

COMPARTILHAMENTO DE CARGA EM MICRORREDES USANDO UMA TÉCNICA MESTRE-ESCRAVO SEM COMUNICAÇÃO

ALEX S. PEREIRA*, GUSTAVO M. S. AZEVEDO*, FABRÍCIO BRADASCHIA*, MARCELO C. CAVALCANTI*

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária 50740-533, Recife-PE, Brasil

Emails: pereiraalexs@gmail.com, gustavo.msazevedo@ufpe.br,
fabricio.bradaschia@ufpe.br, marcelo.ccavalcanti@ufpe.br

Abstract— This paper presents a study on the microgrid primary control, encharged to the distributed generation power sharing. The scenario of a microgrid based on master-slave technique is considered because in this technique power converters can act as voltage source and current source as well. The master-slave control without communication, adapted from the droop control, is presented. Results obtained verify the validity of the theoretical control model presented.

Keywords— Microgrids, Distributed generation, Power sharing, Droop control.

Resumo— Este artigo apresenta um estudo do controle de microrrede em nível primário, responsáveis pelo compartilhamento de potência da geração distribuída. O cenário de uma microrrede baseada na técnica mestre-escravo é considerado porque nesta técnica, os conversores podem atuar tanto como fonte de tensão quanto como fonte de corrente. O controle mestre-escravo sem comunicação, adaptado do controle por inclinação, é apresentado. Os resultados obtidos comprovam a validade do modelo teórico do controle apresentado.

Palavras-chave— Microrredes, Geração distribuída, Compartilhamento de potência, Controle por inclinação.

1 Introdução

Com o desenvolvimento de novas tecnologias e alguns incentivos governamentais, aqui e em vários países já existe uma grande quantidade de pequenos geradores distribuídos instalados no próprio local onde a energia é consumida. Atualmente, a geração distribuída (*Distributed Generation* – DG) é uma alternativa de inovação para atender as necessidades dos clientes cada vez mais exigentes em confiabilidade e qualidade de energia (Lasseter et al., 2002)(Bastiani et al., 2016). Neste cenário, os desafios a serem vencidos são os impactos na coordenação da proteção do sistema, nos equipamentos de controle e na flutuação de potência causada pela intermitência da geração por fontes renováveis de energia. Neste contexto, o conceito de microrrede surge como uma opção para superar estes desafios.

A microrrede é conectada à rede elétrica de distribuição em um único ponto (*Point of Common Coupling* – PCC), operando desta forma na maior parte do tempo. Porém, ela também deve ser capaz de operar de forma autônoma quando a rede principal estiver inoperante (por exemplo, devido a uma falta) ou quando a rede não atender aos requisitos de qualidade de energia desejado (Azevedo et al., 2015).

Quando conectada à rede, a potência entregue por cada GD é gerenciada pelo sistema supervisor da microrrede para atender um determinado objetivo (ex.: maximizar geração renovável, minimizar consumo de combustíveis fósseis, carregar

elementos armazenadores de energias, etc), não havendo restrições quanto ao balanço de carga. No entanto, quando a microrrede opera de forma autônoma, é essencial garantir que a potência gerada coincida com a potência demandada pelas cargas. Além disso, esta demanda de carga deve ser atendida de forma compartilhada entre todas as fontes GD da microrrede.

Teoricamente, uma maneira simples para compartilhamento de potência uniforme é conectar os conversores em paralelo por meio de uma impedância, caso eles tenham as mesmas tensões e impedâncias de saída. Porém, na prática existem variações paramétricas e o compartilhamento de potência é sensível às diferenças entre ângulos de fase, entre as impedâncias de linha e entre os valores dos filtros *LC*. Mesmo quando dois conversores são conectados por apenas uma linha indutiva, o mínimo desvio de fase ou amplitude causa a circulação de corrente entre eles (Vandoorn et al., 2013) (Wang, Hu, Jiang, Wang and Gao, 2018). Então, é necessário controlar os conversores de forma que eles compartilhem a demanda de carga, mas sem que haja circulação de corrente entre eles.

As estratégias para o compartilhamento de carga entre conversores em uma microrrede podem ser divididas em: controle sem comunicação e com comunicação (Azevedo et al., 2015)(Han et al., 2016). Como exemplo de controle sem comunicação tem-se o controle por inclinação ou, do inglês, *droop control* (Vandoorn et al., 2013). Embora o controle por inclinação resulte em um

compartilhamento de carga bom, a escolha dos parâmetros é complexa dada a dificuldade de se manter a estabilidade de um sistema formado por fontes de tensão em paralelo (Firdaus and Mishra, 2018) (Sanseverino et al., 2018). Em contrapartida, o controle mestre-escravo (uma estratégia para o compartilhamento de carga com comunicação) possui apenas um conversor controlado como fonte de tensão e os demais, os escravos, são controlados como fonte de corrente, conseguindo-se assim, aumentar a estabilidade do sistema (Jain et al., 2018). Porém, a grande desvantagem do controle mestre-escravo é a forte dependência de uma rede de comunicação entre os conversores para envio das referências de potência que cada conversor deve entregar (Wang, Hao and Gao, 2018).

Para contornar essa desvantagem do controle mestre-escravo, neste trabalho é apresentada uma configuração de controle mestre-escravo autônoma (*Autonomous Master-Slave – AMS*), ou seja, que não depende de um canal de comunicação para o compartilhamento da demanda de carga.

2 Configuração da microrrede mestre-escravo e modos de operação

Na Figura 1 é mostrado um esboço da microrrede baseada na configuração AMS. A microrrede é conectada à rede principal através de uma chave. A forma como os conversores são controlados depende do modo de operação da microrrede conforme discutido a seguir.

2.1 Modo de operação conectado à rede

A técnica mestre-escravo sem comunicação apresentada neste trabalho se comporta da mesma forma que a técnica mestre-escravo clássica quando a microrrede está conectada à rede elétrica principal. Portanto, neste modo de operação, todos os conversores (incluindo o conversor mestre) são controlados como fontes de corrente. A corrente injetada por cada um destes conversores é calculada de forma a atender uma determinada referência de potência ativa e reativa, definidas pelo controle secundário da microrrede.

A microrrede permanecerá no modo de operação conectado à rede, até que um sinal de comando, por ocasião de acionamento manual ou detecção de falta na rede, faça a comutação do controle para o modo de operação desconectado

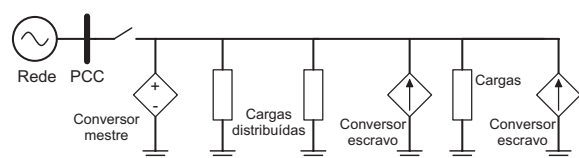


Figura 1: Estrutura da microrrede mestre-escravo.

da rede. Vale salientar que a diferença entre as estratégias AMS e a mestre-escravo clássica se dá apenas quando a microrrede está desconectada da rede principal, conforme apresentado a seguir.

2.2 Modo de operação desconectado da rede

No modo desconectado da rede, o compartilhamento de carga entre os conversores usado a configuração mestre-escravo sem a necessidade de um canal de comunicação específico é possível utilizando as características da tensão da microrrede (amplitude e frequência) como um sinal piloto para controle dos conversores escravos. A ideia é que o conversor mestre permita que a amplitude e a frequência de sua tensão gerada mudem em função do carregamento da microrrede. Isto pode ser conseguido impondo uma relação linear entre a amplitude da tensão com a potência reativa entregue pelo conversor e entre a frequência com a potência ativa entregue pelo conversor. Ou seja, o conversor mestre, desconectado da rede, pode ser controlado como em um conversor com controle por inclinação também conhecido como *droop control* (HUA; LIAO; LIN, 2002). Por sua vez, os conversores escravos terão suas referências de potência ativa e reativa definidas pela amplitude e frequência das tensões em seus terminais, respectivamente. Desta forma, o conversor mestre é capaz de controlar a potência ativa entregue por cada conversor escravo ao variar a frequência da sua tensão. Da mesma forma, o conversor mestre também é capaz de controlar a potência reativa dos conversores escravos ao variar a amplitude da sua tensão gerada. Com este princípio de operação em mente, nas seções seguintes é detalhado o controle do conversor mestre e dos conversores escravos.

3 Implementação do controle mestre-escravo autônomo

Nesta seção é apresentado como os conversores são controlados quando a microrrede está desconectada da rede elétrica principal. O diagrama do circuito de potência dos conversores é mostrado na Figura 2 sendo comum aos conversores mestres ou escravos (o que difere é a estratégia de controle).

3.1 Controle do conversor mestre

Quando a microrrede está desconectada da rede principal, o conversor mestre é controlado como uma fonte de tensão. O controle de tensão é feito através de duas malhas de controle em cascata que utilizam controladores Proporcional-Ressonante. A malha mais interna controla a corrente de saída do conversor (i_{Fi} na Figura 2, em que $i = a, b, c$) enquanto que a malha externa controla a tensão de saída v_i . Informações detalhadas sobre este

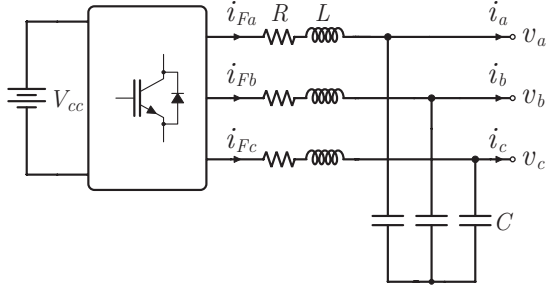


Figura 2: Diagrama do circuito de potência dos conversores.

controle de tensão são apresentadas em (Azevedo et al., 2013) e fogem ao foco deste trabalho.

Como proposta deste trabalho, a obtenção da referência de tensão é feita de forma a permitir o compartilhamento de potência sem a necessidade de comunicação entre os conversores. Na Figura 3 é mostrado o diagrama de blocos geral para a obtenção da tensão de referência. A primeira etapa é o cálculo das componentes instantâneas de potência ativa p e reativa q fornecidas pelo conversor. Para sistemas trifásicos, estas potências são obtidas por

$$p = \vec{v} \cdot \vec{i}, \quad (1)$$

$$q = |\vec{v} \times \vec{i}|. \quad (2)$$

em que $\vec{v} = [v_a \ v_b \ v_c]^T$ e $\vec{i} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ são os vetores espaciais de tensão e corrente, respectivamente, medidos no ponto de conexão do conversor (ver Figura 2).

Os filtros passa-baixas, LPF, são usados para se obter a componente média da potência em um ciclo da fundamental. Isto é importante para a estabilidade da microrrede pois impede que a amplitude e frequência da tensão gerada mude em um tempo inferior ao seu período. O bloco seguinte, característica de inclinação, calcula a amplitude e frequência da tensão de referência em função das componentes médias de potência. Note que as variações destes parâmetros (amplitude e frequência) vão funcionar apenas como sinal de controle para os conversores escravos. Porém, é interessante usar a mesma característica obtida pelo controle por inclinação (Guerrero et al., 2004)(Guerrero et al., 2005)

$$\omega^* = \omega_n - k_{p\omega} P, \quad (3)$$

$$V^* = V_n - k_{qv} Q, \quad (4)$$

em que V^* e ω^* são a amplitude e a frequência da tensão de referência; V_n e ω_n são seus valores

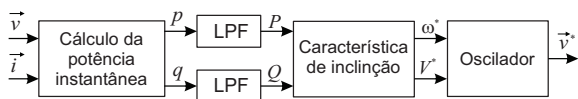


Figura 3: Geração da referência e controle de tensão do inversor mestre.

nominais; $k_{p\omega}$ e k_{qv} são os coeficientes de inclinação; P e Q são as componentes médias da potência ativa e reativa respectivamente.

O último bloco é um oscilador responsável por gerar um conjunto de tensões de referência trifásica (em referencial $\alpha\beta$) com amplitude V^* e frequência ω^* . Uma implementação bastante simples para este oscilador é mostrada na Figura 4. A entrada ω^* modula a frequência da senoide enquanto que a entrada V^* modula sua amplitude. O vetor espacial da tensão de saída, em referencial $\alpha\beta$, é dado por $\vec{v}^* = [v_\alpha^* \ v_\beta^*]^T$.

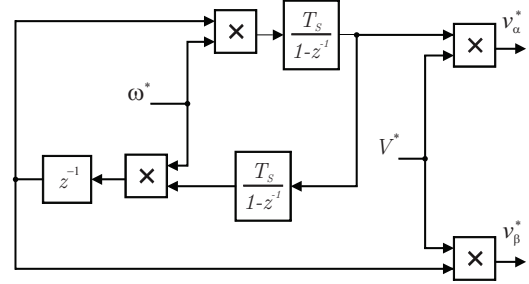


Figura 4: Diagrama de blocos do oscilador senoidal.

3.2 Controle dos conversores escravos

Com a microrrede desconectada da rede principal, os conversores escravos da microrrede AMS usam as características da tensão (amplitude e tensão) no ponto de conexão do conversor para definir a potência a ser injetada. Essa técnica de controle é semelhante ao controle por inclinação reverso (Wen and Jia, 2016) (Villa et al., 2016). A partir das referências de potência, são geradas as referências de corrente da malha interna de controle de corrente do inversor escravo. Uma visão geral da geração da referência de potência proposta é mostrada no diagrama de blocos da Figura 5.

Este compartilhamento deve ser idêntico se os inversores tiverem a mesma potência nominal, ou seja, cada inversor deve compartilhar a carga proporcionalmente à sua respectiva potência nominal. Para garantir esse compartilhamento de carga, as expressões do controle por inclinação são reescritas da seguinte forma

$$P^* = \frac{1}{k_{p\omega}} (\omega_n - \hat{\omega}), \quad (5)$$

$$Q^* = \frac{1}{k_{qv}} (V_n - \hat{V}), \quad (6)$$

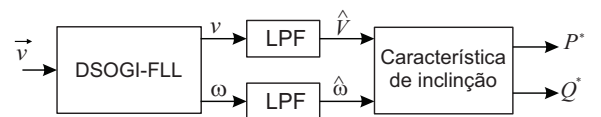


Figura 5: Diagrama de blocos do sistema de geração de referência para os conversores escravos.

em que $\hat{V}$ é o valor estimado da amplitude da tensão no ponto de conexão do conversor e $\hat{\omega}$ é o valor estimado de sua frequência.

Para a detecção da amplitude e frequência da tensão é usando um integrador generalizado de segunda ordem duplo (DSOGI-FLL) como o mostrado na Figura 6. Detalhes deste sistema de

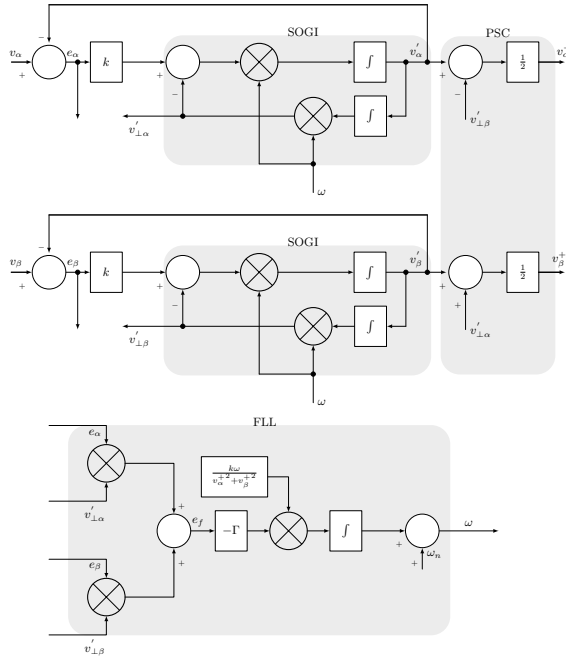


Figura 6: DSOGI-FLL para a estimador de $\hat{V}$ e $\hat{\omega}$.

detecção são apresentados em (Rodriguez et al., 2008)(Azevedo et al., 2013). Para a obtenção de $\hat{V}$ e $\hat{\omega}$, os sinais do DSOGI-FLL são filtrados por filtros com as mesmas características dos usados no conversor mestre para a obtenção das componentes médias de potência.

Com as referências das componentes de potência a serem injetadas pelo conversor disponíveis, a corrente de referência é calculada por

$$\vec{i}_{\alpha\beta}^* = \frac{P^*}{|\vec{v}^+|^2} \vec{v}^+ + \frac{Q^*}{|\vec{v}_\perp^+|^2} \vec{v}_\perp^+, \quad (7)$$

em que $\vec{v}^+$ é o vetor tensão de sequência positiva (extraído da tensão trifásica medida pelo conversor utilizando o DSOGI-FLL) e $\vec{v}_\perp^+$ é a componente ortogonal de $\vec{v}^+$ que pode ser obtida por

$$\vec{v}_\perp^+ = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \vec{v}^+. \quad (8)$$

Após obtida esta referência de corrente, um controlador Proporcional-Ressonante é utilizado para garantir que o conversor injete estas correntes na microrrede. Mais informações sobre a implementação deste controle de corrente são mostradas em (Azevedo et al., 2013).

4 Verificação da estratégia de controle AMS

Para verificar a validade da estratégia apresentada, foi construído um protótipo da microrrede AMS com dois conversores, um mestre e um escravo conforme mostrado na Figura 7. Para a implementação do controle AMS são utilizadas apenas as medições de tensão e corrente na saída do conversor. Foram consideradas dois tipos de cargas trifásicas distribuídas ao longo do barramento *ca* da microrrede: carga puramente resistiva; carga resistiva/indutiva. A Carga 1 é resistiva e equilibrada com resistência de $40,2\Omega$ por fase. A Carga 2 também é equilibrada e possui componente resistiva e componente indutiva com impedância $40,2 + j48,3\Omega$ por fase. A microrrede tem tensão nominal eficaz de $110V$ e frequência $60Hz$. O barramento *cc* é alimentado com uma fonte *cc* de $V_{cc} = 300V$. Na Figura 8 é mostrada a foto do protótipo com destaque para o conversor escravo e o controlador implementado no dSPACE. O algoritmo de controle foi desenvolvido no software MATLAB/SIMULINK e foi implementado em sistema dSPACE modelo DS1005.

Para os resultados apresentados a seguir, os conversores mestre e escravo estão operando em paralelo, desconectados da rede principal (operação isolada) e inicialmente com carga nula. No ins-

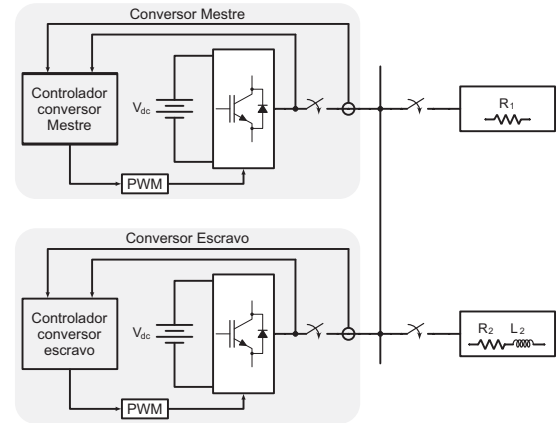


Figura 7: Diagrama esquemático do protótipo da microrrede AMS com 2 conversores.

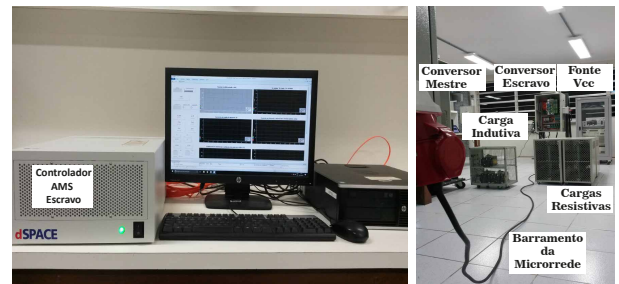


Figura 8: Foto do protótipo incluindo o dSPACE para implementação do controlador.

tante $t = 0$, a Carga 1 (resistiva) é conectada à microrrede. Esta carga demanda cerca de 900 W que são divididos igualmente entre o conversor mestre e o conversor escravo. Após $1,75\text{ s}$, a Carga 2 também é conectada à microrrede. Esta segunda carga demanda cerca de 300 W de potência ativa, e 350 var de potência reativa.

Na Figura 9 são mostrados os resultados experimentais das tensões e correntes do inversor mestre durante os transitórios de carga. Nesta mesma figura também é possível observar em detalhe as tensões e correntes em regime permanente (com todas as cargas conectadas). Vale ressaltar que este conversor está contribuindo com metade da demanda de carga, pois a outra metade é fornecida pelo conversor escravo.

Os resultados experimentais das tensões e correntes do conversor escravo, durante os transitórios de carga e em regime permanente, são mostrados na Figura 10.

Na Figura 11 são mostradas as tensões de saída dos dois conversores em referencial estacionário $\alpha\beta$ durante a inserção da Carga 2. Estas

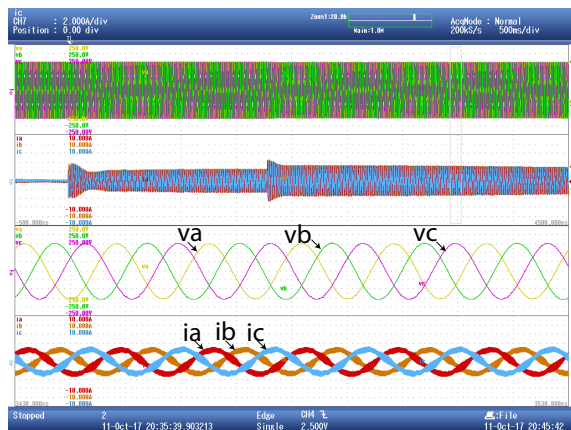


Figura 9: Resultados experimentais do conversor mestre. Tensões e correntes de saída do conversor. Escala de tensão: 50 V/div , escala de corrente: 2 A/div .

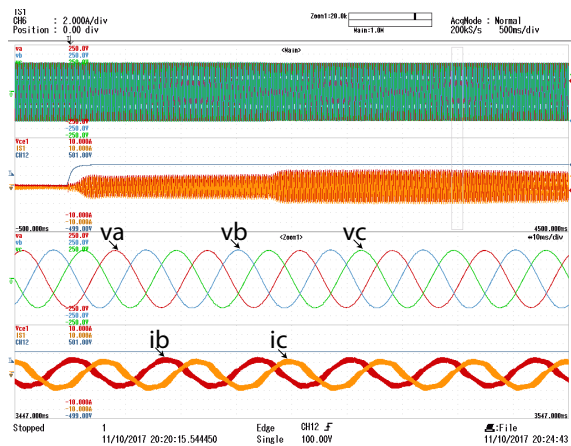


Figura 10: Resultados experimentais do conversor escravo. Tensões e correntes de saída do conversor. Escala de tensão: 50 V/div , escala de corrente: 2 A/div .

são grandezas internas ao dSPACE, ou seja, os sinais discretos adquiridos pelo conversor analógico-digital. Observa-se que as tensões dos conversores são parecidas e a diferença corresponde a queda de tensão entre os cabos que conectam os conversores. Também pode ser observado que o transitório de carga não provoca uma perturbação significativa nestas tensões. O THD da tensão da fase a do conversor mestre é $0,66\%$ e o para o conversor escravo o THD é $0,82\%$.

Na Figura 12 são mostradas as componentes de corrente de eixo α dos dois conversores, o

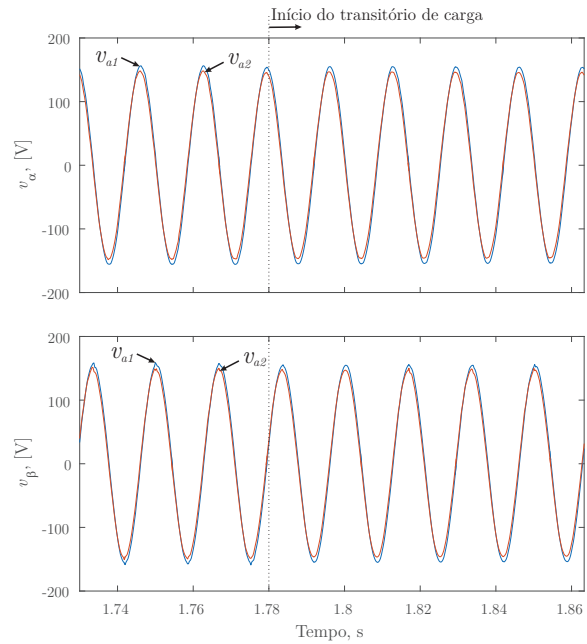


Figura 11: Tensões de saída do conversor mestre ($v_{\alpha\beta 1}$) e do conversor escravo ($v_{\alpha\beta 2}$) durante a entrada da Carga 2.

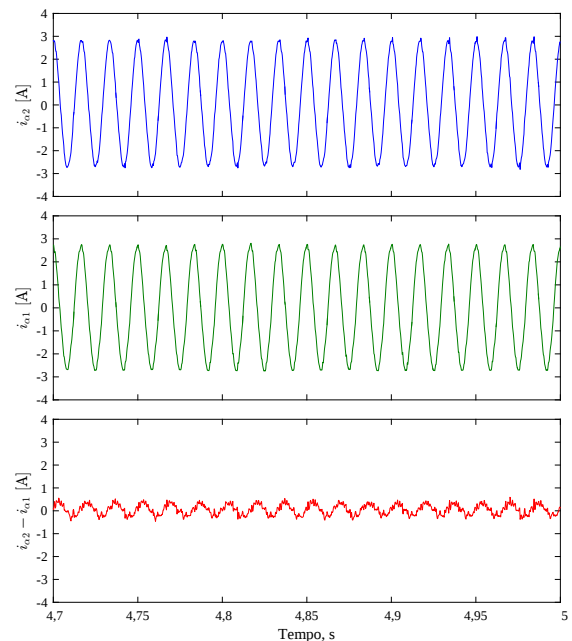


Figura 12: Corrente de circulação entre os conversores.

mestre e escravo. Observa-se que a corrente do conversor mestre $i_{\alpha 1}$ e a corrente do conversor escravo $i_{\alpha 2}$ são semelhantes. A amplitude da corrente de carga resultante é de 5,51 A. Por outro lado, a corrente de circulação entre os conversores mestre-escravo é de 0,23 A, ou seja, 4,17 %.

Na Figura 13 é mostrada a potência ativa injetada pelo conversor mestre (P_1) e pelo conversor escravo (P_2). Nesta mesma figura é mostrada a frequência de referência, ω_1^* , calculada pelo conversor mestre usando (3) e a frequência estimada pelo conversor escravo $\hat{\omega}_2$ (usando o sistema mostrado na Figura 5). Note que esta frequência estimada é usada para definir a potência a ser injetada pelo conversor escravo usando (5). O estimador de frequência apresentou resposta rápida e erro de regime permanente nulo. Observe que os conversores compartilham a potência ativa total das cargas de forma satisfatória havendo apenas uma pequena diferença entre elas.

Na Figura 14 é mostrada a potência reativa injetada pelo conversor mestre (Q_1) e pelo conversor escravo (Q_2). Nesta mesma figura é mostrada a tensão de referência V_1^* calculada pelo conversor mestre usando (4) e a tensão estimada pelo conversor escravo $\hat{V}_2$. Esta tensão estimada é usada para definir a potência reativa a ser injetada pelo conversor escravo usando (6). A tensão estimada pelo conversor escravo é inferior a tensão sintetizada pelo conversor mestre porque, de fato, há uma queda de tensão nos cabos que conectam estes conversores. Isso é uma característica inerente de qualquer microrrede que compromete o compartilhamento de potência reativa. Note que este efeito não ocorre com a frequência (em regime permanente, a frequência é a mesma em qualquer ponto da microrrede) e, portanto, o compartilhamento de potência ativa é mais preciso.

Embora o compartilhamento de potência reativa seja degradado pela queda de tensão nos cabos, o aumento do coeficiente de inclinação k_{qv} pode mitigar esse erro de compartilhamento. Na Figura 14 também pode ser observado que os conversores compartilham a potência reativa total das cargas de forma satisfatória havendo apenas uma pequena diferença entre elas.

5 Conclusões

Neste trabalho é apresentado uma estratégia de controle para os conversores de uma microrrede mestre-escravo de forma que seja possível o controle dos conversores escravos sem a necessidade de um canal de comunicação entre os conversores. O fato de apenas o conversor mestre ser controlado como fonte de tensão e qualquer conversor escravo ser controlado como fonte de corrente evita problemas de instabilidades no paralelismo dos conversores. O compartilhamento da demanda de carga entre os conversores da microrrede AMS

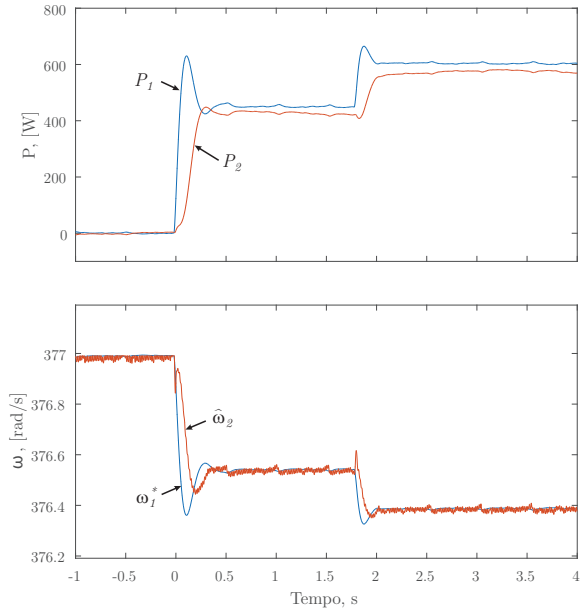


Figura 13: Resultado do compartilhamento de potência ativa.

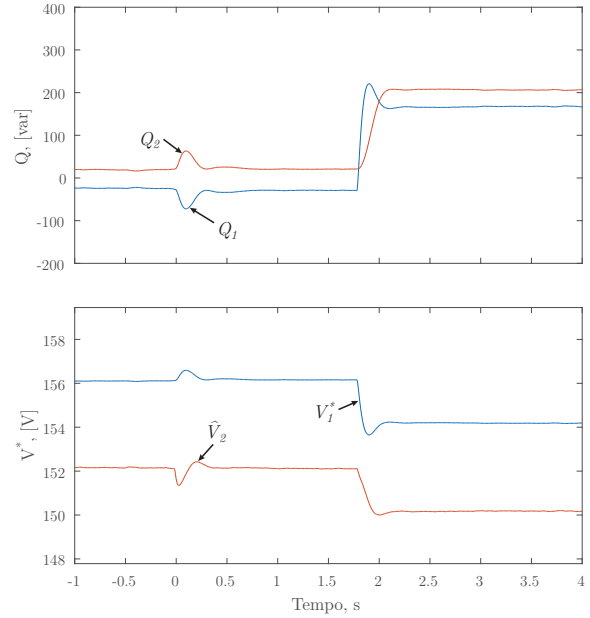


Figura 14: Resultado do compartilhamento de potência reativa.

pôde ser comprovado experimentalmente demonstrando sua eficácia.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Referências

- Azevedo, G. M. S., Arruda, J. P., Cavalcanti, M. C. and Limongi, L. R. (2015). Fault detection system to trigger the microgrid disconnection procedures, *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6.
- Azevedo, G. M. S., Cavalcanti, M. C., Neves, F. A. S., Limongi, L. R. and Bradaschia, F. (2013). A control of microgrid power converter with smooth transient response during the change of connection mode, *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 1008–1015.
- Bastiani, B. A., de Oliveira, R. V., Bordignon, A. and Torrico, C. R. C. (2016). Controle auxiliar de frequência para microrredes ilhadas com baixa inércia equivalente, *XXI Congresso Brasileiro de Automatica, Vitoria - ES, Brasil*, pp. 202–207.
- Firdaus, A. and Mishra, S. (2018). A double derivative based droop controller for improved power sharing in inverter based autonomous microgrid, *2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT)*, pp. 1–6.
- Guerrero, J. M., de Vicuna, L. G., Matas, J., Castilla, M. and Miret, J. (2004). A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems, *IEEE Transactions on Power Electronics* **19**(5): 1205–1213.
- Guerrero, J. M., de Vicuna, L. G., Matas, J., Castilla, M. and Miret, J. (2005). Output impedance design of parallel-connected ups inverters with wireless load-sharing control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **52**(4): 1126–1135.
- Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M. and Guerrero, J. M. (2016). Review of power sharing control strategies for islanding operation of ac microgrids, *IEEE Transactions on Smart Grid* **7**(1): 200–215.
- Jain, P., Agarwal, V. and Muni, B. P. (2018). Hybrid phase locked loop for controlling master-slave configured centralized inverters in large solar photovoltaic power plants, *IEEE Transactions on Industry Applications* pp. 1–1.
- Lasseter, R., Akhil, A., Marnay, C., Stephens, J., Dagle, J. and et al, R. G. (2002). Integration of distributed energy resources. the certs microgrid concept, *Technical report*, Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/9w88z7z1>.
- Rodriguez, P., Luna, A., Candela, I., Teodorescu, R. and Blaabjerg, F. (2008). Grid synchronization of power converters using multiple second order generalized integrators, pp. 755–760.
- Sanseverino, E. R., Tran, Q. T. T., Silvestre, M. L. D., Zizzo, G. and Doan, B. V. (2018). Minimum power losses by using droop coefficients regulation method with voltage and frequency constraints in islanded microgrids, *2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, pp. 1–6.
- Vandoorn, T., Kooning, J. D., Meersman, B. and Vandevelde, L. (2013). Review of primary control strategies for islanded microgrids with power-electronic interfaces, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **19**: 613 – 628.
- Villa, A., Belloni, F., Chiumeo, R. and Gandolfi, C. (2016). Conventional and reverse droop control in islanded microgrid: Simulation and experimental test, *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 288–294.
- Wang, J., Hu, F., Jiang, W., Wang, W. and Gao, Y. (2018). Investigation of zero sequence circulating current suppression for parallel three-phase grid-connected converters without communication, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **65**(10): 7620–7629.
- Wang, Y., Hao, T. and Gao, F. (2018). Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power stations and vsc-hvdc without communication, *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1815–1820.
- Wen, C. and Jia, J. (2016). Research and analysis of the improved inverse-droop control strategy for dual mode inverters in micro grid, *2016 Tsinghua University-IET Electrical Engineering Academic Forum*, pp. 1–6.