica de segunda harmônica nas tensões e correntes. Para as faltas no lado da rede, oscilações terão frequência igual a $120Hz$, enquanto para faltas no lado do gerador, será o dobro da frequência elétrica em que o gerador estiver operando.

Essa análise pode ser realizada para outros tipos de geradores de velocidade variável a fim de mostrar como diferentes topologias respondem aos casos de faltas elétricas. Além disso, podem ser avaliados sistemas de controle e proteção específicos para minimizar os danos que as faltas possam causar.

AGRADECIMENTOS

A realização desse trabalho foi possível graças a estrutura disponibilizada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), bem como ao financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo: 456517/2014-6) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo: 2017/09554-0). Agradecemos o suporte fornecido.

REFERÊNCIAS

Abbes, M. and Belhadj, J. (2012). New control method of a robust NPC converter for renewable energy sources grid connection. *Electric Power Systems Research*, 88, 52–63. doi:10.1016/j.epsr.2012.01.018.

Attaianesi, C., Di Monaco, M., and Tomasso, G. (2010). Three-Phase Three-Level active NPC converters for high power systems. *SPEEDAM 2010 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 204–209. doi:10.1109/SPEEDAM.2010.5542195.

Boldea, I. (2016). *Synchronous Generators*. 1. doi:10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004.

Boldea, I. (2017). Electric Generators and Motors: An Overview. *CES transactions on electrical machines and systems*, 1(1), 3–14. doi:10.23919/TEMS.2017.7911104.

Friedli, T., Kolar, J.W., Rodriguez, J., and Wheeler, P.W. (2012). Comparative evaluation of three-phase AC-AC matrix converter and voltage DC-link back-to-back converter systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(12), 4487–4510. doi:10.1109/TIE.2011.2179278.

Hang, J., Zhang, J., Cheng, M., and Huang, J. (2015). Online Interturn Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Machine Using Zero-Sequence Components. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 6731–6741. doi:10.1109/TPEL.2015.2388493.

Hasan, N.S., Rosmin, N., Osman, D.A.A., and Musta'amal@Jamal, A.H. (2017). Reviews on multilevel converter and modulation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(May), 163–174. doi:10.1016/j.rser.2017.05.163.

Jeong, H., Moon, S., and Kim, S.W. (2017). An Early Stage Interturn Fault Diagnosis of PMSMs by Using Negative-Sequence Components. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7), 5701–5708. doi:10.1109/TIE.2017.2677355.

Jung, K. and Suh, Y. (2019). Analysis and Control of Neutral-Point Deviation in Three-Level NPC Converter under Unbalanced Three-Phase AC Grid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5), 4944–4955. doi:10.1109/TIA.2019.2923379.

Kolar, J.W., Friedli, T., Rodriguez, J., and Wheeler, P.W. (2011). Review of three-phase PWM AC-AC converter topologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(11), 4988–5006. doi:10.1109/TIE.2011.2159353.

Letcher, T.M. (2017). Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. In T.M. Letcher (ed.), *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, chapter Wind Turbi, 1–600. Elsevier, London, 1st edition.

Malakondareddy, B., Senthil Kumar, S., Ammasai Gounden, N., and Anand, I. (2019). An adaptive PI control scheme to balance the neutral-point voltage in a solar PV fed grid connected neutral point clamped inverter. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 110(October 2018), 318–331. doi:10.1016/j.ijepes.2019.03.012.

Mihet-Popa, L., Groza, V., Prostean, G., Filip, I., and Szeidert, I. (2007). Variable speed wind turbines using cage rotor induction generators connected to the grid. *2007 IEEE Canada Electrical Power Conference, EPC 2007*, 8–13. doi:10.1109/EPC.2007.4520298.

Obeidat, F., Li, Y., and Xu, L. (2012). The application of three level NPC converter for wind power generator. *Conference Proceedings - 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, IPEMC 2012*, 3, 1597–1602. doi:10.1109/IPEMC.2012.6259072.

Porru, M., Serpi, A., Marongiu, I., and Damiano, A. (2018). Suppression of DC-link voltage unbalance in three-level neutral-point clamped converters. *Journal of the Franklin Institute*, 355(2), 728–752. doi:10.1016/j.jfranklin.2017.11.039.

Quéval, L. and Ohsaki, H. (2012). Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines. In *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*,

1–6.

- Rojas, F., Cardenas, R., Kennel, R., Clare, J.C., and Diaz, M. (2017). A Simplified Space-Vector Modulation Algorithm for Four-Leg NPC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(11), 8371–8380. doi:10.1109/TPEL.2016.2618061.
- Seixas, M., Melício, R., and Mendes, V.M. (2014). Offshore wind turbine simulation: Multibody drive train. Back-to-back NPC (neutral point clamped) converters. Fractional-order control. *Energy*, 69, 357–369. doi:10.1016/j.energy.2014.03.025.
- Selvaraj, R., Desingu, K., Chelliah, T.R., Khare, D., and Bharatiraja, C. (2018). Fault Tolerant Operation of Parallel-Connected 3L-Neutral-Point Clamped Back-to-Back Converters Serving to Large Hydro-Generating Units. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 5429–5443. doi:10.1109/TIA.2018.2851581.
- Teodorescu, R., Liserre, M., and Rodríguez, P. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley and Sons.
- Umbría, F., Gordillo, F., Gómez-Estern, F., Salas, F., Portillo, R.C., and Vázquez, S. (2014). Voltage balancing in three-level neutral-point-clamped converters via Luenberger observer. *Control Engineering Practice*, 25(1), 36–44. doi:10.1016/j.conengprac.2013.12.003.
- Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., and Kouro, S. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. John Wiley and Sons.
- Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P.C., Kouro, S., and Narimani, M. (2015). High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. *Proceedings of the IEEE*, 103(5), 740–788. doi:10.1109/JPROC.2014.2378692.
- Yazdani, A. and Iravani, R. (2006). A neutral-point clamped converter system for direct-drive variable-speed wind power unit. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 596–607. doi:10.1109/TEC.2005.860392.
- Yazdani, A. and Iravani, R. (2010). *VOLTAGE-SOURCED CONVERTERS IN POWER SYSTEMS - Modeling, Control, and Applications*. Wiley.
- Zhang, Z., Wang, F., Wang, J., Rodríguez, J., and Kennel, R. (2017). Nonlinear Direct Control for Three-Level NPC Back-to-Back Converter PMSG Wind Turbine Systems: Experimental Assessment with FPGA. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(3), 1172–1183. doi:10.1109/TII.2017.2678500.
- Zheng, T.Y., Cha, S.T., Crossley, P.A., and Kang, Y.C. (2011). Protection algorithm for a wind turbine generator based on positive- and negative-sequence fault components. *APAP 2011 - Proceedings: 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2, 1115–1120. doi:10.1109/APAP.2011.6180548.