

Estudo do Controlador Dinâmico e Direto de Tensão (D²VC) em Diferentes Conexões com a Rede Elétrica

Arthur V. C. Martins *. Silvangela. L. Barcelos*
Robson F. S. Dias, Edson H. Watanabe**

*Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Avenida dos Portugueses, 1966, Campus Bacanga, Cep: 65080-805, São Luís - MA, Brazil (arthurvictor@outlook.com).

** Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Centro de Tecnologia, Bloco H, Sala 305, Cidade Universitária – Ilha do Fundão, Caixa Postal 68504 – Cep. 21945-970, Rio de Janeiro, Brazil

Abstract: By increasing the contribution of intermittent power sources to the power grid and connecting these sources to the Point of Common Connection (PCC) changes in the grid voltage profile, such as voltage fluctuation, compromise Electrical Power Quality (QEE) of the system. Given the capacity of the Dynamic Direct Voltage Controller (D²VC) to compensate for voltage variations, even in the face of imbalances, this paper presents a qualitative analysis in terms of the nominal capacity of the D²VC, considering different forms of connection, of the converters that compose it, to the power grid. Performance analysis of D²VC will be performed through PSCAD / EMTDC simulations.

Resumo: Mediante o aumento da contribuição de fontes intermitentes de energia à rede elétrica e à conexão destas fontes no Ponto de Conexão Comum (PCC), alterações no perfil de tensão da rede, como a flutuação de tensão, comprometem a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) do sistema. Diante da capacidade do Controlador Dinâmico e Direto de Tensão (*Dynamic Direct Voltage Controller – D²VC*) de compensar variações de tensão, mesmo diante de desbalanços, este artigo apresenta uma análise qualitativa em termos da capacidade nominal deste controlador, considerando diferentes formas de conexão, dos conversores que o compõe, com a rede elétrica. As análises de desempenho do D²VC serão realizadas por meio de simulações realizadas no programa PSCAD/EMTDC.

Keywords: Direct Voltage Control (DVC); Dynamic Direct Voltage Controller (D²VC); Distribution Grids; Intermittent Generator; Compensation Percentage.

Palavras-chaves: Controle Direto de Tensão (CDT); Sistema de Distribuição; *Dynamic Direct Voltage Controller (D²VC)*; Geração Intermitente; Percentual de Compensação.

1. INTRODUÇÃO

Impulsionado pelo crescimento econômico do país, o aumento do consumo de energia elétrica tem evoluído ao longo dos últimos anos (ANEEL, 2010). A contribuição que fontes de energia intermitentes dão ao sistema elétrico tem evoluído desde pequenos incrementos eventuais na rede elétrica até injeções significantes de potência. Este tipo cenário requer a integração destas fontes ao sistema elétrico, com níveis de tensão seguros e de acordo com os requisitos de qualidade de energia (ANEEL, 2010). A interligação de fontes intermitentes à rede elétrica, realizada no Ponto de Conexão Comum (PCC), altera o perfil de tensão da rede, ocasionando fenômenos como a flutuação de tensão (Barcelos, 2013).

Dependendo dos níveis de tensão em redes de distribuição, por conta da natureza das impedâncias das linhas (predominantemente resistivas), o perfil de tensão é fortemente influenciado diante da operação da geração intermitente associada nas proximidades do PCC (ROSAS, 2006). Dentre alternativas que podem ser adotadas para controlar a tensão no PCC de sistemas de distribuição com

geração distribuída conectada, existem as de Controle Indireto de Tensão (CIT) e as de Controle Direto de Tensão (CDT) (SILVA, et al., Kassel, 2015).

Essas alternativas de controle visam evitar a violação dos limites de tensão em conformidade com as normas IEEE Std. 1547-2003 “IEEE standart for Interconnecting Distributed Resources with Eletric Power Systems” (IEEE, 2009) e Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional”, PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2010). A tensão no PCC de um sistema de distribuição de baixa tensão, para condições normais de operação, deve estar entre 0.93 pu e 1.05 pu, em conformidade com o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2010).

Conforme mostrado por Barcelos, Dias e Watanabe (2017), através de resultados de uma análise comparativa em termos da capacidade nominal de cada equipamento considerado, nos diferentes níveis de tensão de sistemas de distribuição com linhas de distribuição, desde predominantemente resistivas ($R/X \gg 1$) a predominantemente indutivas ($R/X \ll 1$), a capacidade nominal do controlador direto de tensão foi sempre

inferior a capacidade nominal do controlador indireto de tensão.

Sabe-se da capacidade do CDT para controlar tensões no PCC de redes de distribuição de baixa tensão (Barcelos, et al., 2017) que é efetuado pelo Controlador de Tensão Direto e Dinâmico (*Dynamic Direct Voltage Controller – D²VC*). Este trabalho propõe investigar como a conexão deste controlador com a rede elétrica interfere no perfil de tensão da rede elétrica de distribuição e na determinação da capacidade nominal deste controlador. Análises de desempenho do D²VC serão realizadas por meio de simulações no PSCAD/EMTDC. Também é escopo deste trabalho a realização de uma análise qualitativa em termos da capacidade nominal do D²VC para cada forma de conexão com a rede elétrica.

A organização deste artigo é a seguinte: a seção II apresenta as principais características do CDT; as características do D²VC são apresentadas na seção III; O detalhamento da representação do D²VC considerando diferentes conexões deste controlador com a rede elétrica é apresentado na Seção IV. Os resultados de simulação dinâmica do D²VC em diferentes conexões são apresentados na Seção V. Finalmente, são apresentadas as conclusões na Seção VI.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTROLE DIRETO

Nos casos em que o CIT é considerado, conforme mostrado na fig. 1(a), a compensação de tensão pode ser realizada usando capacitores ou indutores conectados em paralelo ao circuito ou pode ser baseado na compensação contínua em derivação usando, por exemplo, um STATCOM que injeta correntes reativas na linha, ou um SVC (*Static Var Compensation*) (Barcelos, et al., 2017). O CDT, conforme ilustrado na fig. 1(b), baseado no uso de equipamentos adicionais conectados em série com o PCC para controlar diretamente a tensão. Este tipo de controle pode ser realizado por meio de transformadores com comutação de tap sob carga (On Load Tap Changer – OLTC), ou por meio da conexão de equipamentos baseados na tecnologia FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), que adicionam ou subtraem uma tensão em série com a tensão no barramento (Barcelos, et al., 2017).

Conforme demonstrado por (Barcelos, et al., 2017), o CDT justifica-se principalmente para linhas predominantemente resistivas. Neste caso, as capacidades nominais de alternativas de controle direto podem ser bem menores que as capacidades nominais de controle indireto. Diante da possibilidade do D²VC de controlar diretamente a tensão no PCC de sistemas de distribuição, por meio da configuração proposta por Barcelos (2013), este artigo propõe investigar o desempenho do D²VC considerando diferentes conexões possíveis com a rede de distribuição elétrica para os conversores deste controlador, as proteções associadas, assim como uma análise comparativa em termos da capacidade nominal do D²VC para cada forma de conexão considerada.

3. O CONTROLADOR DINÂMICO E DIRETO DE TENSÃO (*Dynamic Direct Voltage Controller – D²VC*)

O D²VC é composto por dois conversores fonte de tensão (VSC – *Voltage Source Converter*) monofásicos a IGBTs com PWM (modulação por largura de pulso) conectados em *back-to-back*. Cada controlador série (VSC 2), é diretamente conectado à rede de distribuição atuando como uma fonte controlada de tensão, e cada conversor paralelo (VSC 1) é conectado por meio de um transformador de acoplamento desempenhando o papel de uma fonte de tensão com injeção controlada de corrente, conforme ilustrado na fig. 2.

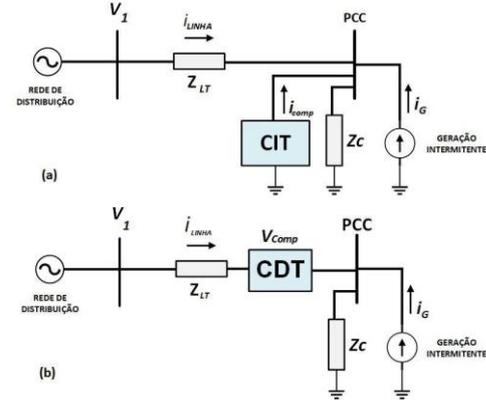


Figura 1: Representação de uma rede elétrica de distribuição com controle da tensão no PCC e injeção de corrente através de fonte de corrente intermitente (a) CIT e (b) CDT.

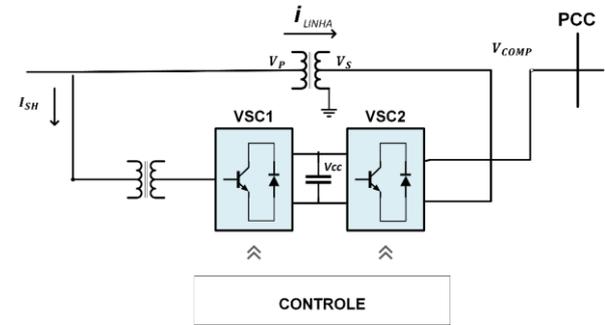


Figura 2: Representação simplificada do D²VC (fase a).

A partir da representação do D²VC mostrada na fig. 3, pode-se obter o circuito equivalente para uma das fases do sistema elétrico, representado por duas fontes de tensão ideais \hat{V}_1 e \hat{V}_2 interligadas por meio de uma linha de transmissão de reatância equivalente X_L . Também estão representadas, como fontes equivalentes aos conversores do controlador, a tensão de compensação série V_{COMP} e a fonte de corrente I_{sh} (Barcelos, 2013).

O D²VC sintetiza por meio do VSC 2 uma tensão controlável em módulo ($0 \leq V_{COMP} \leq V_{MÁX}$) e fase ($0^\circ \leq \theta_{COMP} \leq \theta_{MÁX}$) em série com a linha (Barcelos, 2013), conforme mostrado no diagrama fasorial representado na Fig. 4. A partir da análise do diagrama fasorial representado na fig. 4, é possível afirmar que a tensão V_{PCC} pode ser controlada em magnitude e fase a partir da variação da tensão de compensação série sintetizada pelo VSC 2. Assim, a tensão no PCC pode ser expressa por:

$$\hat{V}_{PCC} = \hat{V}_{COMP} + \hat{V}_1 \quad (1)$$

Sendo: σ_0 a diferença angular entre as duas fontes \hat{V}_1 e \hat{V}_2 e \hat{V}_{COMP} a tensão de compensação sintetizada pelo VSC2 do D²VC. A partir de (1) observa-se que V_{PCC} varia, em termos de magnitude e ângulo de fase, de acordo com o grau de compensação imposto. A tensão no PCC é controlada, portanto, por meio da tensão de compensação sintetizada pelo VSC série. De acordo com (KALYANI & DAS, 2008) e Barcelos (2013), o D²VC pode assumir os seguintes modos de operação para controlar a tensão:

- Regulação direta de magnitude da tensão no PCC: O controle de tensão é efetuado por meio da adição de V_{COMP} em fase ou em contrafase com \hat{V}_1 .
- Controle de fase: neste modo de controle obtém-se uma tensão no PCC com a mesma magnitude que \hat{V}_1 e uma defasagem σ em relação a essa tensão,
- Controle direto de magnitude e fase da tensão: Neste modo, obtém-se a tensão no PCC com magnitude e fase diferentes da fonte.

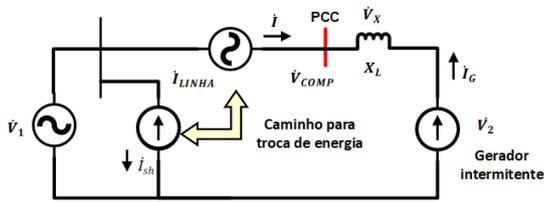


Figura 3: Representação conceitual do D²VC em um sistema elétrico genérico.

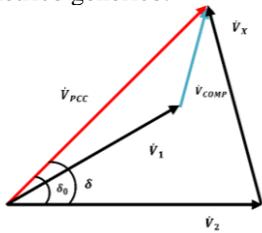


Figura 4: Diagrama fasorial do circuito genérico do D²VC

O D²VC, aplicado para controlar diretamente a tensão, tem modo de operação baseado na regulação direta de tensão, em que uma tensão de compensação é sintetizada em fase ou em contra fase com a tensão \hat{V}_1 . O modo de operação do D²VC considerado neste trabalho é expresso por:

$$\hat{V}_{COMP} = \pm k_v \hat{V}_1 \quad (2)$$

sendo k_v o fator de compensação. Uma representação em termos de um diagrama fasorial, representando o modo de compensação direta de tensão com o D²VC é mostrado na fig. 5.

A síntese da tensão de compensação em fase com cada tensão de referência, pode ainda ser expressa por:

$$V_{PCC_n} = V_{COMP_n} + V_{REF}, \quad n = a, b, c \quad (3)$$

em que: V_{REF} corresponde à tensão de referência para a compensação realizada pelo VSC2.

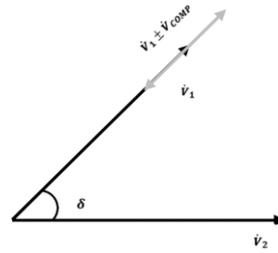
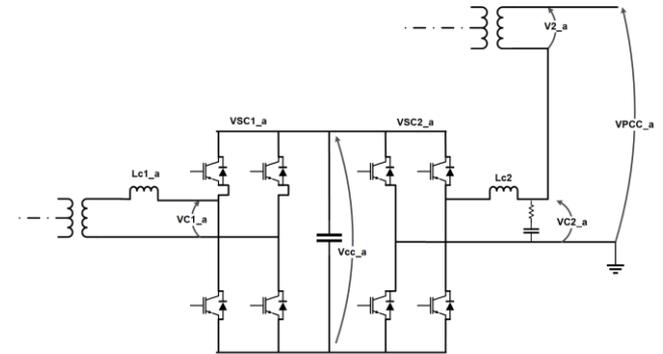


Figura 5: Diagrama fasorial para o caso do D²VC operando no modo regulação de magnitude na tensão do PCC.

3.1 Estratégias de Controle do D²VC

Para fins de entendimento das estratégias de controle do D²VC, uma representação detalhada deste controlador para uma das fases do sistema elétrico é mostrada na Fig. 6.



Figur 6: Representação do D²VC (fase a).

3.2 Controle do VSC Paralelo (VSC1)

O controle de cada VSC1 objetiva manter a tensão constante no elo CC. O resultado da comparação entre as tensões V_{CC} (tensão no elo CC) e V_{CC}^* (tensão referência), é o parâmetro de entrada do controlador PI (Proporcional Integral), utilizado neste controle. Este parâmetro determina a magnitude da corrente de referência (i_{ref}). Um circuito PLL, proposto por KARIMI-GHARTEMANI & IRAVANI (2001) e (2002) conforme mostrado na Fig. 7, obtém o ângulo da tensão do lado CA de VSC1 (V_{C1}) e produz uma senoide unitária. O PLL (*Phase Locked Loop*) apresenta uma dinâmica que é regida pelos parâmetros K_a , K_p e K_i , sendo K_a o parâmetro que determina a amplitude – o valor de K_a é inversamente proporcional ao tempo de resposta e seu aumento pode ocasionar oscilações na saída; já os parâmetros K_p e K_i têm influência direta na obtenção de fase e frequência. Seguindo a proposição de Barcelos (2013), os parâmetros adotados neste estudo são: $K_a = 100pu$, $K_p = 200pu$ e $K_i = 100S^{-1}$.

A referência de corrente i_{ref} é produto da multiplicação da saída do controlador pela senoide unitária fornecida pelo PLL. O parâmetro i_{ref} é comparado com a corrente medida na entrada de VSC1 para obtenção do erro da corrente (i_{erro}). Com base no erro de corrente obtido uma estratégia de controle por bandas de histerese é efetuada para a geração dos pulsos de controle dos IGBTs do conversor (Barcelos, 2013), conforme ilustrado na fig. 6.

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação do desempenho do D²VC no PSCAD/EMDTC, considerando diferentes formas de conexões para os VSCs deste controlador. Para isso, considerou-se a compensação direta de magnitude da tensão (Barcelos, 2013).

Em todos os casos propostos, o gerador intermitente inicia a operação no instante $t = 0,4s$ fornecendo $0.6MW$ à rede elétrica. A partir deste instante, as cargas Z_{C1} e Z_{C2} passam a ser supridas pela geração convencional V_1 e pela geração intermitente V_G . O D²VC controla as magnitudes da tensão no PCC em 1pu a partir do instante $t = 2.0s$. Como mencionado, a configuração adotada para o transformador da rede é Δ -Y (13.8/0.69kV/kV).

Neste estudo, a disposição das conexões do D²VC à rede elétrica são: **Caso I:** D²VC com VSC2 em série com o lado de baixa tensão da rede elétrica, representado na fig. 10; **Caso II:** D²VC no lado de baixa tensão da rede elétrica, representado na fig. 11 e **Caso III:** D²VC no lado de alta tensão da rede elétrica, representado na fig. 12.

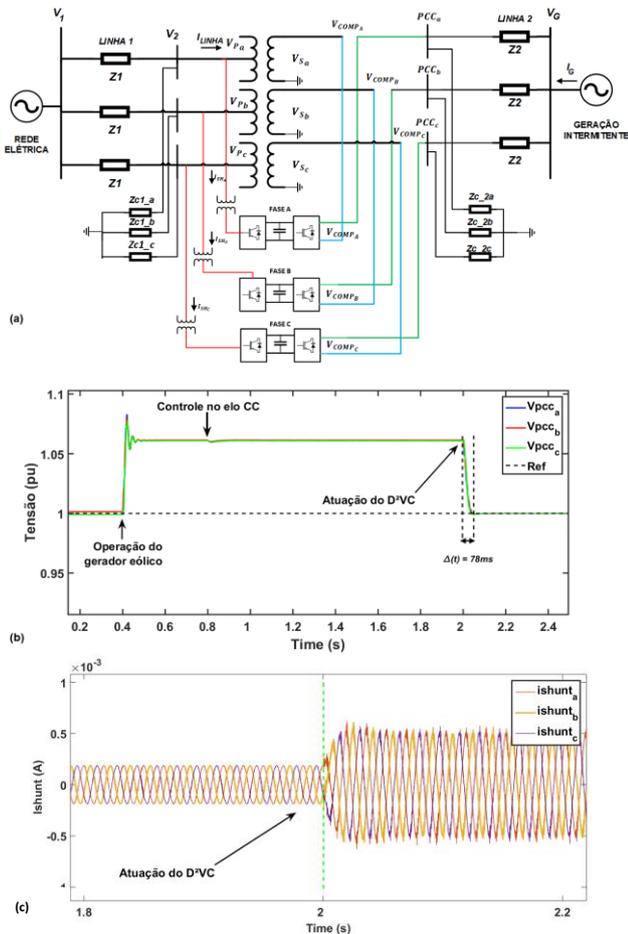


Figura 10: Representação simplificada do caso 1 (a), da variação da tensão no PCC (b) e da corrente drenada (c) durante o intervalo entre a operação da geração intermitente e a atuação do D²VC.

Em todos os casos propostos observa-se comportamento semelhante da corrente controlada pelo VSC1, conforme fig. 10 (c). O VSC1 atua como fonte de tensão com injeção

controlada de corrente que drena a potência ativa da rede e a transfere ao conversor em série com a linha, assim, a fase da tensão pode ser variada para que o módulo seja mantido em um nível constante.

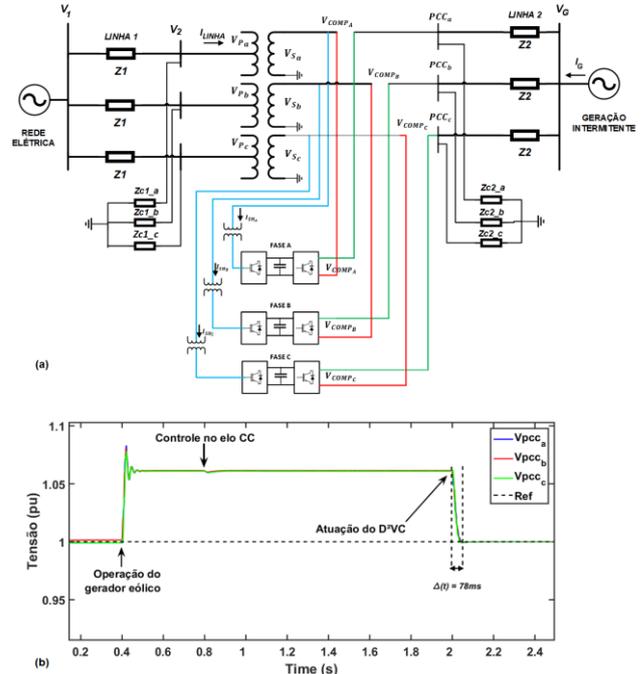


Figura 11: Representação simplificada do caso 2 (a) e (b) variação da tensão no PCC durante o intervalo entre a operação da geração intermitente e a atuação do D²VC.

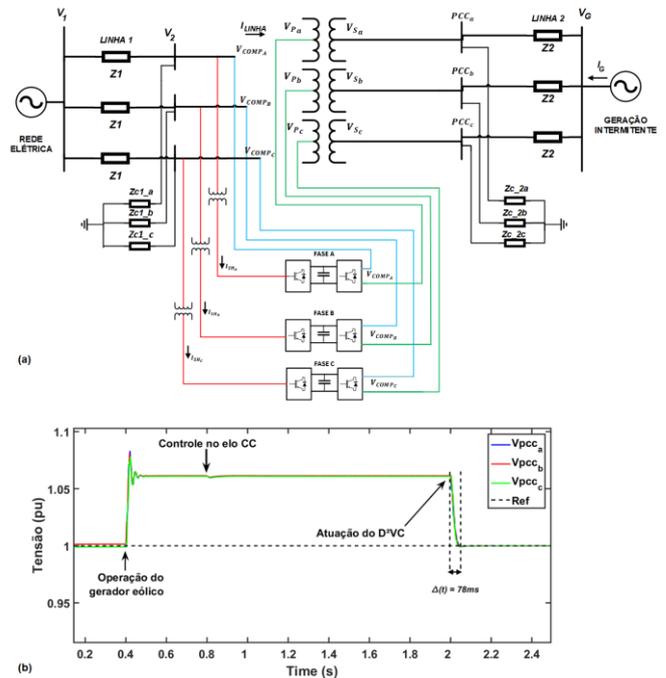


Figura 12: Representação simplificada do caso 3 (a) e (b) variação da tensão no PCC durante o intervalo entre a operação da geração intermitente e a atuação do D²VC.

5.1 Análise Comparativa

Nesta seção, é realizada uma análise comparativa entre os casos analisados, em termos de capacidade nominal do D²VC

para compensar diretamente a tensão no PCC. Também são mostrados os percentuais de tensão de compensação sintetizados pelo D²VC em cada caso. A capacidade nominal do D²VC necessária para controlar a tensão no PCC de uma rede elétrica pode ser expressa pela equação proposta por (Barcelos, et al., 2017) :

$$S_{D^2VC} = S_{VSC1} + S_{VSC2} \quad (4)$$

Sendo: S_{D^2VC} , a potência aparente do D²VC, e S_{VSC1} e S_{VSC2} as potências aparentes dos conversores paralelo e série, respectivamente. Como as potências aparente dos conversores que compõem o D²VC são iguais, a potência do D²VC pode ser expressa por:

$$S_{D^2VC} = 2 S_{VSC} \quad (5)$$

Assim, para efeitos de comparação, a partir de (5), o valor da potência trifásica do D²VC para os três casos analisados neste estudo são mostrados na tabela 2.

A contribuição do tipo de conexão do D²VC considerando a inserção de cada VSC 2 em diferentes pontos da rede elétrica e as configurações factíveis para os transformadores da rede, a partir das simulações apresentadas nesta seção, indicam que o D²VC tem melhor desempenho quando conectado no lado de alta tensão (13.8kV) da rede elétrica de distribuição em estudo, conforme mostrado na tabela 2, que apresenta o percentual de tensão de compensação sintetizado pelo D²VC para manter a tensão no PCC em 1pu nos três casos analisados.

Tabela 2: Percentual de tensão de compensação e potência trifásica do D²VC para os casos analisados.

Caso	V_{COMP} (pu)	S_{D^2VC} (kVA)
I	0.06	0.0089
II	0.06	0.0237
III	0.031	0.0089

Os resultados obtidos demonstram que a configuração dos transformadores não afeta significativamente a tensão no PCC. No entanto, dependendo da configuração de transformadores pode-se ter vantagens do ponto de vista da qualidade de energia, tendo em vista que na configuração Y-Δ não há grandes problemas com conteúdo harmônico. No caso II a potência aparente é maior devido à conexão do VSC1 no lado de baixa tensão, em que o nível de corrente é maior. Enquanto nos casos I e III a potência requerida pelos conversores para controlar a tensão no PCC é menor devido à ligação do VSC 1 no lado de alta tensão da rede, que possui menor nível de corrente.

6. CONCLUSÕES

A versatilidade oferecida pelo D²VC é um aspecto importante a ser considerado em aplicações tanto em média tensão, quanto no lado de baixa tensão do sistema. A realização deste trabalho para os estudos acerca do desempenho D²VC no controle direto de tensão em sistemas de distribuição comprova a capacidade deste controlador para conferir compensação em diferentes arranjos de conexão com a rede elétrica. De acordo com as análises realizadas, o D²VC pode ainda ser conectado considerando sua inserção direta em série com os

enrolamentos de transformadores da rede elétrica. Dessa forma, pode-se associar os VSC série em pontos de menor isolamento. Portanto, pode-se notar que em sistemas de distribuição com as características aqui apresentadas, o D²VC não apresenta limitações operacionais para o controle direto de tensão. Como atividades futuras, propõe-se que a partir das considerações obtidas para o controle direto de magnitude de tensão neste estudo, será realizada a implementação em experimental do D²VC, considerando as conexões aqui propostas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem apoio e colaboração oferecidos pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), pelo Instituto de Energia Elétrica (IEE) E Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2010. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, PRODIST - Módulo 8: Qualidade de energia elétrica, s.l.: s.n.
- Barcelos, S. L. d. S. L., 2013. UPFC para controle direto de tensão. Tese de D.Sc. COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Barcelos, S. L. d. S. L., Dias, R. F. d. S. & Watanabe, E. H., 2011. UPFC based on single-phase converters for voltage control.
- Barcelos, S. L. d. S. L., Dias, R. F. d. S. & Watanabe, E. H., 2017. Indirect voltage control (IVC) versus direct voltage control (DVC) in distribution grids with renewable energy sources. s.l.:IEEE.
- IEEE, I. A. G. f. I. S. 1., 2009. IEEE standard for interconnecting distributed resources with electronic power systems, s.l.: IEEE Std 1547.2-2008, 15.
- Kalyani, S. T. & DAS, G. T., 2008. Simulation of real and reactive power flow control with UPFC connected to a transmission line. Journal of theoretical and applied information technology, pp. 16-22.
- Patel, N. A. B. J. C., 2016. A hysteresis current control technique for electronics convertor. IJRSET., 5(2), pp. 2203-2210.
- Rosas, P. A. C., 2006. Conexão de turbinas eólicas à rede elétrica - Análise e operação normal e transiente. Recife: Série engenharia eólica.
- Silva, J., Kruschel, W. & Zacharias, P., Kassel, 2015. Power electronics for voltage control in distribution networks. 16th Kassel symposium energy systems technology, pp. 1-15.
- Suhara, E. M. N. M., 2015. Analysis of hysteresis current controlled three phase PWM rectifier with reduced switching loss. IJCTA, 8(3), pp. 877-887.
- Urban, J. d. A., 2018. Estratégia e controle do UPFC para compensação dinâmica de tensão com controle direto no referencial estático utilizando controladores PRressonantes. UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.