

Configuração Modificada de D²VC (Dynamic Direct Voltage Controller) com Controle CC Baseado em Teoria PQ

Rafael W. P. Silva*. Silvangela L. S. Lima Barcelos*. Robson F. S. Dias**. Edson H. Watanabe**

*Universidade Federal do Maranhão, Dep. de Engenharia Elétrica, São Luís MA
Brasil (e-mail: rafael.william@discente.ufma.br; silvangela.barcelos@ufma.br).

**Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro - RJ,
Brasil (e-mail: dias@dee.ufrj.br; watanabe@coe.ufrj.br)

Abstract: This paper proposes a modified structure for the Dynamic Direct Voltage Controller (D2VC), here defined as Modified Dynamic Direct Voltage Controller (MD2VC) for application in distribution grids. An advantage of this controller structure is the online voltage compensation in distribution systems using a three-phase Voltage Source Converter (VSC) for the shunt side of the controller instead of three single-phase VSCs as in the case of the original proposed configuration of D2VC. In this case, the series VSCs are connected to the shunt VSC by only a single dc link, unlike the original configuration where, for each of phase, the series VSC is connected to the respective shunt VSC by the respective dc link. In this work, a control algorithm for dc-link voltage based on pq theory is proposed, dismissing the use of the adaptive hysteresis band current single-phase control strategy. This configuration of D2VC has the number of switches for shunt converters and dc links reduced. Simulation results carried out in time domain using PSCAD/EMTDC are presented to show the effectiveness of the proposed control.

Resumo: Este artigo propõe uma estrutura modificada para o controlador direto e dinâmico de tensão (D2VC), aqui definido como controlador direto e dinâmico de tensão modificado (MD2VC) para aplicações em redes de distribuição. Uma vantagem dessa estrutura de controlador é a compensação dinâmica de tensão em redes elétricas de distribuição considerando um único VSC trifásico para o lado paralelo do controlador, ao invés dos três VSCs monofásicos da configuração convencional de D2VC. Neste caso, os VSCs série são conectados através de um único elo CC, diferentemente da configuração original em que, para cada fase, o VSC série é conectado ao respectivo VSC paralelo através de um elo CC. Neste trabalho, um algoritmo de controle para a tensão CC baseado na teoria pq é proposto, dispensando o uso do controle monofásico adaptativo em corrente. Esta configuração de D2VC tem o número de chaves e de elos CC do D2VC reduzidos. Serão mostrados resultados de simulações no PSCAD/EMTDC para evidenciar a efetividade da solução do controle proposto.

Keywords: MD2VC; D2VC; Pq Theory; Voltage Compensation; DC Link

Palavras-chaves: MD2VC; D2VC; Teoria PQ; Compensação de Tensão; Elo CC

1. INTRODUÇÃO

A predominância de cargas não lineares e a constante mudança no perfil de consumo dos sistemas de distribuição causam variações de tensão em determinados pontos da rede elétrica. Conforme mencionado por Vanishree et. al (2014), nas situações em que o nível de tensão cai e a demanda por potência reativa aumenta, não sendo atendida, pode ocorrer queda na tensão dos barramentos próximos, resultando em um efeito cascata nas regiões adjacentes. Por outro lado, o aumento da conexão de Geradores Distribuídos (GD), caracterizados por um perfil intermitente, nas atuais redes elétricas de distribuição, também acentua o problema de extrapolação dos limites de tensão, principalmente as gerações do tipo solar e eólica. Tais variações de tensão são indesejáveis do ponto de vista operacional, tendo em vista que podem levar as redes elétricas a operar fora dos limites normativos adequados de tensão, no que tange aos padrões de qualidade da tensão nos barramentos próximos ao Ponto de Conexão Comum (PCC)

entre GDs e rede de distribuição (PRODIST, 2020). Nas últimas décadas muitas alternativas foram propostas para mitigar variações de tensão em barramentos de redes de distribuição. Essas alternativas se dividem em dois tipos de controle: o Controle Indireto de Tensão (CIT) e o Controle Direto de Tensão (CDT). No CIT, a potência reativa é controlada para então se controlar a tensão, que pode ser realizado por bancos de capacitores ou mesmo através de controladores baseados em eletrônica de potência, por exemplo o compensador estático de reativos (STATCOM - Static Var Compensator); No CDT, a tensão é controlada diretamente, como no caso do Transformador com comutação de tap sob carga (Transformador OLTC). O OLTC, através da variação de tap no secundário, permite que a tensão seja mantida em níveis adequados. No entanto, o ajuste de tensão realizado pelo Transformador OLTC é mecânico e o tempo de resposta para efetuar tal ajuste pode ser da ordem de milissegundos a segundos, conforme mencionado por (Marinelli et. al, 2016) e (Rahman et. al, 2018).

O D²VC foi proposto inicialmente por Barcelos (2013), sendo inspirado em uma das funcionalidades do UPFC (*Unified Power Flow Controller*), originalmente proposto por (Gyugyi et. Al, 1995). Recentemente, Silva Lima et al (2020) propôs o uso do controlador direto e dinâmico de tensão (D²VC) para controle dos níveis de tensão em redes elétricas de distribuição de baixa tensão com geração distribuída conectada. Alguns estudos sobre este controlador vêm evidenciando uma série de vantagens de sua utilização para o controle direto de tensão, em redes elétricas que necessitem de um rápido ajuste dos níveis de tensão.

Em Macedo et. Al (2019), foi proposto um algoritmo de controle para compensação de tensão desequilibrada usando D²VC baseado nas componentes instantâneas de sequência positiva e negativa no referencial $\alpha\beta$. Em Martins et. Al (2020), são apresentados resultados de uma análise qualitativa em termos da capacidade nominal deste controlador, considerando diferentes formas de conexão, dos conversores que o compõe, com a rede elétrica.

Neste trabalho é proposto o uso de uma configuração modificada de D²VC (MD²VC) para compensação de tensão em redes elétricas de distribuição especiais, por exemplo, redes que tenham GDs com perfil altamente intermitente associados, fazendo com que os níveis de tensão nas proximidades do PCC tendam a exceder os limites normativos. Este conversor foi originalmente proposto como UPFC-3 ϕ - 1 ϕ por Barcelos (2013) para aplicações em redes elétricas com impedâncias indutivas.

No MD²VC, os VSCs paralelos, que são monofásicos, são substituídos por um único VSC trifásico, que é conectado aos VSCs série através de um elo CC comum. O algoritmo de controle da tensão CC proposto para o MD²VC é baseado na teoria pq, dispensando o uso da estratégia monofásica de controle de corrente por banda de histerese adaptativa. Nessa configuração de controlador direto de tensão há um número reduzido chaves para o estágio de conversão paralela e de elos CC. Análises de desempenho do MD²VC com o controle aqui proposto serão realizadas por meio de simulações no PSCAD/EMTDC. Para isso, será considerado para cada VSC série, o controle de magnitude da tensão.

A organização deste artigo é a seguinte: a seção II apresenta as principais características do D²VC; as características do MD²VC e os detalhes do algoritmo proposto para o controle da tensão CC são apresentadas na seção III; os resultados de simulação dinâmica do MD²VC considerando algoritmo proposto para o controle da tensão CC são apresentados na seção IV. As conclusões são apresentadas na Seção V.

2. O CONTROLADOR DIRETO E DINÂMICO DE TENSÃO (D²VC)

Uma representação simplificada para *fase a* do D²VC, originalmente proposto, é mostrada na Fig. 1. Conforme pode ser observado, para cada uma das fases há dois VSCs conectados em *back-to-back* através de um elo CC. Nessa configuração, os VSCs paralelos (para a fase *a*, VSC 1a) são conectados à rede elétrica através de transformadores de acoplamentos, enquanto os VSCs série podem ser diretamente

conectados em um nível mínimo de isolamento (para a fase *a*, VSC 2a).

O D²VC monofásico foi proposto por Barcelos (2013) para regulação dinâmica de tensão em redes elétricas com linhas predominantemente resistivas, ou seja, Sistemas de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT). Os VSCs paralelos (VSC 1n, n=a, b e c) do D²VC regulam a tensão nos elos CC, controlando a injeção de potência nos VSCs série (VSC 2n, n=a, b e c), que são conectados diretamente em série com o enrolamento secundário do transformador da rede elétrica e, neste caso, regulam a tensão no PCC da rede. Conforme apresentado por Martins et. al (2020), a conexão dos VSCs série pode ser feita em diferentes pontos da rede elétrica, dependendo apenas do ponto da rede elétrica em que se deseja compensar variações de tensão.

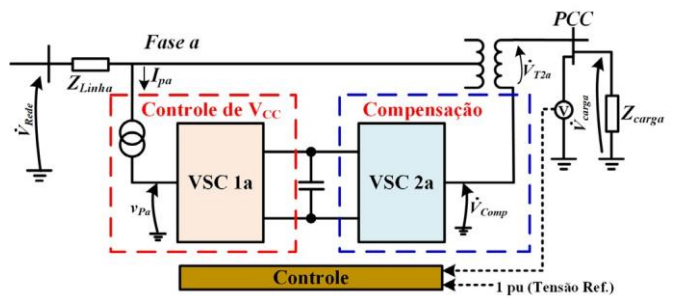


Fig. 1 Representação simplificada do D²VC convencional.

2.1 Controle CC dos VSCs paralelos

No controle da tensão CC, originalmente proposto por Silva Lima et. al (2014), cada VSC paralelo é controlado como uma fonte de corrente com fator de potência unitário e a corrente é controlada para manter a tensão do respectivo elo CC constante. Por uma questão de simplicidade a estratégia de controle por banda de Histerese foi adotada para cada VSC paralelo. Uma representação em blocos da estratégia de controle da tensão de cada elo CC do D²VC é mostrada na Fig. 2.

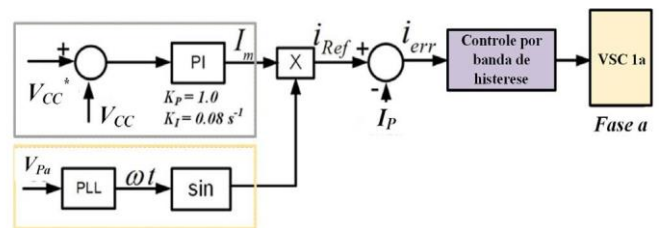


Fig. 2 Diagrama em blocos do controle CC do D²VC convencional (Silva Lima et. al, 2014).

Conforme descrito em (Silva Lima et. al, 2014), o valor medido de V_{CC} é comparado com o valor de referência (V_{CC}^*), o resultado dessa comparação é processado por um controlador PI, resultando na magnitude (I_m) da corrente de referência (i_{Ref}). Um circuito de sincronismo (*Phase Locked Loop* - PLL) fornece um sinal com magnitude unitária em fase com a tensão V_{pa} (Karimi-Ghartemani e Iravani, 2002). A corrente de referência i_{Ref} é comparada com a corrente I_{pa} , gerando o sinal de erro que é usado pelo controlador por banda de histerese.

Dessa forma, é possível manter a tensão CC constante controlando-se a injeção de corrente por cada um dos VSCs paralelos.

2.2 Controle dos VSCs série

Os VSCs série do D²VC regulam a tensão CA, podendo compensar variações de tensão em diferentes pontos de uma rede elétrica, tendo em vista que a forma de conexão dos conversores e ainda, que compensação é feita por fase. Algumas estratégias de controle para os VSCs série do D²VC já foram propostas em alguns estudos. Silva Lima et. al (2014) propuseram uma estratégia de controle por fase, em que cada VSC é controlado para sintetizar uma tensão série que mantenha a tensão no PCC no valor de referência (Ver Fig. 1), ou seja:

$$\dot{V}_{PCCj} = \dot{V}_{Tj} + \dot{V}_{Comp_j} \quad j = a, b, c \quad (1)$$

Em que, \dot{V}_{Tj} ($j = a, b, c$) é a tensão no enrolamento secundário do transformador da fase j e \dot{V}_{Comp_j} é a tensão de compensação para a respectiva fase, expressa por:

$$\dot{V}_{Comp_j} = k \dot{V}_{Tj} \quad (2)$$

Sendo k o fator de compensação do D²VC. Nessa estratégia, a contribuição do controlador é analisada variando-se a magnitude da tensão de compensação (\dot{V}_{Comp_j}). O fator k é um número real e \dot{V}_{Comp_j} pode ser injetada em fase ou em contrafase (0° ou 180°) com relação a \dot{V}_{Tj} . Esse tipo de compensação mostra-se adequada para redes elétricas em que as tensões no PCC são consideradas balanceadas. Um diagrama de blocos da estratégia da magnitude da tensão CA proposta por Silva Lima et al (2014) para o D²VC é mostrado na Fig. 3.

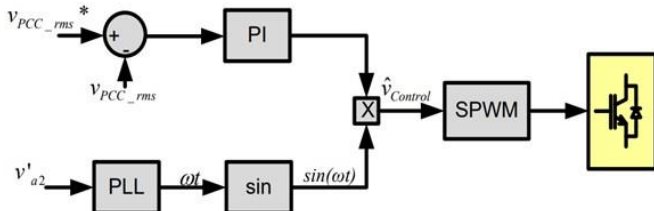


Fig. 3 Diagrama em blocos do controle CA do D²VC convencional (Silva Lima et. al., 2014).

O resultado da comparação entre o valor eficaz da tensão no PCC (V_{PCC}) com o valor de referência V_{PCC}^* passa por um controlador PI, resultando na magnitude da tensão que deve ser injetada em série com a tensão no ponto da rede elétrica em que se deseja conferir compensação (V_{a1}'). Um PLL é utilizado para estimar a fase da tensão V_{a1}' (Karimi-Ghartemani e Iravani, 2002). $\hat{v}_{control}$ é comparada com uma portadora triangular para então gerar os pulsos de disparo dos IGBTs de cada VSC Série.

Além do controle de magnitude da tensão por fase por proposto por Silva Lima et. al. (2014), foi proposta Silva Lima et. al. (2020) uma estratégia de controle baseada no uso de processador unificado de sinais trifásicos (*Unified Threephase Sinal Processor* - UTSP), em que, através do D²VC, é realizada uma compensação de tensão com base na compensação de

componentes de sequência. Macedo et. al. (2019) propôs um algoritmo de controle para o D²VC, com base nos componentes instantâneos de sequência positiva e negativa no referencial $\alpha\beta$.

3. O CONTROLADOR DIRETO E DINÂMICO DE TENSÃO MODIFICADO (MD²VC)

Uma representação básica do MD²VC é mostrada na Fig. 4. Como pode ser observado, a diferença básica dessa configuração com relação a configuração original de D²VC reside na substituição dos VSCs paralelos (monofásicos) por um único VSC trifásico, que é conectado aos VSCs série através de um único elo CC. A conexão dos VSCs série ao PCC é feita através de transformadores de acoplamento.

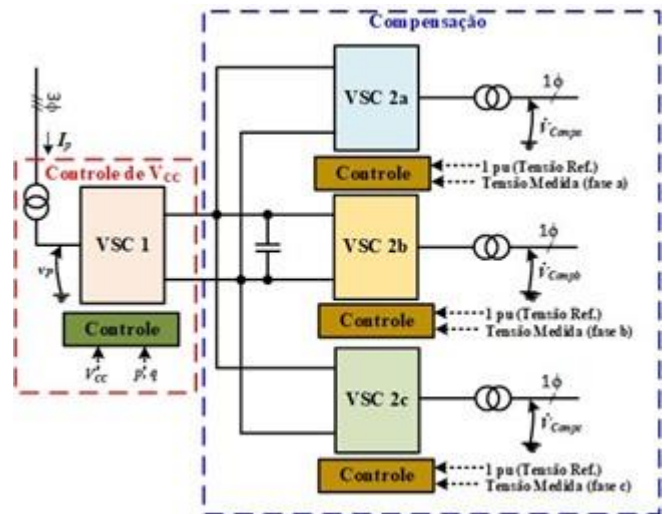


Fig. 4 Representação simplificada do MD²VC.

3.1 Controle CC do VSC paralelo

Neste caso, o controle da tensão CC e da injeção/absorção de potência baseia-se na Teoria pq para a determinação das tensões de referência do controle CC. Na Fig. 5 é mostrada a representação dos lados CA e CC do VSC 1, evidenciando as variáveis associadas ao controle da tensão CC. Conforme pode ser visto, as tensões e correntes do lado 1 do transformador de acoplamento deste conversor são medidas e, em seguida, são convertidas para o referencial $\alpha\beta$. Neste estudo, assume-se que o sistema elétrico seja balanceado e a três fios. Assim, não há componentes de sequência zero relativas à corrente, sendo possível a aplicação da transformada de Clarke para as tensões e correntes, de forma simplificada, conforme:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

A potência ativa trifásica instantânea no referencial $\alpha\beta$, definida com base na propriedade de invariância no tempo da transformada de Clarke, desconsiderando-se a existência de componentes de sequência zero, é dada por:

$$p_{3\varphi} = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} \quad (5)$$

Em que, $p_{3\varphi}$ refere-se à potência real, p , da Teoria pq (Akagi et. al, 1983).

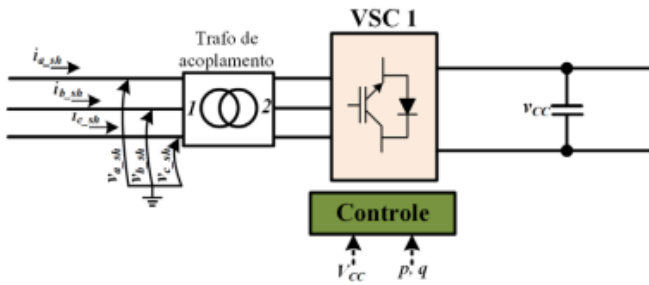


Fig. 5 Representação simplificada dos lados CA e CC do VSC 1, com variáveis associadas ao controle da tensão CC.

Nesta estratégia de controle, a potência real p é obtida conforme mostrado no diagrama de blocos da Fig. 6, em que a tensão CC (V_{CC}) é medida e comparada com o valor de referência (V_{CC}^*). O resultado dessa comparação (ϵ) é processado através de um controlador PI, definindo-se então o valor de referência da potência real (p_{ref}) a ser processada através do elo CC do D²VC. A referência de potência imaginária (q_{ref}) é mantida igual a zero, tendo em vista que o objetivo pretendido com a implementação do controle da tensão CC, é permitir o intercâmbio de p através do D²VC. Um diagrama de blocos para a estratégia de controle da tensão no elo CC do MD²VC é mostrado na Fig. 6.

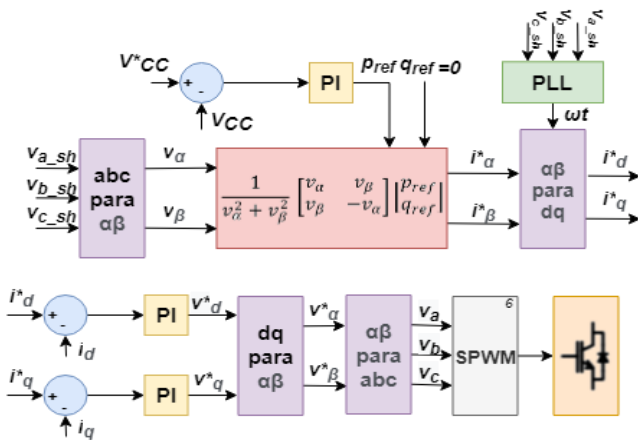


Fig. 6 Diagrama de blocos da estratégia de controle da tensão CC do MD²VC baseada na teoria pq.

Através da conversão das tensões de fase ($V_{a,sh}$, $V_{b,sh}$ e $V_{c,sh}$) do lado #1 transformador de acoplamento e a partir das referências de potência p_{ref} e q_{ref} , são calculadas as correntes de referência no referencial $\alpha\beta$, i_{α}^* e i_{β}^* . Conforme pode ser observado neste diagrama de blocos, essas correntes são convertidas para o referencial dq através da transformada de Park para garantir que apresentem valores real e imaginário constantes, enquanto não houver variações nos níveis de potência real processados através do controlador MD²VC. Com essa conversão de coordenadas de $\alpha\beta$ para dq ocorre um enquadramento do fasor resultante a uma frequência angular ω , que corresponde à frequência da rede, resultando em tensões contínuas. Uma ilustração da decomposição de variáveis no

referencial abc decompostas nos referenciais $\alpha\beta$ e dq são mostradas na Fig. 7. As correntes i_d e i_q são expressas por:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi) & \sin(\omega t + \varphi) \\ -\sin(\omega t + \varphi) & \cos(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

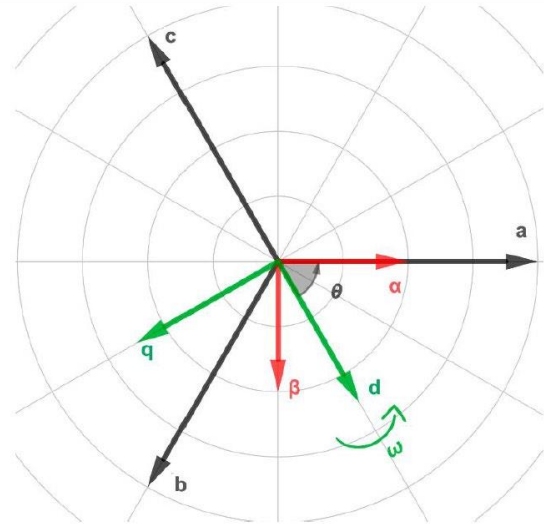


Fig. 7 Decomposição de variáveis do referencial abc nos referenciais $\alpha\beta$ e dq .

Em que, ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f$), determinada através da frequência da rede elétrica (f). A frequência angular rotacional do eixo dq é sintetizada por meio de um PLL como o ilustrado na Fig. 6, que obtém as fases de $v_{a,sh}$, $v_{b,sh}$ e $v_{c,sh}$. As correntes i_d e i_q são comparadas com as respectivas correntes de referência i_d^* e i_q^* . Os resultados dessas comparações são processados por controladores PI, definindo as tensões de referência para disparo dos IGBTs do VSC 1, ainda são necessários dois estágios de conversão de coordenadas, de dq para $\alpha\beta$ e de $\alpha\beta$ para abc .

3.2 Considerações sobre a capacitância do elo CC do MD²VC

Na configuração original do D²VC, a potência instantânea no lado CC pode ser expressa em termos de:

$$p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(2\omega) \quad (7)$$

Em que, \bar{p} é a parcela constante de potência instantânea, com valor médio igual a zero, que corresponde à energia transferida do lado CA para o lado CC do conversor, por unidade de tempo, por fase do sistema monofásico e $\tilde{p}(2\omega)$ é a uma parcela oscilante com frequência duas vezes maior que a frequência da rede elétrica, que existe, quando a carga a ser compensada é desequilibrada.

De acordo com a teoria pq (Akagi et. al, 2007), a potência real através do elo CC do MD²VC, pode ser expressa por:

$$p(t) = \bar{p} + \tilde{p} \quad (8)$$

A parcela \bar{p} é resultante de variações no fluxo energético através do MD²VC, sendo responsável pela flutuação da tensão no elo CC.

Pode-se concluir, comparando (7) e (8), para casos de compensação de cargas com cargas desequilibradas, que a tensão no lado CC do D²VC apresenta um *ripple* maior que o apresentado no lado CC do MD²VC. Dessa forma, observa-se que na topologia MD²VC, o capacitor do elo CC é menor em relação aos utilizados no D²VC para atenuar a amplitude da componente oscilante contida nas tensões CC.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Na Fig. 8 é mostrado o circuito equivalente de uma rede elétrica de distribuição adaptada para que seja possível avaliar o desempenho da configuração de D²VC proposta. Com o objetivo de avaliar a operação do MD²VC, considerando o controle de VCC baseado na Teoria pq, foram realizadas simulações no PSCAD/EMTDC. Os principais parâmetros desta rede de distribuição são apresentados na Tabela 1.

VSC 1 é conectado em paralelo com o a rede em estudo através de um transformador de acoplamento de 120 kVA e relação de transformação 13,8 kV/ 0,5 kV (Lado 1). Os VSCs 2 são conectados em série com os enrolamentos secundários do banco de transformador da rede (Lado 2) através de transformadores de acoplamento de 40 kVA e relação de transformação (0,69 kV/0,69 kV). No entanto, conforme mostrado por Martins et. al (2020), a conexão dos VSCs deste controlador pode ser feita de formas distintas na rede elétrica. No MD²VC, os conversores VSC 1 e VSCs 2 são a IGBTs com estratégia de chaveamento bipolar (Sinusoidal Pulse Width Modulation - SPWM).

A estratégia de controle proposta é aplicada unicamente ao VSC 1, uma vez que a teoria pq é aplicada tão somente à circuitos trifásicos. Embora, o foco deste trabalho seja o controle de tensão do elo CC, através de VSC 1, procurou-se regular a tensão no PCC, por meio dos VSCs 2, através da estratégia de controle com compensação direta da amplitude de tensão proposta por Silva Lima et. al (2014) e, abordada na seção 3.

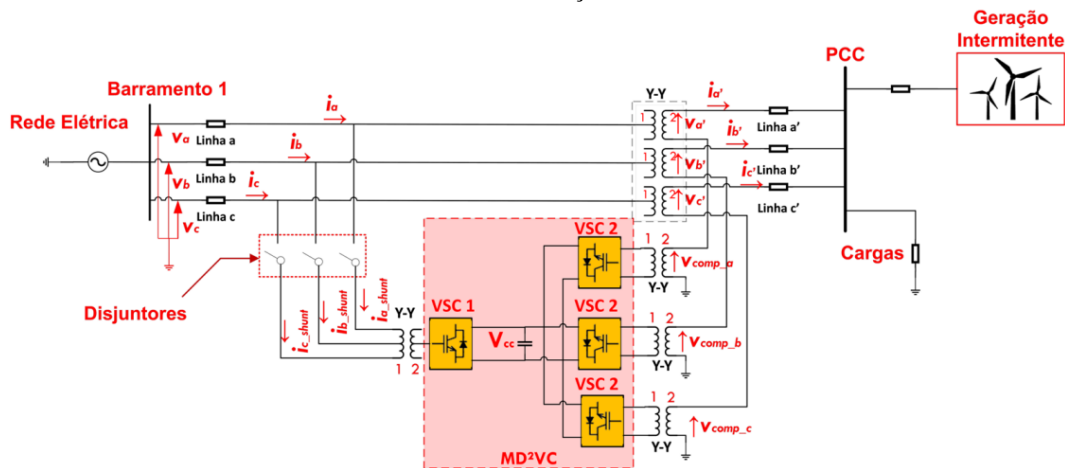


Fig. 8 Circuito equivalente de uma rede elétrica de distribuição genérica

Tabela 1. Parâmetros do sistema.

Parâmetros	Valores
Tensão da rede	13,8 kV
Tensão nominal do gerador eólico	0,69 kV
Frequência da rede	60 Hz
Potência do transformador da rede	1,1 MVA
Relação de transformação	20:1 - 13,8 kV/0,69 kV
Impedância da LT	$0,0532 + jj0,00547 \Omega$
Impedância da Carga RL	$0,53 + jj0,00021015 \Omega$
Capacitância do elo CC	25 mF
Tensão no elo CC	680 V
Frequência de chaveamento	10 kHz

Para fins de simulação do algoritmo de controle proposto para o VSC 1, considerou-se a conexão do MD²VC aos terminais 1 e 2 do banco de transformador da rede elétrica. Neste caso, o

Um primeiro resultado de simulação realizada no PSCAD/EMTDC buscou mostrar o perfil de operação da rede elétrica adaptada para avaliar o desempenho do MD²VC mostrada na Fig. 8. Para esta situação, pode-se observar na Fig. 9 os valores instantâneos das tensões de fases medidas no PCC diante da operação compartilhada entre geração convencional e GD para atendimento da carga equivalente a partir de t=0,4 s. Conforme pode ser observado, ocorre um aumento na magnitude das tensões medidas no PCC.

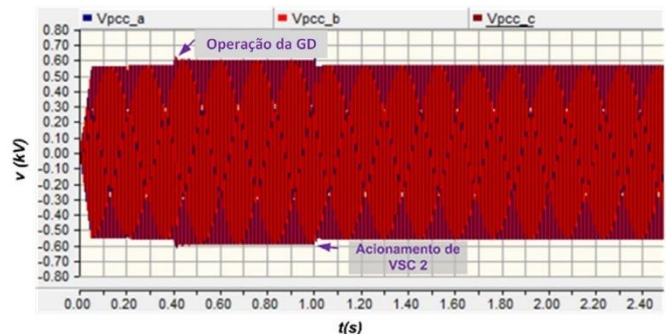


Fig. 9 Valores instantâneos de tensão no PCC diante da operação da GD.

A sobretensão ocasionada pela injeção de potência por parte da GD, que neste caso é da ordem de 0,6 MW, altera o perfil de tensão no PCC, fazendo com que as magnitudes dessas tensões estejam fora dos limites adequados estabelecidos pelo módulo número 8 da norma PRODIST (Ministério de Minas e Energia, 2020). Na Fig. 10 é possível observar o aumento de aproximadamente 6% nos valores eficazes das tensões do PCC devido a operação da GD. Conforme pode ser observado nesses resultados, uma ação de controle é necessária, para que as tensões no PCC e barramentos vizinhos dessa rede elétrica sejam mantidas dentro de limites adequados.

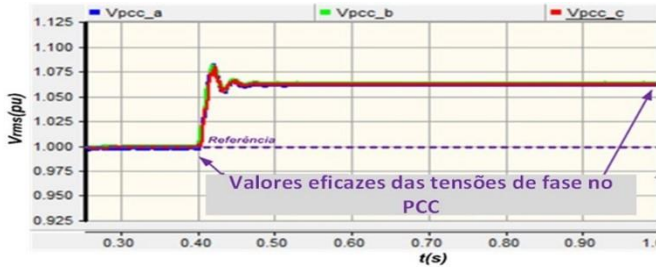


Fig. 10 Valores eficazes das tensões de fase no PCC diante da operação da GD na rede de distribuição.

As tensões de fase no PCC da rede elétrica em estudo, considerando a operação do VSC 2 do MD²VC para compensar diretamente as magnitudes dessas tensões, a partir de $t = 1$ s, são mostradas na Fig. 11. A compensação das magnitudes dessas tensões ocorre em aproximadamente 60 ms.

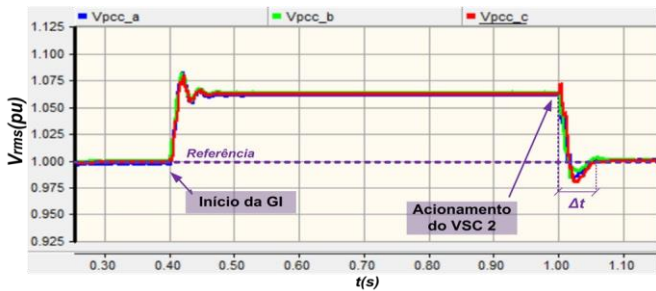


Fig. 11 Valores eficazes das tensões de fase no PCC diante da operação da GD e compensação realizada pelo MD²VC.

Um resultado da operação do VSC 1 do MD²VC, considerando a estratégia de controle baseada na Teoria pq, diante da condição observada na Fig. 11, é mostrada na Fig. 12. A energização e regulação da tensão no elo CC deste controlador ocorre a partir do instante $t = 0,2$ s. A tensão CC é regulada em aproximadamente 22 ms, estabilizando-se em 1 pu (Corresponde a $V_{CC} = 680$ V). Conforme pode ser observado nessa figura, a tensão CC apresentou um *overshoot* de aproximadamente 5%.

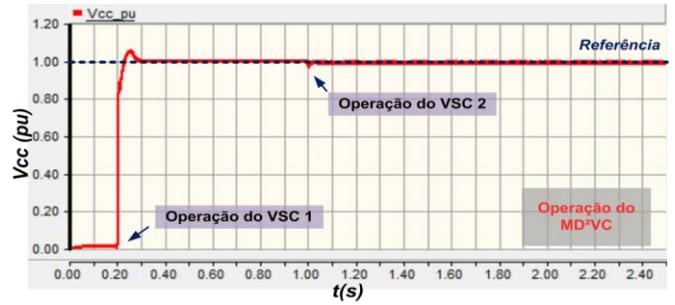


Fig. 12 Tensão no elo CC do MD²VC.

As correntes dq de referência, definidas a partir de p_{ref} , $v_{a_{sh}}$, $v_{b_{sh}}$ e $v_{c_{sh}}$ e ω (ver Fig. 6), requisitadas pelo MD²VC para que uma compensação de tensão seja realizada pelos VSCs 2 são mostradas na Fig. 13. Essas correntes são comparadas a $i_{d_{shunt}}$ e $i_{q_{shunt}}$, sendo gerados erros residuais a partir de tais comparações, que se referem a diferença entre as correntes *shunt*, que (entram no MD²VC) e a de referência calculadas, no sistema de coordenadas dq , tais erros, são processados por um controlador PI, que estima as tensões de correção v_d e v_q mostradas na Fig. 14.

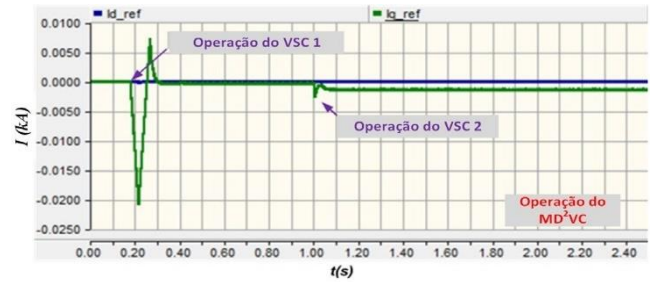


Fig. 13 Correntes $i_{d_{ref}}$ e $i_{q_{ref}}$.

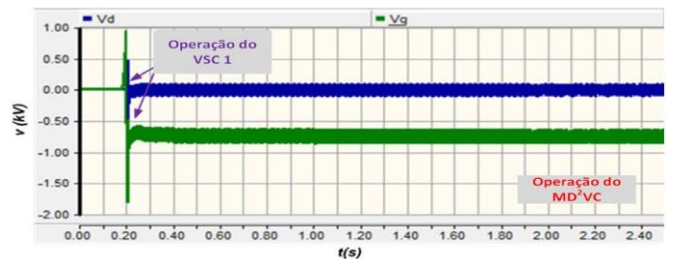


Fig. 14 Tensões v_d e v_q .

Após v_d e v_q serem estimadas, são convertidas para o sistema $\alpha\beta$, por meio da transformada inversa de Park e posteriormente, para o sistema abc , através da transformada inversa de Clarke. Por fim, as tensões passam por uma modulação SPWM, para que sejam gerados os pulsos de disparo dos 6 IGBTs que compõem o VSC 1, efetuando-se assim a regulação da tensão CC.

5. CONCLUSÕES,

Neste trabalho, foi avaliada a aplicabilidade do controle de tensão do elo CC de um D²VC modificado (MD²VC) baseado na teoria pq, em redes de distribuição em que haja necessidade de melhorar o perfil de tensão. Os resultados de simulações no PSCAD/EMTDC, considerando a estratégia de controle do elo CC proposta mostram que o MD²VC pode ser considerado como uma alternativa conveniente para a compensação de

variações de tensão em redes com as características mencionadas. Dentre as vantagens do MD²VC sobre o D²VC monofásico, pode-se citar menor número de chaves, menor valor de capacitância CC e manutenção da modularidade quanto aos pontos da rede elétrica em que se deseja compensar variações de tensão, tendo em vista que, nessa configuração de controlador ainda se mantem VSCs monofásicos para o lado série.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Akagi, H., Kanazawa, Y. e Nabae, A., (1983). Generalized theory of instantaneous reactive power and its application. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Tokyo*. 1 de julho. pp. 480–490.
- Akagi, H., Watanabe, E. H. e Aredes, M., (2007). *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Barcelos, S. L. d. S. L., (2013). *UPFC para controle de tensão*. Tese de doutorado, COPPE-UFRJ.
- Gyugyi, L.; Schauder, C.D.; Williams, S.L.; Rietman, T.R.; Torgerson, D.R.; Edris, A. (1995). The unified power flow controller: A new approach to power transmission control. *IEEE Transactions on Power Delivery*. **10** (2): 1085. doi: 10.1109/61.400878.
- Karimi-Ghartemani, M. e Iravani, M. R., (2002). A nonlinear adaptive filter for online signal analysis in power systems: applications. *IEEE Trans. Power Delivery* [em linha]. 7 de agosto. pp. 617–622. [Consultado em 19 de abril de 2022]. Disponível em: doi: 10.1109/61.997949
- Macedo, E. O., Dias, R. F. S., Barcelos, S. L. d. S. L. e Watanabe, E. H., (2019). Unbalanced voltage mitigation using D2VC with proportional resonant controller in $\alpha\beta$ - frame. In: *5th southern power electronics conference/15th brazilian power electronics conference, 2019, 12 de dezembro de 2019, Santos - SP, Brazil*.
- Marinelli, J. H., Coppo, M., Zecchino, A. e Bindner, H. W., (2016). Coordinated voltage control of a decoupled three phase on-load tap changer transformer and photovoltaic inverters for managing unbalanced networks. *Electric Power Systems Research* [em linha]. **131**, 264–274. [Consultado em 19 de abril de 2022]. Disponível em: doi: 10.1016/j.epsr.2015.10.025
- Martins, A. V. C., Barcelos, S. L. d. S. L., Dias, R. F. S. e Watanabe, E. H., (2020). Estudo do controlador dinâmico e direto de tensão (D2VC) em diferentes conexões com a rede elétrica. In: *Simpósio brasileiro de sistemas elétricos, 28 de agosto de 2020, Santo André - SP, Brasil*. Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
- Ministério de Minas e Energia, (2020). *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica*. Resolução Normativa nº 794/2017. Brasília - DF.
- Rahman, M. M., Arefi, A., Shafiullah, G. M. e Hettiwatte, S., (2018). A new approach to voltage management in unbalanced low voltage networks using demand response and OLTC considering consumer preference. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* [em linha]. 20 de abril. pp. 11–27. [Consultado em 19 de abril de 2022]. Disponível em: doi: 10.1016/j.ijepes.2017.12.034
- Silva Lima, S. L., Dias, R. F. S. e Watanabe, E. H., (2014). Direct voltage control in grids with intermittent sources using UPFC. *Power Electron. Mag. SOBRAEP* [em linha]. **19**(3), 260–267. [Consultado em 19 de abril de 2022]. Disponível em: doi: 10.18618/REP.2014.3.260267
- Silva Lima, S. L., Dias, R. F. S., Abrantes-Ferreira, A. J. G., Alves, A. G. P. e Watanabe, E. H., (2020). Dynamic direct voltage controller (D2VC) for grids with intermittent sources. *Electric Power Systems Research*. **182**, 1–11.
- Vanishree, J. e Ramesh, V., (2014). Voltage profile improvement in power systems – A review. In: *2014 international conference on advances in electrical engineering (ICAEE)*, 9 de janeiro de 2014, Vellore, India [em linha]. IEEE. [Consultado em 19 de abril de 2022]. Disponível em: doi: 10.1109/ICAEE.2014.6838533 .