

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CONVERSORES EM UMA MICRORREDE SEM CANAIS DE COMUNICAÇÃO EM MODO CONECTADO À REDE ELÉTRICA PRINCIPAL

TIAGO DOMINGOS CARDOSO*, MARCELLO MEZAROBA†, GUSTAVO MEDEIROS DE SOUZA AZEVEDO*,
MARCELO CABRAL CAVALCANTI*, FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES*

* *Universidade Federal de Pernambuco - UFPE*
Recife, Pernambuco, Brasil

† *Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC*
Joinville, Santa Catarina, Brasil

Emails: tiago.domingos@ufpe.br, marcello.mezaroba@gmail.com, gustavomsa@aim.com,
marcelo.ccavalcanti@ufpe.br, fneves@ufpe.br

Abstract— The parallelism of converters in microgrids has been widely studied in the literature. There are many control techniques to perform the parallel operation of such converters, and the droop control method (or based methods) is the most common. The main focus of this article is in the case study by computational simulations of a system that emulates a low voltage microgrid composed by two microsources using droop and virtual impedance method. The system is subjected to some common non-idealities in low voltage electrical systems, such as frequency variation and voltage unbalance. A comparison is also made regarding the use of the three-phase and per-phase droop control in situations of voltage unbalance of the main grid.

Keywords— Droop control, Microgrids, Parallelism of converters, Per-phase droop.

Resumo— O paralelismo de conversores em microrredes tem sido amplamente estudado na literatura. Existem muitas técnicas de controle para realizar a operação dos conversores em paralelo, e os métodos baseados no controle por inclinação são os mais utilizados. O enfoque principal deste artigo é no estudo de caso em simulações computacionais de um sistema que emula uma microrrede de baixa tensão composta por duas microfones controladas utilizando o método de decaimento e impedância virtual. O sistema é submetido a algumas não-idealidades comuns em sistemas elétricos de baixa tensão, como variação de frequência e desequilíbrio nas tensões. Também é realizado um comparativo quanto ao uso do controle por inclinação trifásico e um por fase em situações de desbalanço de tensão da rede principal.

Palavras-chave— Controle por inclinação, *Droop* por fase, Microrredes, Paralelismo de conversores.

1 Introdução

Sistemas de Geração Distribuída (GD) e microrredes têm se tornado cada vez mais importantes no que concerne ao aumento da penetração de energias renováveis nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Nesse sentido, o uso de dispositivos baseados em eletrônica de potência como interfaces de energia inteligentes entre as fontes de geração primária e a rede elétrica é obrigatório, de forma a garantir a controlabilidade e flexibilidade exigidas (Vasquez et al., 2009).

Concebida como solução para integração dos sistemas de geração distribuída ao SEP, uma microrrede pode ser definida como um agrupamento coordenado de microfones e cargas que operam como uma célula única controlável conectada à rede elétrica principal em um único ponto (PAC – Ponto de Acoplamento Comum, do inglês, PCC – *Point of Common Coupling*) (Lasseter, 2002). Uma microrrede deve ser capaz de operar de modo conectado e isolado da rede elétrica principal, e também na transição entre os dois modos de operação. Um exemplo de estrutura de uma microrrede pode ser observado na Figura 1.

Observando a estrutura de uma microrrede, têm-se uma configuração com várias microfones

conectadas em paralelo, de forma que são requeridas técnicas de controle bem elaboradas para evitar circulação de corrente entre as fontes e compartilhar adequadamente as demandas de carga.

As técnicas de controle para viabilizar o paralelismo de conversores foram previamente desenvolvidas e utilizadas em aplicações de sistemas com UPS (Fonte de alimentação ininterrupta – UPS – *Uninterruptible Power Supply*) (Shanxu et al., 1999), e posteriormente foram adaptadas ao controle de conversores em microrredes. Os métodos existentes na literatura, de uma maneira geral, podem ser classificados de acordo com alguns princípios básicos. Um dos aspectos mais importantes a ser levado em consideração é a existência ou não de comunicação entre os inversores de uma

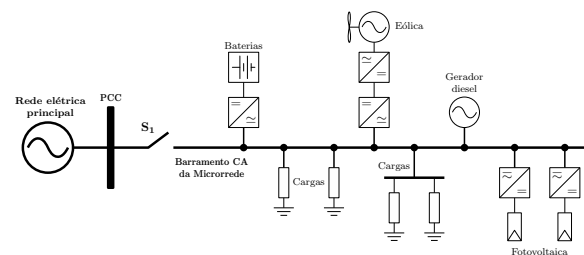


Figura 1: Exemplo de estrutura de uma microrrede.

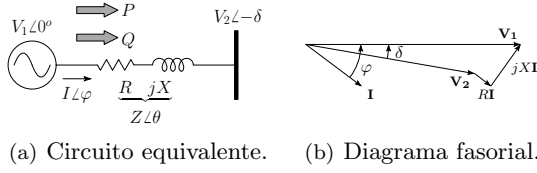


Figura 2: Modelo simplificado de um conversor conectado à rede principal.

microrrede (de Andrade, 2005).

Existem muitos algoritmos que possibilitam realizar o paralelismo dos conversores, sendo mais comuns na literatura os métodos baseados no controle por inclinação (ou por curvas de decaimento), também conhecido por *droop control*. Justifica-se essa opção pelo fato de que não há necessidade de canais de comunicação com elevada largura de banda, eliminando (ou minimizando) os limites impostos pela localização física das microfones, melhorando o desempenho da microrrede (Guerrero et al., 2006).

Este artigo apresenta um estudo de caso em simulações computacionais de um sistema que emula uma microrrede de baixa tensão composta por duas microfones controladas, e conectadas à rede elétrica principal no PAC. As microfones são controladas com o controle por inclinação e não existem canais de comunicação entre os conversores. O sistema é submetido a algumas não-idealidades comuns nos sistemas elétricos, como variação de frequência e desequilíbrio nas tensões. Também é realizado um comparativo quanto ao uso do controle por inclinação trifásico (que utiliza as potências trifásicas nas regras de decaimento) e um por fase quando há desequilíbrio de tensão no PAC.

2 Fundamentos do controle por inclinação (*droop control*)

O controle por inclinação é realizado com base em equações bem conhecidas e utilizadas nos sistemas de potência em regime permanente com abordagem fasorial.

Considerando o modelo de um conversor de potência como uma fonte ideal conectada a rede elétrica através de uma impedância ($\mathbf{Z} = R + jX = Z\angle\theta$) e seu diagrama fasorial representados na Figura 2, em que $V_1\angle 0^\circ$ é o fasor tensão de saída do conversor e $V_2\angle -\delta$ é o fasor tensão da rede elétrica no PAC, tem-se que as equações de fluxos de potência ativa e reativa entre o conversor para a rede principal são dadas por:

$$P = \frac{V_1^2}{Z} \cos \theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \cos(\theta + \delta) \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_1^2}{Z} \sin \theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \sin(\theta + \delta). \quad (2)$$

A depender da natureza da linha (predominantemente resistiva ou indutiva), e considerando pequenas aberturas angulares (pequenos valores do ângulo de potência δ , em que pode-se admitir que $\sin \delta \cong \delta$ e $\cos \delta \cong 1$), as equações do fluxo de potência podem ser aproximadas por

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{V_1}{X} (V_1 - V_2), \quad (4)$$

para linhas predominantemente indutivas ($\mathbf{Z} \approx X\angle 90^\circ$), e por

$$P = \frac{V_1}{R} (V_1 - V_2) \quad (5)$$

$$Q = -\frac{V_1 V_2}{R} \delta, \quad (6)$$

para linhas predominantemente resistivas ($\mathbf{Z} \approx R$).

Nota-se, levando em conta as considerações tomadas, que existe uma relação direta entre a potência ativa P e o ângulo de potência δ , assim como entre a potência reativa Q e a diferença de tensão ($V_1 - V_2$), demonstrando assim as relações P - δ e Q - V , para linhas predominantemente indutivas. Enquanto as relações para o caso de linhas predominantemente resistivas são entre a potência ativa P e a diferença de tensão ($V_1 - V_2$), e entre a potência reativa e o negativo do ângulo de potência, revelando relações P - V e Q - δ .

Na prática, utiliza-se a frequência para impor o ângulo de potência, pois, como não há comunicação entre as microfones, uma unidade não conhece a fase inicial da outra. Entretanto, uma frequência inicial pode ser facilmente fixada como ω_o (Guerrero et al., 2007). Assim, a frequência de operação e amplitude da tensão do conversor são governadas pelas regras de inclinação

$$\omega = \omega_o - k_{p\omega} (P - P_0) \quad \text{e} \quad (7)$$

$$E = E_o - k_{qv} (Q - Q_0), \quad (8)$$

para linhas predominantemente indutivas, e por

$$E = E_o - k_{pv} (P - P_0) \quad \text{e} \quad (9)$$

$$\omega = \omega_o + k_{q\omega} (Q - Q_0), \quad (10)$$

para linhas predominantemente resistivas, em que ω_o e E_o são a frequência e a amplitude da tensão na saída de um conversor sem carga, $k_{p\omega}$ e $k_{q\omega}$ são os coeficientes de inclinação de frequência e k_{pv} e k_{qv} são os coeficientes de decaimento da amplitude da tensão, P e Q são as potências médias ativa e reativa de saída do conversor, respectivamente, e P_0 e Q_0 são as potências de operação do conversor (utilizados quando o conversor opera conectado à rede elétrica principal), que devem assumir valores nulos quando a microrrede opera em modo isolado da rede elétrica principal (em ilha).

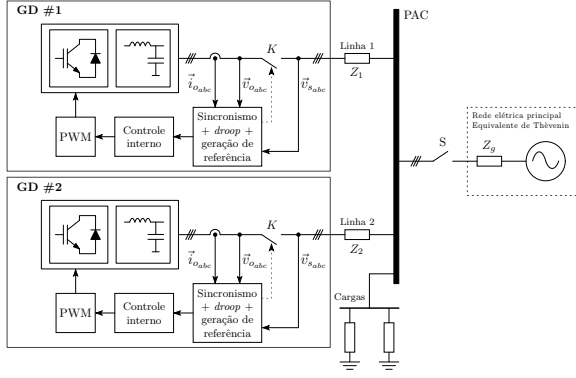


Figura 3: Sistema simulado – MR emulada

Com a manipulação local da frequência e amplitude da tensão de saída do conversor é possível controlar o fluxo de potência de cada unidade. Aplicando-se as características de inclinação à cada unidade geradora, cada fonte de GD promoverá a regulação da frequência e da amplitude da tensão de saída de acordo com as potências ativa e reativa injetadas, de modo a encontrar um ponto de equilíbrio entre si, garantindo o suprimento de potência às cargas com a distribuição da potência total entre os conversores.

3 Estrutura e controle da microrrede

A estrutura da microrrede simulada pode ser observada na Figura 3. O sistema é formado por dois VSI's (*Voltage Source Inverter*) trifásicos conectados à rede elétrica principal através do PAC.

3.1 Sistema de controle completo

O esquema detalhado de controle (comum aos conversores) é apresentado na Figura 4, onde pode-se observar três malhas de controle principais, além do sistema de sincronização:

- **Malha de controle de potência:** essa malha é composta por três blocos internos, o primeiro consiste no calculador de potência média entregue pelo conversor, cujas entradas são as tensões v_{oabc} e as correntes i_{oabc} . O cálculo de potência média foi realizado com o cálculo da potência instantânea e posterior extração do valor médio com filtros passa baixas (LPF – *Low Pass Filter*) de 1ª-ordem com frequência de corte de 15 Hz. O segundo bloco representa as equações de *droop* (características de inclinação) apropriadas para linhas predominantemente resistivas (adotada neste trabalho por ser mais adequada em sistemas de baixa tensão, em que as linhas são predominantemente resistivas), representadas por (9) e (10), que irá gerar referências de amplitude e frequência da tensão. O terceiro bloco, o Gerador de referência, utiliza os valores de

amplitude e frequência da tensão proveniente das equações de decaimento para gerar senóides de referência v_{abc}^* ;

- **Impedância virtual:** de forma a impor/emular um comportamento de linha (impedância de conexão) desejado ao conversor, adiciona-se um termo de queda de tensão virtual (resultante de uma impedância virtual $Z_V(s)$, que terá apenas um valor de resistência fixada, com um valor nulo de reatância indutiva, multiplicada pela(s) corrente(s) de saída, i_{oabc});
- **Malhas internas de controle:** para controle da tensão dos conversores optou-se pela utilização de um controle de tensão (malha externa) com uma malha interna de controle de corrente por fase do conversor, conforme apresentado na Figura 5. Os controladores $C_v(s)$ e $C_i(s)$ denotam os controladores de tensão e corrente, respectivamente, que são controladores do tipo Proporcional-Ressonante (PR) práticos. Observa-se ainda a utilização dos valores medidos das correntes de saída (após o filtro capacitivo, i_{oabc}) e das tensões sobre o capacitor de filtro (v_{oabc}) como *feedforwards* nas malhas de controle de tensão e corrente, respectivamente. Dessa forma, os distúrbios de i_{oabc} e v_{oabc} são cancelados, aproximadamente (Holtz et al., 2004; Vidal et al., 2015).

Além dessas malhas têm-se uma malha externa de sincronização composta pelo PLL (*Phase Locked Loop*) a partir da medição da tensão do lado da rede, v_{sabc} . Optou-se pela utilização de um PLL em referencial síncrono (SRF-PLL – *Synchronous Reference Frame - PLL*).

Os parâmetros utilizados para os elementos de potência dos conversores, coeficientes e constantes das curvas de decaimento e impedâncias de conexão e equivalente da rede são todos sumarizados na Tabela 1.

Os coeficientes de inclinação $k_{q\omega}$ e k_{pv} foram calculados por

$$k_{q\omega} = \frac{\Delta\omega_{max}}{S_{base}} \quad \text{e} \quad (11)$$

$$k_{pv} = \frac{\Delta E_{max}}{S_{base}}, \quad (12)$$

em que $\Delta\omega_{max}$ e ΔE_{max} denotam as máximas variações de frequência angular e de amplitude da tensão desejados e S_{base} é a potência nominal de base, dada por 10 kVAr. Os valores máximos de desvios admitidos são $\Delta\omega_{max} = 0,5\%$ e $\Delta E_{max} = 5,0\%$ dos valores nominais, ω_o e E_o , respectivamente. E o valor de resistência virtual foi escolhido de forma a garantir a estabilidade do sistema e diminuir os picos de corrente inerentes à conexão das microfuentes no PAC.

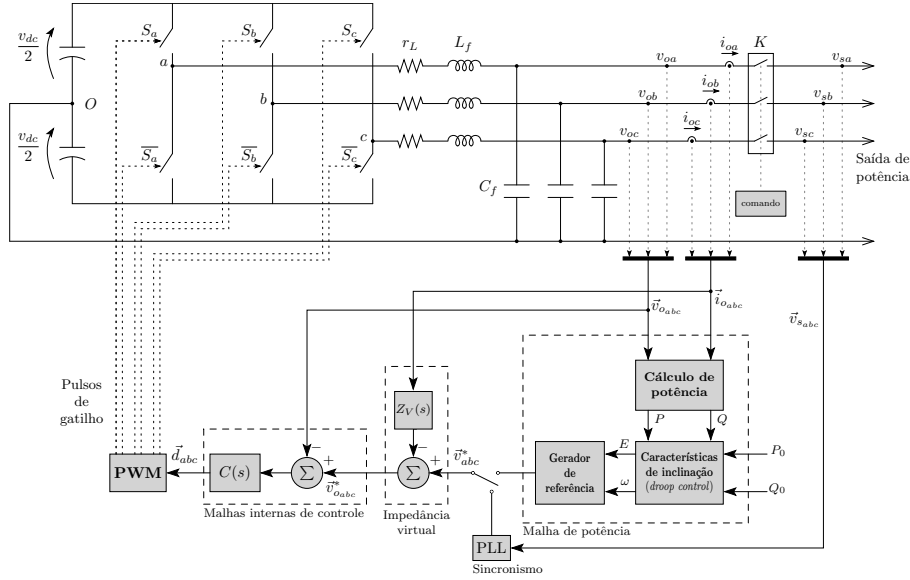


Figura 4: Estrutura de controle comum aos VSI's

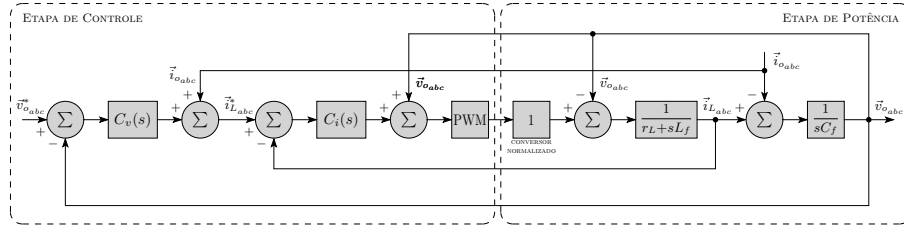


Figura 5: Diagrama de blocos do controle de tensão com malha interna de corrente

Tabela 1: Parâmetros do sistema

Parâmetros de potência dos VSI's	
Parâmetro	Valor
Tensão do barramento CC, V_{dc}	800 V
Frequência de comutação, f_s	20 kHz
Indutância do filtro de saída, L_f	1,6 mH
Resistência do indutor de filtro, r_L	0,1 Ω
Capacitância do filtro de saída, C_f	15 μF
Controle por inclinação e impedância virtual	
Parâmetro	Valor
Amplitude da tensão de referência, E_o	$220\sqrt{2}$ V
Frequência de referência, ω_o	$2\pi 60$ rad/s
Coef. de inclinação da frequência, $k_{q\omega}$	$0,1884 m \frac{rad/s}{V \sqrt{Ar}}$
Coef. de inclinação da tensão, k_{pv}	$1,5556 m \frac{W}{V}$
Resistência virtual dos inversores, R_V	0,3 Ω
Indutância virtual dos inversores, L_V	0
Sistema	
Parâmetro	Valor
Impedância de conexão 1, Z_1	0,1284 + j0,0166 Ω
Impedância de conexão 2, Z_2	0,1926 + j0,0249 Ω
Impedância de rede, Z_g	0,0955 + j0,1258 Ω

3.2 Ajuste das potências de operação

Em modo conctado à rede elétrica, o inversor deve operar de forma a otimizar os custos operacionais da microrrede. Assim, torna-se interessante que as microfones injetem na rede o máximo de potência disponível.

Utilizando as equações de decaimento, enunciadas por (9) e (10), deve-se provocar distúrbios nas potências de operação, P_o e Q_o , de forma que, após o equilíbrio das equações, as potências ativa e reativa entregues pelo conversor atinjam os valores desejados. Entretanto, apenas modificar os valores de P_o e Q_o para os desejados não se torna eficaz, uma vez que os valores de amplitude e frequência da tensão da rede elétrica podem variar dentro de certos limites.

Uma forma de garantir que o conversor entregue a potência desejada é utilizar uma malha lenta de ajuste das potências de operação, conforme apresentado na Figura 6. Utilizam-se controladores do tipo Proporcional-Integral (PI) sobre os erros de potências ativa e reativa médias ($\Delta P = P^* - P$ e $\Delta Q = Q^* - Q$), de forma que as saídas dos PIs, P_0 e Q_0 , são aplicadas diretamente nas equações de inclinação. Os parâmetros dos controladores da malha de ajuste das potências de operação são apresentados na Tabela 2.

4 Resultados

4.1 Controle por inclinação trifásico

Em uma primeira análise, utilizando um *droop* trifásico, fez-se a conexão dos conversores à rede elétrica (em instantes distintos). Nas Figuras 7 e 8

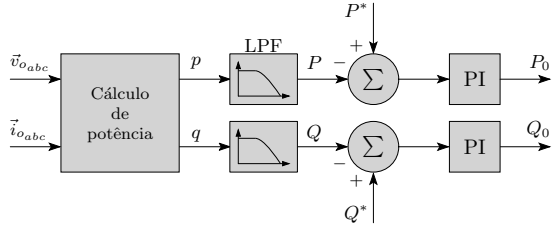


Figura 6: Malha de ajuste das potências de operação

Tabela 2: Parâmetros dos controladores da malha de ajuste de P_0 e Q_0

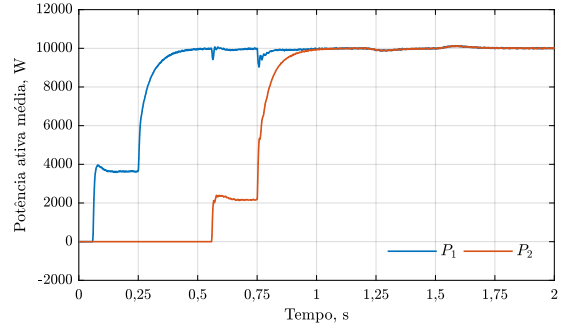
Parâmetro	Valor
Ganho proporcional – ajuste de P_0 , k_p^{aP}	1, 0
Ganho integral – ajuste de P_0 , k_i^{aP}	50 s^{-1}
Ganho proporcional – ajuste de Q_0 , k_p^{aQ}	0, 5
Ganho integral – ajuste de Q_0 , k_i^{aQ}	20 s^{-1}

são apresentados os fluxos de potência dos VSIs e as referências de amplitude e frequência da tensão impostas pelo controle por inclinação de cada conversor, respectivamente.

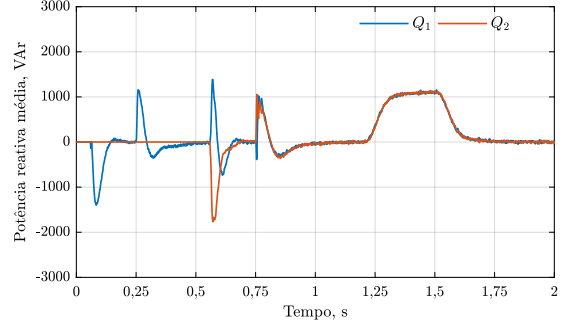
No início da simulação, a rede elétrica principal opera de forma equilibrada e com valores nominais de amplitude e frequência de tensão (220 V_{rms} , 60 Hz). Em $t = 0 \text{ s}$ o sincronismo do VSI 1 é habilitado, e, após o erro de tensão ser mínimo (dentro dos limites definidos), o conversor é conectado com o fechamento automático da chave K (Figura 4). Após a conexão, o *droop* passa a definir os pontos de equilíbrio do conversor, convergindo após alguns ciclos de rede. Em $t = 0,25 \text{ s}$ o ajuste das potências de operação é habilitado com $P^* = 10 \text{ kW}$ e $Q^* = 0$ (injeção de potência nominal com fator de potência unitário), valores de referência que são atingidos após o equilíbrio.

O sincronismo do VSI 2 é habilitado em $t = 0,5 \text{ s}$, com a seguinte conexão do conversor ao sistema. Nota-se que, mesmo com o conversor submetido às mesmas condições e possuir os mesmos coeficientes de inclinação e impedância virtual do VSI 1, estes possuem pontos de equilíbrio com a rede (de potência ativa) distintos. Isso acontece devido a diferença na impedância de conexão dos conversores, sendo a linha de interconexão do conversor 2 ao PAC mais distante fisicamente (maior impedância). Após o regime, habilita-se o ajuste das potências de operação deste conversor em $t = 0,75 \text{ s}$, com $P^* = 10 \text{ kW}$ e $Q^* = 0$.

De forma a observar o ajuste adequado de potência reativa, uma vez que, caso a rede mantenha frequência nominal, o ponto de equilíbrio de potência reativa será sempre $Q = 0$, altera-se em rampa o valor de frequência da rede principal com uma variação positiva de $0,67 \text{ rad/s}^2$, com início em $t = 1,2 \text{ s}$ e término em $t = 1,5 \text{ s}$, de forma que o valor final de frequência seja de $60,3 \text{ Hz}$ ($\approx 378,88 \text{ rad/s}$). Dessa forma, verifica-se o ade-

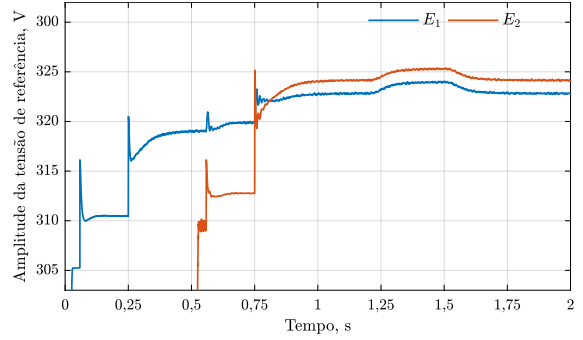


(a) Fluxos de potência ativa.

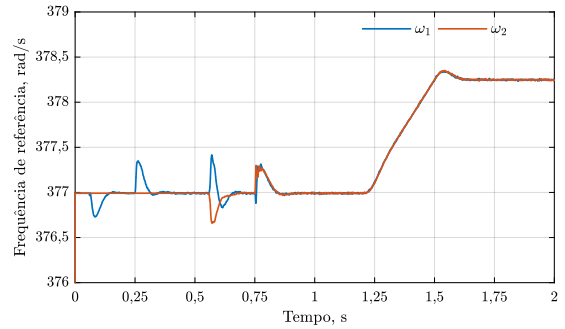


(b) Fluxos de potência reativa.

Figura 7: Fluxos de potência dos VSI's.



(a) Amplitude da tensão.

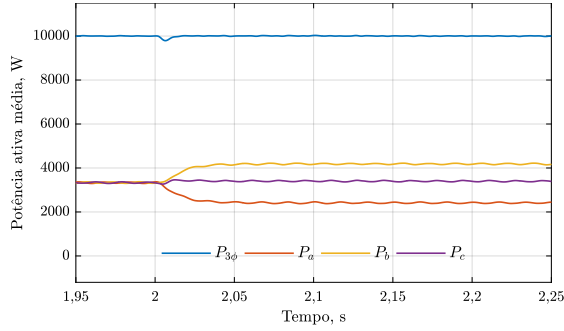


(b) Frequência.

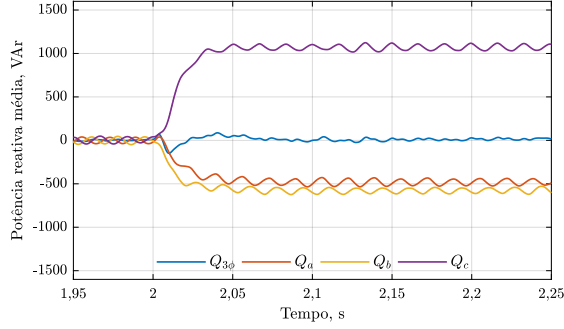
Figura 8: Sinais de referência obtidos do controle por inclinação.

quado ajuste da potência reativa de operação.

Em $t = 2 \text{ s}$ provoca-se um distúrbio de tensão na rede elétrica principal. O valor nominal de tensão de sequência positiva é mantido, e adiciona-se 2% de tensão de sequência negativa com fase $\phi_n = 0$. Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os



(a) Fluxos de potência ativa.



(b) Fluxos de potência reativa.

Figura 9: Fluxos de potência do VSI 1 após distúrbio na tensão da rede.

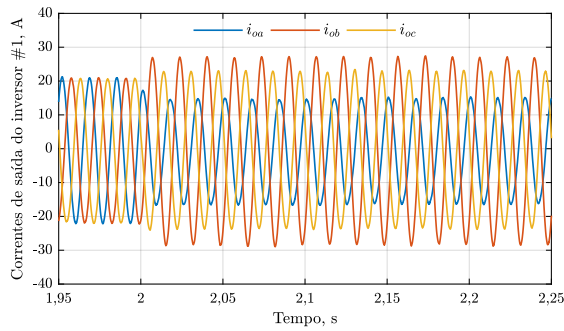


Figura 10: Correntes de saída do VSI 1

fluxos de potência, total e por fase, e as correntes de saída do conversor 1, respectivamente.

Após o distúrbio, os pontos de equilíbrio de potência ativa e reativa de cada fase apresentam valores distintos, apesar das potências trifásicas resultantes assumirem os valores desejados ($P^* = 10 \text{ kW}$ e $Q^* = 0$). E, portanto, existe um grande desequilíbrio de corrente e potência entre as fases do conversor, conforme pode ser observado na Figura 10.

4.2 Controle por inclinação por fase

Souza et al. (2015) faz uma análise comparativa quanto ao uso do *droop* trifásico e por fase em situações de desbalanço de carga. Neste trabalho, faz-se o uso do controle por inclinação e correção das potências de referência de operação por fase visando situações de desbalanço das tensões de rede, de forma que a promover a equalização

de potência entre as fases do conversor.

Desta forma, tem-se que as equações do controle por inclinação com o sistema operando em modo conectado são definidas por

$$E_a = E_o - 3 \cdot k_{pv} (P_a - P_{a0}), \quad (13)$$

$$E_b = E_o - 3 \cdot k_{pv} (P_b - P_{b0}), \quad (14)$$

$$E_c = E_o - 3 \cdot k_{pv} (P_c - P_{c0}) \quad (15)$$

e

$$\omega_a = \omega_o + 3 \cdot k_{q\omega} (Q_a - Q_{a0}), \quad (16)$$

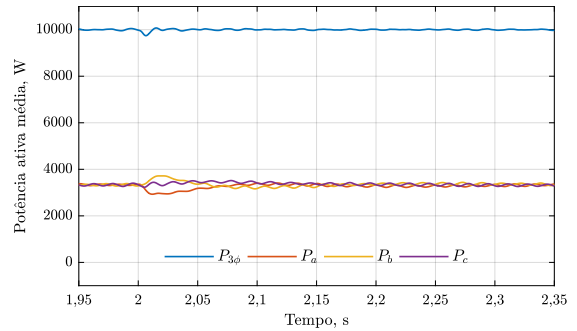
$$\omega_b = \omega_o + 3 \cdot k_{q\omega} (Q_b - Q_{b0}), \quad (17)$$

$$\omega_c = \omega_o + 3 \cdot k_{q\omega} (Q_c - Q_{c0}). \quad (18)$$

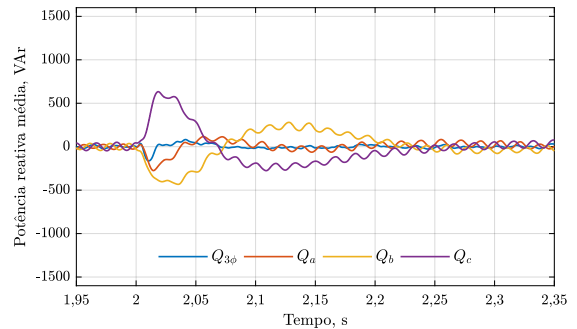
E, conseqüentemente, o ajuste das potências de operação contará com três malhas idênticas à Figura 6, uma para cada fase do conversor.

Fazendo desta forma, toma-se novamente o caso da subseção anterior, em que um desequilíbrio da tensão de rede foi provocado. Utilizando a abordagem por fase apresentada, verificam-se novamente, para o VSI 1, os fluxos de potência ativa e reativa e as potências de operação por fase (P_{abc0} e Q_{abc0}) nas Figuras 11 e 12, respectivamente, e as tensões e correntes na Figura 13.

Com estes resultados mostra-se boa adequação dos níveis de amplitude e fase das correntes do conversor, de modo que o ajuste por fase das potências de operação e a utilização do controle por inclinação por fase promovem a equalização das potências de cada fase do conversor, mesmo em



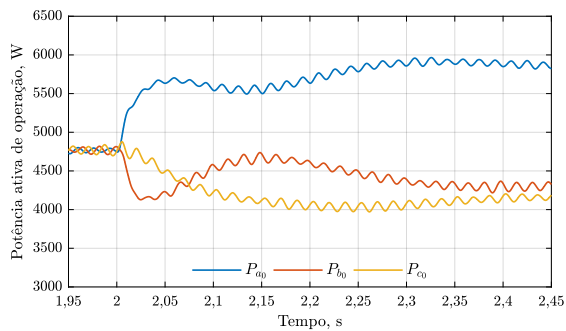
(a) Fluxos de potência ativa.



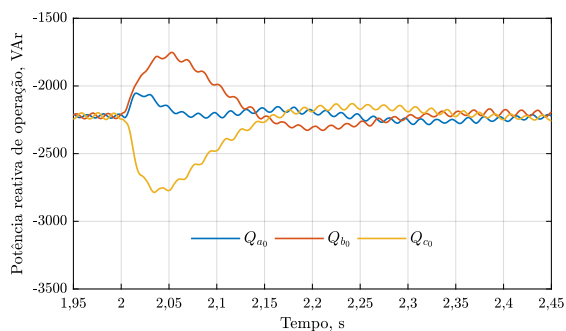
(b) Fluxos de potência reativa.

Figura 11: Fluxos de potência do VSI 1 após distúrbio na tensão da rede – *droop* por fase.

situações de desequilíbrio de rede (bastante usuais). Desta forma não são necessárias malhas externas de ajuste sobre os coeficientes de amplitude da tensão e frequências de referência, E_o e ω_o .

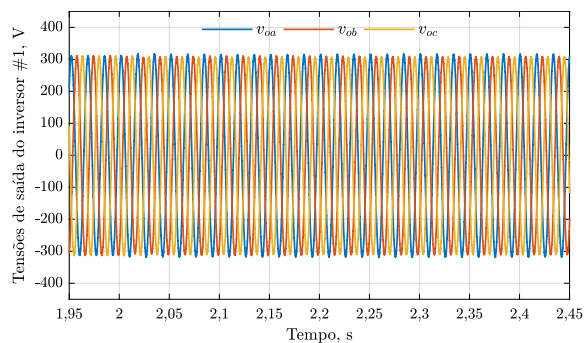


(a) Potência ativa de operação.

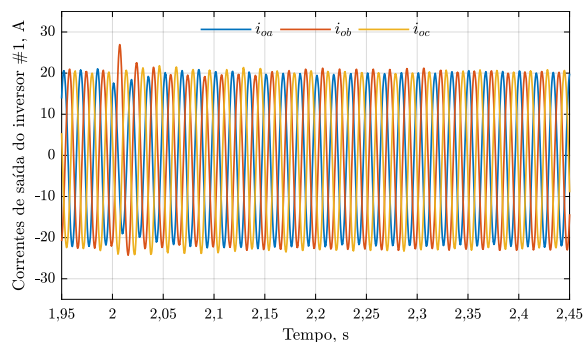


(b) Potência reativa de operação.

Figura 12: Potências de operação – droop por fase.



(a) Tensões.



(b) Correntes.

Figura 13: Tensões e correntes instantâneas do VSI 1 – droop por fase.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo de caso de uma microrrede conectada à rede elétrica principal com os conversores controlados através das curvas de decaimento (controle por inclinação). Rotinas de controle para corrigir as potências entregues pelo conversor em modo conectado foram implementadas, e resultados de simulação comprovaram que, caso o controle por inclinação seja implementado utilizando as potências trifásicas, pontos de equilíbrio indesejados de fluxos de potência por fase podem ser atingidos caso haja desequilíbrio de rede. Os resultados mostram que torna-se mais interessante utilizar o *droop* e correção das potências de operação por fase em modo conectado à rede elétrica, pois, desta forma, promove-se com facilidade a equalização das potências injetadas na rede pelo conversor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq), à *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (CAPES) e à *Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco* (FACEPE), Brasil, pelo suporte financeiro.

Referências

- de Andrade, B. G. (2005). *Contribuição ao controle e paralelismo de ups*, Master's thesis, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, Brasil.
- Guerrero, J. M., Matas, J., de Vicuna, L. G., Castilla, M. and Miret, J. (2007). Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **54**(2): 994–1004.
- Guerrero, J. M., Matas, J., Vicuna, L. G. D. V. D., Castilla, M. and Miret, J. (2006). Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **53**(5): 1461–1470.
- Holtz, J., Quan, J., Pontt, J., Rodriguez, J., Newman, P. and Miranda, H. (2004). Design of fast and robust current regulators for high-power drives based on complex state variables, *IEEE Transactions on Industry Applications* **40**(5): 1388–1397.
- Lasseter, R. H. (2002). Microgrids, *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, Vol. 1, pp. 305–308 vol.1.

- Shanxu, D., Yu, M., Jian, X., Yong, K. and Jian, C. (1999). Parallel operation control technique of voltage source inverters in UPS, *International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS*, Vol. 2, pp. 883–887.
- Souza, W. F., Severo-Mendes, M. A. and Lopes, L. A. C. (2015). Analysis of a microgrid with unbalanced load comparing three-phase and per-phase voltage droop control, *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–7.
- Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., Luna, A., Rodriguez, P. and Teodorescu, R. (2009). Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **56**(10): 4088–4096.
- Vidal, A., Yepes, A. G., Freijedo, F. D., López, ., Malvar, J., Baneira, F. and Doval-Gandoy, J. (2015). A method for identification of the equivalent inductance and resistance in the plant model of current-controlled grid-tied converters, *IEEE Transactions on Power Electronics* **30**(12): 7245–7261.