

Análise de Microrrede Ilhada Utilizando Inversores em Paralelo com *Droop*

Douglas A. F. Pelacini^{*}, João V. G. Kasper^{*}
 Cyntia C. C. B. de Aquino^{*}, João A. Vilela, Jr^{*}
 Gustavo H. C. Oliveira^{*}

^{*} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, PR (e-mail: douglaspelacini@ufpr.br; joaovitorgk21@hotmail.com; cyntiacristinne@gmail.com; vilela@eletrica.ufpr.br; gustavo@eletrica.ufpr.br)

Abstract: This paper presents an analysis the dynamics response of three-phase microgrid in isolated operation through decentralized droop control. The objective is to control both voltage and frequency, due to isolated operation, to maintain those electrical parameters in operative levels similar to the connected ones. Therefore, a decentralized control proposal is applied. In this microgrid, the energy storage system and distributed generation are connected to the AC loads present in the microgrid through the voltage inverters. The droop control is intended to make the voltage inverters connected to the microgrid share the power required by the loads operating in two ways: in the first way, the inverter operates as a voltage source (VSI) and uses the values of active and reactive power it is processing to define the frequency and effective voltage of the grid; the second way, the voltage inverter operates as a current source (CSI) the frequency and effective grid voltage are measured. The measured values determine the values of active and reactive power that this inverter must inject into the grid. To assess the response of inverters operating isolated, a load curve is considered. The results obtained validate the control used in the inverters.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise de resposta dinâmica de microrredes trifásicas operando ilhadas através de um controle descentralizado do tipo *droop*. O objetivo é controlar a tensão e a frequência no caso de ilhamento, a fim de manter o perfil dessas duas grandezas em patamares operativos semelhantes de quando conectadas. Para isso, uma proposta de controle descentralizado é apresentada. Nessa microrrede, os inversores de tensão fazem a conexão dos sistemas de geração e de armazenamento de energia com as cargas CA presentes na microrrede. O controle *droop* tem como finalidade fazer com que os inversores de tensão conectados à microrrede compartilhem as potências demandadas pelas cargas, operando de duas formas: na primeira o inversor de tensão opera como fonte de tensão (VSI) e utiliza os valores de potência ativa e reativa que está processando para definir a frequência e a tensão eficaz da rede CA; na segunda o inversor de tensão opera como fonte de corrente (CSI) em que a frequência e a tensão eficaz da rede são medidas. Através dos valores medidos são determinados os valores de potência ativa e reativa que esse inversor deve injetar na rede. Para avaliar a resposta dos inversores operando ilhados, uma curva de carga é considerada. Resultados mostram a operação destes inversores para validar o controle utilizado.

Keywords: Island microgrids; voltage and frequency control; decentralized control of inverter; droop control; load curve.

Palavras-chaves: Microrrede ilhada; controle de tensão e frequência; controle descentralizado de inversores; controle *droop*; curva de carga.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia passam por desafios decorrentes da crescente inserção de fontes renováveis de energia na rede elétrica. Esse expressivo aumento da geração distribuída requer um maior controle da rede de distribuição, a fim de não comprometer a qualidade da

energia elétrica e a confiabilidade do sistema. O conjunto desses Recursos Energéticos Distribuídos (RED) associados aos sistemas de armazenamento de energia e às cargas é chamado de microrrede. As microrredes podem operar no modo conectado à rede ou ilhado (Piagi and Lasseter, 2006). Quando conectado à rede, o controle dos inversores de tensão pode ser projetado para diferentes objetivos, tais como: melhorar o perfil de tensão da rede, corrigir o fator de potência, minimizar o impacto de fontes intermitentes na rede, deslocamento de cargas e outras.

^{*} Os autores agradecem ao apoio financeiro do Projeto PD - 2866-0470/2017, regulamentado pela ANEEL e desenvolvido no âmbito do programa de P&D da COPEL Distribuição.

No modo de operação ilhado o objetivo do controle é manter a frequência e os valores eficazes de tensão da rede dentro de patamares operativos. A intermitência da geração e a oscilação das cargas são os grandes desafios para a operação ilhada da microrrede (Barnes et al., 2007). No contexto das microrredes, tem-se observado um crescimento substancial no uso de fontes renováveis baseadas em energia fotovoltaica (Aneel, 2018). Essa implementação de sistemas fotovoltaicas pode levar a flutuações de tensão e frequência do sistema, ocasionadas pela natureza intermitente e descontínua da radiação solar (Pandey et al., 2013), como mencionado anteriormente. Tais flutuações podem causar problemas de estabilidade, qualidade de energia e geralmente requerem compensação ou suporte de energia via equipamentos de armazenamento de energia (Oliveira et al., 2019). Apesar de os sistemas de controle de tensão e frequência nas microrredes estarem estritamente relacionados por serem variáveis fortemente acopladas, podem ser analisados separadamente (Farrokhbadi et al., 2019). Assim, esforços têm sido realizados na tentativa de avaliar a operação desses sistemas e garantir as condições confiáveis de operação da microrrede, de forma a manterem por exemplo: os valores de tensão e frequência desejados, como vistos em Yuen et al. (2011), Olivares et al. (2014) and Belkacemi et al. (2015).

Para a implementação de uma microrrede ilhada é essencial a utilização de inversores de tensão (Voltage Source Inverter - VSI) para formar a rede CA. Os demais inversores presentes na microrrede devem operar como fonte de corrente (Current Source Inverter - CSI). Todavia, é possível utilizar mais de um inversor VSI na microrrede, mas o controle é mais complexo e não é foco deste trabalho. A operação dos inversores como VSI ou como CSI é determinada pelas estruturas internas de controle de cada equipamento. No entanto, sem uma comunicação entre os inversores é complexo gerenciar as potências entregues por cada equipamento à rede (Dan Wu et al., 2014). Nesse sentido, o controle *droop* é utilizado para obter o gerenciamento das potências entre os inversores, sem requerer uma comunicação entre os equipamentos. Assim, um inversor não fica sobrecarregado em detrimento de outros operarem com baixo carregamento, mas todos entregam potências percentualmente parecidas como apresentado em Vasquez et al. (2009). Outros trabalhos também fazem uso desta estratégia para controle de tensão em inversores. Alguns exemplos podem ser vistos em Shayanfar and Malek (2015) e Charalambous et al. (2019).

As unidades de geração utilizando inversores CSI atuam de forma a contribuir com uma parcela da potência solicitada pelo inversor VSI, cuja contribuição é definida pelo desvio de frequência ou de tensão eficaz e pelo coeficiente *droop* do inversor CSI (veja Figura 1). Desse modo, uma análise do controle *droop* para uma microrrede com inversores VSI e CSI é apresentada neste artigo, em que o modelo de uma microrrede implementada no Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR é considerado. O foco de interesse é realizar o controle descentralizado de tensão e frequência para inversores operando como VSI e CSI em uma microrrede ilhada, evidenciando o compartilhamento de potência entre eles. Para tal, Utilizam-se dados reais de consumo obtidos via medição local, estabelecendo patamares de carga que retratam o perfil de carga da microrrede. Os resultados desta implementação são obtidos

via simulações no domínio do tempo. Assim, o presente artigo está organizado em seções da seguinte forma: na Seção 2 apresentam-se as estratégias de controle para os inversores utilizadas nestes sistemas. Na Seção 3 apresenta-se a descrição da microrrede utilizada para validação dos resultados. Na Seção 4 tem-se os resultados obtidos via testes de simulação para diferentes patamares de cargas. Por fim, na Seção 5 são feitas as considerações finais acerca do trabalho.

2. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA OS INVERSORES

As microrredes possuem conversores estáticos e sistemas de controle que fornecem flexibilidade para operar como um sistema único e manter a qualidade da energia elétrica dentro de parâmetros especificados. Isso permite que as microrredes apresentem-se como uma unidade controlada que atende à demanda local com confiabilidade e segurança (Chowdhury et al., 2009). Nesse sentido, o inversor de tensão conectado a um sistema ilhado torna-se um elemento essencial nas microrredes e nos sistemas de geração distribuída, pois permitem a interface entre a rede e os sistemas de geração e/ou armazenamento de energia (Zeng et al., 2013).

Em uma microrrede no modo de operação ilhada o inversor VSI opera como formador de rede, sendo conectado a um banco de baterias ou a uma fonte firme. O inversor CSI opera injetando ou absorvendo correntes da rede, ou seja, fornecendo ou absorvendo potências ativa e reativa da microrrede (Matos, 2014).

Para se obter uma resposta dinâmica mais rápida e estável dos inversores, no controle das correntes, é utilizado neste trabalho a técnica de controle vetorial. Essa técnica permite transformar um sistema trifásico num sistema bifásico, formado pelos eixos direto e em quadratura, de tal forma que pode-se relacionar a corrente direta do sistema (I_d) com a potência ativa injetada e a corrente em quadratura do sistema (I_q) com a potência reativa injetada. Assim, é possível realizar o controle das correntes trifásicas do sistema parametrizando apenas dois controladores. Utilizando as correntes I_d e I_q é possível elaborar o controle dos inversores VSI e CSI de forma bem mais simples.

A Figura 2 ilustra a estrutura de controle do inversor operando como fonte de corrente. As três correntes trifásicas do sistema são medidas e em seguida passam pela transformada de *Park*. A saída da transformada fornece I_d e I_q do sistema, sendo multiplicadas pelo k_{des} , que é o fator de desacoplamento e serve para evitar interferências de I_q em I_d e vice-versa. O sinal de erro que entra em cada compensador é calculado através de uma comparação entre as correntes medidas I_d e I_q e seus valores de referência I_d' e I_q' . Os sinais de corrente compensados somados aos fatores de desacoplamento fornecem os ciclos de chaveamento que, após passarem pela transformada inversa de *Park*, fornecem os ciclos de chaveamento trifásico e são os sinais de entrada do PWM.

O presente estudo tem por objetivo avaliar a capacidade dos inversores de dividir a demanda da microrrede, considerando um inversor operando como fonte de tensão e o outro como fonte de corrente. Os inversores conectados devem dividir os acréscimos e decréscimos de potência demandada do sistema. A divisão de potência do sistema pode ser controlada de forma centralizada, como uma

central de controle, recebendo informações através de uma rede de comunicação e informando os valores que cada um dos inversores deve fornecer de potência ativa e reativa. No entanto, esse método depende de uma velocidade de fluxo de informações muito grande e de um grau de confiabilidade elevado. Na microrrede em estudo, a topologia não favorece esse tipo de controle, pois os inversores são afastados e isso poderia comprometer a comunicação entre eles e com a central. Por outro lado, um sistema de controle descentralizado não necessita de uma central de comando e dispensa a comunicação entre os inversores.

No controle *droop*, a potência fornecida pelos inversores é função da tensão e frequência. Essa técnica consiste no cálculo do coeficiente da reta entre os valores de referência para frequência e tensão dos valores máximos ou mínimos assumidos por essas grandezas quando os inversores estão operando com sua potência máxima ou mínima, bem como ilustrado pela Figura 1. As faixas de variação aceitas por cada grandeza são definidas pelo projetista e alteram o valor dos coeficientes das retas, denominados de coeficientes *droop*. Logo, cada um dos inversores possui um coeficiente *droop* que depende de sua potência nominal.

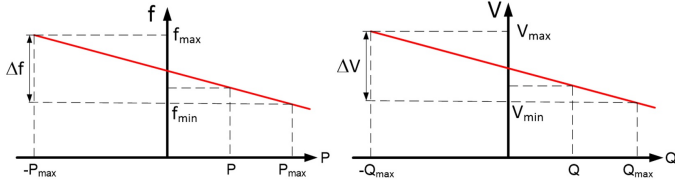


Figura 1. *Droop* de frequência e de tensão.

A estrutura de implementação do inversor operando como CSI é ilustrada na Figura 2. Com a frequência a vazio e a frequência do sistema determinada pelo PLL, calcula-se o desvio da frequência e, em seguida, multiplicando-o pelo coeficiente *droop* de frequência (m_r) define-se o valor de potência ativa que deve ser fornecido por este inversor. Na outra malha de controle, os sinais de tensão trifásicos passam pela transformada de *Park* e, na sequência, são utilizados para calcular a tensão resultante (V_r), a qual é comparada com o sinal de referência (E^*) obtendo-se o desvio na tensão. Esse último, por sua vez, é multiplicado pelo coeficiente *droop* de tensão (n_r), definindo o valor de potência reativa que deve ser entregue por esse inversor. As potências calculadas são utilizadas para definir as correntes de referências I_d e I_q , utilizando a metodologia de cálculo apresentada por Dan Wu et al. (2014).

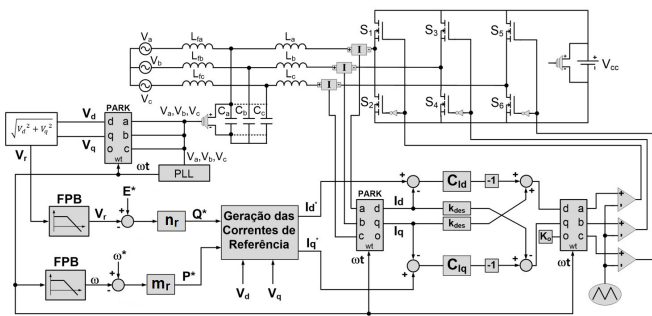


Figura 2. Inversor operando como fonte de corrente.

A estrutura de controle do inversor operando como VSI é ilustrada na Figura 3. As tensões e as correntes trifásicas são medidas e aplicam-se as transformadas de *Park*, obtendo-se as tensões V_d e V_q e as correntes I_d e I_q . Com essas grandezas é possível calcular as potências ativa e reativa fornecidas pelo inversor. Essas potências passam pelo *droop* de frequência (m_d) e de tensão (n_d) e os sinais de saída por filtros passa-baixo (FPB). Esses sinais são então subtraídos da frequência de referência ω^* e da tensão de referência E^* , gerando a frequência e tensão *droop*. A frequência *droop* (ω_{Droop}) passa por um integrador, para gerar o ângulo de referência ωt do vetor resultante das tensões trifásicas (V_r), que é utilizado em todas as transformadas do inversor. A tensão *droop* (E_{Droop}) é a referência para a malha de controle da tensão do filtro de saída. O sinal V_q é comparado com zero para garantir que o vetor resultante das tensões trifásicas (V_r) mantenha-se no eixo direto, definindo para isso o valor de potência reativa que o inversor está produzindo ou absorvendo.

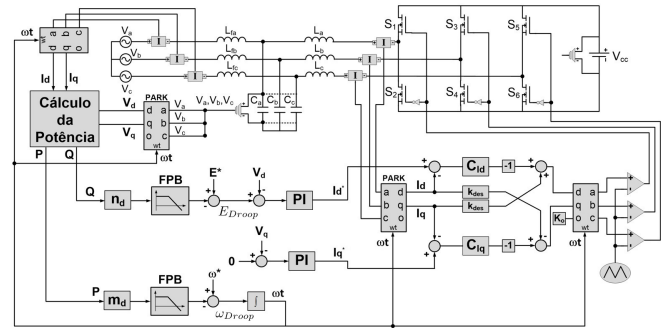


Figura 3. Inversor operando como fonte de tensão.

3. DESCRIÇÃO DA MICRORREDE

O diagrama ilustrado pela Figura 4 é considerado para validar as metodologias propostas na Seção 2. Ele representa um modelo sintetizado da microrrede sendo implementada no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) da UFPR. Ela é composta por dois inversores que operam em paralelo, sendo um deles modelado como fonte de tensão e o outro como fonte de corrente. O controle *droop* descentralizado é aplicado em ambos os inversores com o intuito de realizar o compartilhamento de potência entre eles.

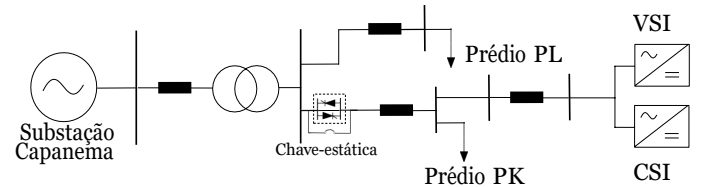


Figura 4. Modelo da microrrede utilizada para os estudos.

Para analisar a estabilidade do sistema, os inversores operam considerando alguns patamares de carga definidos a partir de medições reais realizadas no prédio PK do Departamento de Engenharia Elétrica. A curva de carga do prédio PK é ilustrada na Figura 5. Para tal, são escolhidos

valores de pico de potência ativa e reativa de horários referentes ao dia 20 de novembro de 2019.

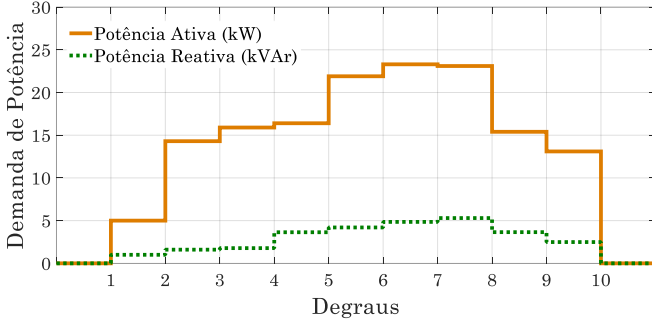


Figura 5. Curva de carga do bloco PK referente ao dia 20 de novembro de 2019.

Os intervalos de horários e valores de potência utilizados como patamares de carga são observados na Tabela 1. Os patamares criados e ilustrados pela Figura 5 seguem o aumento de potência ativa considerando um fator de potência variável ao longo do dia. Esses patamares são utilizados para validar o controle *droop*. O instante 10, na Tabela 1, corresponde ao período do dia em que não se verifica uma demanda de potência. Por conveniência computacional, as variações das cargas durante um período de 24 horas são introduzidas em uma simulação de 8 segundos. Pode-se proceder dessa forma em decorrência dos transitórios de resposta dos inversores aos degraus de carga serem da ordem de milissegundos.

Os inversores possuem coeficientes *droop* que são calculados considerando a potência de cada inversor. Para ambos os inversores, tanto operando como fonte de tensão quanto fonte de corrente, a potência considerada é de 30 kVA, com o fator de potência entre 0 a 1. Nas subseções seguintes, o conceito para obtenção dos coeficientes *droop* é apresentado.

3.1 Coeficientes Droop do VSI

O coeficiente *droop* de frequência (m_d) relaciona a variação da frequência da rede com a potência ativa que o inversor VSI está processando. Esse coeficiente é definido pela potência ativa máxima do inversor e pelos limites aceitáveis de variação de frequência, conforme apresentado na Equação 1. O coeficiente *droop* de tensão (n_d) é definido de forma semelhante, como pode ser visto na Equação 2. Esse coeficiente, por sua vez, relaciona o valor eficaz de tensão da rede com a potência reativa que o inversor VSI está processando. Assim, a frequência e a amplitude da tensão de saída são geradas em função da potência ativa e reativa que o inversor VSI está processando.

$$m_d = \frac{\Delta\omega}{P_{max}} \quad (1)$$

$$n_d = \frac{\Delta E}{Q_{max}} \quad (2)$$

$\Delta\omega$ e ΔE são os máximos desvios de frequência e tensão permitidos e P_{max} e Q_{max} as máximas potências ativa e reativa do inversor. No presente artigo, para se definir o

Tabela 1 - Patamares de potência definidos na Figura 5.

Degrau	Período	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	cos θ (ind)
1	5h - 7h	5,0	1,00	0,981
2	7h - 9h	14,3	1,60	0,994
3	9h - 11h	15,9	1,78	0,994
4	11h - 13h	16,4	3,64	0,976
5	13h - 15h	21,9	4,20	0,982
6	15h - 17h	23,3	4,85	0,980
7	17h - 19h	23,1	5,30	0,975
8	19h - 21h	15,4	3,65	0,973
9	21h - 23h	13,1	2,49	0,982
10	23h - 5h	0,0	0,00	0,000

coeficiente *droop* de frequência considera-se uma variação de 2 Hertz (Hz) e para o coeficiente *droop* de tensão considera-se uma variação de 10 Volts (V). Assim, dada esta variação de frequência para definição do coeficiente, o VSI entrega potência ativa máxima quando há um desvio de 2 Hz da frequência em relação à frequência base (60 Hz). Da mesma forma, considerando a variação de tensão para definição do coeficiente, o VSI entrega potência reativa máxima quando há um desvio de 10 V da tensão em relação à tensão nominal (380 V). O controle *droop* do inversor operando como fonte de tensão deve ter uma dinâmica de resposta rápida, para minimizar os impactos na tensão dos transitórios de carga.

3.2 Coeficientes Droop do CSI

O controle *droop* no CSI monitora os valores de frequência e tensão e em função dos desvios da referência são definidas as potências ativas e reativas que o inversor pode processar. O valor do *droop* de frequência (m_r) é obtido pela relação entre potência ativa nominal e variação de frequência ($\Delta\omega$). Enquanto que valor do *droop* de tensão (n_r) é dado pela relação entre potência reativa nominal e variação de tensão (ΔE). A dinâmica do controle *droop* do inversor CSI é mais lenta quando comparada ao VSI. Essa diretriz de projeto evita que oscilações transitórias de tensão produzidas pelos degraus de carga levem o inversor CSI a realizar injeção de elevados valores de potência reativa a fim de restabelecer o valor da tensão aos padrões operativos. Para tanto, leva-se em consideração a dinâmica dos filtros passa-baixo envolvidos, os quais podem ser observados nas Figuras 2 e 3.

4. RESULTADOS

Para avaliar a eficácia da metodologia de controle descrita no presente trabalho são simulados dois inversores operando em uma microrrede ilhada. Analisa-se o comportamento dos inversores perante variações dos patamares de carga e do fator de potência dessas cargas, as quais são obtidas através de medidas reais realizadas no DELT.

O gráfico de potência ativa ilustrado pela Figura 6 retrata ambos os inversores (VSI e CSI) compartilhando a demanda de potência ativa. A resposta dos inversores no controle da potência ativa é pouco oscilante, visto que a frequência, mesmo com muitas perturbações, oscila em poucos instantes, principalmente nos momentos após os degraus de carga.

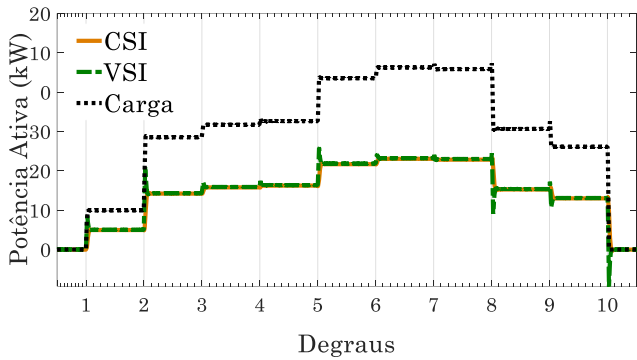


Figura 6. Distribuição de potência ativa para carga com fator de potência indutivo.

A Figura 7 ilustra o sinal de frequência do sistema. Verifica-se que, baseado em um decréscimo de frequência, ocorre uma injeção de potência ativa pelo CSI, caracterizando um compartilhamento praticamente idêntico da potência ativa demandada, assim como ilustrado pela Figura 6. No entanto, ainda percebe-se uma ligeira oscilação na frequência, ação esta confirmada em alguns degraus de carga (4 e 8).

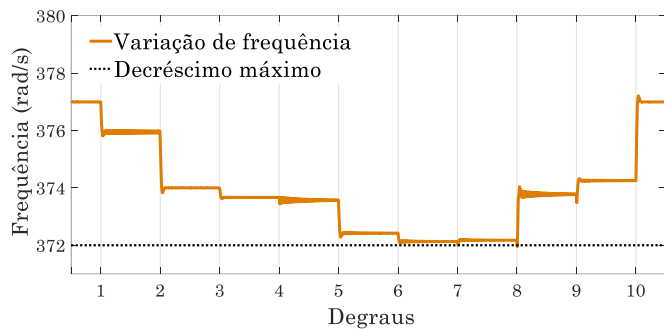


Figura 7. Frequência do sistema.

No gráfico de potência reativa ilustrado pela Figura 8, observa-se novamente a divisão proporcional de potência demandada entre os dois inversores. Em um primeiro momento, a medida que há uma variação de carga a dinâmica do VSI, por ser mais rápida, assume o potência nominal. Conseqüentemente, com o passar do tempo, sua contribuição decresce gradativamente até o ponto em que ambos os inversores passem a suprir esta carga proporcionalmente.

A Figura 9 ilustra as tensões de linha do sistema ao longo dos degraus de carga aplicados. Observa-se que as tensões apresentam um decréscimo do valor eficaz em relação ao seu valor nominal, característica inerente a este tipo de carga, a qual apresenta um fator de potência indutivo. Além disso, percebe-se uma resposta ligeiramente oscilatória em seu valor eficaz.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo a operação de microrredes utilizando o controle *droop* descentralizado para inversores operando em paralelo como fonte de tensão e como fonte de corrente é apresentada. Constata-se que a metodologia adotada é eficiente para o estudo de caso apresentado. Os inversores

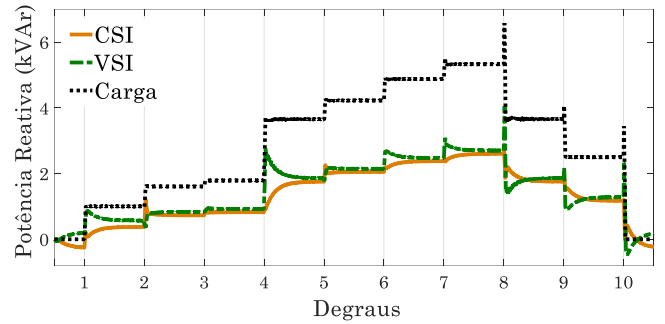


Figura 8. Distribuição de potência reativa para carga com fator de potência indutivo.

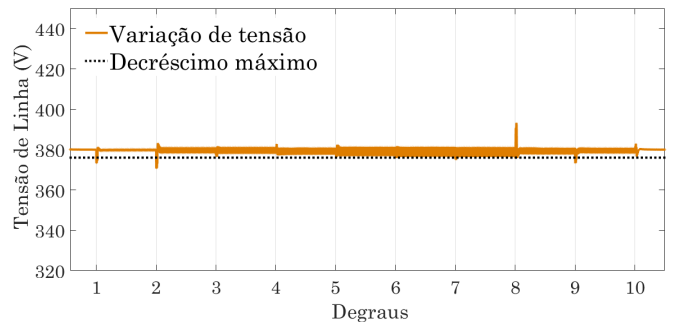


Figura 9. Tensão de linha do sistema.

são capazes de compartilhar as potências demandadas pelas cargas de forma proporcional a sua potência nominal. O controle das potências injetadas através dos conceitos das correntes I_d e I_q minimiza o número de compensadores e torna a resposta mais rápida. Como a tensão do sistema é susceptível às oscilações de carga, a potência reativa apresenta maiores oscilações em relação a potência ativa. As potências são definidas pelas cargas que estão sendo utilizadas ao longo do dia de forma que são divididas entre os inversores através da técnica *droop* descrita no trabalho. Portanto a divisão das potências ativa e reativa mostram-se efetivas através desse controle. Além disso, em regime, as tensões e frequências permanecem dentro das faixas estabelecidas no projeto.

REFERÊNCIAS

- Aneel (2018). Agência nacional de energia elétrica – informações gerenciais – dezembro 2018.
- Barnes, M., Ventakaramanan, G., Kondoh, J., Lasseter, R., Asano, H., Hatziargyriou, N., Oyarzabal, J., and Green, T. (2007). Real-world microgrids - an overview. In *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering, SOSE, 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering, SOSE*. doi:10.1109/SYSE.2007.4304255.
- Belkacemi, R., Zarrabian, S., Babalola, A., and Craven, R. (2015). Experimental transient stability analysis of microgrid systems: Lessons learned. In *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, 1–5. doi:10.1109/PESGM.2015.7286637.
- Charalambous, A., Hadjidemetriou, L., and Kyriakides, E. (2019). Voltage support scheme for low voltage distribution grids under voltage sags. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, 1–6. doi:10.1109/PTC.2019.8810604.

- Chowdhury, S., Chowdhury, S., and Crossley, P. (2009). *Microgrids and active distribution networks*. The institution of Engineering and Technology.
- Dan Wu, Fen Tang, Vasquez, J.C., and Guerrero, J.M. (2014). Control and analysis of droop and reverse droop controllers for distributed generations. In *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD14)*, 1–5. doi:10.1109/SSD.2014.6808842.
- Farrokhhabadi, M., Canizares, C.A., Simpson-Porco, J.W., Nasr, E., Fan, L., Mendoza-Araya, P., Tonkoski, R., Tamrakar, U., Hatziargyriou, N.D., Lagos, D., Wies, R.W., Paolone, M., Liserre, M., Meegahapola, L., Kabalan, M., Hajimiragha, A.H., Peralta, D., Elizondo, M., Schneider, K.P., Tuffner, F., and Reilly, J.T. (2019). Microgrid stability definitions, analysis, and examples. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1–1. doi:10.1109/TPWRS.2019.2925703.
- Matos, J.G.d. (2014). Controle de potência em microrredes ca isoladas com aerogeradores e bancos de baterias distribuídos. *Tese - Universidade Federal do Maranhão (UFMA)*.
- Olivares, D.E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A.H., Cañizares, C.A., Irvani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A.H., Gomis-Bellmunt, O., Saadifard, M., Palma-Behnke, R., Jiménez-Estévez, G.A., and Hatziargyriou, N.D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1905–1919. doi:10.1109/TSG.2013.2295514.
- Oliveira, G.H.C., R. Kuiava, G.V.L., Vilela Jr, J.A., R. Demonti, E.P.R., Dias, J.S., and Pedretti, A. (2019). Minirrede ufpr: Um benchmark para pesquisas em geração distribuída e eficiência energética. In *XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- Pandey, S.K., Mohanty, S.R., and Kishor, N. (2013). A literature survey on load–frequency control for conventional and distribution generation power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 318 – 334. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.029. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002815>.
- Piagi, P. and Lasseter, R.H. (2006). Autonomous control of microgrids. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 8 pp.–. doi:10.1109/PES.2006.1708993.
- Shayanfar, H.A. and Malek, S. (2015). Photovoltaic microgrids control by the cooperative control of multi-agent systems. In *2015 30th International Power System Conference (PSC)*, 287–293. doi:10.1109/IPSC.2015.7827761.
- Vasquez, J.C., Mastromauro, R.A., Guerrero, J.M., and Liserre, M. (2009). Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11), 4510–4519. doi:10.1109/TIE.2009.2015357.
- Yuen, C., Oudalov, A., and Timbus, A. (2011). The provision of frequency control reserves from multiple microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 173–183. doi:10.1109/TIE.2010.2041139.
- Zeng, Z., Yang, H., Zhao, R., and Cheng, C. (2013). Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 223–270.