

CONTROLE DE TENSÃO E FREQUÊNCIA EM UMA CARGA ISOLADA UTILIZANDO FLYWHEEL

IVAN STOPPA*, JANAÍNA G. DE OLIVEIRA*, PEDRO G. BARBOSA*

**Núcleo de Automação e Eletrônica de Potência*

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, MG, 36036-900 Brasil

E-mails: stoppa.ivan@engenharia.ufff.br, janaina.oliveira@ufff.edu.br, pedro.gomes@ufff.edu.br

Abstract – Kinetic energy storage systems (or flywheels) have attracted more attention in recent years due to the current need to store high energy concentrations in a way which is less impactful as possible to the environment, meeting the demands of modern society. One of its applications is its use as auxiliary power supply in the event of contingency and islanding, taking advantage of its feature to combine good energy and power density. Therefore, this article will present a proposal to control voltage and frequency in the case of islanding operation, i.e. CA network disconnection to a given bus which has loads and equipment connected. The proposed system uses the kinetic energy storage device as backup system, coupled with a technique known as control by inclination, which is sensitive to existing parameters between the inverter output and the common coupling point. The main objective is to provide an alternative to greater reliability and speed for the supply of critical loads during a disturbance until the emergency source can initialize and supply charges permanently.

Key Words - Flywheel, UPS, Microgrid, islanding operation, control by inclination.

Resumo— Sistemas armazenadores de energia cinética (ou *flywheels*) tem atraído maior atenção nos últimos anos devido à necessidade atual de armazenar altas concentrações de energia de forma menos impactante possível ao meio ambiente, atendendo as exigências da sociedade moderna. Uma de suas aplicações é seu uso como fonte de alimentação auxiliar na ocorrência de contingência e ilhamento, valendo-se de sua característica de aliar boa densidade de energia e potência. Logo, esse artigo vai apresentar uma proposta de controle para tensão e frequência no caso de ilhamento, ou seja, desconexão da rede CA a um dado barramento que possui cargas e equipamento conectados. O sistema proposto utiliza como fonte de suporte um armazenador de energia cinética aliada à técnica conhecida como controle por inclinação, que é sensível aos parâmetros existentes entre a saída do conversor e o PAC (Ponto de Acoplamento Comum). O principal objetivo é fornecer uma alternativa de maior confiabilidade e velocidade para o suprimento de cargas críticas durante uma perturbação até que a fonte de emergência possa inicializar e suprir as cargas em definitivo.

Palavras-chave— Flywheel, UPS, Microgrid, Ilhamento, Controle por Inclinação.

1. Introdução

Com o aumento nas pesquisas e estudos por sistemas de armazenamento de energia estáveis, limpos e economicamente viáveis, parte significativa das publicações relacionadas concentram seus esforços em trabalhos sobre gerenciamento de energia ou mesmos estudos de minimização de custos totais de tais sistemas. Nesse contexto, trabalhos que se direcionam a estudar estratégias de armazenamento de energia de *back-up* ainda são bem limitados. Essas estruturas são fundamentais para suportar os distúrbios e contingências sem que o suprimento de energia seja interrompido.

Também é conhecido que a conexão de sistemas de geração baseados em energia renovável à rede consumidora será crucial para o desenvolvimento dos sistemas de energia modernos (Olabi, 2013). No entanto, os desafios técnicos, principalmente relacionados com estabilidade de tensão e fluxo de potência levantam questionamentos sobre a penetração dessas novas estruturas nos atuais sistemas de energia elétrica.

É visto que a inserção de unidades de geração complementar em redes de distribuição e transmissão irá requerer estratégias de controle cada vez mais refinadas e robustas. Um alto nível de controlabilidade dessas unidades de geração torna-se interessante para manter as centrais geradoras convencionais

funcionando em seu ponto de operação mínima, como reservas auxiliares, aumentando assim, o grau de eficiência e flexibilidade do sistema elétrico (Rocabert et. al, 2012).

Além disso, a combinação da geração a base de fontes renováveis com sistemas de armazenamento de energia permite fornecer um amplo escopo de serviços auxiliares, melhorar a qualidade de fornecimento de energia e formar as conhecidas ilhas ativas, ou microrredes (Vaquez et. al, 2009). Logo, as microrredes devem exercer no futuro um papel importante nas redes elétricas de distribuição, principalmente em baixa tensão, onde a maioria das unidades geradoras distribuídas são conectadas.

Com isso, a ideia deste trabalho é apresentar uma proposta de um sistema *Uninterruptible Power Supply (UPS)*, utilizando um flywheel conectado à rede de fornecimento CA, a partir do ponto de acoplamento comum (PAC). A conexão do flywheel à rede elétrica se dá através de conversores estáticos trifásicos associados na estrutura *back-to-back*, como ilustrado na Figura 1.

O estudo vai se pautar na simulação de um armazenador de energia cinética, que utiliza parâmetros de um protótipo real, durante uma situação de contingência e ilhamento, solicitando o flywheel a atuar, fazendo que tanto a tensão e frequência no PAC retornem aos seus valores nominais em poucos ciclos, garantindo que os equipamentos e cargas nele conectados retomem a operação de forma segura, até

que a geração de emergência de alta densidade de energia possa ser sincronizada com a rede. Como exemplo de geração de emergência de alta densidade de energia, tem-se motores a diesel que costumam levar de 1 a 2 segundos para detectar a falta de tensão e cerca de 10 segundos para finalmente começarem a injetar energia no sistema (NT-CELG, 2016).

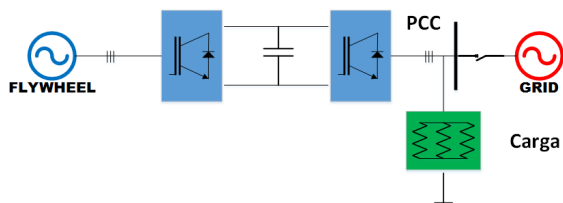


Figura 1. Armazenador de energia cinética conectado ao PAC através de um conversor de dois estágios.

O presente trabalho será organizado da seguinte forma: O capítulo II apresenta a descrição dos equipamentos utilizados, juntamente com as técnicas de controle aplicadas ao retificador ativo e ao inversor trifásico conectado ao PAC. No capítulo III é apresentada a simulação feita no programa SIMULINK e algumas análises dos resultados. Por fim, no capítulo IV são feitas as conclusões do trabalho.

2. Equipamentos e Sistemas de Controle

Nesse capítulo serão apresentados o armazenador de energia cinética e as estratégias de controle aplicadas aos conversores utilizados.

A. Flywheel

Uma massa que gira em torno de um eixo é definida como sendo um flywheel. A energia pode ser armazenada mecanicamente em uma massa em rotação em forma de energia cinética. Esse equipamento combina bons níveis de densidade de potência e de energia, tornando-o uma solução para diversas aplicações, onde se requer um dispositivo de armazenamento de energia. Sua aplicação em sistemas de energia elétrica se deve, principalmente, por sua característica de atuar em picos curtos de potência. Em sistemas de energia elétrica, o armazenador de energia cinética trabalha em dois estados definidos. Para sua aceleração o volante opera como motor, trazendo a massa girante para sua velocidade nominal. Quando a massa é desacelerada, o flywheel está no modo de gerador, ou seja, entrega sua energia armazenada em seu eixo girante para atender a demanda instantânea exigida pela carga.

A máquina elétrica utilizada nesse trabalho é uma máquina síncrona de ímãs permanentes. Ela é modelada em coordenadas de Park (Instruments, 1997), ou seja, possui suas equações matemáticas descritas no sistema de coordenadas síncrono como se segue:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_d + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_r L_{sq} i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_q + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r L_{sd} i_{sd} + \omega_r \psi_m \end{cases} \quad (1)$$

onde i_d e i_q são as correntes do estator de eixo direto e quadratura, respectivamente, L_d e L_q são as indutâncias do estator de eixo direto e quadratura, respectivamente, ω_r é velocidade angular do rotor e ψ_m é o fluxo do rotor.

O volante de inércia a nível de projeto, tanto mecânico e elétrico, é feito com materiais e técnicas a fim de mitigar o máximo as perdas nos processos de armazenamento e de trocas energéticas. Mecanicamente, o protótipo é projetado com o enfoque na redução nas perdas por atrito utilizando mancais magnéticos. Eletricamente são utilizados materiais que podem reduzir consideravelmente as perdas tanto por efeito magnético, devido a saturação do núcleo, e elétricos, devido as perdas joule nos enrolamentos. Na Figura 2 é mostrado a fotografia do protótipo utilizado neste trabalho, projetado e construído na Universidade de Uppsala, na Suécia.

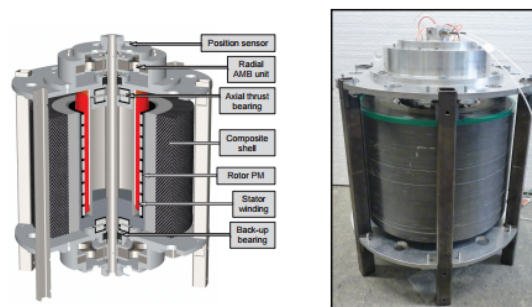


Figura 2. Foto do protótipo construído na Universidade de Uppsala (Abrahamsson, 2014).

Para a simulação desenvolvida no SIMULINK, foram usados os parâmetros do flywheel encontrado em (de Oliveira, 2011) e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor
Resistência do estator (Ω)	0,4
Indutância do estator (Ω)	0,00019
Inercia (Kg.m^2)	0,636
Amortecimento viscoso (N.m.s)	0,001
Par de polos	3
Atrito (N.m)	0
Velocidade nominal (rad/s)	3141,6

B. Controle para dos Conversores

Assim como mencionado anteriormente, a conexão do flywheel à rede elétrica se dá através um conversor *back-to-back*, o qual é composto por um retificador trifásico de comutação forçada (baseado em IGBTs) e um inversor trifásico de 2 níveis.

C. Controle do Retificador

A estratégia de controle do conversor CA/CC é vista em (de Oliveira, 2011) e apresentada na Figu-

ra 3. Esse controle é desenvolvido com o objetivo de manter a tensão no barramento CC constante durante o decorrer da simulação. São utilizados sensores de tensão no barramento CC, sensores de corrente nas três fases do sistema CA e um sensor de efeito hall que estima a velocidade do flywheel. Com as informações das correntes nas três fases e do ângulo estimado do rotor (o ângulo é obtido através da velocidade angular do rotor do flywheel) é possível através da transformação de Park obter as correntes de eixo direto e de quadratura. O sinal da corrente de quadratura (i_q) obtido através da transformação de Park e comparado com um sinal de referência (i_{qref}). Esse sinal de referência é originado da saída de um controlador PID, que recebe o erro do sinal medido de tensão do barramento CC com o valor de referência de tensão. O mesmo é feito para a corrente de eixo direto (i_d), no entanto sua referência é colocada em zero para garantir a relação proporcional entre conjugado e corrente.

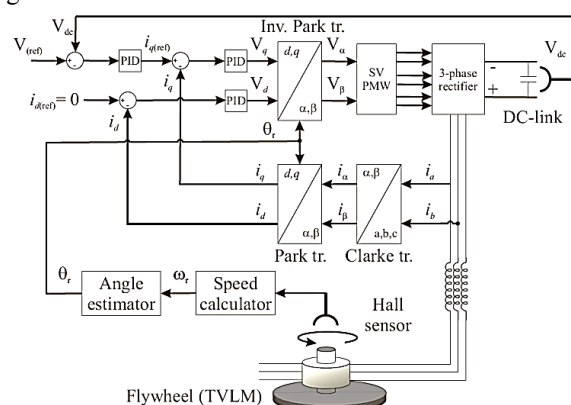


Figura 3. Estratégia de controle do Retificador (conversor CA/CC) (de Oliveira, 2011).

Esses dois sinais de erro produzidos pelas correntes de eixo direto e quadratura são sinais de entrada para outros controladores do tipo PID. Eles produzem os sinais de modulação que são utilizados para o chaveamento do dispositivo semicondutor.

D. Controle do Inversor

Desprezando os harmônicos, a potência complexa injetada pelo conversor VSI (Voltage Source Inverter) da Figura 4 no PAC é dada por:

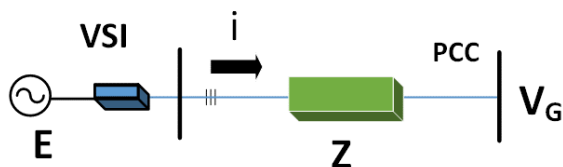


Figura 4. Conversor VSI acoplado ao ponto de acoplamento comum através de uma impedância.

$$P + jQ = S = Ei^* = E\left(\frac{E - V_G}{Z}\right)^* \quad (3)$$

sendo,

$$Z = R + jX \quad (4)$$

Destacando da equação (3), as potências ativas e reativas, é possível obter relações que dependem das magnitudes e desfasamento angular das tensões (δ) (tanto no ponto de acoplamento comum e na saída do conversor VSC), além da característica da rede que interliga o inversor com o PAC.

$$P = \frac{E}{R^2 + X^2} [R(E - V_G \cos \delta) + X V_G \sin \delta] \quad (5)$$

$$e,$$

$$Q = \frac{E}{R^2 + X^2} [-RV_G \sin \delta + X(E - V_G \cos \delta)] \quad (6)$$

Alguns trabalhos têm apresentado uma forma alternativa de expressar as relações de potência ativa e reativa circulante entre o conversor VSI e o PAC. Quando a rede que interliga os dois pontos não possui características que possam defini-la explicitamente, é necessário apresentá-la de forma mais generalizada. Essa generalização, passa por uma matriz chamada de matriz de transformação de rotação linear ortogonal (T). Essa matriz carrega as informações relativas à característica da rede e pondera as expressões (5) e (6), obtendo as novas potências ativa (P') e reativa (Q') real (Hossain and Mahmud, 2014).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} &= T \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & \frac{-R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

$$P' = \frac{X}{Z}P - \frac{R}{Z}Q \quad (8)$$

$$Q' = \frac{R}{Z}P + \frac{X}{Z}Q \quad (9)$$

A utilização do método convencional de controle de inclinação (sensibilidades P - F e Q - V) demonstram resultados satisfatórios em sistemas de transmissão em alta tensão (Hossain and Mahmud, 2014). Nesse cenário, os equacionamentos negligenciam o efeito da resistência, trabalhando apenas com a reatância.

Por outro lado, em sistemas de baixa tensão as malhas $P-F$ e $Q-V$ não são mais efetivas. Isso ocorre devido a pequena inércia das fontes de gerações locais (Fontes renováveis). Outro ponto importante é que em redes de baixa tensão o efeito da resistência não pode ser desprezado e ainda é preponderante ao da reatância, fazendo com que ela seja abandonada nos equacionamentos. É visto então no equacionamento abaixo as malhas $P-V$ e $Q-F$, ocorrendo uma inversão nos acoplamentos convencionais.

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & \frac{-R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} & \frac{-R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \\ R & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$$

Nesse caso, a reatância é considerada zero. $X=0$

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P' = -Q = \frac{E}{R} [(E - V_G \cos \delta)] \quad (11)$$

$$Q' = P = \frac{E}{R} [-V_G \sin \delta] \quad (12)$$

Considerando que $\sin \delta = \delta$ e $\cos \delta = 1$ (devido à diferença da defasagem angular das tensões serem pequenas), é possível obter as seguintes relações, que são inversas as obtidas no caso onde a rede é puramente indutiva. Assim, a potência ativa está intimamente relacionada com as tensões da saída do conversor VSI e no PAC e a potência reativa está ligada ao ângulo de defasagem dessas tensões.

$$E - V_G = \frac{RP}{E} \quad (13)$$

$$\delta = -\frac{RQ}{EV_G} \quad (14)$$

É possível associar o controle da frequência elétrica ao ajuste da potência reativa e o controle da tensão ao controle da potência ativa. Ocorre então, um acoplamento invertido, que na literatura técnica é descrito como controle reverso de inclinação (Hossain and Mahmud, 2014) e dado nas equações (15) e (16).

$$f - f_0 = K_q(Q - Q_0) \quad (15)$$

$$V - V_0 = -K_p(P - P_0) \quad (16)$$

Na Figura 5 é visto a estratégia de controle adotada para o chaveamento do dispositivo semicondutor que conecta o barramento CC com o PAC.

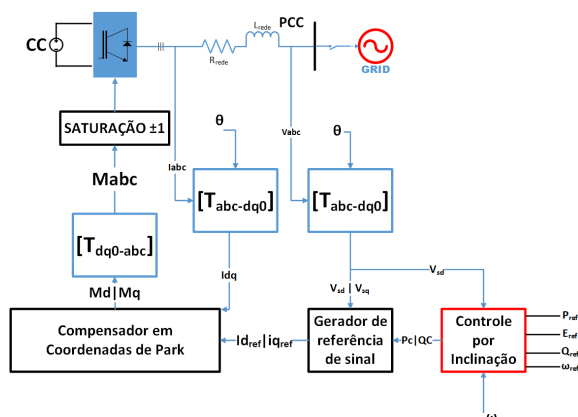


Figura 5. Estratégia de controle do inversor.

Nessa técnica existem três malhas de controle: (1) uma malha interna de controle de corrente, (2) uma malha de potência que proporciona a referência de eixo direto e quadratura para a malha de corrente e

(3) externamente a malha de controle por inclinação, que utiliza as equações 15 e 16. Toda a proposta de conexão do inversor trifásico à rede CA utilizando uma malha interna de corrente e controlando a potência injetada na rede, pode ser vista em (Yazdani, 2010). Nesta referência é proposto um projeto para sintonias dos controladores e além de expor de forma clara toda a modelagem matemática que é base para os ajustes. Já na referência (Rocabert et. al, 2012) é apresentada uma alternativa para a sintonia do controlador proporcional presente na malha de inclinação.

3. Resultados de Simulação

A simulação proposta foi implementada utilizando o software MATLAB-SIMULINK. O modelo implementado apresenta uma alternativa de UPS (*Uninterruptible Power Supply*) para um barramento onde se tem conectado uma rede CA em baixa tensão (127 volts fase terra, 60 Hz) com uma carga Resistiva associada. É simulada a retirada do sistema CA do barramento principal. A energia armazenada do flywheel irá manter os níveis de tensão e frequência nos patamares nominais. Isso é de suma importância para cargas sensíveis e para o funcionamento adequado dos equipamentos conectados ao barramento.

Essa simulação será feita em um período de 0.3 segundos. A retirada da rede CA que simula a contingência e ilhamento ocorre em 0.2 segundos. Nesse trabalho, a carga será modelada como um banco resistivo de 4Ω conectado em estrela, equilibrado. E a resistência e indutância entre a saída do inversor e o PAC tem valores de 0.642Ω e 0.0083Ω , respectivamente. Logo, o fator X/R que relaciona a resistência e a reatância entre os dois pontos é de aproximadamente 4.9.

A. Comportamento do Flywheel

Inicialmente, é apresentado nas Figuras 6 e 7 o comportamento das potências ativa e reativa do flywheel durante a simulação.

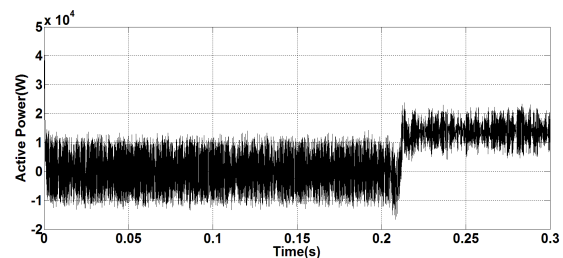


Figura 6. Potência ativa do Flywheel.

A máquina inicia a simulação com sua velocidade nominal e à vazio. Após a saída do barramento infinito em 0.2 segundos, o volante é obrigado a atuar, entregando sua energia armazenada para suprir a carga e as perdas, passando pelos conversores estáticos. Como o flywheel atua apenas após 0.2 segundos de simulação, as potências ativa e reativa ficam

com seu valor médio em aproximadamente zero antes da retirada da rede.

Após a saída do barramento infinito é interessante notar que a potência ativa que flywheel injeta é algo próximo à 15 kW médio. Esse valor é condizente com a exigência de aproximadamente 12 kW de potência ativa da carga somada às perdas de conversão.

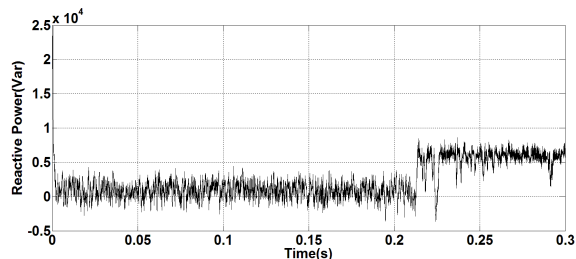


Figura 7. Potência reativa do Flywheel.

B. Comportamento do Barramento CC

Toda energia injetada pelo flywheel durante a simulação, passa pelos conversores estáticos. A saída trifásica do armazenador de energia cinética é conectada a entrada do retificador trifásico, que retifica o sinal senoidal em sua saída. O capacitor de saída do retificador é utilizado como um filtro para o sinal de tensão e possui valor de 350μF e tensão de 500 volts. Na Figura 8 é observada a forma de onda da tensão no barramento CC.

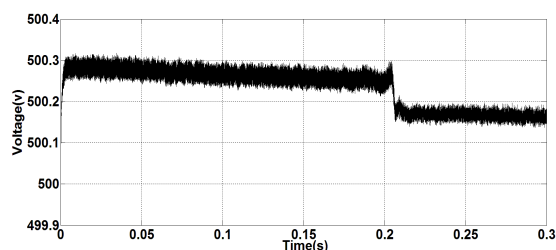


Figura 8. Tensão no Barramento CC.

É pertinente observar nas curvas do barramento CC que a tensão se altera muito pouco, mesmo com a retirada do barramento infinito durante o terço final da simulação.

C. Comportamento no PAC

Na saída do inversor, ou seja, no PAC, ao qual a rede CA e a carga estão conectadas, observa-se a forma de onda e o comportamento da tensão de fase durante a simulação.

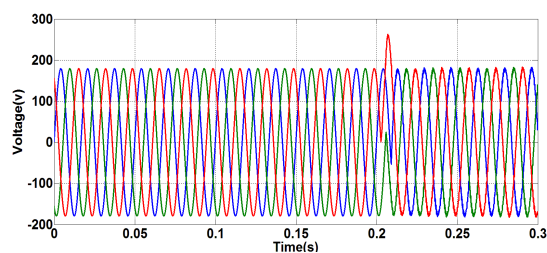


Figura 9. Tensão nas três fases no PAC.

A tensão tem valor de pico de aproximadamente 179 volts e no período de 0,2 segundos, observa-se um fenômeno transitório. Isso é devido a desconexão do barramento infinito do PAC. No entanto, a atuação dos controles do sistema inversor é fundamental para que a forma de onda possa ter seus patamares nominais novamente restabelecidos. Isso afeta minimamente as cargas e equipamentos conectadas nesse barramento.

As Figuras 10, 11 e 12 mostram respectivamente a potência ativa de saída do inversor, a potência reativa de saída do inversor e a frequência elétrica.

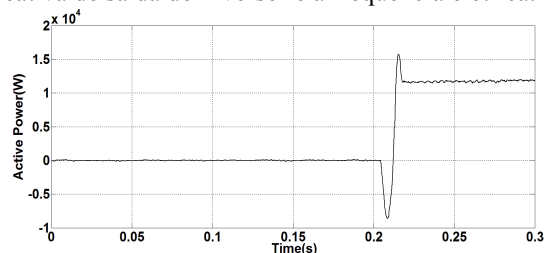


Figura 10. Potência Ativa de saída do Inversor.

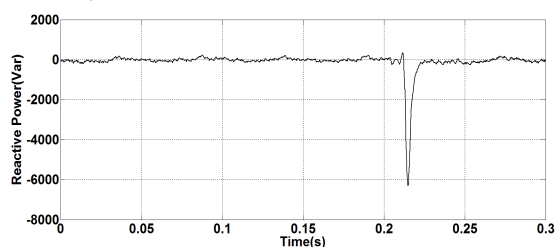


Figura 11. Potência Reativa de saída do Inversor.

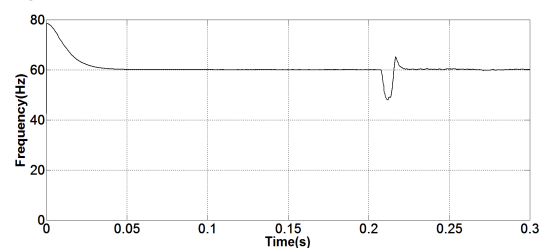


Figura 12. Frequência elétrica no PAC.

Por fim, nas Figuras 13, 14 e 15 são apresentadas o comportamento das correntes: injetada pela rede CA, injetada pelo sistema inversor e consumida pela carga durante a simulação.

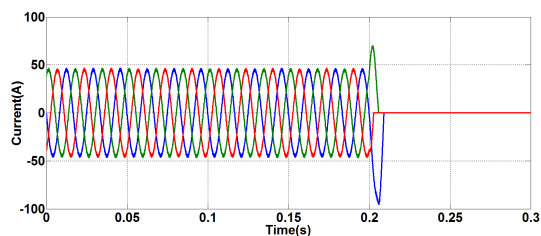


Figura 13. Corrente injetada pela Rede CA.

O comportamento da corrente no barramento infinito mostra que ele entrega toda a energia exigida pela carga durante 0,2 segundos iniciais. Quando ocorre o ilhamento, a energia passa a ser suprida pelo sistema inversor, que durante o período anterior a desconexão tem sua corrente injetada igual zero.

Ao observar a corrente consumida pela carga durante a simulação, é possível notar que ocorre uma perturbação durante a retirada da rede CA. Entretanto isso afeta muito pouco o seu comportamento devido, principalmente, aos controles ajustados para suprir esse fenômeno transitório.

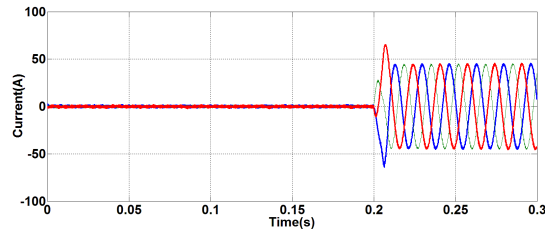


Figura 14. Corrente injetada pelo Inversor.

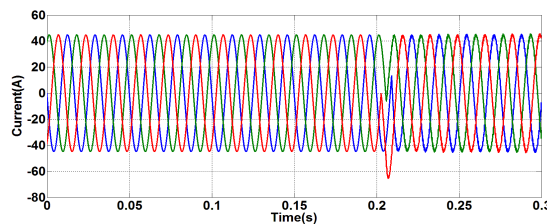


Figura 15. Corrente Consumida pela Carga.

4. Conclusões

Esse trabalho apresentou uma alternativa de suporte de tensão e frequência para um barramento na ocorrência de falha e ilhamento. A ideia é auxiliar possíveis cargas sensíveis e equipamentos nele conectado, a manter seu comportamento nominal durante uma desconexão de sua fonte principal de energia.

Pode ser destacado que os ajustes dos controladores para o sistema inversor que conecta o barramento CC com a rede CA deve ser investigado com maior atenção e formalidade para estarem em perfeita consonância com o restante do sistema, algo que será foco de um próximo trabalho.

Outro ponto que deve ser apontado, para estudos futuros é a implementação de um modelo similar ao apresentado no trabalho em um simulador de tempo real (RTDS). Isso permitirá validar os controles implementados em uma plataforma mais próxima da realidade. Por fim, como proposta final de estudo, seria a presença de uma estratégia de controle que seja capaz de detectar a configuração e os parâmetros de rede. Isso traria maior robustez para casos onde a rede sofra mudanças constantes em sua topologia.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFJF, a FAPEMIG, a FINEP e Swedish Energy Agency pelos recursos financeiros e bolsas para realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Abrahamsson, J. (2014). Kinetic Energy Storage and Magnetic Bearings: for Vehicular Applications. Dissertation, Uppsala University, Sweden.
- de Oliveira, J.G. (2011). Power control systems in a flywheel based all-electric driveline. Dissertation, Uppsala University, Sweden.
- Engler, A. (2005). Applicability of droops in low voltage grids. *International Journal of Distributed Energy Resources*, 1(1), 1-6.
- Hossain, J., & Mahmud, A. (Eds.). (2014). *Renewable energy integration: challenges and solutions*. Springer Science & Business Media.
- Instruments, T. C. (1997). Park Transforms on the TMS320C2xx. *Application Report BPRA048*.
- NT CELG D. (2016). Grupo Gerador a Diesel Especificação, NTC 47, Revisão 2-2016.
- Olabi, A. G. (2013). State of the art on renewable and sustainable energy. *Energy*, 61, 2-5.
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., & Rodríguez, P. (2012). Control of power converters in AC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734-4749.
- Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., Luna, A., Rodríguez, P., & Teodorescu, R. (2009). Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), 4088-4096.
- Yazdani, A., & Iravani, R. (2010). *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons.