

ESTRATÉGIA E SIMULAÇÃO DROOP CONTROL MODIFICADO PARA CONTROLE DE FREQUÊNCIA E TENSÃO EM MICRORREDES

Irlete P. M. Alves* Dalmo C. Silva Júnior**
Janaína G. Oliveira***

Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia Elétrica,
Universidade Federal de Juiz de Fora – MG

* (e-mail: irlete.mota@engenharia.ufjf.br)

** (e-mail: dalmo.cardoso@engenharia.ufjf.br)

*** (e-mail: janaina.oliveira@ufjf.edu.br)

Abstract: This paper discusses the need for a modification in droop control, a control widely used in the connection of inverters to the grid. Such a control is used to maintain power and frequency at standard values. This modification became necessary with the change in the topology of the Brazilian electrical system, where it received several connections at low voltage. These connections cannot use the same control as the system cannot be simplified by a mostly inductive system, simplification used in the implementation of droop control. The proposed control is simulated using Matlab / Simulink software, where the system used for validation consists of two inverters connected in parallel feeding the same load in isolation, which load varies over time.

Resumo: O presente trabalho apresenta a necessidade de uma modificação no *droop control*, controle amplamente utilizado na conexão de inversores a rede. Tal controle é utilizado para manter a potência e a frequência em valores padronizados. Essa modificação tornou-se necessária com a mudança na topologia do sistema elétrico brasileiro, onde o mesmo passou a receber diversas conexões na baixa tensão. Essas conexões não podem utilizar o mesmo controle, visto que o sistema não pode ser simplificado por um sistema majoritariamente indutivo, simplificação essa utilizada na implementação do *droop control*. O controle proposto é simulado com a utilização do software Matlab/Simulink, onde o sistema utilizado para validação é composto por dois inversores conectados em paralelo alimentando uma mesma carga de forma isolada, carga essa que sofre variações ao longo do tempo.

Keywords: Energy sharing control strategies; Droop Control; Complex impedance; Parallel inverters; Distributed generation.

Palavras-chaves: Palavras-chave: Estratégias de controle do compartilhamento de energia; *Droop control*; Impedância complexa; Inversores paralelo; Geração distribuída.

1. INTRODUÇÃO

Desde sua concepção o sistema elétrico brasileiro teve sua topologia configurada como um sistema radial, onde o fluxo de potência flui da geração até os consumidores. Com essa topologia todo o controle de tensão e frequência é realizado a montante do sistema, onde estão localizadas as grandes centrais geradoras. De Brabandere et al. (2004) Silva Júnior (2017). Para a energia ser transportada a mesma necessita passar por uma subestação elevadora, afim de ser conduzida em alta tensão através das linhas de transmissão até chegar aos grandes centros quando sua tensão é reduzida e distribuída entre os consumidores Lou et al. (2018) Nasirian et al. (2014).

Essa topologia clássica está se reestruturando involuntariamente, pois há um aumento nas conexões das fontes

alternativas de energia nas redes de baixa tensão, como por exemplo a fotovoltaica, que hoje assume o posto de geração de energia elétrica com mais pontos de conexão no sistema. Esse aumento significativo de conexões ocorreu pela evolução na fabricação dos materiais, tornando a instalação de sistemas fotovoltaicos financeiramente rentável e pela baixa agressão ao meio ambiente Silva Júnior (2017).

O sistema predominantemente radial que por décadas foi o centro de estudo e desenvolvimento altera gradativamente sua configuração, pois pequenas localidades como casas que antes eram vistas apenas como consumidores passivos passam agora a produzir sua própria energia elétrica em determinados momentos do dia. Conectando essa energia produzida a rede de distribuição Zhang et al. (2015).

A literatura Han et al. (2015) apresenta diferentes técnicas de realizar o controle para a conexão de inversores a rede.

Nesse cenário destaca-se o controle do tipo *droop*. Um controle que tem ganhado destaque por sua fácil implementação, onde a frequência e a tensão são controladas no ponto de acoplamento do inversor com a rede ou carga, estando em condições de ilhamento Araújo et al. (2016).

Atualmente esse suporte é utilizado em sua maioria para cargas de natureza indutiva, onde o acoplamento tensão e frequência ocorre diretamente com a variação das potências reativa e ativa, respectivamente Yao et al. (2010). Porém quando a conexão dos inversores com a carga é realizada na baixa tensão considerar a carga com natureza indutiva torna-se arriscado, visto que para esse ponto do sistema a carga não possui a natureza majoritariamente indutiva, mas sim, complexa.

Com a aplicação de técnicas de controle em inversores conectados a sistemas de distribuição, torna-se necessário investigar controle do tipo de *droop* aplicado a inversores conectados a cargas complexas (conforme acontece nas conexões realizadas na baixa tensão). O controle do tipo *droop* modificado foi proposto na literatura, sendo este o objetivo desde trabalho Zhang et al. (2015) Yao et al. (2010).

2. DROOP CONTROL

A conexão de inversores em paralelo é necessária por diversos fatores, dentro eles está a redundância do sistema, podendo aumentar sua confiabilidade, critério importante quando trata-se de clientes críticos. Outras vantagens associadas são a facilidade no gerenciamento térmico e a maior facilidade no design de inversores de alta potência Chen et al. (2018).

2.1 Topologia dos inversores

Visando o entendimento do princípio do funcionamento de inversores operando em paralelo é necessário realizar uma breve análise matemática. Revendo alguns princípios básicos do sistema de potência Lazzarin (2012). Para realizar tal análise será considerado o fluxo de potência entre os conversores e a carga. Nos inversores de tensão, a tensão na saída do inversor PWM (tensão de entrada do filtro LC) é composta por componentes na frequência fundamental da tensão de saída V_0 , nas frequências de comutação e múltiplas. Quando despreza-se as componentes de alta frequência (frequência de comutação e múltiplas), pode-se representar o inversor PWM por uma fonte de tensão Milczarek (2017). Por tal motivo a Figura 1 pode ser utilizada como a representação da conexões de dois inversores em paralelo.

2.2 Equacionamento

Na Figura 1 tem-se a representação de dois inversores conectados em paralelo, nessa representação a impedância de linha é omitida, sendo possível perceber que os inversores compartilham a mesma tensão. Baseado nessa primícia torna-se possível encontrar as equações que regem a potência ativa e reativa do sistema.

$$P = \left(\frac{EV_0}{Z_0} \cos\delta - \frac{V_0^2}{Z_0} \right) \cos\theta + \frac{EV_0}{Z_0} \sin\delta \sin\theta \quad (1)$$

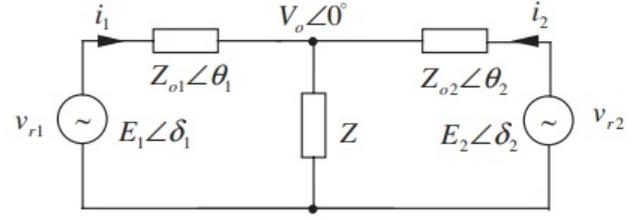


Figura 1. Conexão de dois inversores em paralelo.

$$Q = \left(\frac{EV_0}{Z_0} \sin\delta - \frac{V_0^2}{Z_0} \right) \cos\theta - \frac{EV_0}{Z_0} \sin\delta \cos\theta \quad (2)$$

onde δ é a diferença de fase entre a fonte e o terminal, geralmente chamado ângulo de potência. Tomando posse das equações acima pode-se notar que P e Q podem ser controlados variando δ e E. Este é o conceito primordial para a estratégia do *droop control*.

Uma simplificação plausível está relacionada ao ângulo de potência, onde realiza-se a estimativa que o mesmo possua um valor pequeno, sendo possível realizar a simplificação $\sin\delta = \delta$ e $\cos\delta = 1$. Sendo assim, pode-se determinar a potência ativa e a potência reativa conforme:

$$P = \left(\frac{EV_0}{Z_0} - \frac{V_0^2}{Z_0} \right) \cos\theta + \frac{EV_0}{Z_0} \delta \sin\theta \quad (3)$$

$$Q = \left(\frac{EV_0}{Z_0} - \frac{V_0^2}{Z_0} \right) \sin\theta + \frac{EV_0}{Z_0} \delta \cos\theta \quad (4)$$

Utilizando as características das cargas é possível simplificar o *droop control*.

2.3 Carga resistiva

Uma das características da carga resistiva é o ângulo θ igual a 0° , pois em cargas com essas características não ocorre defasagem entre a tensão e corrente.

$$P = \frac{EV_0}{Z_0} - \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (5)$$

$$Q = -\frac{EV_0}{Z_0} \delta \quad (6)$$

De posse dessas equações, é definida a estratégia para o *droop control*, onde é possível considerar que a potência ativa é variável de acordo com a tensão e a potência reativa varia conforme o ângulo de potência. Com isso, é possível definir o formato da estratégia utilizada para cargas resistivas.

$$E_i = E - n_i P_i \quad (7)$$

$$\omega_i = \omega + m_i Q_i \quad (8)$$

onde:

- E_i - Amplitude da tensão de saída
- n_i - Coeficiente de inclinação de frequência

- P_i - Potência ativa de saída
- ω_i - Parâmetro da tensão de saída
- m_i - Coeficiente de inclinação de amplitude
- Q_i - Potência reativa de saída

2.4 Carga indutiva

A característica predominante na carga indutiva é o ângulo $\theta = 90^\circ$, onde a tensão encontra-se adiantada em relação a corrente em 90° .

$$P = \frac{EV_0}{Z_0} \delta \quad (9)$$

$$Q = \frac{EV_0}{Z_0} - \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (10)$$

De posse das equações anteriores é possível considerar que a potência ativa é variável de acordo com o ângulo de potência e a potência reativa varia conforme a tensão E . Tornando viável a definição da estratégia utilizada para cargas indutiva.

$$E_i = E - n_i Q_i \quad (11)$$

$$\omega_i = \omega - m_i P_i \quad (12)$$

2.5 Carga capacitiva

A característica predominante na carga capacitiva é o ângulo $\theta = -90^\circ$, onde a tensão encontra-se atrasada em relação a corrente em 90° .

$$P = -\frac{EV_0}{Z_0} \delta \quad (13)$$

$$Q = -\frac{EV_0}{Z_0} + \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (14)$$

De posse dessas equações, torna-se plausível considerar que a potência ativa é variável de acordo com o ângulo de potência e a potência reativa varia conforme a tensão. Assim, admissível a seguinte definição para cargas capacitivas.

$$E_i = E + n_i Q_i \quad (15)$$

$$\omega_i = \omega + m_i P_i \quad (16)$$

Todas as simplificações utilizadas no *droop control* baseiam-se na característica predominante da carga, não suprimindo os momentos em que a carga possui característica complexa. Por tal motivo, é previsto um novo controle, o *droop control* modificado, controle que será utilizado quando o *droop control* não conseguir atuar corretamente.

3. DROOP CONTROL MODIFICADO

Em sistemas onde a simplificação baseada na topologia da carga torna-se inviável existe a necessidade de uma adequação do *droop control* de forma a viabilizar sua

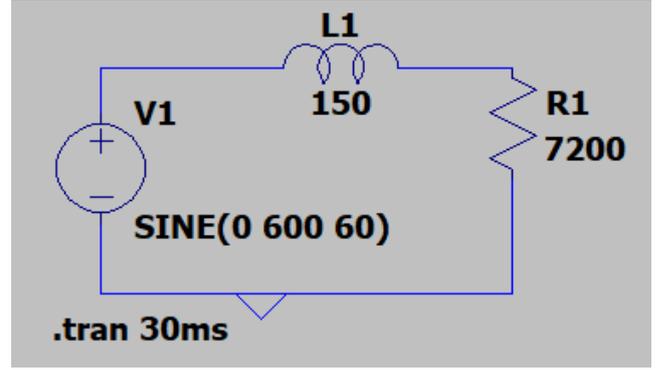


Figura 2. Representação do circuito simulado.

utilização em sistemas conectados a baixa tensão. Em tal panorama as cargas consideradas possuem característica complexa tornando-se pertinente utilizar de novas equações para realizar o controle tais sistemas, possuindo assim, a regência a partir das seguintes equações:

$$E_i = E + n_i(Q_i + P_i) \quad (17)$$

$$\omega_i = \omega - m_i(P_i - Q_i) \quad (18)$$

4. IMPLEMENTAÇÃO

Baseado no triângulo de potência que relaciona a potência ativa, reativa e aparente é possível estabelecer as relações da potência ativa com a potência aparente: $P = S \cos \theta$, e da potência reativa com a potência aparente: $Q = S \sin \theta$, que serão essenciais para os seguintes tópicos.

4.1 Carga resistiva

Baseado nessas equações e nos conceitos anteriormente definidos, tem-se que para cargas resistivas a potência ativa possui o mesmo valor da potência aparente. Uma vez que para a carga ser considerada puramente resistiva as formas de onda de tensão e corrente devem estar em fase. Porém há um limite para a carga ser considerada majoritariamente resistiva. Para definir tal limite o circuito da Figura 2 é simulado no software *LTspice*.

Tal circuito é submetido a variações no valor de sua reatância indutiva, de maneira a encontrar a relação entre a reatância indutiva e resistiva para dado circuito ser considerado majoritariamente resistivo. Após as simulações, encontrou-se:

$$\frac{X_L}{R} < 0,5 \quad (19)$$

Obteve-se o ângulo de defasagem de $25,16^\circ$. Este ângulo é adotado como máximo para a carga ser considerada majoritariamente resistiva. Conclui-se que $P = 2,12Q$ para cargas majoritariamente resistivas.

4.2 Carga majoritariamente indutiva

A literatura Milczarek (2017) Baker et al. (2017) mostra que para uma carga ser considerada indutiva, a relação descrita abaixo deve ser atingida Mousavi et al. (2018).

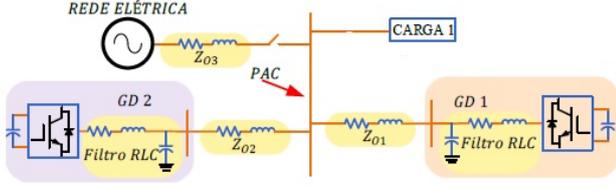


Figura 3. Sistema utilizado para realização da simulação.

$$\frac{X_L}{R} > 7 \quad (20)$$

Com base nessa definição, são realizadas as simulações de onde é possível extrair que as cargas, com defasagem angular entre a corrente e a tensão supera o valor de $81,41^\circ$, serão consideradas majoritariamente indutiva. Assim, $P = 0,15Q$.

4.3 Carga complexa

De posse das simulações e considerações anteriores torna-se factível a definição de cargas complexas, cargas onde a defasagem angular supera o valor mínimo de $25,16^\circ$ e possui um limite máximo de $81,41^\circ$. Tal intervalo de variação foi obtido através das simulações mencionadas anteriormente. Porém nestas simulações será aplicado somente um dentre tais ângulos. Sendo assim, nesse documento serão consideradas as cargas com defasagem angular de 74° . De onde é possível extrair que $P = 0,29Q$.

4.4 Circuito implementado

Com o intuito de comprovar a eficácia do método, um sistema onde dois inversores estão operando em paralelo com compartilhamento igualitário de cargas, é implementado, conforme ilustra a Figura 3.

Inicialmente, o sistema estará conectado a um barramento infinito, que em $t = 0,05$ s é ilhado, onde a carga passa a ser alimentada apenas pelos inversores. A carga sofre variações ao longo do tempo, visando esse comportamento foram realizados degraus de carga, buscando aproximar o sistema simulado da dinâmica de um sistema real.

5. RESULTADOS

5.1 Caso 1 - cargas com característica indutiva

Neste caso a carga será tratada como indutiva durante todo o processo. Em $t = 0$ s, a carga conectada a saída do inversor possui valor $1440 + j9600$ VA. Em $t = 0,15$ s, altera seu valor se tornando $1350 + j9000$ VA. Em $t = 0,35$ s, ocorre um novo decréscimo de potência para $1050 + j7000$ VA. A última comutação ocorre em $t = 0,45$ onde a carga assume o valor de $1200 + j8000$ VA, sendo essa mantida até o final da simulação.

Na Figura 4 pode-se perceber um sobre-sinal na tensão nos momentos em que ocorre o degrau da carga. Também é possível observar que a corrente varia de acordo com a carga, enquanto o valor de pico da senoide de tensão permanece praticamente constante durante todo o processo em 180 V, exceto pelo pequenos instantes de sobre-sinal. Mostrando a capacidade do sistema de capaz de

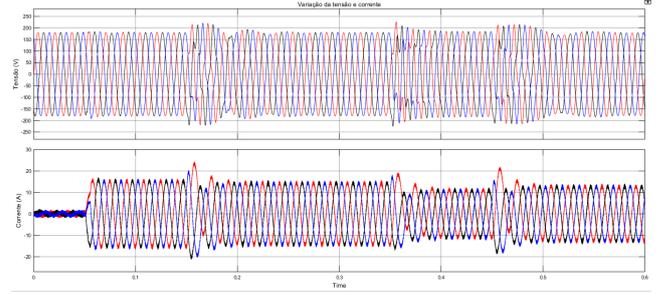


Figura 4. Forma de onda da tensão e corrente sobre a carga para o caso 1.

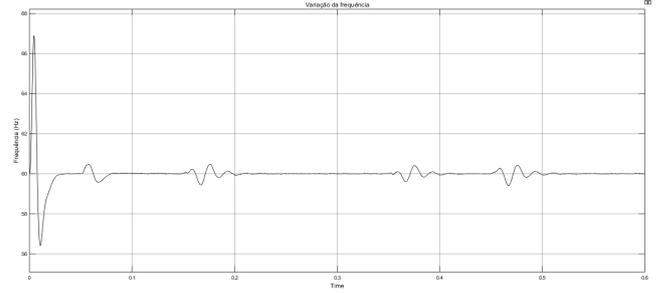


Figura 5. Variação de frequência sobre a carga para o caso 1.

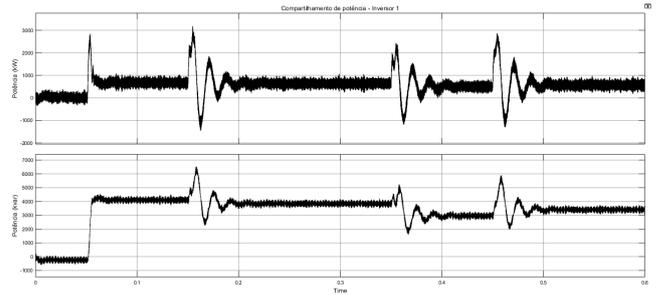


Figura 6. Variação da potência ativa e reativa do inversor 1 para o caso 1.

controlar a tensão mesmo sobre alterações nas potências da carga. Já na Figura 5 tem-se a variação da frequência, que sofre distorções conforme ocorre a comutação das cargas, tendo seu valor restaurando em 60 Hz. Mostrando assim a aplicabilidade do *droop control*, onde o mesmo é capaz de controlar o valor da tensão e frequência mesmo em situações onde ocorre a mudança na intensidade da carga.

Observando a Figura 6 e a Figura 7 é possível confirmar o correto compartilhamento de carga pelos inversores, onde cada um fornece a metade da potência necessária para suprir a carga.

5.2 Caso 2 - comutação de cargas com características distintas

Durante esta simulação, em $t = 0$ s, a carga conectada a saída do inversor é complexa com valor $1237 + j4266$ VA. Em $t = 0,15$ s, a carga muda sua topologia, assumindo característica resistiva com valor de $9044 + j4266$ VA. Em $t = 0,35$ s, ocorre uma nova comutação de carga, alterando sua topologia para um equivalente indutivo de $1357 + j4266$ VA. A última comutação ocorre em $t = 0,45$ onde a

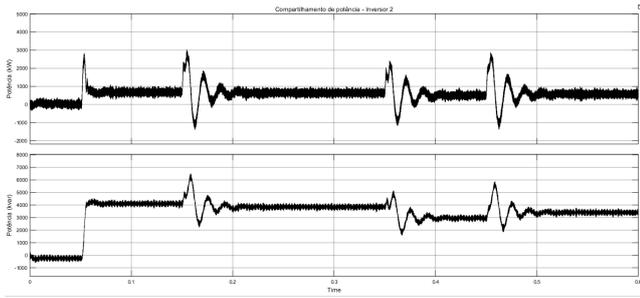


Figura 7. Variação da potência ativa e reativa do inversor 2 para o caso 1.

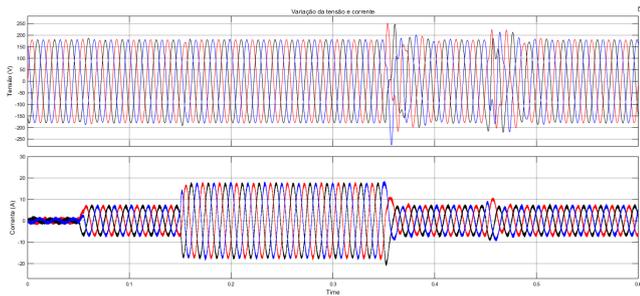


Figura 8. Forma de onda da tensão e corrente sobre a carga para o caso 2.

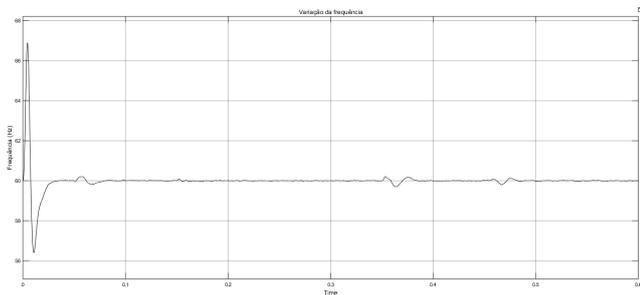


Figura 9. Variação de frequência sobre a carga para o caso 2.

carga inicial conectada é restaurada. Porém em $t = 0,55$ s há um corte total de carga, causando uma instabilidade no controle da tensão.

Na Figura 8 pode-se perceber um desnível da tensão nos momentos em que há a comutação na característica da carga, esse desnível não são prejudiciais pois ocorreram por um pequeno ciclo. Sendo possível observar que a corrente varia de acordo com a carga, porém a tensão permanece praticamente constante durante todo o processo em 180 V. Na Figura 9 tem-se a variação da frequência, que sofre pequenas alterações durante a comutação das cargas, mas rapidamente assume seu valor estipulado de 60 Hz. As oscilações de frequência visualizadas no início da simulação advêm da sincronização do circuito de PLL.

Observando a Figura 10 e Figura 11 é possível afirmar que ambos os inversores estão compartilhando a carga sem ocorrer o sobrecarregamento, visto que cada um aplica a mesma quantidade de potência ativa para o circuito.

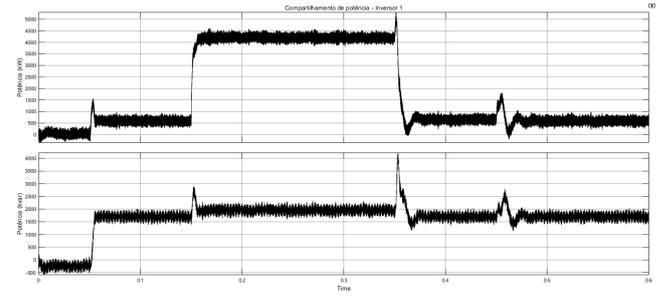


Figura 10. Variação da potência ativa e reativa do inversor 1 para o caso 2.

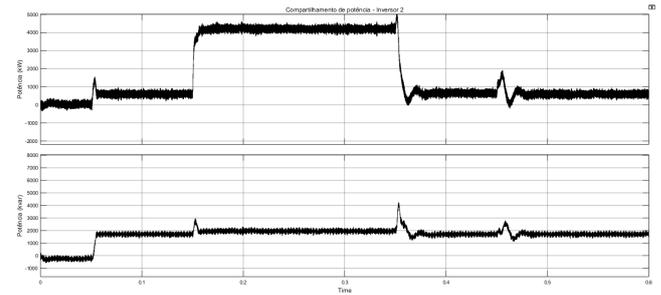


Figura 11. Variação da potência ativa e reativa do inversor 2 para o caso 2.

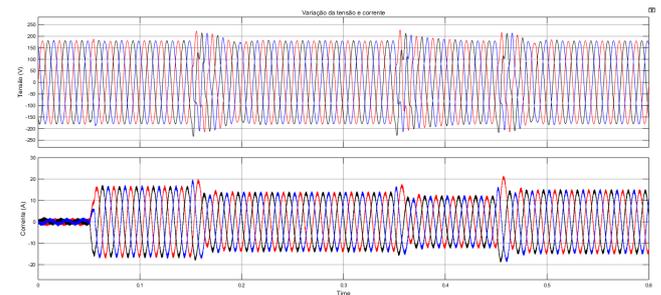


Figura 12. Forma de onda da tensão e corrente sobre a carga para o caso 3.

5.3 Caso 3 - cargas com característica complexa

Nesta simulação a carga terá uma característica complexa durante todo o processo. Em $t = 0$ s, a carga conectada a saída do inversor possui valor $2785 + j9604$ VA. Em $t = 0,15$ s, altera seu valor se tornando $2320 + j8000$ VA. Em $t = 0,35$ s, ocorre uma nova comutação de carga, reduzindo novamente sua potência para $2030 + j7000$ VA. A última comutação ocorre em $t = 0,45$ onde a carga assume o valor de $2500 + j8621$ VA, sendo essa mantida até o final da simulação.

Na Figura 12 pode-se perceber um desnível da tensão nos momentos em que há a comutação na característica da carga. Sendo possível observar que a corrente varia de acordo com a carga, porém a tensão permanece praticamente constante durante todo o processo em 180 V. Na Figura 13 tem-se a variação da frequência, que permanece em seu valor estipulado de 60 Hz, exceto por pequenos transitórios.

Ao observar a Figura 14 e a Figura 15 é possível afirmar que os inversores estão compartilhando a carga sem ocorrer

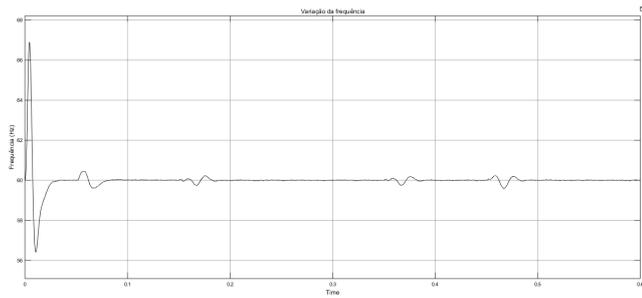


Figura 13. Variação de frequência sobre a carga para o caso 3.

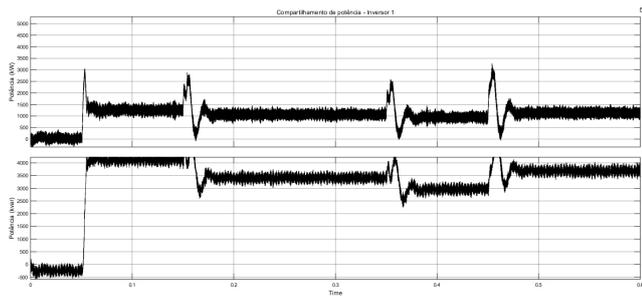


Figura 14. Potência ativa e reativa do inversor 1 para o caso 3.

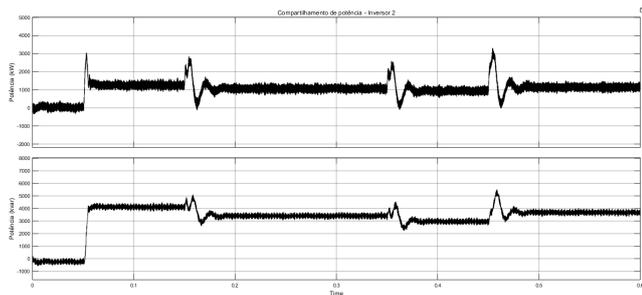


Figura 15. Potência ativa e reativa do inversor 2 para o caso 3.

o sobrecarregamento, algo de extrema importância, visto que é um dos objetivos do *droop control* modificado.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo mostrar a necessidade e aplicabilidade do *droop control* modificado, com simulações realizadas no Matlab/Simulink, sendo possível perceber a atuação de tal controle sobre cargas que sofrem variações ao longo do tempo, conforme acontece diariamente no sistema de distribuição de baixa tensão. Assim, com o crescente aumento no número de conexões ao sistema em baixa tensão, se desenvolveu a necessidade de uma topologia de controle robusta voltada para gerações distribuídas, onde a simplificação comumente utilizada de considerar o sistema elétrico majoritariamente indutivo não é possível. Por tal motivo é necessário considerar uma impedância de linha com características de impedância complexa, motivo pelo qual não é possível realizar a mesma simplificação utilizada pelo *droop control* convencional.

Uma característica causada por ele é a dependência tanto da potência ativa quanto da potência reativa para realizar o controle da frequência e tensão do sistema. Dessa forma,

com esse controle proposto, definido como o *droop control* modificado é possível realizar a conexão de micro-gerações na rede de baixa tensão, local onde o sistema possui uma característica complexa.

REFERÊNCIAS

- Araújo, L.S., Narváez, D.I., Siqueira, T.G., and Villalva, M.G. (2016). Modified droop control for low voltage single phase isolated microgrids. In *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, 1–6. IEEE.
- Baker, K., Bernstein, A., Dall’Anese, E., and Zhao, C. (2017). Network-cognizant voltage droop control for distribution grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), 2098–2108.
- Chen, L., Deng, Z., and Xu, X. (2018). Two-stage dynamic reactive power dispatch strategy in distribution network considering the reactive power regulation of distributed generations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(2), 1021–1032.
- De Brabandere, K., Woyte, A., Belmans, R., and Nijs, J. (2004). Prevention of inverter voltage tripping in high density pv grids. *19th EU-PVSEC, Paris*.
- Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M., and Guerrero, J.M. (2015). Review of power sharing control strategies for islanding operation of ac microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 200–215.
- Lazzarin, T.B. (2012). Paralelismo de inversores de tensão aplicado a nobreaks. In *Teoria, estratégias de controle e exemplo de projeto*. IFSC.
- Lou, G., Gu, W., Wang, J., Sheng, W., and Sun, L. (2018). Optimal design for distributed secondary voltage control in islanded microgrids: Communication topology and controller. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(2), 968–981.
- Milczarek, A. (2017). Harmonic power sharing between power electronics converters in islanded ac microgrid. In *2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, 1–7. IEEE.
- Mousavi, S.Y.M., Jalilian, A., Savaghebi, M., and Guerrero, J.M. (2018). Coordinated control of multifunctional inverters for voltage support and harmonic compensation in a grid-connected microgrid. *Electric Power Systems Research*, 155, 254–264.
- Nasirian, V., Davoudi, A., Lewis, F.L., and Guerrero, J.M. (2014). Distributed adaptive droop control for dc distribution systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(4), 944–956.
- Silva Júnior, D.C.d. (2017). Modelagem e controle de funções auxiliares em inversores inteligentes para suporte a microrredes ca - simulação em tempo real com controle hardware in the loop. UFJF.
- Yao, W., Chen, M., Matas, J., Guerrero, J.M., and Qian, Z.M. (2010). Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(2), 576–588.
- Zhang, H., Zhou, J., Sun, Q., Guerrero, J.M., and Ma, D. (2015). Data-driven control for interlinked ac/dc microgrids via model-free adaptive control and dual-droop control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(2), 557–571.