

Modelagem do Inversor PWM Trifásico no Ambiente Computacional DIgSILENT PowerFactory® para Análise de Redes Elétricas com Geração Distribuída

Igleyce K. A. Silva*. Yuri P. M. Rodriguez**. Clivaldo S. de Araújo***. Frank W. Rodrigues****. Thommas K. S. Flores*****.

*Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil (Tel: 55-83-98731-7596; e-mail: igleyce.silva@cear.ufpb.br).

**Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil (Tel: 55-83-99813-2085; e-mail: molina.rodriguez@cear.ufpb.br).

***Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil (Tel: 55-83-98869-6003; e-mail: clivaldo@cear.ufpb.br).

****Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil (Tel: 55-89-98112-7639; e-mail: frank.rodrigues@cear.ufpb.br).

*****Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil (Tel.: 55-83-99931-3473; e-mail: thommas.flores@cear.ufpb.br).

Abstract: This article presents an inverter control model in DIgSILENT PowerFactory® for analyzing the effects of distributed generation sources (DG) in the distribution network. A control model of this inverter was designed considering the "Composite Model" block, which consists of slots for controllers or standard elements that can be assigned ('Common Models') within a dynamic system. Thus, the use of this tool allows a very detailed analysis of the dynamic behavior of the system, allowing the control of its variables. To apply to a large system, the design of controllers for the power system was carried out and was implemented in the multimachine system. Analysis of the short circuit and load exchange were performed and the numerical results are presented and discussed to demonstrate the applicability of the proposed inverter control modeling in large systems.

Resumo: Este artigo apresenta a modelagem do controle do inversor no DIgSILENT PowerFactory® para análise dos efeitos das fontes de geração distribuída (GD) na rede de distribuição. A modelagem do controle deste inversor foi projetada considerando o bloco "Composite Model", que consiste em slots aos quais controladores ou elementos predefinidos podem ser atribuídos ('Common Models') dentro de um sistema dinâmico. Assim, o uso desta ferramenta permite uma análise muito detalhada do comportamento dinâmico do sistema, permitindo o controle de suas variáveis. Para aplicar em um sistema de grande porte, foi realizado o projeto dos controladores para o sistema de energia e foi implementado no sistema multimáquinas. Análises da comutação de curto-circuito e da carga foram realizadas e os resultados numéricos são apresentados e discutidos para demonstrar a aplicabilidade da modelagem de controle do inversor proposta em sistemas de grande porte.

Keywords: Inverter type voltage source; LCL filter; Distributed generation; Control; DIgSILENT; Phase-Locked Loop.

Palavras-chaves: Inversor tipo fonte de tensão; Filtro LCL; Geração distribuída; Controle; DIgSILENT; Malha de captura de fase

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico possibilitou a inclusão de fontes de energia alternativas na geração de energia elétrica, o que tem provocado nos últimos anos mudanças importantes nas características dos sistemas elétricos de potência, mantendo uma tendência de transformação dos sistemas de geração centralizada em geração distribuída (GD) (Azevedo, 2011).

A rápida expansão das unidades de geração distribuída ocasiona a aparição de alguns efeitos prejudiciais, que têm um impacto crescente na qualidade de energia do sistema de distribuição e que devem ser considerados, tais como mudanças nos perfis de tensão, aumento das correntes de curto-circuito, perda da coordenação das proteções, problemas de estabilidade, entre outros. Dessa forma, é de grande importância a análise do comportamento desses sistemas.

As fontes de energia renováveis são normalmente conectadas à rede através de inversores tipo fonte de tensão (VSI – *Voltage Source Inverters*) com modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*). Os inversores conectados ao sistema de distribuição são classificados de acordo com os objetivos de controle (por exemplo, controle de tensão, etc.). A utilização destes inversores ligados à rede possui muitas vantagens, porém a forma de onda da tensão gerada por estes difere de um sistema senoidal convencional para uma forma de onda de três ou mais níveis, introduzindo na rede um elevado conteúdo de distorção harmônica de alta ordem que deteriora a qualidade da energia e pode causar ressonância harmônica entre a impedância de saída do inversor e a impedância da rede. Além disso, a utilização dos inversores ligados à rede pode perturbar outros equipamentos sensíveis na rede e pode produzir perdas. Portanto, torna-se necessária a instalação de filtros apropriados entre o inversor de energia e a rede. Neste artigo são utilizados filtros

passivos LCL (indutor – capacitor indutor) para filtrar as harmônicas de alta frequência. Dessa forma, para modelar com precisão os efeitos em relação à estabilidade da rede e à qualidade da energia que esses equipamentos podem provocar na rede, são necessários modelos apropriados dos inversores (Hackel, et al., 2015).

Tratando-se dos sistemas de geração de energia distribuída solar, estes apresentam como desvantagem sua baixa eficiência, visto sua baixa capacidade de converter energia solar em energia elétrica, além da grande dificuldade em controlar esses sistemas, desse modo a sua conexão com a rede da concessionária pode levar à instabilidade do sistema ou até mesmo ao colapso, caso esses sistemas não sejam controlados adequadamente. Portanto, nota-se a importância do papel do controle em sistemas de geração distribuída (Blaabjerg, et al., 2006).

Neste artigo é realizada a modelagem do controle do inversor através da implementação do bloco de controle de corrente, do PLL (*Phase-Locked Loop*) e do filtro LCL. A utilização de forma correta desse controle proporciona o funcionamento mais adequado dos sistemas de geração distribuída.

Neste trabalho é realizada a implementação de um modelo detalhado do inversor no sistema de potência de nove barras do livro do Anderson (Anderson & Fouad, 1994), utilizando o software de simulação DiGSILENT PowerFactory®, que é capaz de simular o comportamento dinâmico de sistemas e modelar a rede elétrica com detalhes. Dessa forma, neste trabalho foi realizado o projeto do controlador de corrente para um sistema multimáquina, bem como é analisado o comportamento do sistema e a atuação do controle quando submetido a curtos-circuitos e ao chaveamento de carga.

2. APLICAÇÃO DO CONTROLE DO INVERSOR EM SISTEMAS DE GRANDE PORTE

O esquema geral de controle do VSI é mostrado na Fig. 1. O esquema é chamado “*Composite Frame*” no programa de simulação e o seu funcionamento ocorre de forma que dois *slots* de medição são utilizados. Um desses blocos está medindo a corrente de fase que flui através do indutor do lado da rede (L_2) e as transforma instantaneamente em valores de quadratura de duas fases, que são frequentemente chamadas de quadro de referência $\alpha\beta$ ou xy . No DiGSILENT, a componente α ou x é nomeado por r , referindo-se a um valor real, e o componente β ou y é chamado de componente i , referindo-se a ele como um valor imaginário (Hackel, et al., 2015). Através do bloco “Corrente xy para dq ”, as componentes ir e ii das correntes medidas no indutor L_2 são transformadas em componentes de corrente de eixo direto e quadratura, para posteriormente serem utilizadas no controle de corrente.

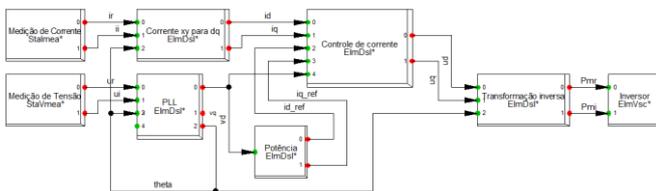


Fig. 1 Esquema da estrutura geral de controle do VSI em DiGSILENT.

A tensão é medida no barramento chamado “*Grid*”, mostrado na Fig. 2, e transformada instantaneamente no quadro xy (isto é, ri). Essas quantidades são convertidas no referencial rotativo dq através de um bloco interno ao *slot* “PLL”. O PLL sincroniza o quadro de referência com a tensão da rede, enquanto o *slot* “Potência” calcula as correntes id e iq de referência para o fluxo de potência ativo e reativo desejado. Finalmente, o controlador de corrente produz as tensões requeridas, e os índices de modulação para o *slot* “Inversor” são obtidos pela transformação inversa de Park. Esses índices de modulação controlam os chaveamentos no VSI (Hackel, et al., 2015).

Para simplificar os cálculos no interior do controlador e conseguir uma regulação PI com erro de estado estacionário nulo, os componentes ri são convertidos na estrutura de referência rotativa dq usando a transformação estacionária que é descrita por (1) para correntes. A mesma transformação é aplicada também para tensões, como mostrado em (2).

$$\begin{aligned} i_d &= i_r \cos(\theta) + i_i \sin(\theta) \\ i_q &= i_i \cos(\theta) - i_r \sin(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u_d &= u_r \cos(\theta) + u_i \sin(\theta) \\ u_q &= u_i \cos(\theta) - u_r \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

Onde θ é o ângulo instantâneo entre a tensão da rede e o referencial rotatório calculado pelo PLL. A componente zero da transformação de Park é desprezada, já que nem os pontos em estrela dos capacitores nem a rede externa estão conectados à terra e, portanto, as correntes das três fases somam-se sempre para zero.

2.1 Projeto do controlador PI do PLL

Conforme o projeto do controlador descrito em (Gomes, 2007), tem-se que a função de transferência de malha aberta do sistema PLL (controlador PI) é descrita em (3).

$$FTMA_{PLL}(s) = \frac{k_i + k_p s}{s} \quad (3)$$

Onde k_p e k_i são os ganhos proporcional e integral do controlador.

As equações (4) e (5) mostram o cálculo do módulo e da fase da $FTMA_{PLL}(s)$, respectivamente, para ω igual a ω_c (frequência de cruzamento).

$$\left| \frac{k_i + jk_p \omega_c}{(j\omega_c)^2} \right| = 1 \quad (4)$$

$$\angle \left(\frac{k_i + jk_p \omega_c}{(j\omega_c)^2} \right) = -(180^\circ - MF) \quad (5)$$

Onde MF é a margem de fase desejada. Resolvendo (4) e (5) obtêm-se (6) e (7).

$$\omega_c^4 - k_p^2 \omega_c^2 - k_i^2 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{k_p \omega_c}{k_i} = \tan(MF) \quad (7)$$

Os valores para a frequência de corte e para a margem de fase foram arbitrados em valores próximos aos correspondentes destas variáveis para o filtro LCL projetado. Dessa forma, utilizando estes valores obtêm-se os ganhos k_p e k_i .

2.2 Projeto dos controladores PI do controle de corrente

Os ganhos do controlador PI podem ser calculados definindo-se a largura de banda do controlador ω_b e a razão de amortecimento do sistema ζ utilizando-se (8) e (9) (Paukner, 2016).

$$k_p = \frac{2\zeta\omega_b(L_1 + L_2)}{\sqrt{2\zeta^2 + 1} + \sqrt{(1 + 2\zeta^2)^2 + 1}} \quad (8)$$

$$k_i = \frac{\omega_b^2(L_1 + L_2)}{2\zeta^2 + 1 + \sqrt{(1 + 2\zeta^2)^2 + 1}} \quad (9)$$

Este método de controle pode ser utilizado tanto para o controle do inversor conectado à rede com filtro L, quanto com filtro LCL, quando a largura de banda for similar para ambos os casos (Paukner, 2016).

Para o cálculo da largura de banda do controlador foram utilizados os critérios estabelecidos em (Dannehl, et al., 2009), que define que a largura de banda é calculada por (10).

$$\omega_b = \frac{\omega_c}{5} \quad (10)$$

Esse valor é considerado o máximo atingível para cada frequência de controle do sistema (Dannehl, et al., 2009). Sabendo que a frequência de controle deve variar de acordo com (11):

$$2 * \omega_{res} < \omega_c < 4 * \omega_{res} \quad (11)$$

Adotando o máximo valor possível para ω_c , calcula-se então o valor da largura de banda.

2.3 Bloco de controle “Potência”

No bloco “Potência” são calculadas as componentes direta e em quadratura da corrente de referência. Essas correntes são calculadas através de (12) e (13).

$$i_{d_ref} = \frac{P^*}{v_{gd}} \quad (12)$$

$$i_{q_ref} = -\frac{Q^*}{v_{gd}} \quad (13)$$

Sendo P^* e Q^* são as potências ativa e reativa de referência, respectivamente.

2.3 Bloco de controle “Transformação inversa”

No bloco “Transformação inversa” as tensões representadas no eixo de referência rotativo dq que são produzidas pelo controlador de corrente são convertidas de volta ao quadro estacionário ri e assim os sinais de modulação P_{mr} e P_{mi} para o “Inversor” estão prontos. A tensão de saída do VSI na frequência fundamental é igual a (14) de acordo com (DIgSILENT, 2008).

$$u_{ACr} = \frac{\sqrt{3}P_{mr}U_{DC}}{2\sqrt{2}} \quad (14)$$

$$u_{ACi} = \frac{\sqrt{3}P_{mi}U_{DC}}{2\sqrt{2}}$$

Com essas equações é possível calcular os valores de P_{mr} e P_{mi} . Esses valores são então aplicados nos parâmetros do inversor.

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação e análise para o estudo de caso, onde o VSI é implementado no sistema de nove barras (Anderson & Fouad, 1994), com a aplicação do controle. São analisados os resultados para os casos de ocorrência de curto-circuito e chaveamento de carga.

Os valores nominais dos inversores utilizados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações do grupo de inversores

| | |
|---|------|
| V_{CA} (V) | 2300 |
| V_{CC} (V) | 4000 |
| Potência nominal do grupo de inversores (MVA) | 128 |
| Potência nominal de cada inversor (MW) | 2,5 |
| Número de inversores | 34 |
| Ponto de operação da potência ativa (MW) | 85 |

Para que o VSI apresente como valor nominal a potência do grupo de inversores de 128MVA, é necessário utilizar trinta e sete inversores em paralelo, dado que a potência ativa nominal do inversor adotado é de 2,5MW. O valor da potência ativa (85MW) corresponde ao valor que o grupo de inversores deve ser capaz de fornecer no barramento *Grid* da Fig. 2, onde está o gerador 3 e onde é conectado o filtro LCL e o VSI. O *ripple* adotado para o projeto do filtro foi de 10%.

Os valores do filtro LCL projetado de acordo com (Reznik, A. et al., 2016) utilizando dados do sistema são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do filtro LCL para o sistema de grande porte

| | | |
|-----------|--------------------------------|----------------|
| L_1 | Indutância do lado do inversor | 44,2 μ H |
| L_2 | Indutância do lado do grid | 4,8 μ H |
| C | Capacitor | 2,13mF |
| f_{res} | Frequência de ressonância | 1657Hz |
| R_d | Resistor de amortecimento | 0,015 Ω |

Na Fig. 2 é apresentado o sistema utilizado e cada um dos eventos aplicados é especificado. Também é possível verificar barramentos onde são realizados os curtos-circuitos e o chaveamento de carga.

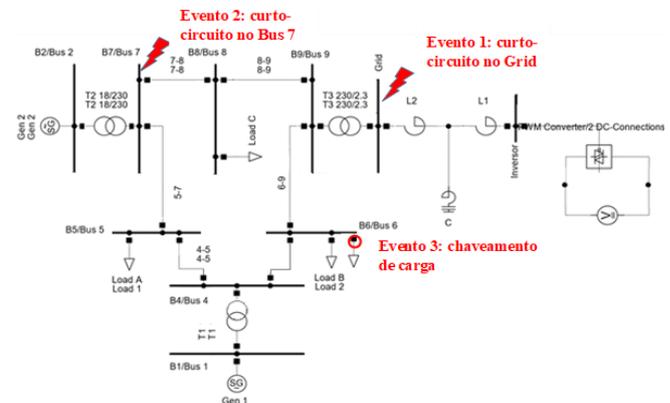


Fig. 2 Sistema com localização dos eventos aplicados.

3.1 Resultados quando aplicado um curto-circuito no barramento "Grid"

Um curto-circuito trifásico é aplicado no barramento "Grid", dessa forma é possível observar o comportamento do sistema quando ocorre um curto-circuito próximo ao VSI. O curto-circuito foi aplicado no regime estacionário, no tempo $t = 3s$ e foi retirado no tempo $t = 3,005s$. O funcionamento do sistema quando aplicado esse evento é verificado a seguir. O comportamento da potência no indutor L_2 , ou seja, a potência fornecida pelo VSI é apresentada na Fig. 3.

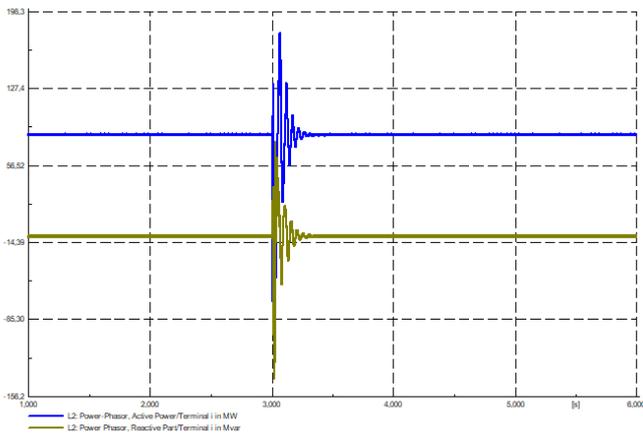


Fig. 3 Potências ativa e reativa injetadas na rede.

Ocorre um pico de potência no instante em que é aplicado o curto-circuito e no instante em que é retirado o curto-circuito a potência passa a ter uma menor oscilação e, em seguida, o sistema consegue estabilizar apesar da ocorrência da falta, atingindo o regime permanente em um intervalo de tempo curto. Portanto, o sistema está operando da maneira correta, bem como os controladores implementados.

Na Fig. 4 são verificadas as correntes i_d e i_{d_ref} , que são a corrente de eixo direto, proveniente do controle, e a corrente de referência que a corrente i_d deve seguir, respectivamente.

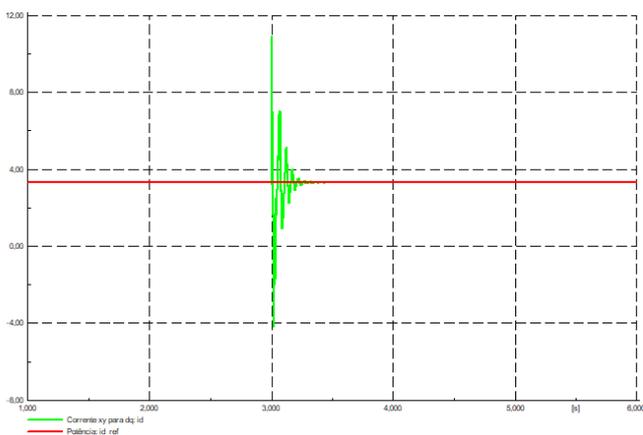


Fig. 4 Operação do controlador de corrente.

A corrente do controlador apresenta uma oscilação após a ocorrência do curto-circuito, porém atinge o valor de referência em poucos milissegundos, o que demonstra o funcionamento adequado do controlador projetado.

Na Fig. 5 é mostrado o gráfico da corrente que circula pelo indutor L_2 . A corrente apresenta uma oscilação de curta

duração de tempo, além disso sua forma de onda estabiliza logo após alguns milissegundos.

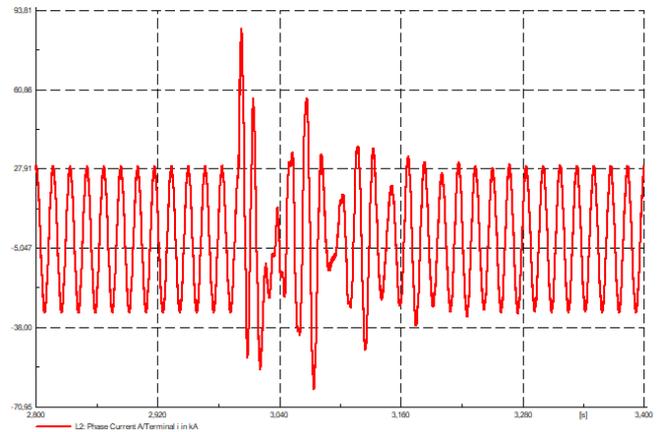


Fig. 5 Corrente na fase A no indutor medida no lado do grid.

A Fig. 6 exibe as potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2. Nota-se que as potências apresentam picos em seus valores, especialmente a potência do gerador 2, mas que o regime permanente é alcançado, apresentando os valores esperados, além da oscilação de potência durar um pequeno intervalo de tempo.

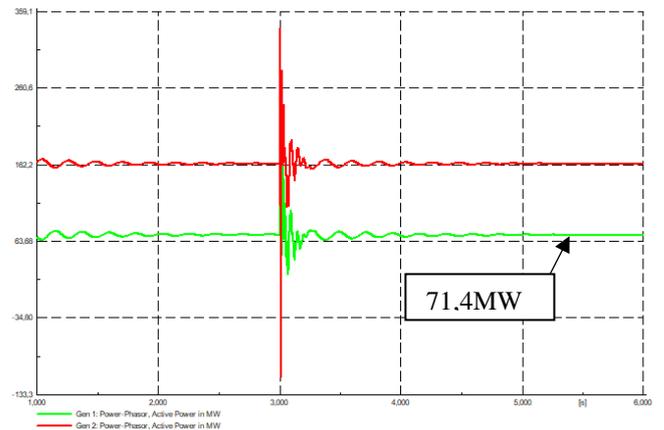


Fig. 6 Potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2.

3.2 Resultados quando aplicado um curto-circuito no barramento "Bus 7"

Um segundo curto-circuito trifásico foi aplicado no barramento "Bus 7", possibilitando a análise do comportamento do sistema quando aplicado um curto-circuito em um barramento distante do VSI. O curto-circuito foi aplicado após o sistema ter atingido o regime estacionário, no tempo $t = 3s$ e foi retirado no tempo $t = 3,005s$. O funcionamento do sistema quando aplicado esse evento é mostrado a seguir. O comportamento da potência no indutor L_2 , ou seja, a potência fornecida pelo VSI é mostrada na Fig. 7.

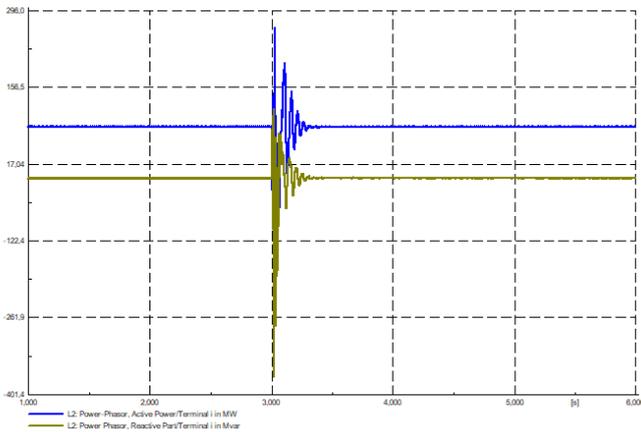


Fig. 7 Potências ativa e reativa injetadas na rede.

É possível observar que ocorre um pico de potência no instante em que é aplicado o curto-circuito e uma oscilação durante um curto intervalo de tempo, em seguida o sistema consegue estabilizar apesar da ocorrência da falta, atingindo o regime permanente. Portanto, o sistema está operando da maneira correta, bem como os controladores implementados.

A Fig. 8 mostra as correntes i_d e i_{d_ref} , que são a corrente de eixo direto, proveniente do controle, e a corrente de referência que a corrente i_d deve seguir, respectivamente.

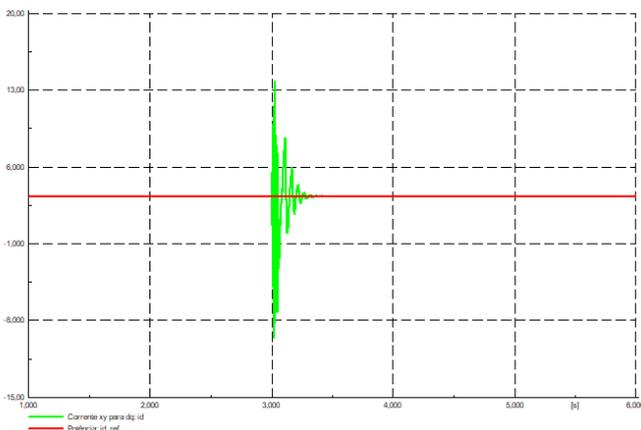


Fig. 8 Operação do controlador de corrente.

Apesar da oscilação no instante de aplicação do curto-circuito a corrente atinge o valor de referência em poucos milissegundos, demonstrando o funcionamento adequado do controlador projetado.

Na Fig. 9 é mostrado o gráfico da corrente que circula pelo indutor L_2 . A corrente apresenta uma oscilação de curta duração de tempo, além disso sua forma de onda estabiliza logo após alguns milissegundos.

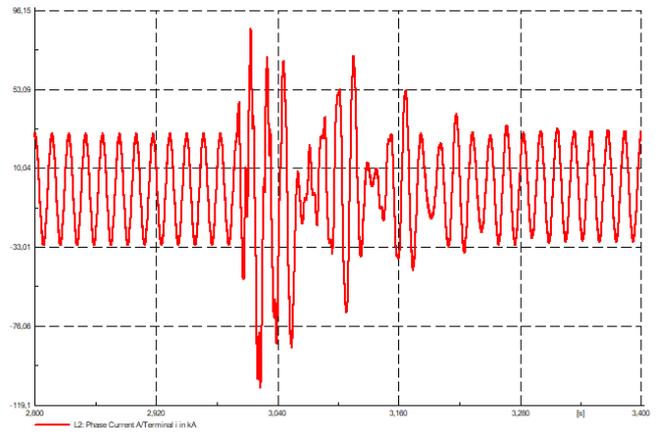


Fig. 9 Corrente na fase A no indutor medida no lado do grid.

A Fig. 10 exibe as potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2. É possível observar que as potências apresentam picos em seus valores, especialmente a potência do gerador 2, mas que os valores de regime permanente são atingidos normalmente, além da oscilação de potência durar um pequeno intervalo de tempo.

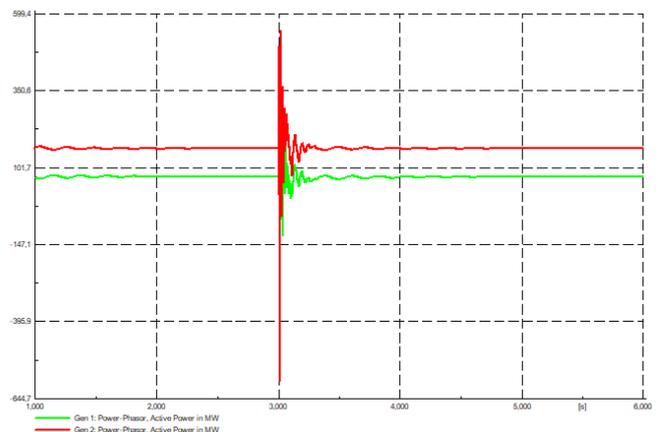


Fig. 10 Potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2.

3.3 Resultados quando há chaveamento de carga

Para realizar esta simulação, uma carga foi adicionada ao barramento 6, cujos valores correspondem a 10% da carga "Load B" (Load B: 90MW; 30MVar), localizada no mesmo barramento. A carga está acoplada ao sistema quando, no tempo $t = 4s$, ela é retirada do sistema por um período de 1s, posteriormente esta carga retorna ao sistema. Em uma situação real este chaveamento pode representar a queda de energia em determinada área, retirando a carga do sistema, e o posterior retorno do abastecimento, implementando a carga novamente.

Na Fig. 11 é mostrado o comportamento das potências ativas nos geradores 1 e 2 quando ocorre esta variação de carga. O comportamento do VSI não apresentou alterações relevantes, visto a distância entre ponto onde ocorre o chaveamento de carga e o ponto onde são medidos os parâmetros para a realização do controle.

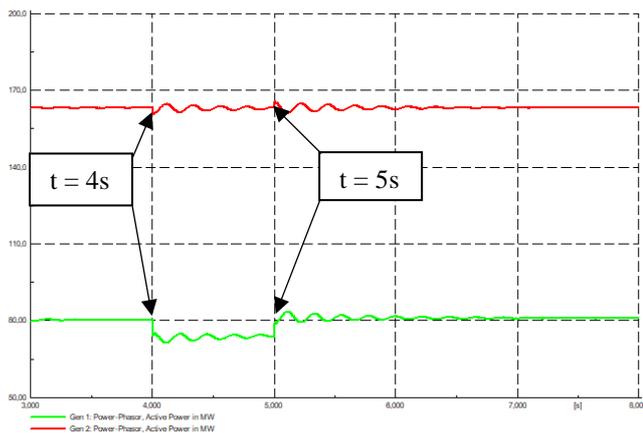


Fig. 11 Potências ativas dos geradores 1 e 2.

Nota-se na Fig. 11 que as potências ativas fornecidas pelos geradores sofrem uma pequena variação quando as cargas saem do sistema. Quando a carga retorna ao sistema as potências oscilam novamente e estabilizam após um pequeno intervalo de tempo. É possível observar também que a potência requerida pela carga adicionada é suprida pelo gerador 1. Tal comportamento já é esperado visto que este gerador é de referência.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma estratégia de controle VSI e sua implementação no programa de simulação DIGSILENT PowerFactory®. O modelo combina o processo fundamental de modulação de inversor com um regulador de corrente de ponta e controladores de potência ativa e reativa de nível mais alto, para criar uma representação detalhada que descreva completamente o estado estacionário do inversor e respostas transitórias a eventos de conexão de rede. O VSI foi implementado em um sistema de grande porte, utilizando o modelo do inversor PWM e analisando o comportamento desse modelo no sistema. Foram verificados os procedimentos para a realização do projeto dos controladores implementados no sistema de alta potência.

Os resultados da simulação mostram que o modelo opera com precisão suficiente nos modos transitório e estado estacionário e, portanto, é adequado para analisar os efeitos do VSI na rede. O modelo pode ser mais desenvolvido considerando as perdas de comutação e um modelo mais detalhado da rede externa.

Foi possível observar que o filtro opera de forma satisfatória, reduzindo o *ripple* da corrente do sistema para valores menores que aqueles definidos em projeto. Com a implementação do controle do VSI foi possível realizar uma análise dinâmica da operação do sistema de alta potência quando este opera com um sistema de geração fotovoltaica. Através da criação de eventos de simulação foi possível analisar o comportamento do controle, do VSI e do sistema completo quando ocorrem curtos-circuitos em um barramento próximo ao VSI e distante do VSI, respectivamente. Também foi analisada a situação de ocorrência de variação de carga, simulando as situações em que uma carga sai do sistema e posteriormente retorna. Com essas situações foi possível analisar o comportamento adequado do VSI, bem como da

operação satisfatória do controle implementado, visto que em todas as situações o sistema atinge seus valores de regime permanente em um pequeno intervalo de tempo, mesmo com a aplicação dos eventos descritos.

REFERÊNCIAS

- Anderson, M. A. & Fouad, A. A., 1994. *Power System Control and Stability*. Iowa State University Press.
- Azevedo, G. M. D. S., 2011. *Controle e operação de conversores em microrredes*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Recife: Universidade Federal de Pernambuco.
- Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M. & Timbus, A. V., 2006. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), pp. 1398-1409.
- Dannehl, J., Wessels, C. & Fuchs, F. W., 2009. Limitations of Voltage Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers With LCL Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(2), pp. 380-388.
- DIGSILENT, 2008. *PWM Converter*, s.l.: DIGSILENT TECHNICAL REFERENCE PAPER.
- Gomes, C. E. M., 2007. *Controle digital de um controlador de tensão alternada usando PLL para obtenção do sinal de referência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Hackel, K., Farkas, C. & Dán, A., 2015. *Inverter control modeling in DIGSILENT power factory to analyze the effects of DG units on the distribution grid*. s.l., s.n., pp. 1-7.
- Paukner, F. L., 2016. *Comparação do controle do inversor trifásico conectado à rede com filtro LCL considerando o amortecimento passivo e ativo*, Pato Branco: Universidade Federal do Paraná.
- Reznik, A. et al., 2016. *LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 50, n. 2, p. 1225-1232.