CONTROLE DA ASSOCIAÇÃO EM TRIÂNGULO DE INVERSORES DO TIPO FONTE DE TENSÃO COM ACOPLAMENTO LC SÉRIE

E-mails: LUCAS KOLEFF, EDUARDO PELLINI, LOURENCO MATAKAS JR.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO AV. PROF. LUCIANO GUALBERTO, TRAV. 3, 158 – SÃO PAULO – SP

E-mails: koleff.lucas@gmail.com, elpellini@usp.br, matakas@pea.usp.br

Abstract—Reactive power compensation in low and medium voltage grids is generally done by delta-connected capacitor banks. Synchronous static reactive power compensators are used to improve the fundamental displacement power factor in electrical power systems. Those are usually equipped with voltage source inverters using an inductive coupling impedance. The usage of a series LC coupling impedance reduces the inverter rating as the series capacitor blocks the fundamental voltage of the grid from the inverter. This paper presents a control strategy for a delta-connected LC coupled voltage source inverter topology. Current tracking is achieved in the delta branches, including the circulating current control. The delta branch current references are calculated by a linear transformation of the phase currents. Additionally, the control of the energy on the DC link capacitors and the voltage balancing is presented. The proposed control strategy is validated through simulations with the topology parameters.

Keywords-Power electronics, power quality, reactive power, control systems.

Resumo— A compensação de potência reativa em redes de baixa e média tensão é geralmente feita por bancos de capacitores conectados em triângulo. Compensadores síncronos estáticos são utilizados para melhorar o fator de potência de deslocamento de fundamental em sistemas elétricos de potência. Estes são geralmente equipados com inversores do tipo fonte de tensão com impedância de acoplamento indutiva. A utilização de inversores com impedância de acoplamento do tipo LC série reduz as especificações do inversor devido ao capacitor série que impede a queda completa da tensão de frequência fundamental no inversor. Este artigo apresenta uma estratégia de controle para uma topologia com inversores do tipo fonte de tensão com acoplamento LC série conectados em triângulo. O rastreamento de corrente é realizado nos ramos do triângulo, incluindo o controle da corrente circulante. As referências de corrente nos ramos do triângulo são calculadas a partir de uma transformação linear através das correntes de fase. Adicionalmente, o controle da energia total nos capacitores CC da topologia é mostrado junto com o balanceamento das tensões. A estratégia de controle proposta é validada através de simulações com os parâmetros da topologia.

Palavras-chave— Eletrônica de potência, qualidade de energia, potência reativa, sistemas de controle.

1 Introdução

Existem várias formas de se realizar a compensação de reativos de fundamental em sistemas elétricos de potência. A maioria das aplicações utiliza bancos de capacitores chaveados (Hingorani and Gyugyi, op. 2000). Em instalações de média e principalmente em baixa tensão, estes estão geralmente ligados em triângulo. Uma outra maneira de realizar a compensação de reativos é utilizar compensadores síncronos estáticos (STATCOMs). (Gyugyi, 1979) Estes utilizam inversores do tipo fonte de tensão para impor uma tensão com a frequência fundamental da rede, variando amplitude e ângulo de fase para controlar o fluxo de potência. A maioria dos inversores do tipo fonte de tensão são acoplados à rede por meio de uma impedância indutiva. Os inversores com acoplamento LC série, também denominado filtros híbridos na literatura, por sua vez, utilizam um indutor ligado em série com um capacitor. A vantagem desta topologia é diminuir as especificações e o custo do inversor (Akagi and Isozaki, 2012). Isso se deve ao fato de que a maior parte da queda da tensão fundamental se dá no capacitor, pois em baixas frequências a sua impedância predomina. Esta topologia foi utilizada para mitigar diversos problemas no sistema elétrico, como circulação de harmônicos de corrente (Bai et al., 2018) e estabilidade (Bai et al., 2017). Em outras publicações, também foi utilizada para compensação de reativos

(Wang, Lam and Wong, 2018), inclusive como STATCOM (Wang, Lam and Wong, 2016). No entanto, estes autores utilizam a ligação em estrela. A principal contribuição deste artigo é propor uma malha de controle para um compensador estático de reativos e harmônicos utilizando inversores com acoplamento LC série ligados em triângulo, aplicação não encontrada na literatura.

2 Modelo da Planta

A Figura 1 mostra a topologia proposta. Os pontos A, B e C representam as três fases do sistema, ligadas nos ramos AB, BC e CA, respectivamente. São identificados os capacitores série C_F , os indutores L_F e a resistência equivalente série R. Os barramentos CC dos inversores são representados por C_{CC,ab}, C_{CC,bc} e C_{CC,ca} e suas tensões de saída por $U_{f,ab}$, $U_{f,bc}$ e $U_{f,ca}$. As correntes nas fases são i_a , i_b e i_c , e as correntes nos ramos são iab, ibc e ica. Em (1), é mostrada a relação corrente-tensão para o ramo AB na frequência fundamental e em (2) o seu respectivo fluxo de potência apararente. Os diagramas fasoriais nas Figura 2 e na Figura 3 ilustram estas relações. A corrente circulante é representada por *icirc*. Observa-se que a corrente circulante não produz efeito sobre a corrente na rede, pois fica confinada nos ramos da associação triângulo.

$$I_{ab} = j \cdot \omega_1 \cdot \mathcal{C} \cdot (U_{ab} - U_{f,ab}) \tag{1}$$

$$S_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}^* \tag{2}$$



Figura 1. Diagrama de circuito elétrico equivalente da topologia



Figura 2. Diagrama fasorial para tensão no inversor em quadratura com a tensão de linha.



Figura 3. Diagrama fasorial para injeção de tensão no inversor em fase com a tensão de linha.

A Tabela 1 mostra os parâmetros dos componentes utilizados para o desenvolvimento das malhas de controle mostradas na Seção 3 e para a obtenção das formas de onda mostradas na Seção 4.

Tabela 1. Parâmetros da Topologia.					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor		
U _{fase,pico}	125V	L_F	30 <i>mH</i>		
C_F	15μ <i>F</i>	R	0.1Ω		
C_{CC}	330µ <i>F</i>	f_{sw}	20KHz		
f_1	60 <i>Hz</i>	ω_1	377rad/s		

3. Desenvolvimento do Controle

3.1 Malha de Rastreamento de Corrente

As malhas de controle são baseadas no rastreamento das correntes nos ramos do triângulo. São utilizados os controladores proporcionais integrais G_i em (3), comparando as referências de corrente nos ramos $i_{ab,ref}$, $i_{bc,ref}$ e $i_{ca,ref}$ com os valores medidos, como mostrado na Figura 4. Os valores de referência para as correntes no ramos são compostos pela superposição das correntes de referência em frequência fundamen-

tal $i_{ab,1,ref}$, $i_{bc,1,ref}$ e $i_{ca,1,ref}$, das correntes de compensação de harmônicos $i_{ab,h,ref}$, $i_{bc,h,ref}$ e $i_{ca,h,ref}$ e a referência de corrente circulante $i_{circ,ref}$ que passa pelos três ramos. Finalmente, as referências de tensão $U_{f,ab}$, $U_{f,bc}$ e $U_{f,ca}$ para a modulação PWM de três níveis nos inversores são geradas a partir da soma dos esforços de controle gerados pelos controladores de corrente G_i e pelos controladores de tensão no link CC $U_{CC,ab,ref}$, $U_{CC,bc,ref}$ e $U_{CC,ca,ref}$.



Figura 4. Rastreamento de corrente nos três ramos do triângulo.

$$G_I(s) = \frac{K_I(1 + s \cdot T_I)}{s \cdot T_I}$$
(3)

As referências de corrente mostradas na Figura 4 são referentes às correntes nos ramos da ligação triângulo. No entanto, deseja-se dar a referência em termos das correntes nas fases $A, B \in C$. Para tanto, é necessário transformar as referências de corrente nas fases $i_{a,h,ref}$, $i_{b,h,ref}$, $i_{c,h,ref}$, $i_{a,1,ref}$, $i_{b,1,ref}$ e $i_{c,1,ref}$ nas respectivas correntes nos ramos, como mostrado na Figura 5. (Gao *et al.*, 2014). Para tanto, é utilizada a transformação M_{3x3} mostrada em (4). É importante notar que esta conversão não é biunívoca, e nesta etapa toma-se a parcela da corrente circulante como nula (Lourenco Matakas Junior, 2000).

Figura 5. Cálculo da referência de corrente.

$$M_{3x3} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4)

3.2 Malha de Controle da Corrente Circulante

A Figura 6 por sua vez mostra a malha de corrente circulante, que é responsável pelo balanceamento das tensões nos barramentos CC nos três inversores. Notase a comparação dos valores de tensão medidos $U_{CC,ab}$, $U_{CC,bc}$ e $U_{CC,ca}$.com o valor de referência $U_{cc,ref}$. Faz- se a multiplicação por um sistema de tensões trifásicas de amplitude unitária em fase com as tensões nos ramos do triângulo para obter os valores apropriados ao balanceamento (Hagiwara, Maeda and Akagi, 2013). Os resultados das multiplicações são então somados. O resultado da soma alimenta um controlador proporcional de ganho K_c para finalmente gerar a referência de corrente circulante $i_{circ,ref}$. O cálculo da corrente circulante é mostrado em (5) e na Figura 7. O funcionamento desta malha de controle é explicado pela relação de potência introduzida em (2). Ao se impor uma corrente circulante passando pelo ramo do inversor em fase com a tensão neste mesmo ramo, há a ocorrência de fluxo de potência ativa no ramo em questão. Esta será absorvida ou fornecida pelo inversor já que o capacitor e o indutor possuem apenas capacidade de trabalhar com potência reativa.



Figura 6. Malha de controle da corrente circulante.



Figura 7. Cálculo da corrente circulante.

3.3 Malha de Controle da Tensão CC

A malha de controle da tensão nos barramentos CC mostrada na Figura 8 é responsável pelo controle da média das tensões nos capacitores de barramento CC nos inversores. Ela permite injetar potência ativa no sistema, carregando os capacitores, sendo que a malha de controle da corrente circulante se encarrega de distribuir e equilibrar a carga entre os capacitores. A referência de tensão nos barramentos CC Ucc.ref é comparada com o valor médio das tensões medidas nos barramentos, e passa pelo controlador proporcional integral mostrado em (6). O PLL ilustrado na Figura 9 permite obter o ângulo de fase Θ e as tensões de fundamental de linha na rede $U_{a,1}, U_{b,1} \in U_{c,1}$ e nos ramos $U_{ab,1}, U_{bc,1} \in U_{ca,1}$. Multiplica-se a saída do controlador pelas tensões nos ramos defasadas em 90º para obter referências de tensão no inversor para o controle da energia CC. Com a tensão do inversor defasada em quadratura em relação à tensão de linha temos um fluxo de corrente e potência ativa no ramo, como ilustra o diagrama fasorial mostrado na Figura 2. Dessa forma, tem-se um fluxo de potência ativa entrando ou

saindo do conjunto. Caso a tensão do inversor estivesse em fase com a tensão de fase no ramo, haveria apenas um fluxo de potência reativa como mostrado na Figura 3. A Tabela 2 sumariza os parâmetros de todos os controladores.



Figura 8. Malha de controle da energia nos barramentos CC.

$G_{CC}(s) = \frac{K_{CC}(1 + s \cdot T_{CC})}{s \cdot T_{CC}}$				
$\begin{array}{c c} U_{a} & & U_{a,1} \\ \hline U_{b} & \\ U_{c} & \\ U_{c,1} \end{array} \begin{array}{c} U_{b,1} \\ U_{b,1} \\ U_{c,1} \end{array} 3 \cdot M_{3x3} \begin{array}{c} U_{ab,1} \\ U_{bc,1} \\ U_{ca,1} \end{array}$	•			
θ,ωt				

Figura 9. Diagrama de blocos do PLL

Tabela 2. Parâmetros do Controle.					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor		
K _I	765	T _{CC}	0.1 <i>s</i>		
T_{I}	0.1ms	K _C	10^{-5}		
K _{CC}	10	-	-		

4 Resultados Obtidos

4.1 Energização dos Barramentos CC

Foram realizadas simulações do transitório de energização dos barramentos CC dos inversores. Foi utilizado o programa PSIM em todas as simulações apresentadas. Nas formas de ondas na Figura 10, os capacitores tinham como condição inicial tensão nula e as malhas de rastreamento de corrente e tensão foram ligadas no instante t = 0. É possível ver que as tensões se estabilizam no valor de referência de 190V conforme esperado.



Figura 10. Formas de onda de tensão nos barramentos CC dos inversores durante o transitório de energização.

A Figura 11, por sua vez, mostra o detalhe da oscilação de tensão nos barramentos CC dos inversores em regime permanente. Nota-se que esta possui uma frequência igual ao dobro da frequência da tensão na rede.



Figura 11. Detalhe das formas de onda de tensão nos barramentos CC dos inversores em regime após o transitório de energização.

A potência instantânea em cada inversor é calculada de acordo com (7) (Akagi, Watanabe and Aredes, 2007). Suas respectivas formas de onda durante o transitório de energização são mostradas na Figura 12.

$$p(t) = v_{ab}(t)i_{ab}(t) + v_{bc}(t)i_{bc}(t) + v_{ca}(t)i_{ca}(t)$$
(7)



Figura 12. Formas de onda de potência no inversor durante o transitório de energização.

4.2 Balanceamento das Tensões nos Barramentos CC

Com o objetivo de validar o funcionamento da malha de corrente circulante, foram realizadas simulações em que a tensão inicial do barramento CC do ramo *AB* é de 250V e dos ramos *BC* e *CA* é de 180V. As malhas de corrente e tensão foram ligadas em t = 0. Na Figura 13 é possível observar que as tensões se estabilizam no valor de referência de 190V. Já a Figura 14 e a Figura 15 mostram as formas de onda da corrente circulante simulada e a sua referência durante o transitório, sendo que esta corrente tem frequência de 60Hz.



Figura 13. Formas de onda de tensão no barramento CC dos inversores durante o transitório de balanceamento.



Figura 14. Formas de onda de corrente circulante no transitório de balanceamento.



Figura 15. Detalhe das formas de onda de corrente circulante no transitório de balanceamento.

A Figura 16 por sua vez mostra as formas de onda da potência instantânea em cada inversor. É possível observar que a potência instantânea no ramo AB, que tinha como condição inicial a maior tensão no barramento CC, apresenta tendência inversa aos ramos BC e CA, que tinham como condição inicial menores tensões no barramento CC. Após o transitório, a potência instantânea corresponde à reposição das perdas nos resistores de descarga e no inversor.



Figura 16. Formas de onda de potência no inversor durante o transitório de balanceamento.

4.3 Variação nos Reativos de Frequência Fundamental

A fim de observar o comportamento do rastreamento de correntes de frequência fundamental e a injeção de reativos, foi realizada a variação em degrau dos reativos injetados através do rastreamento de corrente na rede. A Figura 17 mostra as formas de onda de corrente na rede e a Figura 18 por sua vez a potência reativa absorvida pelo conjunto. É importante lembrar que a capacidade de injeção de potência é limitada pela tensão do barramento CC nesta topologia. (Tzung-Lin Lee, Zong-Jie Chen and Shang-Hung Hu, 2009). A equação (8) mostra o cálculo da potência reativa Q_{ab} a partir da tensão eficaz de saída do inversor $U_{f,ab,ef}$. Assume-se que tensão do inversor está em fase com a tensão no ramo. Para permitir a geração de reativos indutivos (Q > 0), é necessário que a tensão máxima de saída dos inversores seja superior ao valor de pico da tensão de linha da rede. A referência de corrente para o controle de reativos pode ser gerada a partir da tensão no ponto de acoplamento como mostrado em (Rivas et al., 2003).



Figura 17. Formas de onda de corrente na rede para a variação dos reativos na frequência fundamental.



Figura 18. Formas de onda de potência reativa no conjunto para a variação dos reativos na frequência fundamental.

4.4 Rastreamento de Corrente com Conteúdo Harmônico

Para verificar o rastreamento de corrente com conteúdo harmônico, foi utilizada uma referência trifásica de corrente senoidal na rede composta por uma componente de frequência fundamental de amplitude de 1A e uma componente de 5^a harmônica de amplitude de 0,7A. A Figura 19 mostra o efetivo rastreamento das correntes nos ramos *AB*, *BC* e *CA*.



Figura 19. Formas de onda de corrente nos ramos do triângulo para o rastreamento de corrente de 5ª harmônica.

A Figura 20 mostra as formas de onda das correntes resultantes nas fases A, $B \in C$. Na Figura 21, é mostrada a transformada de Fourier da corrente na fase A da rede calculada usando MATLAB. É possível observar que as amplitudes das raias espectrais coincidem com os valores de referência, atestando o correto funcionamento das malhas de rastreamento. O comportamento do espectro das correntes nas fases $B \in C$ é análogo. A Figura 22 por sua vez apresenta as respectivas tensões de fase na rede.



Figura 20. Formas de onda de corrente na rede para o rastreamento de corrente de 5ª harmônica.



Figura 21. Transformada de Fourier da formas de onda da corrente na fase A para o rastreamento de corrente de 5ª harmônica.



5 Conclusões

A principal contribuição deste artigo é propor um sistema de controle de tensão e corrente para a associação em triângulo utilizando inversores do tipo fonte de tensão com impedância de acoplamento LC série, já que esta aplicação não foi encontrada na literatura. Formas de onda para os transitórios de energização e balanceamento dos barramentos CC bem como formas de onda para a injeção de reativos e harmônicos de corrente na rede foram obtidas através de simulações permitindo verificar o correto funcionamento das malhas de controle de tensão e corrente do sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento deste projeto de pesquisa pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processos FAPESP 2016/16542-5 e 2016/01930-0).

Referências Bibliográficas

Akagi, H. and Isozaki, K. (2012) 'A Hybrid Active Filter for a Three-Phase 12-Pulse Diode Rectifier Used as the Front End of a Medium-Voltage Motor Drive', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(1), pp. 69–77. doi: 10.1109/TPEL.2011.2157977.

Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007) *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. (IEEE Press series on power engineering). New York: Wiley-IEEE; John Wiley [distributor].

Bai, H., Wang, X., Blaabjerg, F. and Loh, P.C. (2018) 'Harmonic Analysis and Mitigation of Low-Frequency Switching Voltage Source Inverter with Auxiliary VSI', *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, p. 1. doi: 10.1109/JESTPE.2018.2789982.

Bai, H., Wang, X., Loh, P.C. and Blaabjerg, F. (2017) 'Passivity Enhancement of Grid-Tied Converters by Series LC-Filtered Active Damper', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), pp. 369–379. doi: 10.1109/TIE.2016.2562604.

Gao, F., Zhu, H., Li, Z., Chu, Z., Wang, P. and Li, Y. (2014) 'Reference current estimation for threephase delta-connected active power filter', 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, China, 03/09/2014: 31/08/2014 IEEE. pp. 1-6. _ doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940921.

Gyugyi, L. (1979) 'Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits', *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-15(5), pp. 521–532. doi: 10.1109/TIA.1979.4503701.

Hagiwara, M., Maeda, R. and Akagi, H. (2013) 'Application of a modular multilevel cascade converter (MMCC-SDBC) to a STATCOM. Control of active power and negative-sequence reactive power', *Electrical Engineering in Japan*, 183(4), pp. 33–44. doi: 10.1002/eej.22365.

Hingorani, N.G. and Gyugyi, L. (op. 2000) Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York: IEEE Press.

Lourenco Matakas Junior (2000) 'A Decoupled, Hysteresis Based, Voltage Controller for a Current Source Converter', *Proceedings of the IPEC-Tokyo* 2000, 4, pp. 2019–2024.

Rivas, D., Moran, L., Dixon, J.W. and Espinoza, J.R. (2003) 'Improving passive filter compensation performance with active techniques', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(1), pp. 161–170. doi: 10.1109/TIE.2002.807658.

Tzung-Lin Lee, Zong-Jie Chen and Shang-Hung Hu (2009) 'Design of a Power Flow Control Method for Hybrid Active Front-End Converters'.

Wang, L., Lam, C.-S. and Wong, M.-C. (2016) 'A Hybrid-STATCOM With Wide Compensation Range and Low DC-Link Voltage', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6), pp. 3333–3343. doi: 10.1109/TIE.2016.2523922.

Wang, L., Lam, C.-S. and Wong, M.-C. (2018) 'Hybrid Structure of Static Var Compensator and Hybrid Active Power Filter (SVC//HAPF) for Medium-Voltage Heavy Loads Compensation', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(6), pp. 4432–4442. doi: 10.1109/TIE.2017.2772201.