

Controle *Droop* para Conversor de Suporte Conectado a Bateria em Microrrede Monofásica de Baixa Tensão

Lucas Savoi de Araújo, Dante Inga Narvaez
Marcelo Gradella Villalva

FEEC – Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
Campinas – SP, Brasil
savoi@dsce.fee.unicamp.br, dante.innar@gmail.com,
marcelo@fee.unicamp.br

Thais Gama de Siqueira

ICT – Instituto de Ciência e Tecnologia
UNIFAL – Universidade Federal de Alfenas
Poços de Caldas – MG, Brasil
thais.siqueira@unifal-mg.edu.br

Resumo—Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estratégia de controle para conversores de suporte à rede que têm como característica contribuir com a variação da tensão e da frequência em microrredes autônomas. O conversor é conectado a baterias e é utilizada a técnica de controle *droop* para controlar a potência ativa fornecida pelo conversor e ocasionar a aproximação da tensão da rede a seu valor nominal. Este controle suprime a utilização de meios de comunicação física entre os conversores, bastando medições locais, permitindo sua interligação ao sistema sem a necessidade de ajustes. São introduzidos alguns conceitos sobre microrredes e os tipos de conversores que podem ser conectados a elas, como os conversores formadores, os alimentadores e os de suporte à rede. O conversor de suporte à rede é o principal objeto de estudo, e seu controle para a contribuição da regulação de tensão e frequência da rede é mais bem detalhado. É demonstrado o controle *droop* e este é particularizado para sistemas em baixa tensão. A validade desse controle é provada por simulações que demonstram o controle da potência ativa do conversor em função da variação da tensão da rede, contribuindo, assim, com a variação de tensão.

Palavras-Chave—Armazenamento de Energia, Baterias, Controle *Droop*, Geração Distribuída, Microrredes, Regulação de Tensão.

I. INTRODUÇÃO

Devido a preocupações ambientais e limitações da geração de energia por fontes tradicionais, tem crescido o interesse pela geração distribuída de energia elétrica a partir de fontes como motores de combustão interna, turbinas e microturbinas a gás, células fotovoltaicas, células a combustível e turbinas eólicas. Além da possibilidade de descentralizar a geração de energia com geradores distribuídos conectados ao sistema elétrico, também vem crescendo o interesse pela geração isolada através de microrredes autônomas, sobretudo em locais fora do alcance do sistema elétrico nacional. As microrredes (MR) são uma forma interessante de alimentar cargas a partir um ou mais geradores de pequeno ou médio porte, com ou sem a presença de bancos de baterias. Podemos também enxergar as microrredes como áreas ligadas às extremidades de ramais de distribuição radiais, com elevada impedância, e sujeitas a frequentes problemas na qualidade da

energia fornecida, sobretudo no que diz respeito aos níveis de tensão.

Dentre as vantagens da utilização de sistemas de MR estão o aumento da confiabilidade e da qualidade do fornecimento de energia, a redução de perdas de transmissão e distribuição, a contribuição para a regulação das tensões locais, a correção de afundamentos de tensão e, no caso das redes autônomas, o fornecimento ininterrupto de energia.

O conceito de MR em redes elétricas já é bastante utilizado [1], mas ainda existem muitas lacunas para investigação em questões técnicas, regulatórias e econômicas. Ainda são estudadas diversas possibilidades de estruturas de MR e tipos de controle para conseguir alcançar a fase de comercialização.

Em termos gerais, pode-se definir uma MR como um conjunto de cargas, geradores e sistemas de armazenamento interligados em um sistema elétrico único e controlado, podendo operar de forma isolada ou interligada à rede elétrica convencional. Esse conceito pode ser entendido em termos de cogeração de eletricidade e energia térmica para uma determinada área [2].

No modo de operação interligada, o controle da tensão e da frequência do sistema elétrico da MR é feito pela rede convencional existente, que geralmente pode ser considerada uma fonte de potência infinita diante da MR. No modo de operação isolada, a MR precisa gerar e controlar sua própria tensão e, no caso de operação em corrente alternada (CA), é preciso controlar também a frequência [3].

Existem vários tipos de arquiteturas de MR [1],[2],[4]-[7]. O controle desenvolvido nesse trabalho é destinado a uma MR do tipo CA, em que os geradores são conectados de forma distribuída ao longo de um barramento CA e possuem controle local de suas variáveis, isto é, cada fonte geradora é responsável por controlar os devidos valores de potência ativa e reativa geradas, bem como valores de tensão e frequência para garantir a correta operação do sistema em termos de qualidade de energia, inexistindo um controlador central.

Um exemplo de MR com a arquitetura do tipo a ser considerado nesse trabalho é mostrado na Fig. 1 a seguir. Pode ser constatado que as cargas e as fontes geradoras são ligadas

à rede de forma distribuída, possibilitando que as fontes sejam instaladas próximas às cargas estratégicas ou no final de circuitos mais longos, contribuindo para reduzir perdas nos alimentadores e diminuir a queda de tensão na MR. Os termos PV, T.E. e B.B. denotam painéis fotovoltaicos, turbina eólica e banco de baterias, respectivamente.

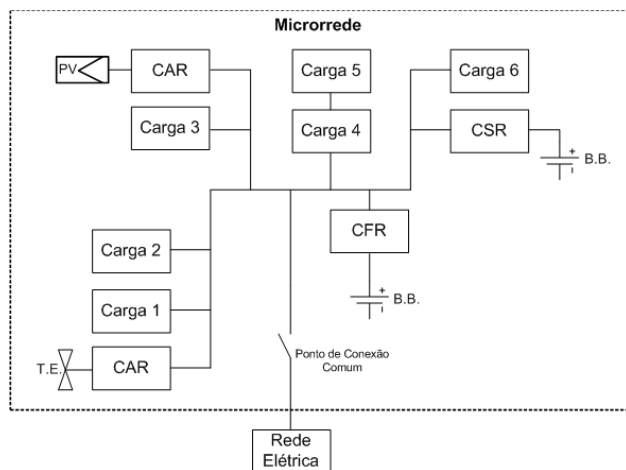


Figura 1. Exemplo de microrrede distribuída.

Cada fonte geradora nessa topologia possui seu próprio controlador. Existem diferentes denominações para os conversores conectados à MR, que são separados de acordo com a função que devem executar. Esses podem ser conversores formadores de rede, conversores alimentadores ou conversores de suporte.

O conversor formador da rede (CFR) tem a função de formar a MR. A partir de uma fonte de energia estável (não intermitente) ele fornece as referências de tensão e frequência que os outros conversores irão utilizar para realizar o sincronismo. Na situação ilustrada o CFR está ligado a um banco de baterias, mas ele pode ser ligado a outros tipos de fontes geradoras. O CFR deve ser alimentado por fontes perenes para manter valores fixos de tensão em sua saída.

O conversor alimentador da rede (CAR) recebe esse nome por alimentar a MR com energia, sem, no entanto ser responsável pela manutenção da tensão e da frequência. O CAR é sempre ligado a uma fonte primária de energia, como uma turbina eólica ou um painel fotovoltaico [3],[8], sendo projetado para fornecer energia a uma rede já energizada. Assim como o CFR, o CAR também possui controladores próprios que determinam a potência ativa e reativa gerada por meio de algum tipo algoritmo.

Por fim, o conversor de suporte à rede (CSR) é um conversor que tem a função de dar suporte à MR. Seu suporte se dá principalmente em termos de regulação dos níveis de tensão e da frequência da MR no local em que ele é instalado. Existem vários tipos de controle para o CSR, cada um exaltando uma função diferente. Normalmente o CSR absorve ou fornece potência ativa ou reativa à MR para efetuar o controle local, sendo sua fonte geradora um elemento com possibilidade de armazenamento de energia como, por exemplo, um banco de baterias.

Considerando que a maioria das fontes renováveis de energia tem característica intermitente, o armazenamento de energia é indispensável nas MR, tanto para armazenar o excesso de energia, quanto para fornecer energia em tempos de escassez ou para prevenir afundamentos de tensão [5]. A integração de tecnologias de sistemas de armazenamento de energia é uma peça chave para o desenvolvimento das microrredes, pois esses sistemas permitem o desenvolvimento de estratégias de controle para solucionar muitos dos entraves que impedem a integração em larga-escala de sistemas de geração distribuída [8],[9].

Este trabalho desenvolve o controle *droop* para redes elétricas em baixa tensão para que seja possível conectar uma bateria ou banco de baterias de modo *plug-and-play*, de acordo com a necessidade da MR, sem que sejam necessárias vias exclusivas de comunicação entre as fontes.

O controle é aplicado em um conversor de energia do tipo de suporte à rede, conectado como fonte de corrente, que tem como principal característica auxiliar no controle do nível de tensão da MR através do fornecimento da potência ativa à rede. O conceito do conversor de suporte à rede existe na literatura, entretanto não foi desenvolvido seu controle especificamente. Este trabalho apresenta como contribuição a validação da funcionalidade do controle *droop* em baixa tensão (P/V), isto é, a variação da potência ativa do CSR em função da variação da tensão da MR para um CSR conectado a um conjunto de baterias. Através de simulações foi possível validar a efetividade do controle proposto.

Na seção II é discutido mais detalhadamente o conceito de conversor de suporte à rede, mostrando suas possíveis formas de conexão à rede. Na seção III é detalhada a teoria do controle *droop* para redes em baixa tensão. Na seção IV mostra-se o desenvolvimento da simulação utilizada para validar o controle e os resultados obtidos. Por fim, a seção V apresenta as conclusões relacionadas ao trabalho.

II. CONVERSORES DE SUPORTE À REDE

Os CSRs são utilizados para injetar ou absorver potência em determinados pontos de uma MR distribuída, interferindo nos fluxos internos de potência. Esses conversores regulam seus valores de tensão e corrente de saída para manter os valores de frequência e amplitude de tensão da MR próximos a seus valores nominais. Devido à necessidade de ora absorver e ora fornecer potência, esses conversores são normalmente conectados a sistemas de armazenamento de energia.

Um CSR pode ser controlado como uma fonte de tensão ou uma fonte de corrente. A Fig. 2, a seguir, mostra duas representações de como seria o controle em cada caso do CSR, operando como fonte de corrente em (a) e operando como fonte de tensão em (b). Percebe-se que a diferença está nos parâmetros de controle que o conversor utiliza para enviar a referência para a saída, sendo que no modo de fonte de corrente envia uma referência em corrente a partir de valores de potência ativa e reativa, e no modo de fonte de tensão, utiliza valores de frequência e amplitude de tensão para gerar uma referência em tensão.

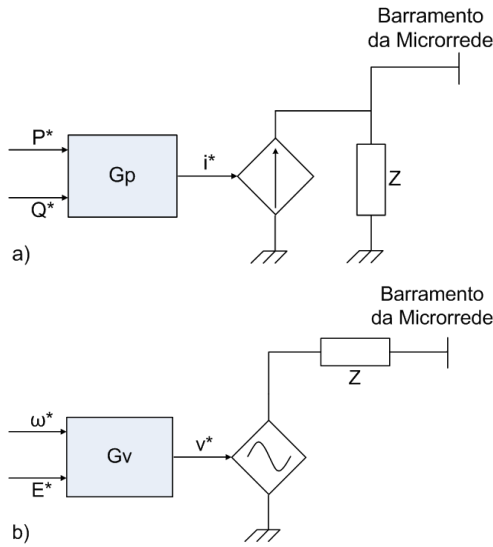


Figura 2. (a) CSR como fonte de corrente; (b) CSR como fonte de tensão.

Para o CSR como fonte de corrente é necessário existir pelo menos um conversor formador de rede conectado, ou então, que a MR esteja no modo interligado à rede convencional. Já se o CSR estiver como fonte de tensão, ele pode operar sozinho em uma microrrede isolada, como um gerador síncrono em uma rede convencional [8].

Independentemente do modo como esse tipo de conversor é controlado, seu principal objetivo é participar da regulação da frequência e da amplitude da tensão CA da MR, controlando as potências ativa e reativa entregue à rede.

Para que esses conversores realizem a divisão igualitária de potência fornecida ou absorvida a rede, é necessária uma estratégia de controle para determinar os valores corretos dessas potências. Devido à característica distribuída considerada nessa MR, é interessante que as variáveis de controle sejam medições de grandezas locais, dispensando comunicação física entre os vários conversores presentes na MR. Um tipo de controle amplamente utilizado, sem meios físicos de comunicação, é o chamado controle *droop*, que será analisado com mais profundidade na seção seguinte.

III. CONTROLE *DROOP* PARA CONVERSORES DE POTÊNCIA EM BAIXA TENSÃO

O controle *droop* para conversores de potência em MR é inspirado no controle *droop* da rede convencional, utilizado em geradores síncronos, cuja estratégia é basicamente a redução da potência ativa entregue quando a frequência da rede aumenta, ou o aumento do fornecimento de potência ativa quando há redução da na frequência.

Em se tratando de uma MR operando na situação isolada, (ilhada ou autônoma), os valores de tensão e frequência da MR são determinados pelo CFR. Além disso, a MR autônoma possui baixa inércia no suprimento de energia, em comparação com o sistema elétrico interligado nacional, alimentado por inúmeros geradores rotativos, e sua dinâmica é determinada pelos conversores estáticos de potência.

Existem conversores que simulam a inércia das redes convencionais por meio de algoritmos de controle especiais

[10],[11]. No caso em que é simulada a inércia dos geradores síncronos, as MR têm dinâmica semelhante às redes convencionais, tornando-se mais apropriada a utilização de controladores convencionais.

Para particularizar o comportamento da MR e o estudo do controle do conversor supridor de rede (CSR), o conversor conectado e a MR podem ser simplificados como duas fontes de tensão conectadas por uma impedância, como representado na Fig. 3 abaixo. A partir dessa simplificação é possível estudar o comportamento da MR.

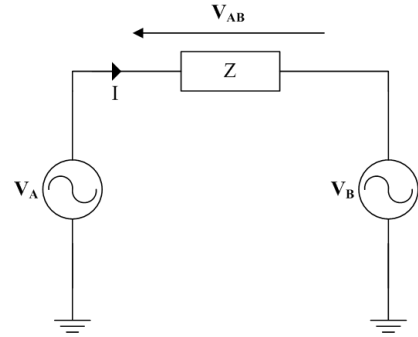


Figura 3. Circuito equivalente do CSR conectado à MR

Na Fig. 3, V_A representa a tensão da MR, V_B representa a tensão na saída do CSR conectado a um banco de baterias e Z representa a impedância da rede. Considera-se, neste caso, a tensão da MR como referência, e o fluxo de potência está no sentido da rede para a bateria, isto é, a bateria estaria carregando-se e absorvendo potência reativa.

O diagrama de fases representando os elementos do circuito pode ser visualizado na Fig. 4 abaixo, em que a tensão eficaz da rede V_A é a referência, a tensão V_B está defasada de V_A pelo ângulo δ e a corrente está atrasada em relação à tensão V_A pelo ângulo θ .

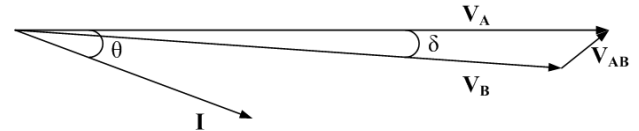


Figura 4. Diagrama de fases do circuito equivalente da MR.

Através da análise do circuito da Fig. 3, pode-se chegar às equações de fluxo de potência para este circuito. As equações (1) e (2) abaixo representam as potências ativa e reativa da rede, respectivamente.

$$P_{rede} = \frac{V_A * [V_A - V_B \cos(-\delta)] * \cos\theta + V_A * V_B \sin(-\delta) * \sin\theta}{Z} \quad (1)$$

$$Q_{rede} = \frac{V_A * [V_A - V_B \cos(-\delta)] * \sin\theta - V_A * V_B \sin(-\delta) * \cos\theta}{Z} \quad (2)$$

As redes elétricas de distribuição possuem diferentes características de impedância de linha de acordo com seu nível de tensão. Através das equações das potências ativas e reativas acima, é possível fazer aproximações para o comportamento das redes em alta ou em baixa tensão. A Tabela I [12] mostra os diferentes valores de impedância de linha que variam em função do nível de tensão.

Este trabalho considera uma MR em corrente alternada (CA) monofásica de baixa tensão. Como mostrado na Tabela I, a impedância das linhas das redes em baixa tensão possuem a característica resistiva muito superior à característica indutiva, podendo ser negligenciada a reatância indutiva da linha, o que possibilita simplificações nas expressões das potências.

TABELA I. PARÂMETROS TÍPICOS DE LINHA

Tipo de linha	R [Ω/km]	X [Ω/km]	R/X
Baixa Tensão	0,642	0,083	7,7
Média Tensão	0,161	0,190	0,85
Alta Tensão	0,06	0,191	0,31

Para uma rede com valor de $R \gg X$, pode-se dizer que $Z=R$, e que o ângulo da impedância $\theta=0$. As expressões das potências são reduzidas para as seguintes:

$$P_{rede} = \frac{V_A [V_A - V_B \cos(-\delta)]}{R} \quad (3)$$

$$Q_{rede} = \frac{-V_A V_B \sin(-\delta)}{R} \quad (4)$$

Pode ser considerada também que a defasagem entre as tensões da rede e do conversor é mínima [13], isto significa que o ângulo δ é pequeno e, assim, $\cos(-\delta) = 1$ e $\sin(-\delta) = -\delta$ (radianos). Esta aproximação reduz as equações das potências (3) e (4) para:

$$V_A - V_B \propto \frac{R * P_{rede}}{V_A} \quad (5)$$

$$\delta \propto \frac{Q_{rede} * R}{V_A V_B} \quad (6)$$

As equações (5) e (6) levam a compreender que a queda de tensão no ponto de interligação do CSR depende da potência ativa, e que a estabilidade da frequência depende da potência reativa. Isso possibilita que sejam construídos os sistemas de controle.

Neste trabalho, por se tratar de uma rede em baixa tensão, será utilizado o controle *droop* para baixa tensão, que é derivado do equacionamento mostrado anteriormente. É possível, portanto, estabelecer duas equações de controle de tensão e de frequência para o CSR, com base nas características da MR.

Primeiramente, considera-se f a frequência atual da MR e f_0 a frequência nominal ou frequência de operação correta. Analogamente, V é a tensão local medida no ponto de conexão do conversor, e V_0 é a tensão nominal de saída do conversor. De modo análogo, P é a potência de saída do conversor e P_0 é sua potência ativa nominal. Além disso, Q é a potência reativa de saída do conversor e Q_0 é sua potência reativa nominal.

Pode-se construir, então, o controle *droop* para as potências ativa e reativa do CSR. O conceito desse controle é medir a variação de tensão local e ajustar a potência ativa de saída, e medir a variação de frequência local e ajustar a potência reativa de saída. Assim, uma queda na tensão indica necessidade de mais potência ativa e uma queda na frequência

indica necessidade de mais potência reativa. Isso é apontado nas equações (7) e (8), onde k_p e k_q são os coeficientes de inclinação da curva para a potência ativa e para a potência reativa, respectivamente.

$$V = V_0 - k_p (P - P_0) \quad (7)$$

$$f = f_0 - k_q (Q - Q_0) \quad (8)$$

Os coeficientes de inclinação são indicados por percentual de inclinação [14]. Isto é, a porção da variação da grandeza medida para causar 100% de mudança na grandeza controlada. Por exemplo, uma queda de 3% da tensão da MR, para um k_p de 3%, ocasionará um aumento de 100% da potência ativa de saída.

As equações (7) e (8) podem ser interpretadas como curvas, como mostra a Fig. 5. Em conversores conectados a sistemas de armazenamento de energia, que operam no modo bidirecional, é conveniente fazer P_0 e Q_0 iguais a zero [3]. Para esses casos, a potência ativa será nula quando o valor da tensão nos terminais do conversor for V_0 , e f_0 é a frequência da rede quando o conversor deve operar com fator de potência unitário, ou potência reativa nula.

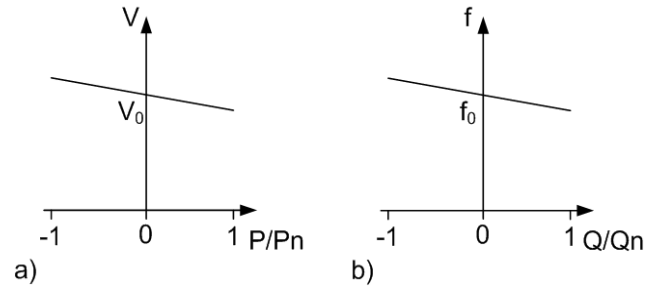


Figura 5. Curva de controle *droop* para CSR em baixa tensão: a) tensão versus potência ativa e b) frequência versus potência reativa.

IV. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

Para comprovar o funcionamento do controle *droop* proposto, foram realizadas simulações que evidenciam o controle da potência ativa de um CSR em função da variação da tensão da rede.

A potência ativa é convencionada positiva quando o banco de baterias fornece potência à rede, em descarga, e negativa quando a bateria absorve energia, em carregamento.

Os CSRs, como citado anteriormente, podem ser conectados à rede no modo de fonte de corrente ou fonte de tensão, dependendo do tipo de controle a ser implementado. Devido à baixa potência do conversor deste trabalho, impossibilitando sua operação solo, foi escolhido o desenvolvimento do controle como fonte de corrente, sendo necessário existir sempre de pelo menos uma fonte de tensão conectada à MR para sua operação.

Considerando, então, o conversor no modo fonte de corrente, e P_0 igual a zero devido ao fato de a fonte conectada ser um armazenador de energia, o valor de referência para potência ativa é determinado pela equação (9) a partir dos valores medidos da tensão V da microrrede. Nesse modo de interligação, a divisão de potência entre conversores em

paralelo não depende da impedância série de saída dos mesmos [3].

$$P^* = \frac{1}{k_p} (V_0 - V) \quad (9)$$

Para realizar o controle adequado das potências é necessário que a fonte de corrente esteja perfeitamente sincronizada com a tensão da MR. Para essa finalidade é necessária a utilização de algum algoritmo de sincronismo. Neste trabalho é utilizado um sistema de *Phase-Locked Loop* (PLL) para o sincronismo.

A Fig. 6 mostra o diagrama de blocos do controle *droop* utilizado no trabalho. Esse controle, derivado da equação (9), mostra claramente que a referência de potência é determinada pelos valores medidos de tensão da MR. A partir dessa estratégia de controle foi possível simular um circuito mostrando sua validade.

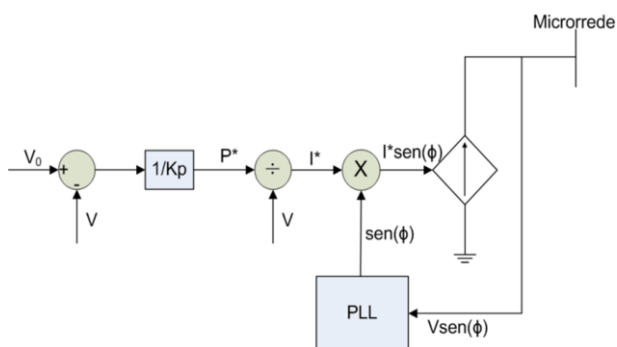


Figura 6. Diagrama de blocos do controle do CSR como fonte de corrente.

Foi simulado o comportamento de um circuito composto por um CSR e um CFR conectados a uma carga resistiva variável em paralelo. Esse circuito pode ser visualizado na Fig. 7, que mostra os sentidos positivos adotados das variáveis de corrente e tensão. O CSR é conectado, então, como fonte de corrente, e o CFR como fonte de tensão. Para a simulação foi utilizado o *software* Psim.

O controle implementado no CFR segue a proposta da equação (7), considerando P_0 com valor nulo. O CFR controla a amplitude da tensão da rede em função da exigência de potência ativa. Ao perceber déficit ou excesso de potência ativa, o CFR diminui ou aumenta a amplitude da tensão para que assim o CSR contribua com o valor devido de potência ativa.

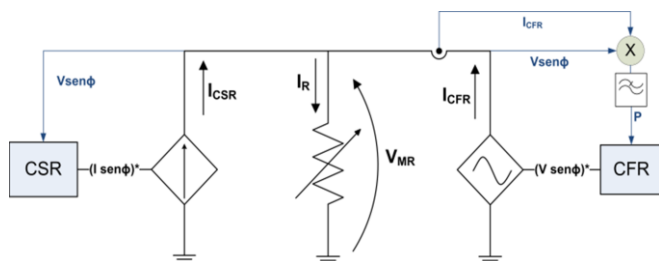


Figura 7. Circuito simulado de uma microrrede.

Os componentes da MR foram dimensionados com base em valores típicos de equipamentos para microgeração. Foi

estabelecida a potência nominal do CSR de 5kW, com carga variável de 0 até 10kW; a tensão nominal da rede é $V_{MR} = 220V$. A variação da amplitude da tensão da rede pelo CFR segue os limites permitidos pela legislação brasileira [15], em 5% acima ou abaixo do valor nominal.

A partir dessas definições é possível calcular o coeficiente de controle da potência ativa k_p , que segue a definição da equação (10). Para este caso considera-se P_{max} igual o valor da potência nominal do CSR e P_{min} o mesmo valor de P_{max} , com sentido contrário.

$$k_p = \frac{V_{max} - V_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (10)$$

As Figuras 8 a 10 mostram o comportamento do sistema em situações específicas. As correntes são representadas por valores instantâneos na curva superior, sendo I_R em verde, I_{CSR} em azul e I_{CFR} em vermelho. A tensão V_{MR} é representada por seu valor eficaz na curva inferior, em azul.

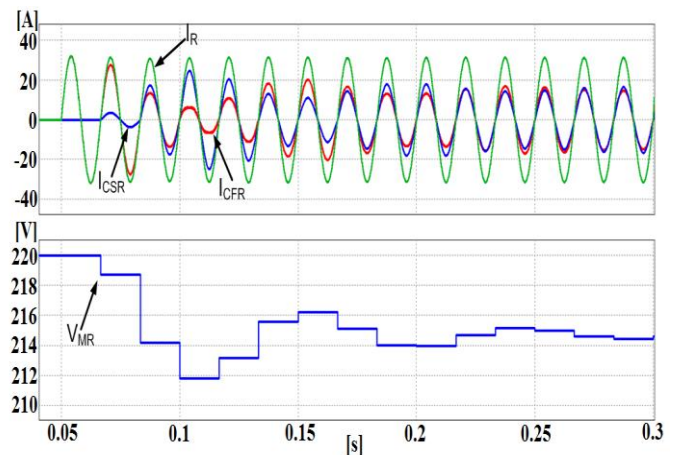


Figura 8. Formas de onda das correntes I_{CSR} , I_{CFR} e I_R e da tensão V_{MR} para a entrada de meia carga.

O funcionamento do circuito pode ser entendido com base na Tabela II, que relaciona os eventos às consequências e à respectiva figura em que é identificado.

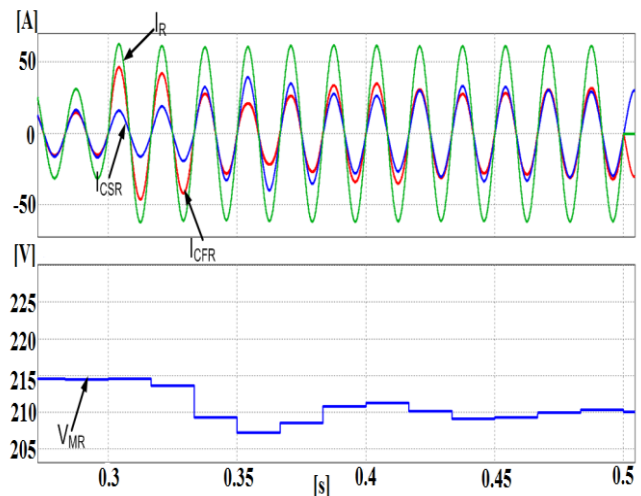
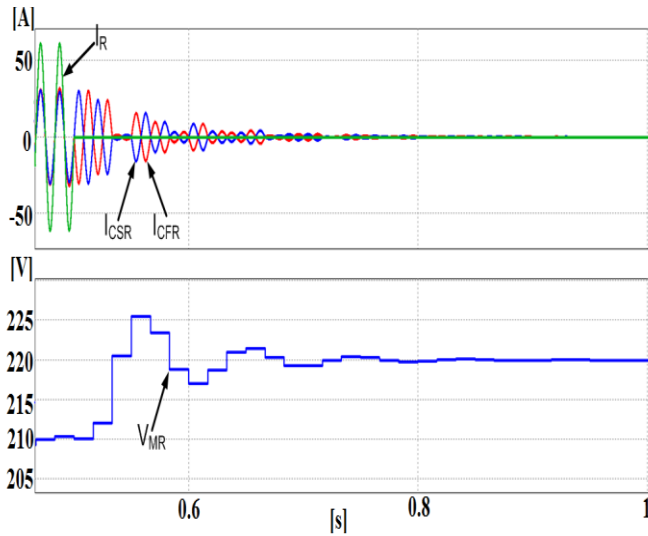


Figura 9. Formas de onda das correntes I_{CSR} , I_{CFR} e I_R e da tensão V_{MR} para carga completa.

TABELA II. EVENTOS ESSENCIAIS DA SIMULAÇÃO

Tempo [s]	Evento
0	Rede está estabilizada, $V_{MR} = 220V$; não há carga. Fig. 8.
0,05	Entrada da carga com metade da potência. CFR assume inicialmente toda a carga e inicia redução de V_{MR} . CSR percebe redução de V_{MR} e começa a contribuir com potência ativa até estabelecer o equilíbrio. Fig. 8.
0,3	Aumento para carga completa. CFR assume instantaneamente o acréscimo de carga e inicia redução de V_{MR} . CSR aumenta contribuição de potência ativa até estabelecer novo equilíbrio. Fig. 9.
0,5	Carga é retirada. CFR recebe potência ativa e inicia acréscimo de V_{MR} . CSR percebe aumento de V_{MR} e reduz potência ativa fornecida. Quando V_{MR} atinge valor nominal CSR anula potência fornecida. Fig. 10.

Figura 10. Formas de onda das correntes I_{CSR} , I_{CFR} e I_R e da tensão V_{MR} para a retirada de carga.

V. CONCLUSÕES

A associação de cargas e geradores em uma microrrede (MR) permite que o controle das fontes seja localizado, não interferindo ou não dependendo no sistema convencional. O controle da amplitude da tensão da rede é essencial para possibilitar o aumento da inclusão de fontes de geração distribuída no sistema elétrico. Uma estratégia para o controle de conversores conectados à MR é o uso da técnica de controle *droop*, que permite a interligação dos conversores sem a necessidade de ajustes ou a instalação de sistemas de comunicação de dados entre os conversores presentes.

Este trabalho mostrou que a utilização de um CSR alimentado por baterias, conectado à MR de baixa tensão e controlado pela técnica *droop*, contribui com a regulação da tensão da MR, tornando-a imune a variações de carga ou variações da potência gerada. Durante sua operação o CSR fornece potência ativa. O controle *droop* convencional em baixa tensão, em que a variação de potência ativa segue a variação de frequência (P/f) já teve sua efetividade demonstrada em outros trabalhos, porém a verificação do

controle da potência ativa em função da variação de tensão (P/V) ainda é pouco explorado na literatura.

Apesar de o sistema simulado estar ilhado, a solução estudada pode ser estendida para uma MR conectada ao sistema elétrico, pois o comportamento da rede em baixa tensão é o mesmo, como demonstrado matematicamente. Além disso, o fato de o CSR estar conectado a uma bateria possibilita a realização de contribuição de potência para os casos de intermitência das fontes de energia da MR.

Mais além, é possível implementar outros laços de controle em níveis hierárquicos superiores que otimizam o fluxo de energia da MR com a rede convencional, possibilitando reduzir o custo de operação, maximizando a eficiência, a confiabilidade e a controlabilidade da rede.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Soshinskaya, W. H. J. Graus, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Microgrids: experiences, barriers and success factors," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 659–672, 2014.
- [2] R. Lasseter, "Microgrids," *IEEE PES Winter Meeting*, January 2002.
- [3] Matos, J. G. Controle de Potência em Microrredes CA Isoladas com Aerogeradores e Bancos de Baterias Distribuídos. 2014. 203f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014.
- [4] H. Jiayi, J. Chuanwen, and X. Rong, "A review on distributed energy resources and MicroGrid," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 9, pp. 2465–2476, 2008.
- [5] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Recent developments in microgrids and example cases around the world - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 4030–4041, 2011.
- [6] M. Barnes, G. Ventakaramanan, J. Kondoh, R. Lasseter, H. Asano, N. Hatziaargyriou, J. Oyarzabal, and T. Green, "Real-world MicroGrids - An overview," *IEEE Int. Conf. Syst. Eng. SOSE*, 2007.
- [7] R. Zamora and A. K. Srivastava, "Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 2009–2018, 2010.
- [8] 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, 2012.
- [9] B. Roberts, "Capturing grid power," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 32–41, 2009.
- [10] J. Liu, Y. Miura, and T. Ise, "Dynamic Characteristics and Stability Comparisons between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators," *The International Power Electronics Conference*, no. 3, pp. 1536–1543, 2014.
- [11] Y. Du, J. M. Guerrero, L. Chang, J. Su, and M. Mao, "Modeling, analysis, and design of a frequency-droop-based virtual synchronous generator for microgrid applications," *IEEE ECCE Asia Downunder - 5th IEEE Annu. Int. Energy Convers. Congr. Exhib.*, pp. 643–649, 2013.
- [12] A. Engler, "Applicability of droops in low voltage grids," *Int. J. Distrib. Energy Resour. Smart Grids*, no. 1, pp. 1–5, 2005.
- [13] H. Laaksonen, P. Saari, and R. Komulainen, "Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid," *Int. Conf. Futur. Power Syst.*, Nov 2005, p. 6.
- [14] S. F. Bush, *Smart grid: Communication-enabled intelligence for the electric power grid*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [15] Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução – ANEEL, Resolução Normativa 469, 2012.