

ESTRUTURA DE CONTROLE PARA O PARALELISMO DE UPS COM EQUALIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS DOS CAPACITORES DE BARRAMENTO

WILLIAM A. VENTURINI, JOÃO M. LENZ, HENRIQUE JANK, FÁBIO E. BISOGNO, JOSÉ R. PINHEIRO

Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Av. Roraima, 1000 – Prédio 07 – Anexo B – CEP: 97105-900 – Santa Maria – RS
{williamventurini, joaomlenz, hiquejank, fbisogno, jrenespinheiro}@gmail.com

Abstract— This paper presents a control structure that allows a thermal equalization between the internal temperatures of DC bus capacitors of UPS connected in parallel. The electrolytic capacitors typically used in DC-links are one of the main causes of failure in electronic equipment and the lifetime of this component is extremely sensitive to high internal operating temperatures. In this sense, this work proposes the addition of a control loop with the objective to increase the lifetime of uninterruptible power systems. Through the estimation of the UPS's internal temperatures, the proposed control manages the active power that each UPS unit must provide to equalize the DC-link capacitors internal temperatures. Simulation results show the functionality and feasibility of the proposed control system.

Keywords— Parallelism, secondary control, thermal equalization, uninterruptible power supply.

Resumo— Este trabalho propõe uma estrutura de controle que permite realizar a equalização das temperaturas internas dos capacitores de barramento de UPSs conectadas em paralelo. Os capacitores eletrolíticos utilizados em barramentos CC são um dos principais responsáveis por falhas em equipamentos eletrônicos, sendo que a vida útil deste componente é extremamente sensível a elevadas temperaturas de operação. Neste sentido, com o intuito de aumentar a vida útil de sistemas ininterruptos de energia, este trabalho propõe a adição de uma malha de controle que, através da estimativa das temperaturas internas das UPSs, gerencia a potência ativa que cada unidade UPS deve fornecer, a fim de equalizar as temperaturas internas dos capacitores de barramento. Resultados de simulação demonstram a funcionalidade e a viabilidade do sistema de controle proposto.

Palavras-chave— Controle secundário, equalização de temperatura, fonte ininterrupta de energia, paralelismo.

1 Introdução

As fontes ininterruptas de energia (*Uninterruptible Power Supplies – UPS*) de dupla conversão são sistemas conectados entre a carga e a rede pública, de forma a garantir o fornecimento de energia elétrica com alta qualidade e de forma ininterrupta, disponibilizando uma tensão de saída regulada, mesmo para grandes variações da tensão de entrada ou frente à distúrbios e faltas provenientes da rede elétrica (Aamir, 2017). Exigências por sistemas cada vez mais confiáveis, redundantes e com flexibilidade de expansão da capacidade de potência instalada, motivam a conexão de UPSs em paralelo, geralmente com características e potências similares (Tolani, 2017).

As técnicas de controle para o paralelismo de UPS podem ser classificadas de acordo com a existência ou não de comunicação entre as unidades (Guerrero, 2008). Os métodos sem comunicação, considerados mais robustos, são baseados no controle por inclinação (Guerrero, 2011). Contudo, por ser fundamentado em desvios de amplitude e frequência, a regulação do sistema é prejudicada. Para compensar estes desvios, o controle secundário pode ser empregado (Shafiee, 2014).

Entretanto, inversores operando em paralelo, mesmo com um compartilhamento adequado de potências, estão sujeitos a temperaturas de operação distintas, seja pela localização física do sistema, discrepâncias entre as tecnologias e valores dos componentes, ou mesmo pelo desgaste provocado por diferentes horas de operação. De acordo com

(Wang, 2018), a vida útil dos capacitores eletrolíticos de alumínio (Al-Caps), geralmente utilizados em barramentos CC de conversores, é reduzida exponencialmente com a elevação da temperatura de operação. Estes componentes são responsáveis por cerca de 50% das falhas em componentes eletrônicos (Abdennadher, 2010), sendo assim apontados como um dos obstáculos na redução de taxas de falha e elevação da confiabilidade de sistemas (Song, 2013; Chung, 2015).

Em UPSs, o barramento CC é projetado de acordo com o *hold-up time* (período de tempo que o conversor é capaz de prover energia para a carga após uma falta do sistema de alimentação principal) (Todd, 1996; Wu, 2015). Usualmente é adotado um *hold-up time* maior que 17 ms, o que representa um grande volume de Al-Caps (Lai, 2014). Neste contexto, torna-se evidente a relação da temperatura interna dos capacitores de barramento de UPSs com a vida útil e confiabilidade de um sistema conectado em paralelo, no qual a falha de um conversor pode comprometer o funcionamento da carga crítica.

O presente trabalho propõe a adição de uma malha de controle para a equalização das temperaturas internas dos capacitores de barramento de UPSs de dupla conversão conectadas em paralelo. Esta malha, a partir da estimativa da temperatura de operação dos capacitores, distribui as potências fornecidas pelas UPSs. Com isso, consegue-se um melhor gerenciamento térmico entre as unidades, aumentando a confiabilidade do sistema e reduzindo os custos de manutenção e substituição. Considerou-se o caso de duas UPSs de

dupla conversão com conexão paralela, localizadas em ambientes distintos e alimentando cargas distribuídas, como mostra a Figura 1. A UPS #1 encontra-se em um ambiente externo e a UPS #2 em um ambiente com temperatura controlada. Apesar de somente duas UPSs terem sido analisadas, a malha de controle proposta pode ser facilmente expandida para o caso do paralelismo com um número maior de unidades. Resultados de simulação comprovam a funcionalidade da estratégia de controle proposta.

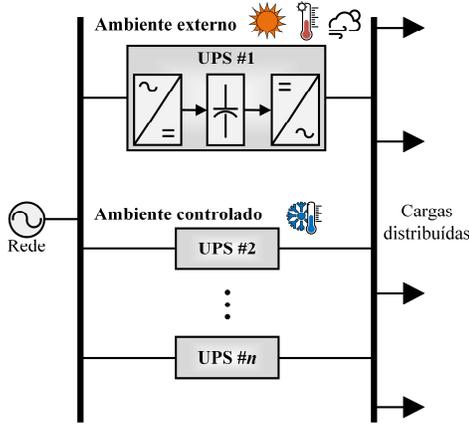


Figura 1. Associação paralela de UPSs de dupla conversão localizadas em ambientes distintos.

2 Análise Eletrotérmica de Capacitores

Dentre os tipos de capacitores utilizados para a aplicações em barramentos CC, o capacitor eletrolítico de alumínio é uma das opções mais usuais por possuir o menor custo por Joule e a maior densidade de energia (Wang, 2014). Contudo, por possuírem valores relativamente altos de resistência elétrica equivalente (ESR – *Equivalent Series Resistance*) e baixa tolerância de corrente, comprometem a confiabilidade na eletrônica de potência. O gerenciamento térmico dos capacitores eletrolíticos proposto neste trabalho é feito com base na modelagem eletrotérmica de UPSs em paralelo.

2.1 Modelo elétrico dos capacitores do barramento CC

O modelo elétrico simplificado de um Al-Cap pode ser descrito por sua capacitância (C), ESR e indutância série equivalente (ESL – *Equivalent Series Inductance*), como mostra a Figura 2 (Yang, 2015).

Para operações abaixo da sua frequência de ressonância, a ESL pode ser desprezada e as perdas Joule do capacitor podem ser calculadas em função apenas da ESR. Assumindo que a tensão do barramento CC da UPS é constante em regime permanente, desprezando perdas por eficiência e considerando que todos os capacitores de barramento são iguais, pode-se assumir que a corrente total do

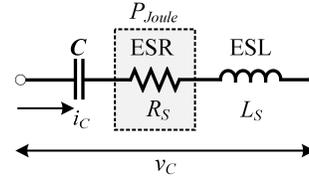


Figura 2. Modelo elétrico dos capacitores do barramento CC.

barramento CC (i_{CC}) se distribui igualmente entre um número de capacitores n_{Caps} , sendo i_C a corrente de cada capacitor. As perdas Joule de cada capacitor podem ser obtidas por (Yang, 2015; Zhang, 2016):

$$P_{Joule} = \left(\frac{i_{CC}}{n_{Caps}} \right)^2 \times ESR = i_C^2 \times ESR \quad (1)$$

2.2 Modelo térmico dos capacitores do barramento CC

Uma vez que UPSs usualmente operam com pouca variação de carga no tempo, apenas a condição de regime permanente foi considerada para a análise da temperatura. O modelo térmico que relaciona a temperatura interna do capacitor (T_{CAP}), a temperatura do encapsulamento do capacitor (T_{case}), a temperatura do dissipador (T_{HS}) e a temperatura ambiente (T_{amb}) é apresentado na Figura 3 (Zhang, 2016).

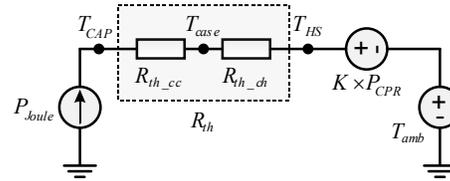


Figura 3. Modelo térmico dos capacitores do barramento CC.

Onde R_{th_cc} é a resistência térmica entre o núcleo e o encapsulamento, R_{th_ch} é a resistência térmica entre o encapsulamento e o dissipador, R_{th} é a resistência térmica total e K é o coeficiente de dissipação de calor, obtido de Zhang (2016). P_{CPR} é a relação de consumo de energia, dado por:

$$P_{CPR} = \frac{P_o}{P_{nom}} \frac{(1-\eta)}{\eta} \quad (2)$$

sendo η o rendimento, P_o a potência de saída e P_{nom} a potência nominal da UPS. Neste trabalho considera-se η igual a 0,9 para qualquer condição de carga. A partir da Figura 3, tem-se que a temperatura do núcleo dos capacitores pode ser obtida por:

$$T_{CAP} \approx (P_{Joule} \times R_{th}) + (K \times P_{CPR}) + T_{amb} \quad (3)$$

Substituindo-se (1) e (2) em (3), tem-se:

$$T_{CAP} \approx (i_c^2 \times ESR \times R_{th}) + (K \times \frac{(1-\eta)}{\eta} \frac{P_o}{P_{nom}}) + T_{amb} \quad (4)$$

Nota-se que, com o aumento da potência de operação da UPS, tem-se uma maior energia no barramento CC e uma consequente maior temperatura no núcleo dos capacitores. Sabe-se que o mecanismo de falha dos Al-Caps é a vaporização de seu elemento eletrolítico, causada principalmente por sua temperatura de operação. Logo, elevados valores de T_{CAP} , aliados à longos períodos de operação – que é uma característica típica das UPSs de dupla conversão – podem resultar em maior degradação e redução da vida útil dos capacitores de barramento (Yang, 2015). Dessa forma, este trabalho atua no intuito de distribuir as potências fornecidas pelas UPSs a fim de equalizar as temperaturas internas dos capacitores de barramento, aumentando a vida útil do sistema.

3 Controle por inclinação (*droop*)

O controle por inclinação permite obter uma alta confiabilidade do sistema sem qualquer interconexão entre os inversores, utilizando apenas medições de variáveis locais, tensão no capacitor (v_o) e corrente no indutor (i_L) do filtro de saída. É frequentemente utilizado em microrredes para tornar o sistema mais amortecido e garantir a estabilidade (Guerrero, 2011).

A impedância de saída dos inversores é frequentemente considerada indutiva, devido principalmente à componente indutiva da impedância de linha e dos indutores dos filtros de saída. Contudo, a impedância de saída de malha fechada depende também da estratégia de controle e, em redes de baixa tensão, a impedância de linha (Z_L) é predominantemente resistiva (Guerrero, 2008). Considerando-se uma impedância de saída com componente resistiva R e reativa indutiva X , o fluxo de potência de cada inversor para o barramento CA é dado por (Avelar, 2012):

$$P = \frac{1}{R^2 + X^2} (RE^2 - REV \cos(\phi) + XEV \sin(\phi)) \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{R^2 + X^2} (XE^2 - XEV \cos(\phi) - REV \sin(\phi)) \quad (6)$$

onde:

- E - amplitude da tensão do inversor;
- V - amplitude da tensão do barramento CA;
- ϕ - ângulo da tensão do inversor;
- P - potência ativa;
- Q - potência reativa.

As equações (5) e (6) podem ser simplificadas assumindo uma pequena diferença de fase entre E e V , o que resulta nas aproximações $\sin \phi \approx \phi$ e $\cos \phi \approx 1$. Considerando a impedância de saída resistiva, e adicionando filtros passa-baixas para as medições

de potências, o controle por inclinação convencional pode ser implementado a partir das seguintes equações (Guerrero, 2011):

$$E_i = E_{ref} - n_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} P_i \quad (7)$$

$$\omega_i = \omega_{ref} + m_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Q_i \quad (8)$$

onde:

- E_{ref} - amplitude da tensão de referência;
- i - índice que representa cada UPS;
- n - coeficiente *droop* de amplitude;
- m - coeficiente *droop* de frequência;
- ω - frequência da tensão;
- ω_{ref} - frequência da tensão de referência;
- ω_c - frequência de corte do filtro passa-baixa.

Quanto maiores forem os coeficientes *droop*, melhor será o compartilhamento de potência, ao custo de degradar a regulação de amplitude e frequência. Contudo, (7) e (8) são válidas para uma impedância de saída fortemente resistiva. Devido ao acoplamento entre as potências ativa e reativa mostrado em (5) e (6), essa condição não é garantida. Para impor uma característica específica à impedância de saída, uma abordagem típica é a inclusão de uma impedância virtual (Z_v) no sistema de controle (Guerrero, 2011; Han, 2016), de acordo com:

$$v_{ref} = v^* - Z_v(s)i_L \quad (9)$$

onde v_{ref} é a referência de tensão do inversor e v^* é a referência de tensão gerada pelo controlador primário. Neste trabalho é considerada uma impedância virtual resistiva, muito maior que a impedância de saída dos inversores.

4 Controle Secundário com Equalização de Temperatura

Apesar do controle por inclinação ser amplamente utilizado, seu funcionamento é baseado nos desvios da amplitude e da frequência da tensão da microrrede, os quais são dependentes da carga. De forma a minimizar os problemas ocasionados pela utilização do controle por inclinação, o controle secundário é incluído (Souza, 2015; Han, 2017). O controle secundário utiliza uma comunicação em baixa frequência e é responsável por reduzir os desvios de amplitude e frequência, sem comprometer o compartilhamento de potências. Nesta configuração, o controle por inclinação é empregado como um controlador primário, utilizado para realizar o compartilhamento das potências ativa e reativa de saída de forma adequada. A Figura 4 apresenta as curvas características do funcionamento do controle primário e secundário operando de forma conjunta.

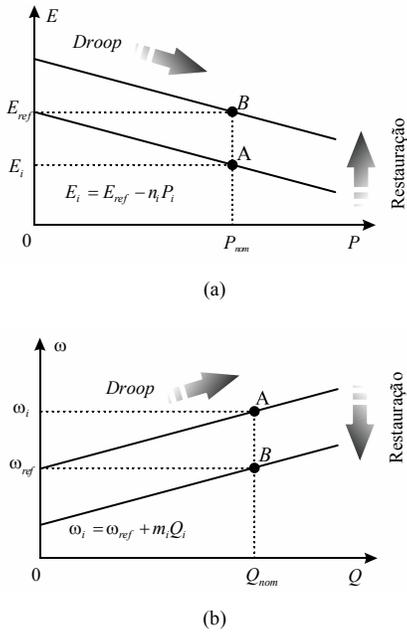


Figura 4. Curvas características do controle primário e secundário. (a) Amplitude da tensão em função da potência ativa. (b) Frequência da tensão em função da potência reativa.

A implementação do controle secundário pode ser realizada de forma centralizada, sendo gerenciado por um controlador específico externo aos módulos UPS. Contudo, todo o funcionamento do sistema é dependente da comunicação entre as unidades e em caso de falha do controlador ou da comunicação, a operação do sistema é interrompida

(Shafiee, 2014). Neste trabalho toda a implementação do controle é descentralizada, com os cálculos sendo realizados internamente pelas UPSs. Dessa forma, em caso de falha da comunicação, o controlador secundário é desabilitado e o sistema continua operando através do controle por inclinação. Assume-se que as malhas internas de corrente e tensão são rápidas o suficiente para rastrear a referência v_{ref} gerada pela contribuição do controle primário e da malha de impedância virtual. A Figura 5 apresenta a estrutura do controle secundário com as malhas internas.

4.1 Restaurações de frequência e amplitude

Para as restaurações de frequência e amplitude, o controlador secundário recebe as variáveis das demais UPSs via comunicação, calcula a média aritmética, e com isso determina o desvio em relação aos respectivos valores de referência (ω_{ref} e E_{ref}). As ações de controle da restauração de frequência (ω_{sec}) e de amplitude (E_{sec}) são calculadas por:

$$\omega_{sec} = k_{p\omega}(\omega_{ref} - \bar{\omega}) + k_{i\omega} \int (\omega_{ref} - \bar{\omega}) dt \quad (10)$$

$$E_{sec} = k_{pE}(E_{ref} - \bar{E}) + k_{iE} \int (E_{ref} - \bar{E}) dt \quad (11)$$

onde k_p é o ganho proporcional, k_i é o ganho integral e $\bar{\omega}$ e \bar{E} são as médias aritméticas das frequências e amplitudes de todos os inversores conectados ao barramento CA, respectivamente.

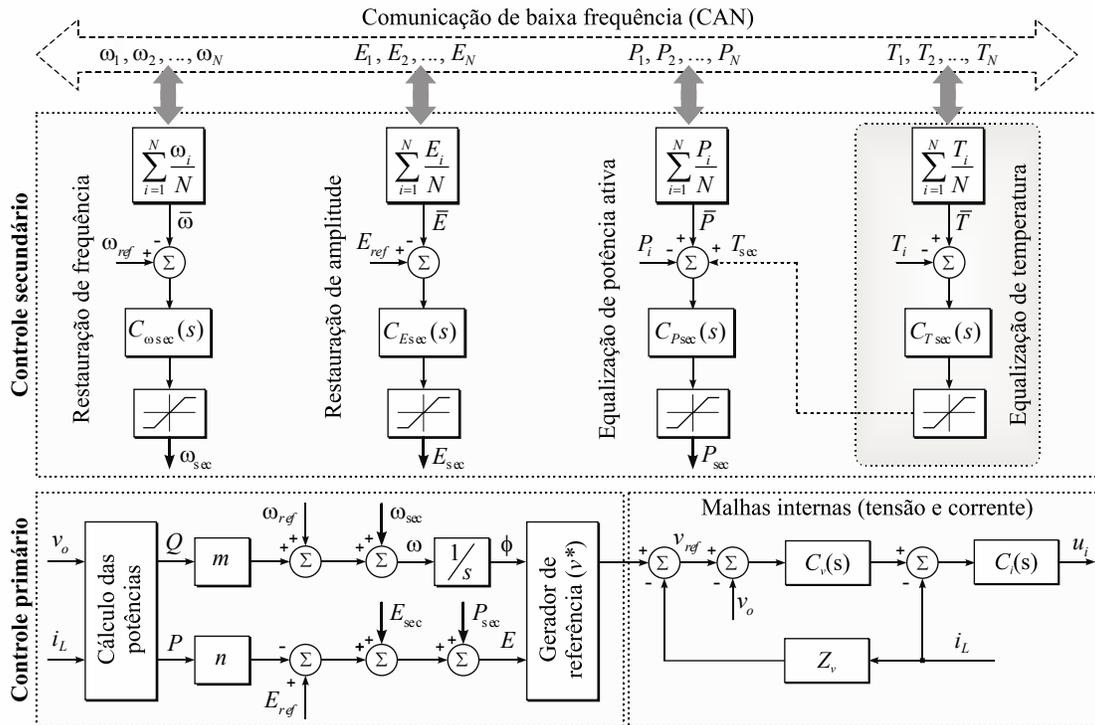


Figura 5. Estrutura do controle secundário proposto com restaurações de frequência e amplitude e equalização de potência ativa e temperatura para uma UPS.

4.2 Equalização de potência ativa

Utilizando a restauração de amplitude é possível manter a média das tensões de saída dos inversores reguladas no valor de referência. Contudo, na presença de impedâncias de linha diferentes, as potências ativas fornecidas pelos inversores diferem, e o compartilhamento de potência é afetado. Para reduzir a influência das impedâncias de linha no compartilhamento de potência, a equalização de potência ativa é incluída (Shafiee, 2014). Nesta malha, os valores das potências ativas médias de saída dos inversores são recebidas através da comunicação, e a média dos valores (\bar{P}) é utilizada como referência. Assim, é calculado o desvio em relação a potência medida pela UPS e gera-se a ação de controle da equalização de potência ativa:

$$P_{sec} = k_{pP}(\bar{P} - P_i) + k_{iP} \int (\bar{P} - P_i) dt \quad (12)$$

A equação (12) não considera a malha de equalização de temperatura, a qual é detalhada na próxima seção.

4.3 Equalização de temperatura

Através da utilização do controle por inclinação e das restaurações proporcionadas pelo controle secundário, é obtido um compartilhamento de potência adequado entre os inversores conectados em paralelo. Contudo, garantir uma distribuição de potência semelhante pode não ser a solução ideal.

Uma vez que a temperatura dos capacitores de barramento é relacionada com o quadrado da sua corrente eficaz, pode-se alterar a sua temperatura de operação através do controle da potência fornecida pela UPS. A malha proposta de controle de temperatura recebe, via comunicação, os valores das estimativas das temperaturas internas das demais UPSs, calcula a média aritmética entre elas, e utiliza este valor como referência. A partir da temperatura interna média dos capacitores de barramento das UPSs (\bar{T}) e da temperatura interna da unidade específica (T_i), é calculado o desvio de temperatura que tende a ser zerado pela ação do controle da malha de equalização de temperatura (T_{sec}), conforme:

$$T_{sec} = k_{pT}(\bar{T} - T_i) + k_{iT} \int (\bar{T} - T_i) dt \quad (13)$$

Esta ação de controle altera a referência da malha de equalização de potência ativa no intuito de igualar as temperaturas internas dos capacitores de barramento das UPSs. A ação de controle da malha de potência ativa, considerando a malha de equalização de temperatura é dada por:

$$P_{sec} = k_{pP}(\bar{P} - P_i + T_{sec}) + k_{iP} \int (\bar{P} - P_i + T_{sec}) dt \quad (14)$$

As ações resultantes do controle secundário, ω_{sec} , E_{sec} e P_{sec} , são somadas na saída do controle primário para efetuar as respectivas restaurações. Dessa forma, as equações que representam a implementação dos controladores são dadas por:

$$E_i = E_{ref} - n_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} P_i + E_{sec} + P_{sec} \quad (15)$$

$$\omega_i = \omega_{ref} + m_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Q_i + \omega_{sec} \quad (16)$$

É importante salientar que as restaurações de frequência e amplitude devem ser limitadas, de forma a não exceder os desvios limites preestabelecidos no projeto do controlador primário. De forma semelhante, a equalização de potência ativa não deve exceder as potências nominais das UPSs.

5 Resultados de Simulação

De forma a avaliar o desempenho da estrutura de controle proposta, foram realizadas simulações através da plataforma PSIM. Foram conectadas em paralelo duas UPSs de 10 kVA alimentando uma carga resistiva de 10 kW através de diferentes impedâncias de linha. Assume-se que as UPSs, apesar de estarem conectadas à mesma rede, estão localizadas fisicamente em ambientes distintos, com a UPS #1 exposta a uma temperatura ambiente de 30 °C e a UPS #2 confinada em um ambiente com temperatura controlada de 20 °C. Nesta simulação as UPSs são idênticas, e com isso, as temperaturas internas dos capacitores de barramento dependem apenas da corrente eficaz de barramento e das temperaturas ambientes. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 1. Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Dados de simulação	
Potência da carga (P_{carga})	10 kW
Passo de simulação (t_p)	500 ns
Impedância de linha da UPS 1 (Z_{L1})	$0,05 + j\omega 0,01 \text{ m } \Omega$
Impedância de linha da UPS 2 (Z_{L2})	$0,10 + j\omega 0,02 \text{ m } \Omega$
Temperatura ambiente da UPS 1 (T_{amb1})	30 °C
Temperatura ambiente da UPS 2 (T_{amb2})	20 °C
Parâmetros de potência (por UPS)	
Tensão de fase da entrada/saída (V_i/V_o)	220 V/ 60 Hz
Potência de saída (S_o)	10 kVA
Frequência de chaveamento (f_{sw})	10 kHz
Frequência de amostragem (f_s)	10 kHz
Tensão total de barramento (V_{bar})	800 V
Capacitância total de barramento (C_{bar})	5400 μF
Capacitores de barramento (C)	1800 μF / 450 V
Resistência térmica total (R_{th})	5,63 K/W
Resistência série dos capacitores de barramento (ESR)	76 m Ω @ 120 Hz

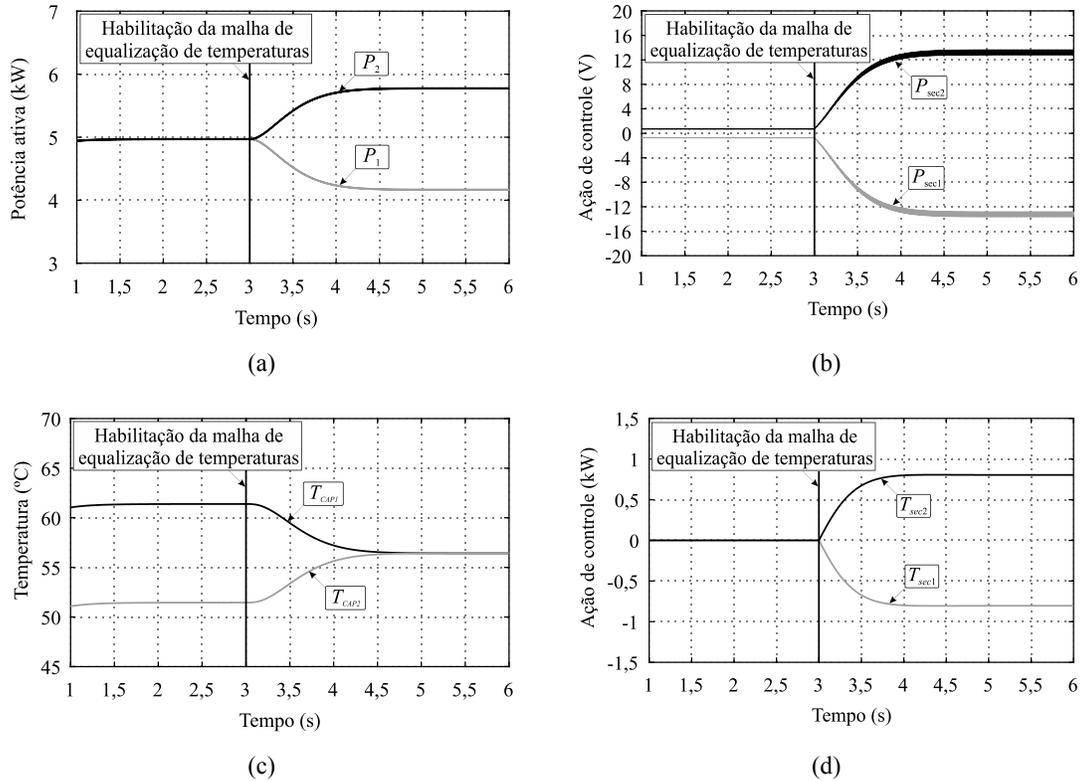


Figura 6. Resultados de simulação. Equalização de temperaturas habilitada no tempo de 3 segundos. (a) Potências ativas fornecidas pelos inversores das UPS em paralelo. (b) Ações de controle das malhas de equalização de potência ativa. (c) Temperaturas internas dos capacitores de barramento das UPSs #1 e #2. (d) Ações de controle das malhas de equalização de temperaturas.

Coefficiente de dissipação de calor (K)	550
Indutor do filtro de entrada (L_i)	1 mH
Capacitor do filtro de saída (C_o)	62 μ F
Indutor do filtro de saída (L_o)	620 μ H
Controladores primários (P)	
Coefficiente <i>droop</i> de amplitude (n)	0,008608
Coefficiente <i>droop</i> de frequência (m)	0,000377
Controladores secundários (PI)	
Restaurador de amplitude (C_{Esec})	$\frac{s+10}{s}$
Restaurador de frequência (C_{fsec})	$\frac{s+10}{s}$
Equalizador de potência ativa (C_{Psec})	$\frac{0,01s+0,1}{s}$
Equalizador de temperatura (C_{Tsec})	$\frac{100s+400}{s}$

O sistema inicia a operação com as malhas de controle primário e com as restaurações de amplitude, frequência e equalização de potência ativa habilitadas. No tempo de 3 segundos a malha de equalização de temperaturas é adicionada. Esta malha possui a dinâmica mais lenta do sistema, usualmente com um tempo de acomodação de alguns segundos ou minutos. Contudo, a fim de reduzir o tempo de simulação, a velocidade da malha foi aumentada.

A Figura 6(a) apresenta as potências ativas fornecidas pelos inversores das duas UPSs em paralelo. Nota-se que até os 3 segundos de operação as UPSs apresentam um compartilhamento de potência adequado, regulando a tensão fornecida à carga comum. Após esse período, é habilitada a equalização de temperatura, a qual, a partir da redistribuição das potências fornecidas pelas UPSs, regula as temperaturas internas dos capacitores dos barramentos CC.

Na Figura 6(b) são mostradas as ações de controle provenientes da malha de equalização de potência ativa. Até a habilitação das malhas de equalização de temperaturas, as ações de controle P_{sec1} e P_{sec2} operam no sentido de igualar as potências fornecidas pelas UPSs. Após a habilitação, as referências de potência são alteradas pela malha de equalização de temperatura, modificando diretamente a amplitude das tensões sintetizadas pelas UPSs.

A Figura 6(c) apresenta as temperaturas internas dos capacitores de barramento das UPSs conectadas em paralelo. Devido às particularidades de cada ambiente onde as UPSs estão localizadas, os barramentos apresentam uma diferença de temperatura de cerca de 10 °C. Salienta-se que um acréscimo de 10 °C na temperatura interna de capacitores eletrolíticos pode reduzir em até 50% sua vida útil (Huesgen, 2014). As temperaturas internas dos capacitores são igualadas no tempo de 5 segundos.

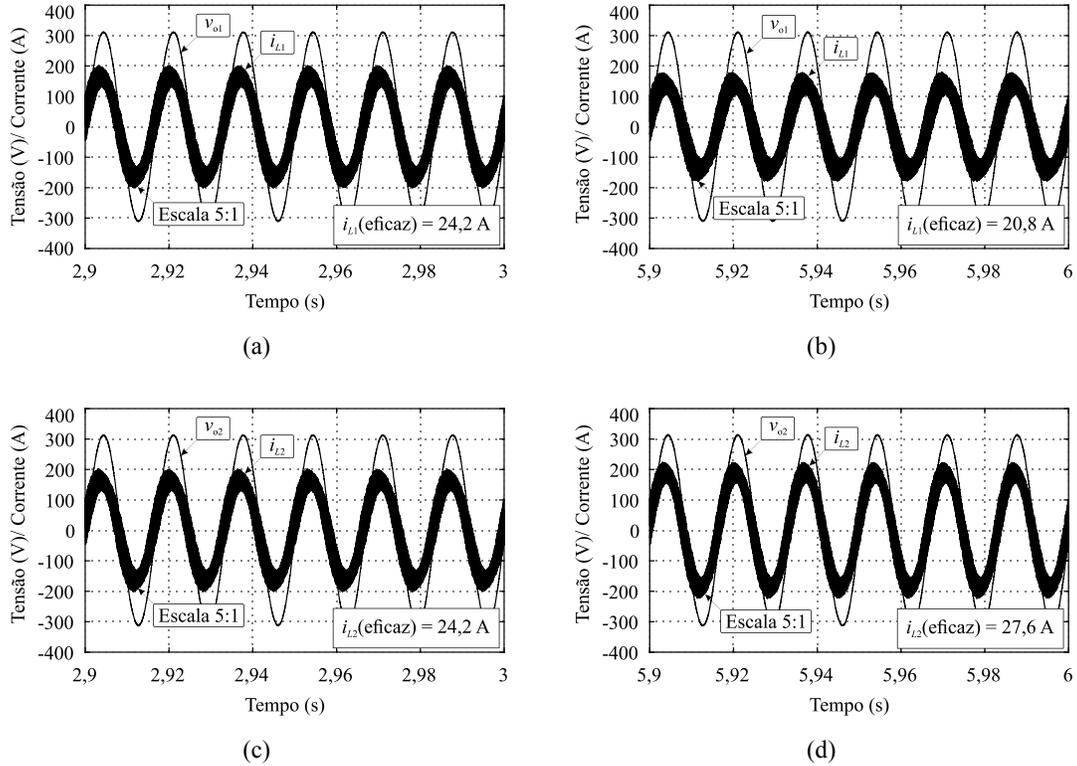


Figura 7. Resultados de simulação. Tensões de saída e correntes dos indutores dos filtros de saída das UPSs em paralelo com e sem as malhas de equalização de temperatura em regime permanente. (a) Tensão e corrente da UPS #1 sem equalização de temperaturas. (b) Tensão e corrente da UPS #1 com equalização de temperaturas. (c) Tensão e corrente da UPS #2 sem equalização de temperaturas. (d) Tensão e corrente da UPS #2 com equalização de temperaturas.

A Figura 6(d) mostra as ações de controle das malhas de equalização de temperatura (T_{sec1} e T_{sec2}). Estas ações de controle representam a diferença de potência ativa que as UPSs devem fornecer para que as temperaturas internas dos capacitores de barramento de cada unidade sejam equalizadas. Em regime permanente, nota-se que, para a situação simulada, uma UPS deve fornecer cerca de 700 W a mais e a outra 700 W a menos que o valor de equilíbrio de potência (cerca de 5 kW).

A Figura 7 apresenta as formas de onda das tensões de saída e das correntes nos indutores dos filtros de saída das UPSs em paralelo sem e com a habilitação das malhas de equalização de temperatura, em regime permanente. Na Figura 7(a) e Figura 7(b) são mostrados os resultados para a UPS #1, sem e com a malha de equalização de temperatura, respectivamente. Como as duas UPSs apresentam as mesmas características construtivas e a UPS #1 encontra-se em um ambiente com temperatura maior, a temperatura interna dos capacitores de barramento apresenta inicialmente um valor superior. Para reduzir a temperatura de operação e atingir igualdade térmica com a UPS #2, a tensão e corrente eficaz de saída são reduzidas. A Figura 7(c) e a Figura 7(d) mostram os resultados para a UPS #2, sem e com a habilitação da malha de equalização de temperatura, respectivamente. De forma análoga aos resultados anteriores, a

temperatura interna dos capacitores de barramento da UPS #2 encontrava-se inicialmente menor do que na UPS #1. Assim, as ações de controle da malha de equalização de temperatura agem no intuito de aumentar a amplitude da tensão de saída e consequentemente elevar a potência e a temperatura interna dos capacitores da UPS #2.

6 Conclusão

Este trabalho apresentou uma estratégia de controle para o paralelismo de UPSs que inclui uma malha para a equalização das temperaturas internas dos capacitores dos barramentos CC. O paralelismo dos inversores é feito com base no controle por inclinação com a adição do controle secundário para mitigação dos desvios de tensão. Através da estimativa das temperaturas dos capacitores é gerada uma ação de controle que altera a potência ativa de referência que cada UPS deve fornecer, modificando assim a corrente eficaz sobre os capacitores de barramento, de forma a equalizar as temperaturas de todas as unidades.

Esta solução permite o aumento da vida útil do sistema, uma vez que a durabilidade dos capacitores eletrolíticos é extremamente sensível à temperatura de operação. Foram obtidos resultados de simulação para duas UPSs conectadas em paralelo e localizadas em ambientes com temperaturas diferentes. Em

implementações práticas, a discrepância entre as temperaturas internas dos capacitores de barramento das UPSs é dependente também das não-idealidades dos componentes, desgastes provocados pela vida útil das unidades, dentre outros fatores, o que motiva ainda mais a utilização de um método para a equalização das temperaturas. Os resultados demonstraram a funcionalidade e viabilidade da proposta do trabalho.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e a CAPES pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Aamir, M. and Mekhilef, S. (2017). An Online Transformerless Uninterruptible Power Supply (UPS) System With a Smaller Battery Bank for Low-Power Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 1, pp. 233-247.
- Abdennadher, K.; Venet, P.; Rojat, G.; Retif, J.; Rosset, C. (2010). A Real-Time Predictive-Maintenance System of Aluminum Electrolytic Capacitors Used in Uninterrupted Power Supplies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1644-1652.
- Avelar, H. J.; Parreira, W. A.; Vieira, J. B.; Freitas, L. C. G.; Coelho, E. A. A. (2012). A State Equation Model of a Single-Phase Grid-Connected Inverter Using a Droop Control Scheme With Extra Phase Shift Control Action. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 3, pp. 1527-1537.
- Chung, H. S.; Wang, H.; Blaabjerg, F. and Pecht, M. (2015). Reliability of Power Electronic Converter Systems. *Institution of Engineering and Technology*.
- Emerson Network Power, "Capacitors Age and Capacitors Have an End of Life", 2008. [Online]. Disponível: www.emersonnetworkpower.com.
- Guerrero, J. M.; Hang, L. and Uceda, J. (2008). Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 8, pp. 2845-2859.
- Guerrero, J. M.; Vasquez, J. C.; Matas, J.; Vicuna, L. G. and Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172.
- Han, H.; Hou, X.; Yang, J.; Wu, J.; Su, M. and Guerrero, J. M. (2016). Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 200-215.
- Han, Y.; Li, H.; Shen, P.; Coelho, E. A. A. and Guerrero, J. M. (2017). Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451.
- Huesgen, T. (2014). Thermal Resistance of Snap-in Type Aluminum Electrolytic Capacitor Attached to Heat Sink. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, pp. 1198-1205.
- Lai, Y.; Su, Z.; Chen, W. (2014). New Hybrid Control Technique to Improve Light Load Efficiency While Meeting the Hold-up Time Requirement for TwoStage Server Power. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4763-4775.
- Shafiee, Q.; Guerrero, J. M. and Vasquez, J. C. (2014). Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 1018-1031.
- Song, Y. and Wang, B. (2013). Survey on Reliability of Power Electronic Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 591-604.
- Souza, W. F.; Severo-Mendes, M. A. and Lopes, L. A. C. (2015). Power Sharing Control Strategies for a Three-phase Microgrid in Different Operating Condition with Droop Control and Damping Factor Investigation. *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 9, pp. 831-839.
- Todd, P. C. (1996). UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design. *Unitrode Product and Applications Handbook*, pp. 10303-10322.
- Tolani, S. and Sensarma, P. (2017). Extended Bandwidth Instantaneous Current Sharing Scheme for Parallel UPS Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 6, pp. 4960-4969.
- Yang, Y.; Ma, K.; Wang, H. and Blaabjerg, F. (2015). Instantaneous Thermal Modeling of the DC-link Capacitor in PhotoVoltaic Systems. Published in: *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*.
- Wang, Z.; Xu, Z.; Zhao, L. and Han, S. (2018). Power Capacitor Temperature Measurement System Using FBG Sensors and Its Validation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 2, pp. 449-458.
- Wang, H. and Blaabjerg, F. (2014). Reliability of Capacitors for DC-link Applications in Power Electronic Converters—An Overview. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 3569-3578.
- Wu, H.; Mu, T.; Gao, X. and Xing, Y. (2015). A Secondary-Side Phase-Shift-Controlled LLC Resonant Converter With Reduced Conduction Loss at Normal Operation for Hold-Up Time Compensation Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 10, pp. 5352-5357.
- Zhang, Z. et al. (2016). Operating Temperatures of Open-rack Installed Photovoltaic Inverters. *Solar Energy*. 137. 10.1016/j.solener.2016.08.017.