

CONTROLE HIERÁRQUICO DISTRIBUÍDO APLICADO AO PARALELISMO DE UPS MONOFÁSICAS

HENRIQUE JANK, WILLIAM A. VENTURINI, MÁRIO L. S. MARTINS, FÁBIO E. BISOGNO, HUMBERTO PINHEIRO

*Grupo de Eletrônica de Potência e Controle – GEPOC, Departamento de Processamento de Energia Elétrica – DPPE, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Caixa Postal 5082, 97105 – 900, Santa Maria, RS, Brasil*

E-mails: hiquejank@gmail.com, williamventurini@gmail.com, mariolsm@gmail.com, fbisogno@gmail.com, humberto.ctlab.ufsm.br@gmail.com

Abstract— This work presents a distributed hierarchical control strategy applied to the parallelism of single-phase UPS. The resistive droop method is used as the primary controller to perform the active and reactive power sharing among the inverters. In the primary controller are also included the synchronization loops with utility grid for proper bypass operation; or with the coupling point, in the case of connecting a new inverter to the system during backup mode. A secondary controller, which uses information from all the inverters by means of a low frequency CAN communication bus is employed. In this controller a master-slave approach is used, where the master inverter is responsible for restoring the amplitude and frequency of the output voltage, due to the deviations produced by the droop method; and the slave inverters are responsible for enhancing power sharing. Results obtained on a hardware-in-the-loop platform are used to validate the proposed strategy.

Keywords— Droop method, Hierarchical control, Parallelism of UPS

Resumo— Este trabalho apresenta uma estratégia de controle hierárquico distribuído aplicado ao paralelismo de UPS monofásicas. O método droop resistivo é utilizado como controlador primário para realizar o compartilhamento das potências ativa e reativa dos inversores. No controlador primário ainda são incluídas as malhas de sincronismo com a rede de entrada para a adequada operação do bypass; ou com o ponto de acoplamento no caso da conexão de um novo inversor no sistema durante o modo backup. Um controlador secundário, que utiliza informação de todos os inversores a partir de um barramento de comunicação CAN em baixa frequência é empregado. Neste controlador é utilizada uma abordagem mestre-escravo, onde o inversor mestre é responsável por restaurar a amplitude e frequência da tensão de saída, devido aos desvios produzidos pelo método droop; e os inversores escravos são responsáveis por aprimorar o compartilhamento das potências. Resultados obtidos em uma plataforma *hardware-in-the-loop* são utilizados para validação da estratégia proposta.

Palavras-chave— Controle hierárquico, Método droop, Paralelismo de UPS.

1 Introdução

Fontes ininterruptas de energia (UPS) consistem em equipamentos capazes de fornecer energia elétrica de elevada qualidade de forma contínua e ininterrupta às cargas críticas, evitando que as mesmas sejam submetidas aos distúrbios provenientes da rede pública. A operação paralela de UPS apresenta diversas vantagens, tais como maior flexibilidade para expansão de potência, maior facilidade em eventos de manutenção, destacando-se ainda o aumento da confiabilidade e redundância do sistema (Zhong e Zeng, 2016, Zhong e Hornik, 2013), ambos fatores fundamentais em se tratando de cargas críticas.

Diversas técnicas de paralelismo de UPS podem ser empregadas, dentre as quais o método droop se destaca pois proporciona o compartilhamento adequado da potência da carga entre as n UPS que operam em paralelo sem a necessidade de comunicação entre as mesmas (Zhong e Zeng, 2016, Zhong e Hornik, 2013, Guerrero *et al.* 2011, Han *et al.* 2017). A função de uma estratégia de controle por método droop é aplicar decaimentos proporcionais às potências médias ativa e reativa na amplitude e frequência da tensão do inversor, de modo que o fluxo de potência seja controlado.

Embora permita o compartilhamento de potência, o método droop é fortemente afetado pela impedância de saída do inversor, a qual depende, em malha fechada, dos parâmetros do filtro, da impedância da

linha e da estratégia de controle utilizada (Guerrero *et al.* 2007). Dependendo do tipo de impedância de saída, diferentes equações de droop são obtidas. Por este motivo, o método droop é usualmente empregado em conjunto com algum tipo de impedância virtual, onde se impõe a característica desejada para a impedância de saída.

Outra limitação do método droop são os inerentes desvios de amplitude e frequência. Trabalhos recentes fazem uso de uma estrutura de controle hierárquico, onde o método droop é utilizado como controlador primário e um controlador secundário é utilizado na restauração da amplitude e frequência da tensão da rede de inversores ao seus valores nominais. O controle hierárquico consiste basicamente em quatro níveis (Guerrero *et al.* 2011):

- **Nível 0** – Malhas internas: malhas referentes a regulação de tensão de cada um dos inversores. Diferentes configurações de controle são utilizadas para regular a tensão e corrente, além de manter a estabilidade do sistema;
- **Nível 1** – Controle primário: neste nível são implementadas as malhas responsáveis pelo compartilhamento de potência do sistema. O controle primário geralmente é implementado a partir do método droop aliado a algum tipo de impedância virtual;
- **Nível 2** – Controle secundário: é responsável por restaurar a tensão (amplitude e frequência) da rede

de inversores ao seu valor nominal. Este controle também pode ser utilizado para realizar o sincronismo de um inversor à rede. Geralmente o sistema supervisor do controle secundário utiliza comunicação em baixa frequência para ajustar os valores de referência do controle primário.

- **Nível 3** – Controle terciário: é relacionado basicamente à produção de energia (injeção ou absorção da rede principal), e depende, normalmente, de questões econômicas. Este nível de controle é utilizado no paralelismo de inversores aplicados a microrredes e não será abordado neste trabalho.

Diversos trabalhos apresentam estratégias de controle hierárquico aplicados ao paralelismo de inversores, podendo estas ser implementadas de forma centralizada ou distribuída. Estratégias centralizadas (Guerrero *et al.* 2011, Han *et al.* 2017) apresentam menor flexibilidade na expansão do sistema, além de estarem sujeitas a falha de ponto único em caso de mau funcionamento do controlador central, penalizando a confiabilidade e redundância do sistema, duas das principais vantagens do paralelismo. Por sua vez, estratégias de controle hierárquico distribuído, como a apresentada por Shafiee (Shafiee *et al.* 2014) para aplicações em microrredes, não apresentam estas desvantagens.

Então, para aprimorar a regulação da tensão e da frequência, mantendo a confiabilidade e redundância, neste trabalho será apresentada uma estratégia de controle hierárquico distribuído aplicada ao paralelismo de UPS monofásicas. A estratégia funciona de forma semelhante à proposta apresentada por Shafiee, onde o controle secundário atua a partir da média das tensões, correntes e potências de todos os inversores presentes na rede. Porém, enquanto o trabalho citado apresenta uma abordagem em que todos os inversores trabalham de forma cooperativa, a abordagem aqui proposta faz uso de uma estratégia mestre-escravo. É importante salientar que existe um rodízio dos inversores que operam como mestre, de forma que, se o mesmo for desconectado do barramento CA, um novo mestre é definido e o sistema continua operacional.

Além disso, o conceito apresentado por Shafiee faz uso do droop indutivo, enquanto este trabalho é desenvolvido em função do droop resistivo, cujas vantagens serão descritas no decorrer do trabalho. Uma malha adicional ainda é incluída ao controlador secundário para proporcionar um melhor compartilhamento de potência reativa. Por fim, por se tratar de uma aplicação diferente, são incluídas ainda malhas de controle para o sincronismo entre as tensões de saída das UPSs e a tensão da rede, o que não é relatado de forma clara na literatura.

2 Descrição do Sistema

O diagrama simplificado do sistema é mostrado na Figura 1, onde a Figura 1(a) representa uma rede composta por n UPS operando em paralelo, alimentado um conjunto de cargas distribuídas através

de um barramento CA. As UPS comunicam-se entre si por meio de um sistema de comunicação em baixa frequência com protocolo CAN. Na Figura 1(b) é mostrado o diagrama do circuito elétrico das UPS que compõe a rede, representadas simplificada por retângulos com indicação UPS, na Figura 1(a). Cada circuito é composto por um retificador/descarregador de baterias, um barramento CC-CC com ponto central e um inversor em meia ponte. Vale salientar que o terminal neutro da rede é conectado ao ponto central do divisor capacitivo. Durante o modo normal de operação, as UPS alimentam a carga a partir da energia da rede elétrica. Quando ocorre uma falta ou quando a tensão da rede está fora de limites pré-estabelecidos, as UPS passam a operar no modo *backup*, onde a rede elétrica é desconectada pelas chaves S_{i1} , S_{i2} e S_{in} e as UPS passam a alimentar a carga a partir de um banco de baterias. Há ainda a possibilidade de o sistema operar no modo *bypass*, durante algum evento de manutenção ou falha de algum equipamento. Durante esse modo, as UPS são desconectadas da rede pelas chaves S_{i1} , S_{i2} e S_{in} e do barramento CA de saída pelas chaves S_{o1} , S_{o2} e S_{on} . Neste modo, as cargas distribuídas são alimentadas diretamente pela rede elétrica através da chave de *bypass* (S_{BP}). Durante o modo normal e *backup* as UPS devem compartilhar a potência demandada pelas cargas ajustando suas tensões de referência em função das potências ativa e reativa entregue por cada um dos n inversores.

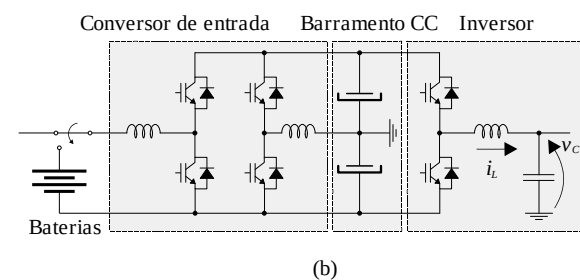
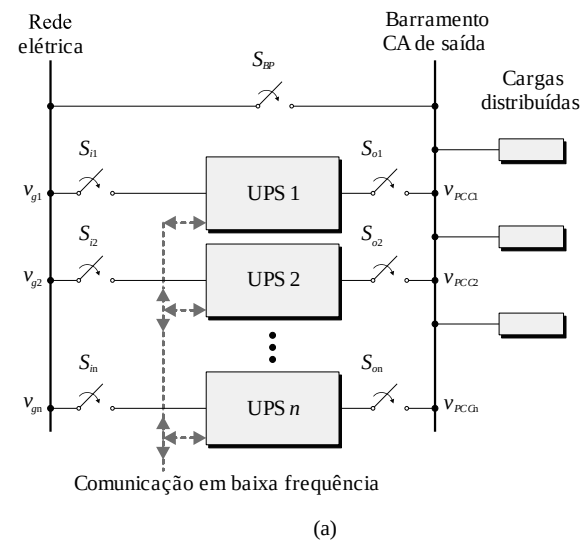


Figura 1. Paralelismo de UPS. (a) Rede de n UPS em paralelo. (b) Diagrama das UPS.

Figura 2. Estrutura de controle do nível 1: Droop resistivo.

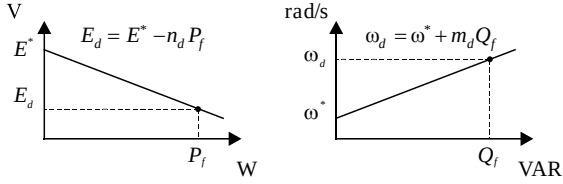


Figura 3. Curva característica $P - E$ e $Q - \omega$ do droop resistivo.

De modo semelhante, o coeficiente m_d é determinado a partir do desvio de frequência permitido para uma determinada variação de potência reativa, de acordo com:

$$m_d = \frac{\Delta\omega}{\Delta Q}. \quad (4)$$

B. Cálculo das potências

Os valores instantâneos das potências ativa e reativa são calculados a partir das componentes da tensão no capacitor e corrente no indutor no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ (Han *et al.* 2017), conforme as equações:

$$p = \frac{v_{C\alpha} i_{L\alpha} + v_{C\beta} i_{L\beta}}{2}, \quad (5)$$

$$q = \frac{v_{C\beta} i_{L\alpha} - v_{C\alpha} i_{L\beta}}{2}. \quad (6)$$

As potências instantâneas são então filtradas a partir de um filtro passa-baixas de primeira ordem com frequência de corte ω_{pb} , conforme as equações:

$$\frac{d}{dt} P_f = \omega_{pb} (p - P_f), \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} Q_f = \omega_{pb} (q - Q_f). \quad (8)$$

O filtro é sintonizado em uma frequência muito menor que os controladores das malhas internas, de forma a limitar a dinâmica do controle primário bem como evitar distorções na geração da referência de tensão a partir das equações de droop.

As componentes de tensão e corrente no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ são obtidas por meio de um gerador de sinais em quadratura (GSQ) baseado em um integrador generalizado de segunda ordem (Golestan *et al.* 2013), cujas equações dinâmicas são dadas por:

$$\frac{d}{dt} x_\alpha = -\omega_d x_\alpha - \omega_d x_\beta + \omega_d x, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} x_\beta = \omega_d x_\alpha, \quad (10)$$

onde x representa a variável em questão (v_C ou i_L).

C. Malhas de sincronismo

No nível hierárquico 1 ainda é realizado o sincronismo com a rede durante o modo normal de operação. Isto é feito para permitir a transferência para o modo *bypass* de forma adequada durante algum evento de manutenção ou mal funcionamento. Apenas o inversor mestre é encarregado dessa tarefa. Os inversores escravos irão permanecer naturalmente sincronizados com o mestre a partir do método droop auxiliado pela malha de compartilhamento de potência reativa do controle secundário.

A malha de sincronismo é implementada a partir de um PLL (*Phase Locked Loop*) em eixos síncronos. As componentes da tensão da rede em coordenadas $\alpha\beta$, obtidas por meio das equações (9) e (10), são convertidas para eixos síncronos a partir da seguinte transformação:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, \quad (11)$$

onde θ é a posição angular da tensão da rede e x a variável de interesse (neste caso, a tensão da rede v_g).

A transformação apresentada na equação (11) funciona como um detector de fase. A componente de quadratura x_q , que está relacionada à fase, é então compensada por um controlador PI que atua sobre a frequência ω_d de forma que a tensão de referência sincronize com a tensão da rede.

Para a obtenção de $\sin(\theta)$ e $\cos(\theta)$ é utilizado um oscilador não linear, que possui como entrada a frequência ω_d e cuja dinâmica é dada pelas seguintes equações dinâmicas:

$$\frac{d S_1}{dt} = S_1 + \omega_d C_1 - S_1 (S_1^2 + C_1^2), \quad (12)$$

$$\frac{d C_1}{dt} = C_1 - \omega_d S_1 - C_1 (S_1^2 + C_1^2). \quad (13)$$

Esse oscilador produz um ciclo limite estável com $S_1(t) = \sin(\omega_d t + \gamma)$ e $C_1(t) = \cos(\omega_d t + \gamma)$, sendo γ um ângulo de fase que depende das condições iniciais de S_1 e C_1 . A utilização do oscilador se justifica devido à redução no custo computacional em comparação às operações trigonométricas usualmente empregadas nestas situações.

Um segundo PLL é incluído para o caso da necessidade de partir uma das UPS durante o modo *backup* quando não há tensão de rede. Neste caso, antes de conectar a UPS ao barramento CA de saída, é realizado o sincronismo da referência de tensão com o ponto de acoplamento comum (v_{PCC}). Esse PLL funciona da mesma forma que o anterior.

D. Cálculo da tensão de referência

A referência de tensão para a UPS é então calculada pela equação:

$$v_{ref} = E_d C_1. \quad (14)$$

Sendo que a amplitude de referência é:

$$E_d = E^* - n_d P_f + E_{M/E}, \quad (15)$$

e C_1 é obtido da equação (13) para uma frequência de referência dada por:

$$\omega_d = \omega^* + m_d Q_f + \omega_{M/E}. \quad (16)$$

E^* e ω^* representam os valores nominais da amplitude e frequência da tensão de saída da UPS. As ações de controle $E_{M/E}$ e $\omega_{M/E}$ dependem do modo de operação da UPS e se o respectivo inversor é mestre ou escravo. Essas ações de controle dependem da posição das chaves S_E e S_ω , conforme mostrado na Figura 2.

Caso a chave S_E esteja na posição 1, independentemente do modo de operação da UPS, o inversor atua como mestre e $E_{M/E} = \delta_E$, onde δ_E é a ação de controle da malha de restauração de tensão do controle secundário. Se a chave S_E estiver na posição 2, tanto para o modo normal como *backup*, o inversor atua como escravo e $E_{M/E} = \delta_P$, sendo δ_P a ação de controle da malha de compartilhamento de potência ativa do controle secundário.

Para a chave S_ω , caso a mesma se encontre na posição 1, a UPS está em modo normal de operação e o inversor atua como mestre, com $\omega_{M/E} = \omega_{PLLg}$, sendo ω_{PLLg} a ação de controle do PLL de sincronismo com a rede de entrada. Se a chave S_ω estiver na posição 2, a UPS está realizando o sincronismo com o ponto de acoplamento durante a partida em modo *backup*, sendo que o inversor atua como escravo e $\omega_{M/E} = \omega_{PLLpcc}$, onde ω_{PLLpcc} é a ação de controle do PLL de sincronismo com o barramento de saída. Quando a chave S_ω estiver na posição 3, a UPS está atuando como escravo e independente do modo de operação, $\omega_{M/E} = \delta_Q$, onde δ_Q é a ação de controle da malha de compartilhamento de potência reativa. Por fim, quando a chave S_ω estiver na posição 4, a UPS encontra-se em modo *backup* e o inversor atua como mestre, com $\omega_{M/E} = \delta_\omega$, onde δ_ω é a ação de controle da malha de restauração de frequência do controle secundário.

D. Impedância virtual

Para garantir que a impedância de saída da UPS tenha característica resistiva na frequência fundamental e as equações do droop resistivo sejam válidas, o conceito de impedância virtual (Guerrero *et al.* 2007) é empregado. Neste caso, a corrente do indutor é medida para implementar um controlador proporcional de forma que a impedância de saída do inversor seja forçada a ser resistiva. Para evitar que componentes harmônicas da corrente de saída distorçam a referência de tensão, é utilizada a impedância virtual apresentada por Zhong (Zhong e Hornik, 2013), cuja equação é dada por:

$$v_{refv} = v_{ref} - R_V i_L + K_R(s)(v_{ref} - v_C), \quad (17)$$

onde v_{refv} é a nova referência de tensão; R_V é um ganho proporcional que força a impedância de saída a apresentar uma característica resistiva na frequência fundamental; e $K_R(s)$ é um compensador de harmônicos.

Um conjunto de controladores ressonantes é adotado como compensador $K_R(s)$, e sua equação é dada pela expressão:

$$K_R(s) = \sum_{h=3,5,\dots} K_h \frac{2\xi h \omega_n s}{s^2 + 2\xi h \omega_n s + (h \omega_n)^2} \quad (18)$$

Os controladores são sintonizados nas harmônicas de ordem 3, 5 e 7, que correspondem às componentes mais significativas da corrente da carga não linear padrão da norma IEC 62040-3, que trata de especificações de desempenho de UPS. O coeficiente de amortecimento ξ é escolhido como 0,01 de forma a acomodar variações de frequência.

3.3 Nível 2: Controle Secundário

A Figura 4 mostra a estrutura de controle do nível hierárquico 2, ou controle secundário. Um link de comunicação em baixa frequência com protocolo CAN é utilizado para compartilhar as informações de potência ativa e reativa, além da amplitude e frequência da tensão de saída entre cada uma das UPS presentes na rede. Essas informações são utilizadas para compensar os desvios de amplitude e frequência da tensão e aprimorar o compartilhamento de potência. Dessa forma, o controle secundário é composto por quatro malhas: restauração de amplitude, restauração de frequência, compartilhamento de potência ativa e de potência reativa. A ideia geral deste nível de controle consiste em deslocar as retas de decaimento de tensão e incremento de frequência do droop convencional, conforme mostra a Figura 5 para o caso do droop resistivo.

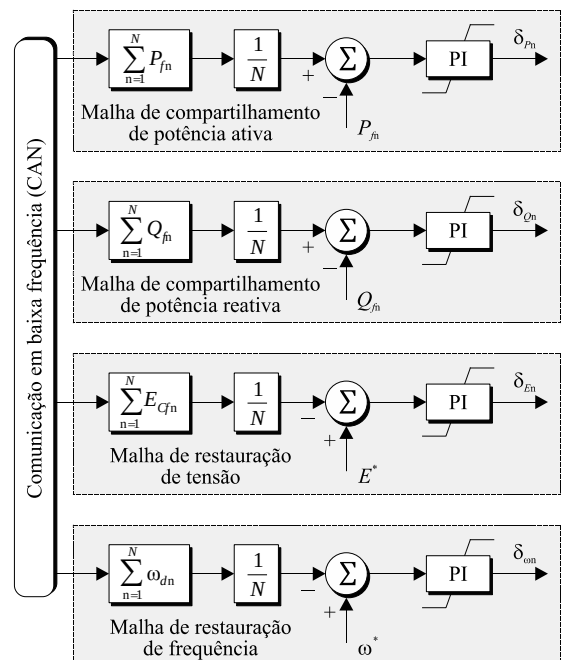


Figura 4. Estrutura de controle do nível 2: Controle secundário.

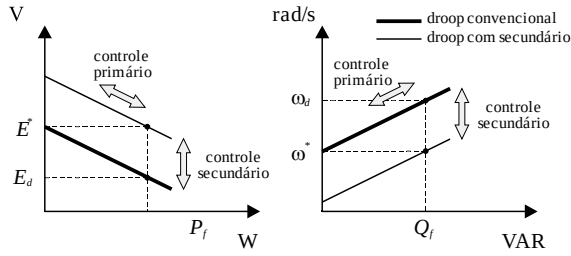


Figura 5. Curva característica $P - E$ e $Q - \omega$ do droop tipo R e controlador secundário.

As malhas de restauração de tensão e compartilhamento de potência ativa atuam, ambas, na amplitude da referência de tensão e, para evitar que uma interfira na operação da outra, apenas o inversor mestre opera com malha de restauração e apenas os escravos com malha de compartilhamento de potência ativa.

De forma semelhante, as malhas de restauração de frequência e de compartilhamento de potência reativa também atuam na mesma variável (frequência da referência de tensão) e para evitar que uma interfira na operação da outra, apenas o mestre atua com restauração de frequência, e os escravos atuam com compartilhamento de potência reativa. Ainda assim, todas as malhas são implementadas em todos os inversores para permitir que qualquer um deles possa atuar como mestre ou escravo.

A. Compartilhamento de potência ativa

Na malha de compartilhamento de potência ativa, a potência de cada uma das UPS conectadas ao barramento infinito é somada e a partir do valor total (N) é calculado o valor médio (que pode ser ponderado quando consideram-se UPS de potências nominais distintas). O valor médio é então utilizado como referência de potência para cada uma das UPS. O erro entre a potência de referência e a potência processada pela respectiva UPS é compensado pelo controlador $G_{CP}(z)$ e a ação de controle δ_P é somada à amplitude da referência de tensão dos inversores. Apesar de o inversor mestre não atuar com a malha de compartilhamento, à medida em que os escravos sejam capazes de rastrear a referência de potência, o inversor mestre naturalmente irá processar a potência restante, de forma que o compartilhamento seja atingido.

B. Compartilhamento de potência reativa

Na malha de compartilhamento de potência reativa, novamente o valor de referência para as UPS é obtido a partir do valor médio das potências reativas dos inversores conectados ao barramento CA de saída. O erro entre o valor de referência e a potência reativa processada pelo respectivo inversor é compensado pelo controlador $G_{CQ}(z)$ e a ação de controle δ_Q é somada à frequência da referência de tensão das UPS. Mais uma vez, apesar de o inversor mestre não atuar com essa malha, o compartilhamento de potência é naturalmente obtido a partir do controle secundário dos escravos.

C. Restauração de tensão

A malha de restauração de tensão é utilizada para compensar o desvio de amplitude causado pelo método droop. O valor médio é comparado com o valor nominal da amplitude da rede e o erro é compensado pelo controlador $G_{CE}(z)$. A ação de controle δ_E é então somada à amplitude da referência de tensão do inversor. Apenas o inversor mestre atua com essa malha e, à medida em que o mestre restaura a tensão do sistema, os inversores escravos tendem a fazer o mesmo, devido a presença da malha de compartilhamento de potência ativa.

D. Restauração de frequência

A malha de restauração de frequência atua apenas no modo *backup*, uma vez que durante o modo normal de operação os inversores devem estar sincronizados com a rede elétrica, de modo que a frequência é definida pela própria rede. A malha de restauração de frequência funciona de forma semelhante à de tensão, onde o valor médio é comparado com o valor nominal e o erro é compensado pelo controlador $G_{C\omega}(z)$, que gera uma ação de controle δ_ω , que é somada à frequência da referência de tensão das UPS. Apenas o inversor mestre atua com malha de restauração de frequência, e os escravos tendem a seguir o mestre devido a presença da malha de compartilhamento de potência reativa.

4 Resultados Hardware-in-the-loop

Para validação da estrutura de controle proposta foram obtidos resultados em uma plataforma *hardware-in-the-loop* modelo Typhoon HIL402. Foram implementadas duas UPS de mesmas especificações, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1. O sistema de controle é implementado em dois processadores digitais de sinais (DSPs) de modelo TMS320F28335. O circuito de potência das UPS (inversores) são emulados no *hardware-in-the-loop*. Para as malhas do controle secundário foram utilizados compensadores do tipo PI. Os parâmetros do sistema de controle primário e secundário são apresentados na Tabela 2. Vale salientar que no nível hierárquico 0 foram utilizados 4 controladores ressonantes, sintonizados na frequência fundamental e harmônicos ímpares até a sétima ordem. Os resultados apresentados são referentes ao modo normal de operação.

Tabela 1. Especificação das UPS

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de pico nominal	E^*	180 V
Frequência nominal	ω^*	377 rad/s
Potência aparente nominal	S^*	10 kVA
Tensão do barramento CC	V_{CC}	450 V
Frequência de comutação	f_{sw}	15 kHz
Frequência de amostragem	f_s	15 kHz
Indutor do filtro de saída	L_f	240 μ H
Capacitor do filtro de saída	C_f	160 μ F

Tabela 2. Parâmetros dos controladores

Parâmetro	Símbolo	Valor
Controle primário		
Coefficiente droop de tensão	n_d	0,0009
Coefficiente droop de frequência	m_d	0,000188
Resistência virtual	R_d	0,5 Ω
Controle secundário		
<i>PIs das malhas de sincronismo</i>		
Ganho proporcional	k_p	0,027925
Ganho integral	k_i	0,054831
<i>PI da malha de restauração de tensão</i>		
Ganho proporcional	k_p	0,2
Ganho integral	k_i	37,5
<i>PI da malha de restauração de frequência</i>		
Ganho proporcional	k_p	0,0005
Ganho integral	k_i	0,0375
<i>PI da malha de compartilhamento de potência ativa</i>		
Ganho proporcional	k_p	0,001
Ganho integral	k_i	0,75
<i>PI da malha de compartilhamento de potência reativa</i>		
Ganho proporcional	k_p	0,005
Ganho integral	k_i	0,0075

A Figura 6 mostra a tensão nos capacitores e correntes nos indutores do filtro de saída dos inversores para a operação com carga linear resistiva à potência nominal. A tensão RMS nos inversores é de 122,8 V e o fator de distorção de tensão na carga é de 0,1%.

A Figura 7 mostra a operação dos inversores utilizando-se uma carga não linear padrão da norma IEC 62040-3 à potência nominal. A carga consiste em um retificador em ponte completa com um filtro capacitivo. Para este caso, a tensão RMS se manteve em 122,8 V e o fator de distorção da tensão na carga em 4,27%, atendendo a limitação de 8% da norma.

Para avaliar o desempenho dinâmico do sistema é aplicado um degrau de carga linear resistiva de 20% para 100% do valor nominal. A Figura 8 mostra as formas de onda dos inversores durante a aplicação do degrau. Vale salientar que o degrau é aplicado no pico da tensão do inversor, caracterizando o pior caso.

Na Figura 9 é mostrado as potências ativa e reativa dos dois inversores para o sistema operando com carga linear à potência nominal. Pode-se observar que as curvas dos inversores estão sobrepostas, o que mostra que o compartilhamento é realizado de forma precisa.

De forma semelhante, a Figura 10 mostra as potências ativa e reativa das UPS para o sistema operando com carga não-linear a potência nominal. Novamente, percebe-se que o bom compartilhamento de potência entre os inversores.

Por fim, a Figura 11 mostra as potências dos inversores durante a aplicação de um degrau de carga linear de 20% para 100% da potência nominal do sistema. Observa-se que a potência é adequadamente compartilhada. O inversor mestre (curva em vermelho) opera na função de restauração de tensão,

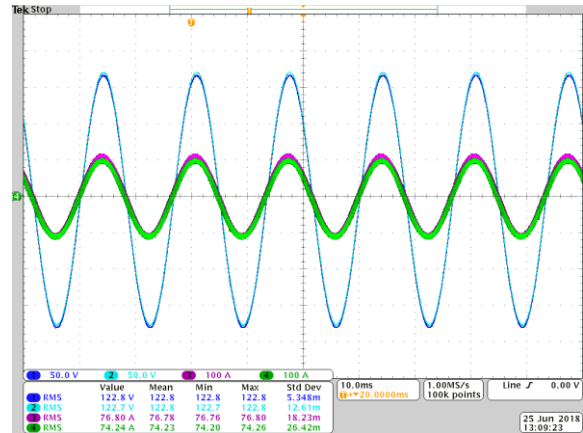


Figura 6. Formas de onda dos inversores para operação com carga linear à potência nominal. Tensão (azul claro) e corrente (magenta) do inversor 1 e tensão (azul escuro) e corrente (verde) do inversor 2.

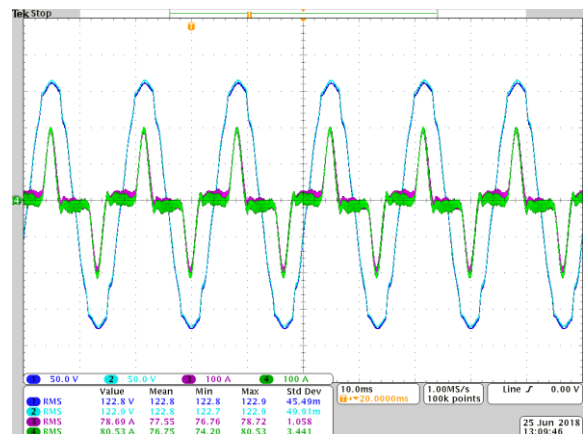


Figura 7. Formas de onda dos inversores para operação com carga não-linear à potência nominal. Tensão (azul claro) e corrente (magenta) do inversor 1 e tensão (azul escuro) e corrente (verde) do inversor 2.

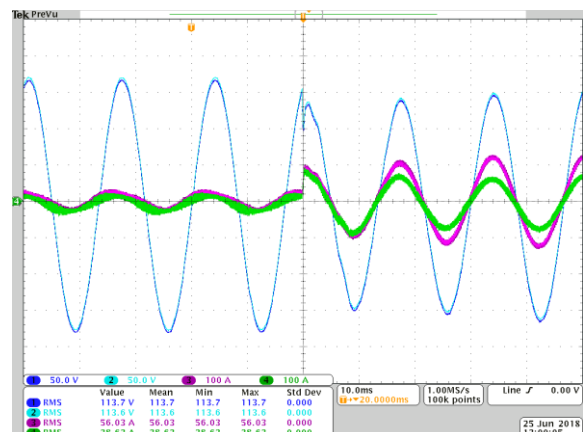


Figura 8. Formas de onda dos inversores para degrau de carga linear (20% – 100%). Tensão (azul claro) e corrente (magenta) do inversor 1 e tensão (azul escuro) e corrente (verde) do inversor 2.

aumentando a tensão de referência para compensar o desvio ocasionado pelo droop. Durante o transitório, o inversor mestre apresenta uma potência mais elevada que o escravo, e, conforme a malha de equilíbrio de potência do escravo passa a atuar, a potência total é adequadamente compartilhada pelos dois inversores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, Typhoon HIL Inc. e grupo LEGRAND pelo suporte a este projeto.

Referências Bibliográficas

- Golestan, S.; Monfared, M.; Guerrero, J. M. Second Order Generalized Integrator Based Reference Current Generation Method for Single-Phase Shunt Active Power Filters Under Adverse Grid Conditions. *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference – PEDSTC 2013*, vol. 4, pp. 510-517, 2013.
- Guerrero, J. M.; Matas, J.; Vicuña, L. G.; Castilla, M. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids — A General Approach Towards Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 1, p. 158-172, Jan. 2011.
- Guerrero, J. M.; Matas, J.; Vicuña, L. G.; Castilla, M.; Miret, J. Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 2, p. 994-1004, Apr. 2007.
- Han, Y.; Matas, J.; Shen, P.; Zhao, X.; Guerrero, J. M.. Control Strategies for Islanded Microgrid Using Enhanced Hierarchical Control Structure With Multiple Current-Loop Damping Schemes. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 8, n. 3, p. 1139-1153, May 2017.
- Koch, G. G.; Venturini, W. A.; Jank, H.; Bisogno, F. E.; Martins, M. L. S.; Pinheiro, H.; Montagner, V. F. Controle de Tensão de UPS com Estabilidade Robusta à Incerteza Paramétrica na Carga. In *procs. of CBA 2016*, 2016.
- Lin, L.; Ma, H.; Bai, Z. An Improved Proportional Load-Sharing Strategy for Meshed Parallel Inverters System With Complex Impedances, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 32, n. 9, p. 5338-7351, Sept. 2017.
- Shafiee, Q.; Guerrero, J. M.; Vasquez, J. C.; Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*. V. 29, n. 2, p. 1018-1031, Feb. 2014.
- Typhoon HIL Real-time Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation platform, Typhoon HIL Control Center. [Online]. Disponível: www.typhoon-hil.com.
- Uninterruptible Power Systems (UPS) - Part 3: Method of Specifying the Performance and Test Requirements, IEC Standard 62040-3, Mar. 1999.
- Yao, W.; Chen, M.; Matas, J.; Guerrero, J. M.; Qian, Z.-H. 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*, v. 58, n. 2, p. 576-588, Feb. 2011.
- Zhong, K. C. Robust Droop Controller for Accurate Proportional Load Sharing Among Inverters Operated in Parallel. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 4, p. 1281-1290, Apr. 2013.
- Zhong, Q. C.; Hornik T. *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*, First Edition, John Wiley & Sons, Ltd. 2013.
- Zhong, Q. C.; Zeng, Y. Universal Droop Control of Inverters With Different Types of Output Impedance, *IEEE Access*, v. 4, p. 702-712, Feb. 2016.

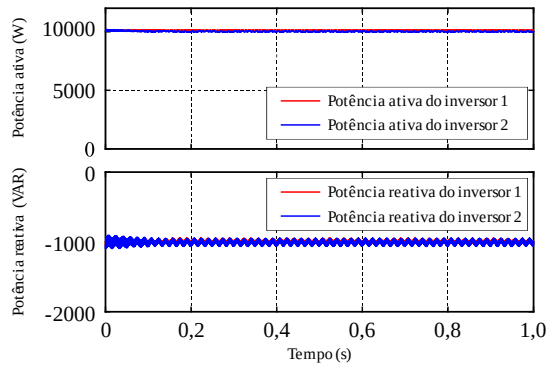


Figura 9. Potência ativa e reativa dos inversores para operação com carga linear à potência nominal.

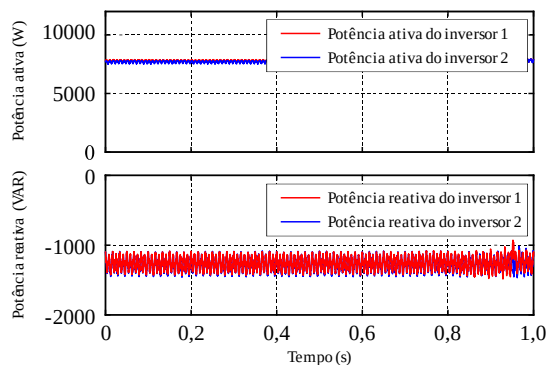


Figura 10. Potência ativa e reativa dos inversores para operação com carga não-linear à potência nominal.

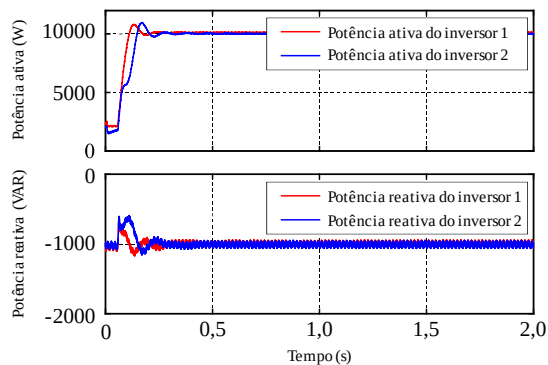


Figura 11. Potência ativa e reativa dos inversores para degrau de carga linear (20% – 100%).

5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma estratégia de controle hierárquico distribuído aplicado ao paralelismo de UPS monofásicas. A estratégia permite que o sistema permaneça operacional mesmo no caso de falha de uma das UPS e, ainda que ocorra uma falha no sistema de comunicação, as UPS permanecem operando em paralelo, a partir do nível hierárquico 1. Os resultados obtidos na plataforma *hardware-in-the-loop* mostram o bom desempenho do sistema de controle, onde as potências ativa e reativa dos inversores foram compartilhadas de forma precisa e a amplitude e frequência da tensão adequadamente restauradas.