

Análise e Operação de uma Microrrede de Energia Elétrica

Hélio Marcos André Antunes

Sidelmo Magalhães Silva

Braz de Jesus Cardoso Filho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, Brasil

helioantunes@ufmg.br, sidelmo@ufmg.br, cardosob@ufmg.br

Resumo— Com a expansão da geração distribuída um novo conceito vem ganhando destaque denominado de microrrede. Uma microrrede é um conjunto de microfontes de geração de energia elétrica, cargas elétricas e elementos armazenadores de energia controlados por uma unidade central. Para que a microrrede funcione corretamente deve haver uma operação coordenada entre a fonte de geração e o sistema de armazenamento de energia, por meio de técnicas de controle. Este artigo tem como objetivo analisar a operação de uma microrrede formada por uma fonte de geração distribuída do tipo fonte de corrente, um conversor formador de rede, filtro passivo e cargas elétricas operando no modo isolado e conectado à rede elétrica. Será utilizada a plataforma Matlab/Simulink para modelar a microrrede em estudo. Os resultados obtidos por simulação mostram que a microrrede pode operar em ambos os modos de operação.

Palavras chave — Fontes renováveis de energia, microrredes, geração distribuída, operação isolada/conectada à rede.

I. INTRODUÇÃO

No passado o sistema elétrico de potência basicamente operava transportando energia de grandes plantas geradoras de energia elétrica, muito distante dos grandes centros consumidores. Com a introdução da geração distribuída esse cenário passou a ser alterado, devido à grande evolução das fontes renováveis na geração de energia elétrica. Assim, o panorama da geração de energia elétrica deixou de ser centralizado e passou a ser descentralizado, com a produção de energia mais próxima dos consumidores [1].

Diante do contexto da evolução da geração distribuída surge um novo conceito, denominado de microrrede. Segundo Lasseter [2] uma microrrede é um conjunto de microfontes de geração de energia elétrica, cargas elétricas e elementos armazenadores de energia controlados por uma unidade central. Deve ser destacado que as microfontes comumente usam fontes renováveis de energia elétrica, que utilizam a energia solar, eólica e biomassa [3]. Em uma microrrede o inversor estático conectado a uma microfonte de energia é chamado de conversor supridor de rede (CSR), com operação em fonte de corrente [4].

Uma microrrede pode operar conectada ao barramento de baixa tensão da concessionária ou de forma isolada da rede. Quando a microrrede opera interligada a rede elétrica, a tensão e a frequência são impostas pela rede principal. Já quando a

microrrede opera isolada não existe mais referência de tensão e frequência para o sistema. Nessa condição o inversor estático chamado de conversor formador de rede (CFR) é composto por um elemento armazenador de energia e opera no modo “Fonte de Tensão”, sendo responsável por manter tensão e frequência na microrrede [4]–[6].

Este artigo apresenta a simulação de uma microrrede de energia elétrica formada pela rede elétrica de baixa tensão, cargas elétricas lineares e não-lineares, filtro passivo, um CSR e um CFR. A microrrede operará no modo conectado à rede elétrica e isolada do barramento principal. Todo o modelo do sistema será desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink, permitindo contemplar uma análise do fluxo de potência, da tensão e frequência no ponto de acoplamento comum (PAC).

II. TOPOLOGIA DA MICRORREDE EM ANÁLISE

A microrrede analisada neste artigo é apresentada na Fig. 1 através de um diagrama por fase. Segundo o padrão IEEE Std. 1547.4 [7] a microrrede é do tipo ilha secundária, com uma fonte de geração distribuída, consumidores e rede de distribuição elétrica de baixa tensão.

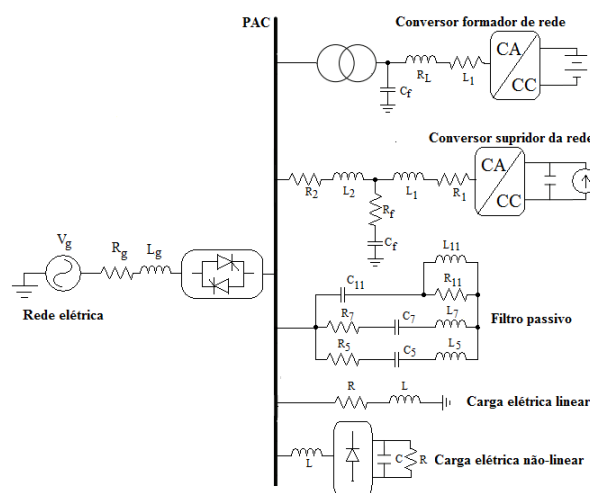


Figura 1. Configuração da microrrede em estudo.

A fonte de geração distribuída da microrrede é formada por um CSR, com capacidade de suprir parte das cargas elétricas. Também existe um CFR, com habilidade de armazenar energia

produzida pela CSR, além de fornecer suporte ao sistema na condição de operação isolada da rede elétrica principal. A microrrede também é composta por uma chave estática, que permite a operação ilhada e conectada a rede elétrica principal. A carga elétrica da microrrede é do tipo linear e não-linear. Devido a característica não-linear da carga é utilizado um filtro passivo para compensação harmônica, com três estágios de filtragem. Toda a microrrede é construída na plataforma MATLAB/Simulink. A Tabela I apresenta os principais parâmetros elétricos para a simulação da microrrede.

TABELA I – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DA MICRORREDE EM ANÁLISE.

Sistema	Características
CFR	Transformador isolador (Δ -Y _g) 220/220V-75kVA, L ₁ =20 μ H, R ₁ =10 m Ω , C _f =550 μ F, f _{sw} =15,36 kHz, banco de baterias V _{cc} =500 V
CSR	20 kVA, 220V, f _{sw} =7,68 kHz, L ₁ =1,5 mH, L ₂ = 47 μ H, R ₁ =R ₂ = 10 m Ω , R _f =0,3 Ω , C _f =55 μ F, C _{dc} = 9,4 mF
Carga elétrica linear	220 V, 35 kVA, fp=0,73 atrasado
Carga elétrica não-linear	Retificador trifásico a diodos, 220 V, 30 kW, L=0,5mH, C= 18,8mF, R=2,5 Ω
Filtro passivo	P. faixa: 5h, Q=42, L= 2,7mH, C= 105,25 μ F, 2 kVA P. faixa: 7h, Q=42, L= 1,3mH, C= 107,40 μ F, 2 kVA P. alta: 11h, Q=2,2, L= 0.535 mH, C= 108,73 μ F, 2kVA
Rede elétrica	220V, 60Hz, S _{cc} =0,75MVA, X/R=0,5

A. Modelo da Carga Elétrica da Microrrede

Uma carga linear pode ser representada por uma impedância série RL do tipo constante. A queda de tensão V_L na carga em função da corrente I_L pode ser descrita através da Eq. 1 [8].

$$v_L(t) = Ri_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (1)$$

Já a carga não-linear é formada por elementos passivos e dispositivos semicondutores. Um retificador trifásico a seis pulsos com fonte de tensão no barramento c.c. e carga resistiva pode representar o modelo de carga não-linear.

B. Filtro Passivo

Uma solução utilizada para evitar a contaminação harmônica do sistema elétrico pode ser obtida através do uso de filtros passivos [9]. Esta estrutura é formada pela associação série de resistores, indutores e capacitores, sendo geralmente conectados em paralelo com a carga, fornecendo um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas na frequência de sintonia. Outra funcionalidade deste elemento é a correção do fator de potência, pois sua impedância na frequência fundamental é capacitiva [10].

Os filtros passivos podem ser do tipo passa-faixa, passa-alta ou compostos, sendo este último formado por múltiplos estágios de filtragem. A Fig. 2 exhibe as configurações típicas dos filtros, com suas respectivas impedâncias em função da frequência elétrica angular [11].

As Eq. 2 a 5 permitem obter os parâmetros de um filtro passa-faixa. Já para o dimensionamento do filtro passa-alta, parte-se do pressuposto que na frequência fundamental toda a corrente passa pelo ramo LC, sendo desprezível a corrente no resistor. Assim, utilizando as Eq. 2 a 4 e 6 é possível determinar todos os parâmetros do filtro [11].

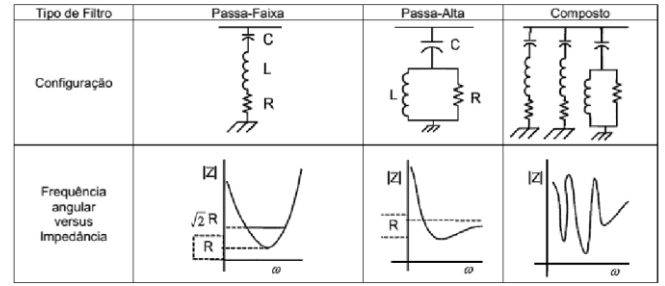


Figura 2. Típicas configurações de filtros passivos. Fonte: [11].

$$w \times L_h - \frac{1}{w \times C_h} = \frac{V_{ef}^2}{Q_{comp}} \quad (2)$$

$$h^2 = \frac{L_h}{C_h} \quad (3)$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_h C_h}} \quad (4)$$

$$Q_{FPB} = \frac{X_h}{R_h} \quad (5)$$

$$Q_{FPA} = \frac{R_h}{\sqrt{L_h C_h}} \quad (6)$$

Onde:

- w – frequência elétrica angular fundamental;
- L_h e C_h – indutância e capacitância do filtro sintonizado no harmônico de ordem h ;
- V_{ef} e Q_{comp} – tensão de linha eficaz e potência reativa trifásica compensada na frequência fundamental;
- f_h – frequência de ressonância do filtro passa-baixa;
- Q_{FPB} , Q_{FPA} , X_h , R_h – fator de qualidade do filtro passa-baixa, fator de qualidade do filtro passa-alta, reatância indutiva ou capacitiva na frequência de ressonância e resistência do filtro passa-baixa/passa-alta.

C. Conversor Formador de Rede

O conversor formador de rede (CFR) utilizado na microrrede é formado por um inversor trifásico a dois níveis, com modulação *Space Vector* PWM (SVPWM) implementada com injeção de sequência zero [12]. No CFR existe um banco de baterias no barramento c.c., que permite a operação da microrrede tanto no modo ilhado e conectado à rede [5]. Também é utilizado um transformador isolador na saída do CFR, com relação de transformação unitária, provendo isolamento galvânico. A Fig. 3 apresenta um circuito equivalente do CFR conectado à rede elétrica [5], [8], [13].

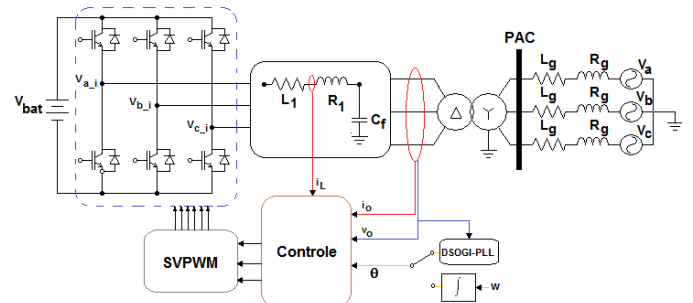


Figura 3. Circuito equivalente do CFR conectado à rede elétrica.

O filtro LC do CFR é projetado para que sua frequência de corte seja igual a (1/10) da frequência de chaveamento do

inversor. Com um banco de capacitores do filtro LC com capacidade de reativos entre 10 a 15% da potência nominal do CFR é possível obter uma boa característica de filtragem [14].

Todo o controle do CFR é feito no sistema de coordenadas dq0, utilizando controladores do tipo proporcional integral. Aplicando as Leis de Kirchhoff de tensão e corrente na saída do CFR e no filtro LC são obtidas as Eq. (7) a (10). A partir destas equações obtém-se a planta do filtro LC ilustrada na Fig. 4.

$$v_{id} = Ri_{Ld} - wLi_{Lq} + L \frac{di_{Ld}}{dt} + v_{od} \quad (7)$$

$$v_{iq} = Ri_{Lq} + wLi_{Ld} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + v_{oq} \quad (8)$$

$$-wC_f v_{oq} + C_f \frac{dv_{od}}{dt} = i_{Ld} - i_{od} \quad (9)$$

$$wC_f v_{od} + C_f \frac{dv_{oq}}{dt} = i_{Lq} - i_{oq} \quad (10)$$

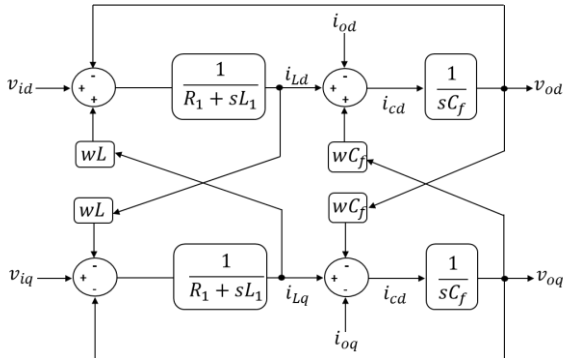


Figura 4. Diagrama com a planta do filtro LC.

A partir do diagrama de blocos do filtro LC da Fig. 4 é possível observar que a tensão de saída no capacitor (v_o) e a corrente de saída (i_o) são os distúrbios. Também existe um acoplamento cruzado entre os termos wLi_d , wLi_q , wCv_d e wCv_q .

Quando a rede elétrica está presente o CFR opera no modo fonte de corrente, conforme diagrama de controle apresentado na Fig. 5 [5]. No modo conectado a rede é utilizado um PLL DSOGI para estimar o ângulo da tensão da rede [15]. Os ganhos do controlador PI para a malha de corrente são calculado a partir das Eq. (11) e (12), com uma frequência de corte ($w_{c,i}$) igual a (1/5) da frequência de chaveamento do CFR [16], [17].

$$K_{p,i} = L_1 w_{c,i} \quad (11)$$

$$K_{i,i} = R_1 w_{c,i} \quad (12)$$

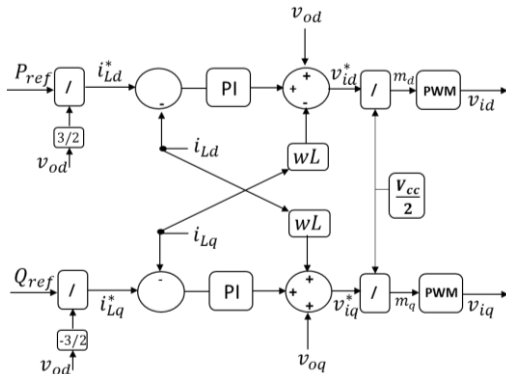


Figura 5. Controle do inversor do CFR no modo fonte de corrente.

Quando o CFR opera isolado da rede este impõe tensão e frequência no PAC, operando no modo Vf ou fonte de tensão.

Neste modo o PLL DSOGI é substituído por um oscilador, que gera a frequência elétrica angular a partir de uma referência de frequência de 60 Hz. Todo o esquema de controle do CFR no modo Vf é apresentado na Fig. 6 [13]. É utilizado uma malha de tensão em cascata com a de corrente, com controlador PI em cada malha. É feita uma realimentação feed-forward da corrente de saída (i_o) e tensão de saída (v_o), com desacoplamento dos termos cruzados (wLi_d , wLi_q , wCv_d e wCv_q) [13], [18]. A malha de corrente é representada por uma função de transferência de primeira, com τ_i calculada pela Eq. (13).

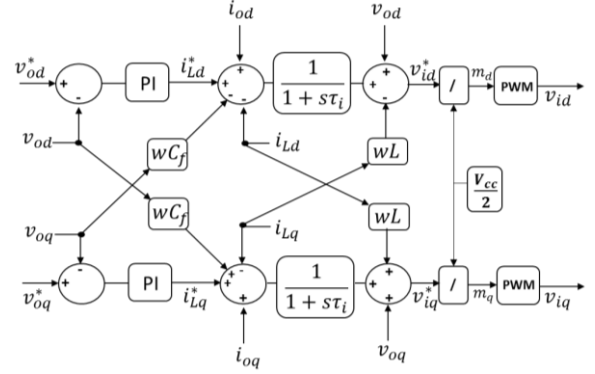


Figura 6. Controle do CFR no modo Vf.

Os ganhos do controlador PI para a malha de tensão são definidos pela metodologia proposta por Yazdani [17]. Primeiramente é definido uma margem de fase (δ_m) para a função de malha aberta de tensão, entre 30° a 75°. Considerando a aproximação da frequência de corte (w_c) igual a frequência de *crossover* é possível calcular os ganhos do PI usando as Eq. (14) e (15). A Tabela II apresenta o ganho dos controladores da malha de tensão e corrente para o CFR.

$$\tau_i = \frac{1}{w_{c,i}} \quad (13)$$

$$K_{p,v} = C_f \sqrt{\frac{1}{\tau_i^2} \left(\frac{1 - \sin \delta_m}{1 + \sin \delta_m} \right)} \quad (14)$$

$$K_{p,i} = \frac{K_{p,v}}{\tau_i} \left(\frac{1 - \sin \delta_m}{1 + \sin \delta_m} \right) \quad (15)$$

TABELA II – GANHO DOS CONTROLADORES DAS MALHAS DO CFR

Malha	Ganho
Tensão	$K_p=1,87 \Omega^{-1}$, $K_i=1125,1 \Omega^{-1}$
Corrente	$K_p=0,37 \Omega$, $K_i=193,02 \Omega$

D. Conversor Supridor da Rede

A Fig. 7 ilustra o circuito equivalente do CSR formado por um inversor trifásico a dois níveis, com modulação SVPWM. A fonte de corrente no lado c.c. do inversor representa a fonte primária de energia, que pode representar a intermitência na geração de um sistema fotovoltaico. O inversor estático do CSR opera como fonte de corrente, injetando potência ativa na rede elétrica, sem contribuir com a injeção de reativos. O filtro LCL na saída do inversor é projetado segundo Reznik et al. [19], com amortecimento passivo através de resistência.

A Fig. 8 ilustra o diagrama de controle do inversor utilizando o sistema de coordenadas dq0 [20]–[22].

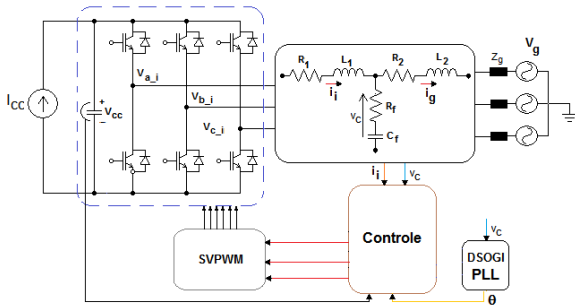


Figura 7. Circuito equivalente do CSR conectado à rede elétrica.

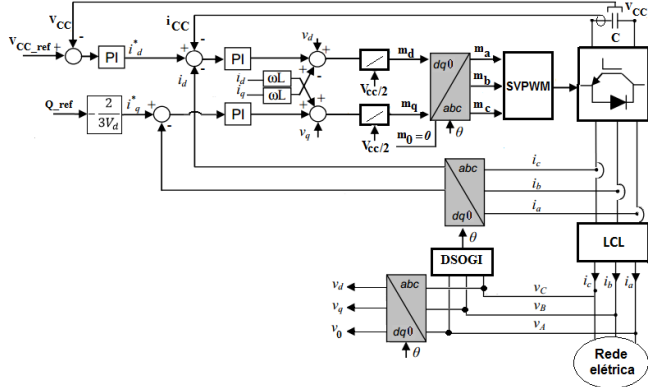


Figura 8. Diagrama de controle do CSR [20].

A partir da Fig. 8 é possível notar que o controle do inversor é composto por uma malha de tensão do barramento c.c. em cascata com uma malha corrente mais rápida, com controlador PI. Os ganhos da malha de corrente foram ajustados de modo similar ao do CFR, porém com uma frequência de corte igual a (1/10) da frequência de chaveamento. Já os ganhos do controlador da malha de tensão são calculados com as Eq. (16) e (17), com uma frequência de corte de (1/10) e (1/100) da frequência de corte da malha de corrente. A Tabela III apresenta os ganhos das malhas de tensão e corrente do CSR.

$$K_{p_{cc}} = -\frac{4\pi v_{cc}(f_{c1}+f_{c2})C}{3v_d} \quad (16)$$

$$K_{i_{cc}} = -\frac{8\pi^2 v_{cc}(f_{c1}+f_{c2})C}{3v_d} \quad (17)$$

TABELA III – GANHO DOS CONTROLADORES DO CSR

Malha	Ganho
Tensão barramento c.c.	$K_p = -9,26 \Omega^{-1}$ $K_i = -406,22 \Omega^{-1}$
Corrente	$K_p = 7,05 \Omega$ $K_i = 48,25 \Omega$

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A Fig. 9 apresenta a microrrede de energia elétrica desenvolvida no software Matlab/Simulink. A seguir serão exibidos os resultados de simulação da microrrede.

A. Operação Conectada à Rede Elétrica

Quando a microrrede opera conectada à rede elétrica, tanto o CSR quanto o CFR operam os inversores como fonte de corrente. A seguir são enumeradas a sequência de conexão das cargas, fontes e demais elementos da microrrede que produziram o fluxo de potência ativa e reativa no PAC ilustrados na Fig. 10, com período de simulação igual a 1 s.

- $t=0s$ - conexão da rede elétrica, filtro passivo e o CFR operando como fonte de corrente;
- $t=0,1s$ - o CSR é conectado a rede e a fonte de corrente no seu barramento c.c. passa a injetar 4A;
- $t=0,2s$ - a fonte de corrente no CSR injeta 20A;
- $t=0,3s$ - conexão de carga RL com $(13 + j12)$ kVA;
- $t=0,4s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 40A;
- $t=0,5s$ - conexão do retificador trifásico com $R=5\Omega$;
- $t=0,6s$ - conexão de carga RL com $(13 + j12)$ kVA e a fonte c.c. do CSR é ajustada para 32A;
- $t=0,7s$ - carga do retificador trifásico passa para $R=2,5\Omega$ e o CSR passa a injetar na rede 20 kW;
- $t=0,8s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 24A;
- $t=0,9s$ - a fonte c.c. do CSR é desligada.

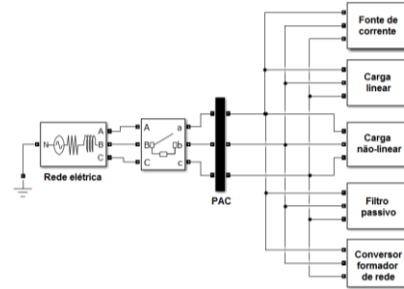


Figura 9. Modelo da microrrede de energia elétrica no Matlab/Simulink.

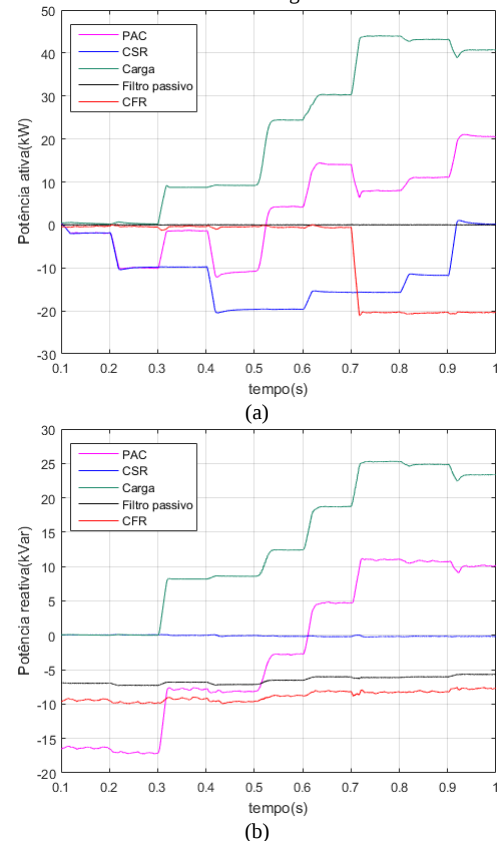


Figura 10. Fluxo de potência no PAC: (a) potência ativa (b) potência reativa

A partir dos resultados da Fig.10 é possível observar que o CSR variou a injeção de potência ativa na rede elétrica, com

valor máximo próximo de 20 kW. Outro ponto a se destacar é que o CSR não contribui com a injeção de reativos. Já o CFR inicialmente supriu as perdas Joule do transformador, com injeção de reativo capacitivo na rede. Em $t=0,7s$ o CFR passou a injetar potência ativa na rede 20 kW, contribuindo com a regulação de tensão na rede. Com a conexão das cargas elétricas houve uma inversão no fluxo de potência no PAC, até atingir um valor de 20 kW e 10 kVar. Já a Fig. 11 apresenta o valor *rms* das tensões por fase no PAC da microrrede, com sua respectiva frequência elétrica.

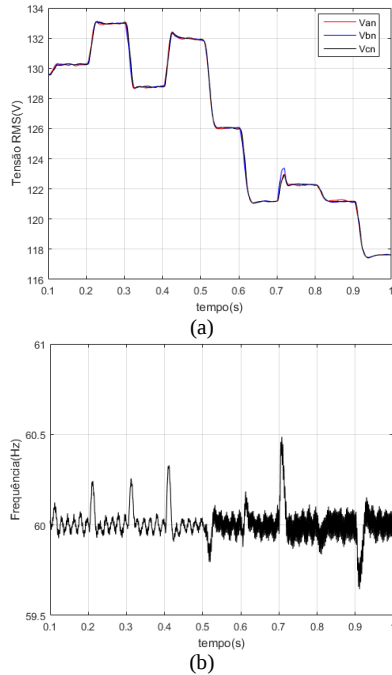


Figura 11. Grandezas elétricas no PAC da microrrede: (a) tensão rms por fase; (b) frequência elétrica.

A ANEEL [23] define que um barramento com tensão menor que 1 kV, a tensão de fase considerada como adequada deve estar entre 117V e 133V. Já com relação a frequência elétrica a ANEEL define que deve estar entre 59,9 e 60,1 Hz. Porém, em sistemas com geração é possível estender os limites de frequência para 59,5 a 60,5 Hz, por no máximo 30s. Assim, é possível notar na Fig. 11 que tanto a tensão quanta a frequência respeitam os limites definidos pela ANEEL.

B. Operação Isolada

Também é avaliada a operação da microrrede na condição em que a rede elétrica está ausente, operando no modo isolado. A seguir são listadas as operações da microrrede isolada que determinaram o fluxo de potência apresentado na Fig. 12, com período de simulação igual a 1s.

- $t=0s$ - início da simulação com *black start*, em que o CFR opera no modo V/f e o filtro passivo é conectado;
- $t=0,1s$ - a fonte de corrente no CSR passa a injetar 4A;
- $t=0,2s$ - a fonte de corrente no CSR injeta 20A;
- $t=0,3s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 40A;
- $t=0,4s$ - conexão de carga RL com $(13 + j12)$ kVA;
- $t=0,5s$ - conexão do retificador trifásico com $R=5\Omega$;

- $t=0,6s$ - conexão de carga RL com $(13 + j12)$ kVA e a fonte c.c. do CSR é ajustada para 32A;
- $t=0,7s$ - conexão do retificador trifásico com $R=5\Omega$;
- $t=0,8s$ - a fonte c.c. do CSR é ajustada para 24A;
- $t=0,9s$ - a fonte c.c. do CSR é desligada.

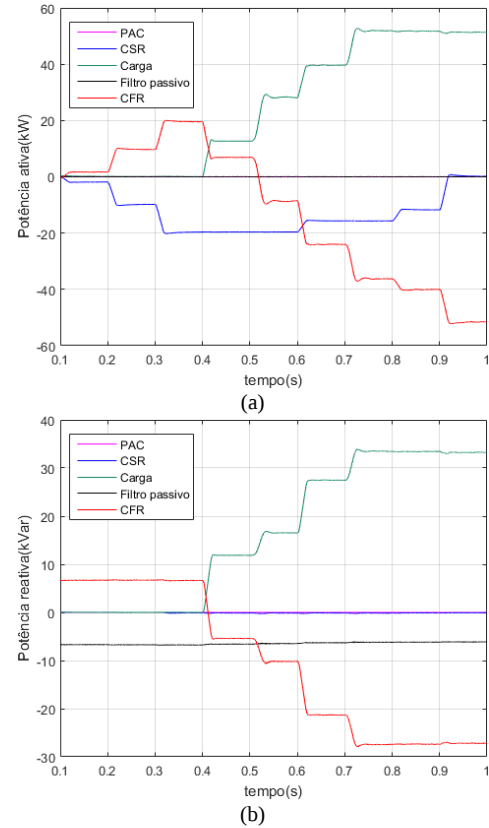


Figura 12. Fluxo de potência na microrrede operando isolada: (a) potência ativa (b) potência reativa.

Da Fig. 12 é possível notar que inicialmente o CFR absorve toda a potência ativa do CSR em seu banco de baterias, até o instante $t=0,4s$. O CSR também absorve o reativo capacitivo produzido pelo sistema de filtragem passiva. Com a conexão das cargas elétricas o CFR tem seu fluxo de potência invertido, agora suprindo uma potência ativa de 56 kW e reativa indutiva de 28 kVar. Logo é demonstrado que o CFR pode operar nos quatro quadrantes de potência durante a operação isolada da microrrede.

Por final, é ilustrado na Fig. 13 a tensão *rms* e a frequência elétrica no PAC da microrrede durante toda a operação isolada. Nesta condição de operação no PAC a tensão rms variou entre 122 a 128,3 V, e a frequência entre 59,79 Hz e 60,12 Hz. Como não existe regulamentação da ANEEL para a operação isolada da microrrede não é possível atestar o desempenho nesta condição de operação.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o modelo de uma microrrede de energia elétrica, formada por um CFR, CSR, filtro passivo e carga elétrica do tipo linear e não-linear. Foi possível observar o fluxo de potência da microrrede na condição de operação conectada à rede elétrica de baixa tensão e no modo isolado.

Em ambos os modos de operação o CSR teve o seu desempenho adequado, injetado potência ativa oriunda da fonte de corrente c.c.. Já o CFR demonstrou que pode operar tanto no modo fonte de corrente quanto no modo fonte de tensão, garantindo a operação isolada da microrrede.

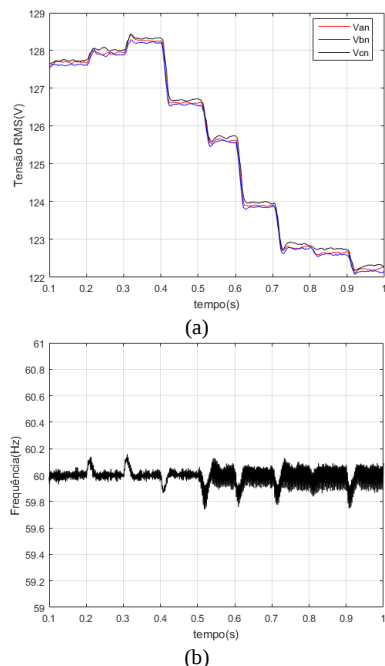


Figura 13. Grandezas elétricas no PAC da microrrede na operação isolada: (a) tensão rms por fase; (b) frequência elétrica.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Medina, A. W. Bizuayehu, J. P. S. Catalao, E. M. G. Rodrigues, and J. Contreras, "Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-economic Benefits and Applications Analysis," 2014 47th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci., pp. 2295–2304, 2014.
- [2] R. H. Lasseter, "MicroGrids," in 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309), 2002, vol. 1, no. C, pp. 305–308.
- [3] N. Hatziaargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," IEEE Power Energy Mag., vol. 5, no. 4, pp. 78–94, Jul. 2007.
- [4] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012.
- [5] L. Xu, Z. Miao, and L. Fan, "Coordinated control of a solar and battery system in a microgrid," in PES T&D 2012, 2012, pp. 1–7.
- [6] J. A. Pecos Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for analysing microgrids islanded operation," in 2005 IEEE Russia Power Tech, 2005, pp. 1–7.
- [7] C. Committee, D. Generation, and E. Storage, "IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems," 2011.

- [8] F. D. Kanellos, I. Tsouchnikas, N. D. Hatziaargyriou, and S. Member, "Micro-Grid Simulation during Grid-Connected and Islanded Modes of Operation," Int. Conf. Power Syst. Transients, p. 6, 2005.
- [9] H. Akagi, "Active Harmonic Filters," Proc. IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, Dec. 2005.
- [10] S. N. A. Yousif, M. Z. C. Wanik, and A. Mohamed, "Implementation of different passive filter designs for harmonic mitigation," in PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference, 2004., 2004, pp. 229–234.
- [11] J. C. Das, "Passive filters-potentialities and limitations," in Conference Record of the 2003 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003., 2003, vol. 40, no. 1, pp. 187–197.
- [12] A. M. Hava, R. J. Kerkman, and T. A. Lipo, "Simple analytical and graphical methods for carrier-based PWM-VSI drives," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 14, no. 1, pp. 49–61, 1999.
- [13] J. G. de Matos, L. A. de S. Ribeiro, and F. S. F. e Silva, "Controle da potência gerada em microrredes autônomas e isoladas com fontes de energia renováveis e sistema de armazenamento com bancos de baterias," Rev. Eletrônica Potência, vol. 19, no. 2, pp. 152–162, 2014.
- [14] S. M. Silva and B. J. C. Filho, "Component-minimized voltage sag compensators," in Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344), 2002, vol. 2, pp. 883–889.
- [15] P. Rodriguez, R. Teodorescu, I. Candela, A. V. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions," in 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006, pp. 1–7.
- [16] S. M. Silva, "Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão," PPGEE-UFGM, 1999.
- [17] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems, vol. 53. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [18] A. Solanki, A. Nasiri, B. Novakovic, and V. Bhavaraju, "State space modeling and stability assessment for a microgrid," in 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 533–538.
- [19] A. Reznik, M. G. Simoes, A. Al-Durra, and S. M. Mueen, "LCL filter design and performance analysis for small wind turbine systems," in 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2012, pp. 1–7.
- [20] I. Vechiu, O. Curea, A. Llarra, and H. Camblong, "Control of power converters for microgrids," COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng., vol. 30, no. 1, pp. 300–309, Jan. 2011.
- [21] A. F. Cupertino, J. T. De Resende, H. A. Pereira, J. T. de Resende, H. A. Pereira, and S. I. Seleme Junior, "A grid-connected photovoltaic system with a maximum power point tracker using passivity-based control applied in a boost converter," in 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012, pp. 1–8.
- [22] S. A. Rahman and R. K. Varma, "PSCAD/EMTDC model of a 3-phase grid connected photovoltaic solar system," in 2011 North American Power Symposium, 2011, pp. 1–7.
- [23] A. Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica," 2015.