

CIRCUITO AUXILIAR PARA EQUALIZAÇÃO DE TENSÃO E REDUÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS NO CONDUTOR DE NEUTRO DE UMA UPS TRIFÁSICA SEM TRANSFORMADOR

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

*Grupo de Eletrônica de Potência e Controle – GEPOC
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Santa Maria, RS, Brasil

HIQUEJANK@GMAIL.COM, WILLIAMVENTURINI@GMAIL.COM, MARIOLSM@GMAIL.COM,
FBISOGNO@GMAIL.COM, HUMBERTO.CTLAB.UFSM.BR@GMAIL.COM

Abstract— This paper proposes an active method to balance the voltage and to reduce low-order current harmonics on the DC bus of a three-phase back-to-back transformerless UPS. These low frequency harmonic components pass through the DC bus via the neutral conductor, which is connected to the center-tapped split capacitors. Due to the presence of unbalanced or non-linear loads, expressive harmonic currents goes through the neutral conductor, which in turn, requires larger DC bus capacitance to keep the bus voltage ripple below a given specified value. Besides, it increases the capacitors losses and reduces its lifespan. The proposed method consists of using an auxiliary circuit composed of a switching branch and an inductor, whose function is to reduce the harmonic content through the neutral conductor and to balance the DC bus voltages. Experimental results confirm the operation of the proposed circuit.

Keywords— Neutral Current, DC Bus, UPS.

Resumo— Este artigo propõe um método ativo para equilibrar a tensão e reduzir correntes harmônicas de baixa frequência no barramento CC de uma UPS trifásica sem transformador. Essas componentes harmônicas de baixa frequência ocorrem no barramento através do condutor de neutro que é conectado ao ponto central do divisor capacitivo. Devido à conexão de cargas desequilibradas ou não-lineares, valores expressivos de corrente de neutro ocorrerão, o que acaba por aumentar o valor necessário para a capacitância de barramento dada uma ondulação de tensão especificada, além de elevar suas perdas e degradar a vida útil dos capacitores. O método proposto consiste na utilização de um circuito auxiliar composto por um braço de interruptores e um indutor, cuja função é reduzir o conteúdo harmônico proveniente das correntes que circulam pelo condutor de neutro, além de assegurar o equilíbrio das tensões do barramento CC. Resultados experimentais comprovam o funcionamento do circuito proposto.

Palavras-chave— Corrente de neutro, Barramento CC, UPS

1 Introdução

Nos últimos anos, Fontes Ininterruptas de Energia (do inglês *uninterruptible power supplies* - UPSs) de dupla conversão isoladas vêm sendo substituídas por UPSs sem transformador, pois estas apresentam características como menor custo e maior eficiência (Sato et al., 2010) (Lei et al., 2011).

Para assegurar a conexão comum entre o neutro da rede e da carga pode-se definir duas configurações básicas para o barramento CC das UPSs sem transformador: a UPS com potencial fixo para o ponto neutro, e a UPS com modulação do potencial do ponto neutro (Tracy et al., 2005) (Kim et al., 2008) (Ibrahim et al., 2009). Na primeira, a conexão de neutro é obtida por meio de um barramento capacitivo com ponto central, sendo ilustrada na Figura 1 (a). Neste circuito a tensão do condutor de neutro é fixada no potencial de referência (0 V). Nesta topologia, cada fase do retificador e do inversor pode ser analisada como um circuito monofásico em meia ponte (UPS-HB). Como os capacitores de barramento possuem valores significativamente elevados, a conexão de cada uma das fases ao ponto central assegura o seu desacoplamento. Este fato permite que a modelagem e o sistema de controle desta UPS sejam significativamente simplificados, uma vez que os controladores podem ser projetados para operação individual, ou seja, por fase.

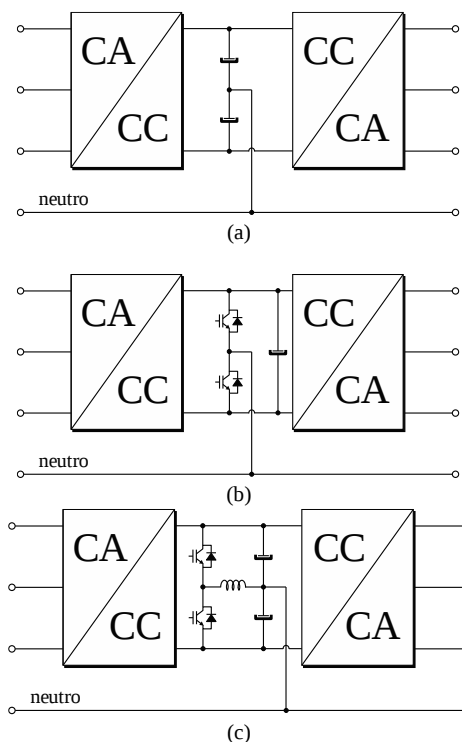


Figura 1. Configurações de UPS trifásicas sem transformador: (a) barramento com ponto central; (b) barramento simples; (c) barramento com ponto central e circuito auxiliar proposto.

Na segunda configuração, ilustrada na Figura 1 (b), o barramento é composto por um único capacitor, sendo o potencial de neutro modulado por meio de um braço de interruptores. O braço onde a conexão de neutro está ligada é compartilhado pelas três fases do retificador e as três fases do inversor. Deste modo, cada fase pode ser vista como um circuito monofásico em ponte completa (UPS-FB). Todavia o compartilhamento deste braço comum acopla as fases, o que impede o controle independente dos conversores retificador e inversor.

Uma das principais consequências da não utilização do transformador de saída é a existência de correntes de neutro que, invariavelmente, devem ser manipuladas pelo barramento nas UPSs-HB ou pelo braço auxiliar nas UPSs-FB (Tracy et al., 2005) (Kim et al., 2008) (Ibrahim et al., 2009) (Zhang et al., 2002) (Zhang, 1998).

A corrente de neutro que ocorre devido à presença de cargas desequilibradas ou não-lineares, acaba por circular nos capacitores de barramento da UPS-HB, de forma que expressivos valores de capacitância sejam necessários para manter o barramento CC com uma ondulação de tensão pequena (sabendo ainda que na aplicação em UPSs, a capacitância do barramento é limitada pelo *hold-up time* (Loeffler, 2009), (Lai et al., 2014)). Na configuração de UPS-FB, onde o neutro é modulado por um braço de interruptores, a corrente de neutro passa a circular por este braço e não pelo capacitor do barramento CC, o que proporciona uma capacitância menor para o barramento CC em comparação com a configuração anterior (Zhang et al., 2002) (Zhang, 1998). Por outro lado, esse braço de interruptores é responsável por modular o potencial do condutor de neutro para as três fases de ambos, retificador e inversor, aumentando consideravelmente os esforços de corrente deste braço e a complexidade do sistema de controle dos conversores desta topologia.

De forma a aliar os benefícios de ambas as configurações, ou seja, possibilitar o desacoplamento das fases sem introduzir um excessivo conteúdo harmônico aos capacitores de barramento, este trabalho propõe a utilização de um circuito auxiliar que consiste de um braço de interruptores e um indutor, cuja função é reduzir o conteúdo harmônico proveniente das correntes que circulam pelo condutor de neutro, além de assegurar o equilíbrio das tensões no barramento CC. O circuito é ilustrado na Figura 1(c).

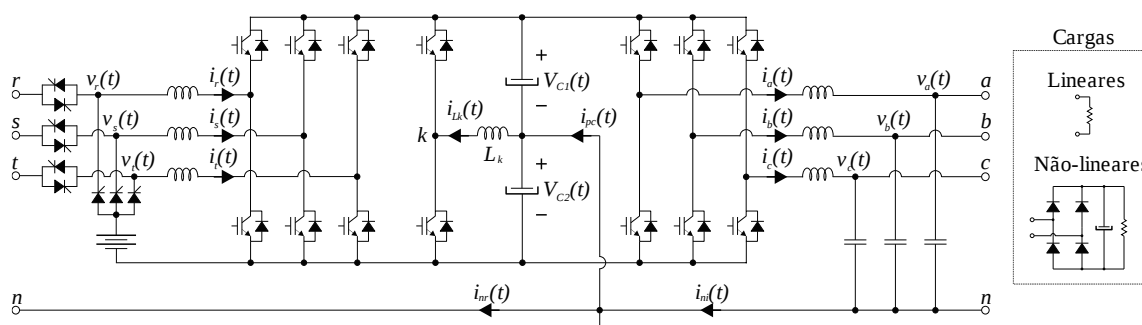


Figura 2. UPS trifásica sem transformador.

2 Descrição do sistema

2.1 Descrição da UPS proposta

A topologia de UPS em estudo se caracteriza por apresentar um retificador e inversor PWM (*pulse width modulation*), ambos a quatro fios e operando com modulação a dois níveis de tensão, além do barramento CC com ponto central conectado ao neutro comum entre entrada e saída. O diagrama do circuito da UPS é mostrado na Figura 2.

O retificador PWM a quatro fios atua como conversor pré-regulador. Durante o modo normal de operação da UPS, o retificador atua de forma a regular a tensão total do barramento CC a partir da tensão da rede elétrica, realizando a correção do fator de potência. Durante o modo bateria, o retificador atua regulando a tensão total do barramento CC operando como descarregador do banco de baterias.

O inversor PWM a quatro fios é responsável por alimentar a carga crítica tanto em modo normal como bateria, sintetizando tensões de saída senoidais com baixos níveis de distorção harmônica.

O circuito auxiliar será descrito detalhadamente na seção 2.3.

2.2 Corrente nos capacitores do barramento CC

Para analisar as correntes no barramento CC a operação do retificador será desprezada, uma vez que a operação com correção de fator de potência com correntes equilibradas, garante que apenas ondulações nos componentes múltiplos da frequência de comutação ocorram (harmônicos de alta frequência) (Kieferndorf et al., 2004).

Já do ponto de vista do inversor, as correntes de fase ocorrem em função das cargas conectadas à UPS. Dessa forma, tomando em consideração o circuito da Figura 2 e desprezando a operação do retificador, através das Leis de Kirchhoff pode-se definir as correntes nos capacitores do barramento conforme a equação (1).

$$\begin{aligned} i_{C1} &= -\frac{1}{V_{CC}} (V_{C2} (i_{ni} + i_{Lk}) + P_{fL} + P_{inv}) \\ i_{C2} &= -\frac{1}{V_{CC}} (-V_{C1} (i_{ni} + i_{Lk}) + P_{fL} + P_{inv}) \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

$$\begin{aligned} i_{ni} &= i_a + i_b + i_c \\ P_{inv} &= P_a + P_b + P_c \\ P_{fL} &= L_o \left(i_a \frac{di_a}{dt} + i_b \frac{di_b}{dt} + i_c \frac{di_c}{dt} \right) + L_k i_{Lk} \frac{di_{Lk}}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

Percebe-se a partir de (1) e (2) que as correntes dos capacitores de barramento dependem de três termos distintos: potência instantânea do inversor (P_{inv}); potência instantânea associada as indutâncias dos filtros (P_{fL}); corrente de neutro do inversor (i_{ni}) e do circuito auxiliar (i_{Lk}).

A aplicação em UPS permite que se utilizem diferentes tipos de cargas, lineares ou não-lineares, equilibradas ou desequilibradas. Dessa forma, uma carga genérica é considerada, conforme equação (3).

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_{a-n} \sin(n\omega t) \\ i_b(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_{b-n} \sin\left(n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ i_c(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_{c-n} \sin\left(n\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

onde n representa a ordem do harmônico e I_{a-n} , I_{b-n} e I_{c-n} a amplitude das correntes no harmônico de ordem n .

Desprezando-se as perdas do inversor e sabendo que a potência instantânea por fase é dada por (4).

$$\begin{aligned} p_a(t) &= V_a(t) i_a(t) \\ p_b(t) &= V_b(t) i_b(t) \\ p_c(t) &= V_c(t) i_c(t) \end{aligned} \quad (4)$$

A partir de (4) e (3), assumindo que a tensão de saída é puramente senoidal e desprezando a defasagem entre a tensão e corrente, pode-se escrever a potência instantânea em cada uma das fases do inversor conforme (5).

$$\begin{aligned} P_a(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} V_a I_{a-n} \left(\cos((n-1)\omega t) - \cos((n+1)\omega t) \right) \\ P_b(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} V_b I_{b-n} \left[\cos\left((n-1)\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \dots \right. \\ &\quad \left. - \cos\left((n+1)\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right] \\ P_c(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} V_c I_{c-n} \left[\cos\left((n-1)\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \dots \right. \\ &\quad \left. - \cos\left((n+1)\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Percebe-se a partir de (5) que, em cada fase, cada componente harmônica de corrente resulta em uma ondulação no barramento em suas bandas laterais, de forma que um harmônico de ordem $n-1$ e um harmônico de ordem $n+1$ ocorram.

A partir de (5), (2) e (1), sabendo-se que no sistema trifásico as três fases são defasadas de 120° , percebe-se que, os componentes harmônicos não múltiplos de três se cancelam para cargas equilibradas. Já os componentes harmônicos múltiplos de três estão em fase e, dessa forma, somam-se e aparecem no barramento mesmo para condições de equilíbrio. Em caso de desequilíbrio de carga, os componentes não múltiplos de três deixam de se anular, de forma que também aparecem no barramento CC.

Considerando-se ainda as equações (3), (2) e (1), percebe-se que para a condição de correntes de fase equilibradas, os harmônicos não múltiplos de três são defasados de 120° e, como possuem mesma amplitude, são cancelados no condutor de neutro. Já os harmônicos ímpares múltiplos de três encontram-se em fase e, portanto, não se cancelam. Novamente, para casos de desequilíbrio de carga, os componentes não múltiplos de três não se anulam no condutor de neutro.

A partir da equação (1) percebe-se ainda que as ondulações da corrente de neutro do inversor acabam causando ondulação nas correntes dos capacitores de barramento e, conseqüentemente, na tensão do barramento. Com isso, expressivos valores de capacitância são necessários para manter o barramento CC com uma ondulação de tensão desejável. Adicionalmente, essa corrente, que ocorre em baixas frequências, acaba degradando a vida útil desses capacitores.

Conforme pode-se observar na equação (1), é possível reduzir a ondulação de corrente nos capacitores do barramento CC que ocorrem em função da corrente de neutro do inversor através do controle da corrente do circuito auxiliar. Utilizando-se como referência para a corrente i_{Lk} a própria corrente de neutro do inversor, o termo $V_{C2}(i_{ni} + i_{Lk})$ pode ser cancelado.

2.3 Descrição do circuito auxiliar

Esta seção descreve o funcionamento do circuito utilizado para reduzir as ondulações de corrente no ponto central do divisor capacitivo. O circuito auxiliar é composto por um braço de interruptores, que operam de forma complementar, e um indutor para limitar a ondulação de corrente deste braço.

Além disso, o circuito é responsável por equalizar a tensão dos capacitores do barramento CC, uma vez que a conexão de cargas desequilibradas e a presença de não idealidades no circuito podem tornar essas tensões desbalanceadas. Este desequilíbrio acabaria por prejudicar a operação do conversor CC/CA de saída e, conseqüentemente, a tensão fornecida à carga crítica.

O circuito apresenta dois estágios de operação. No primeiro estágio, quando o interruptor S_{k1} é acionado, a tensão no nó k é igual a V_{C1} , aplicando uma tensão positiva e magnetizando o indutor L_k . Nesta etapa, a corrente i_{Lk} varia de acordo com (6).

$$\Delta i_{Lk} = \frac{V_{C1}}{L_k} d_k T_{sw} \quad (6)$$

onde d_k é a razão cíclica do interruptor S_{k1} e T_{sw} é a frequência de comutação.

No segundo estágio, o interruptor S_{k2} é acionado, aplicando no nó k uma tensão negativa igual a V_{C2} , fazendo com que o indutor L_k seja desmagnetizado. Nesse momento, a corrente i_{Lk} apresenta um comportamento de acordo com a expressão (7)

$$\Delta i_{Lk} = -\frac{V_{C2}}{L_k} (1 - d_k) T_{sw} \quad (7)$$

2.4 Sistema de controle do circuito auxiliar

Para o controle do circuito auxiliar, um sistema digital com duas malhas é proposto, sendo uma malha interna rápida para o controle da corrente e uma malha externa mais lenta para o controle da tensão diferencial. O sistema de controle é ilustrado na Figura 3.

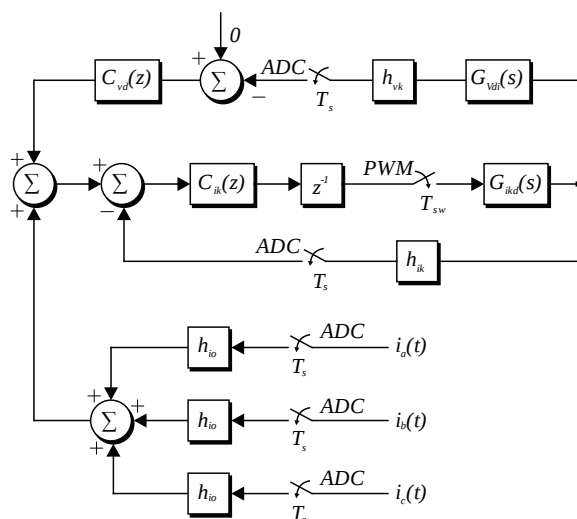


Figura 3. Sistema de controle do circuito auxiliar

A malha externa mais lenta é responsável por realizar o equilíbrio das tensões dos capacitores do barramento CC. Ela compara a diferença das tensões dos capacitores com uma referência nula, gerando um erro que é compensado para compor uma parcela da referência da malha interna. Essa parcela representa um nível CC de corrente responsável por equilibrar a tensão dos capacitores.

A referência de corrente da malha interna é composta pela parcela contínua gerada pela malha de tensão e outra parcela alternada, a qual é obtida a partir da corrente de neutro ocorrida devido a operação do inversor durante a alimentação de cargas desbalanceadas ou não-lineares. Dessa forma, as três correntes de saída do inversor são somadas para se obter a parcela alternada da referência de corrente.

A malha interna de corrente é responsável por controlar diretamente a razão cíclica dos interruptores

e, dessa forma, deve apresentar uma banda passante elevada, sendo que a referência irá possuir componentes em frequências múltiplas da fundamental.

A amostragem de todas as variáveis é realizada uma vez a cada período de comutação. Além disso, como a atualização da razão cíclica não é realizada imediatamente após a amostragem das variáveis, é considerado o atraso de transporte na discretização do modelo dinâmico da corrente pela razão cíclica. O atraso inserido é referente a um período de amostragem, sendo este representado pelo bloco z^{-1} na Figura 3.

Os modelos dinâmicos da corrente em função da razão cíclica e da tensão diferencial em função da corrente são apresentados em (8) e (9), respectivamente.

$$G_{ikd}(s) = \frac{\hat{I}_{Lk}(s)}{\hat{D}_{Lk}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_k s} \quad (8)$$

$$G_{vdi}(s) = \frac{\hat{V}_D(s)}{\hat{I}_{Lk}(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (9)$$

onde $C = C_1 = C_2$ e R é uma resistência equivalente conectada em paralelo a cada um dos capacitores de barramento e é dada conforme (10).

$$R = \frac{V_{CC}^2}{2P} \quad (10)$$

sendo P a potência ativa total da UPS.

Para a malha interna de corrente foi utilizado um compensador do tipo proporcional, de forma a ajustar a velocidade de resposta da malha, sendo a banda passante definida em uma década abaixo da frequência de comutação.

Na malha externa de tensão foi utilizado um compensador do tipo proporcional-integral de forma a eliminar o erro de tensão diferencial em regime permanente.

Os principais parâmetros da UPS avaliada são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da UPS.

Parâmetro	Valor
Tensão eficaz de entrada e saída (V_{in} , V_o)	127 V
Tensão do barramento (V_{CC})	430 V
Potência aparente de saída (S_o)	20 kVA
Frequência de comutação (f_{sw})	15 kHz
Frequência de amostragem (f_s)	15 kHz
Indutor do filtro de entrada (L_i)	450 μ H
Indutor do filtro de saída (L_o)	333 μ H
Indutor do filtro do circuito auxiliar (L_k)	333 μ H
Capacitores do barramento (C_1 , C_2)	12 mF
Capacitores do filtro de saída (C_o)	100 μ F

A Figura 4 apresenta o diagrama de bode do sistema compensado em malha aberta, para ambas as malhas de controle. As funções de transferência discretas

dos controladores de corrente e tensão são apresentadas em (11) e (12), respectivamente.

$$C_{ik}(z) = -0,0069 \quad (11)$$

$$C_{vd}(z) = \frac{5,433z - 5,207}{z + 1} \quad (12)$$

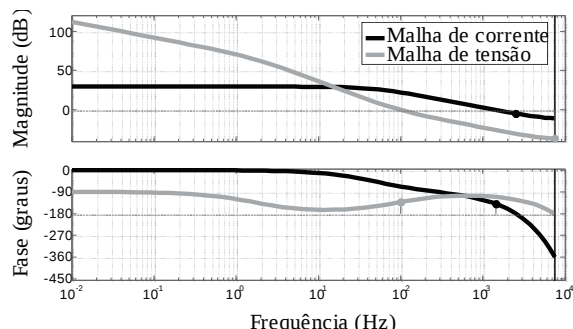


Figura 4. Diagrama de bode do sistema compensado em malha aberta.

4 Resultados Experimentais

Para avaliar o sistema proposto foram obtidos resultados experimentais a partir de um protótipo da UPS implementado em laboratório, sendo este ilustrado na Figura 5. Os parâmetros utilizados para a planta são os mesmos apresentados na Tabela 1.

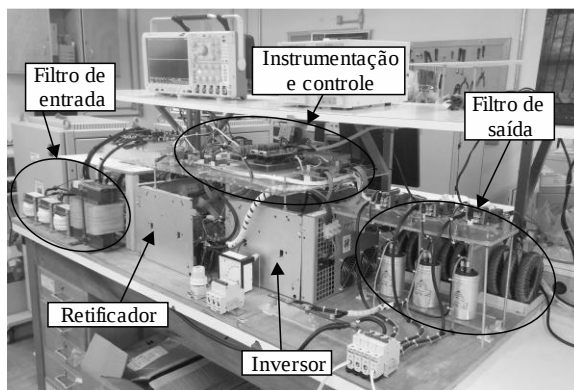


Figura 5. Protótipo implementado.

A Figura 6 apresenta a tensão nos capacitores do barramento CC e a corrente no circuito auxiliar para a condição de desequilíbrio das tensões do barramento CC. Neste ensaio a UPS opera a vazio e o desequilíbrio de tensão é ocasionado pelas não idealidades do circuito. Inicialmente, o circuito auxiliar opera com razão cíclica fixa de 50% e, após passado um período de tempo, o sistema de controle de equilíbrio de tensão é acionado.

Conforme pode-se observar na Figura 6, quando o sistema de controle da tensão diferencial do circuito auxiliar passa a operar, as tensões dos capacitores do barramento CC convergem e mantêm-se equilibradas.

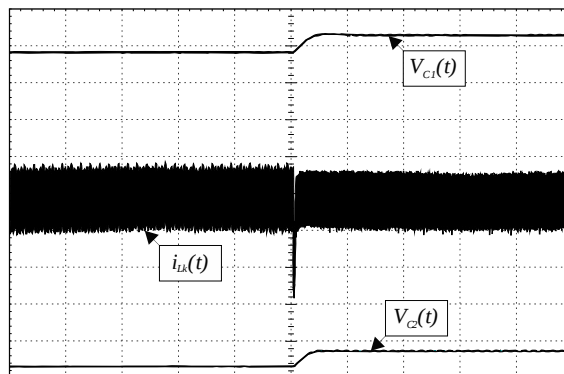


Figura 6. Resultado experimental. Desequilíbrio no barramento: tensões do barramento CC (50 V/div) e corrente no circuito auxiliar (5 A/div). Escala de tempo de 100 ms/div.

Na Figura 7 são apresentadas as tensões nos capacitores do barramento CC, a corrente no ponto central do divisor capacitivo e a corrente no indutor do circuito auxiliar. Neste ensaio foi utilizada uma condição de carga linear desequilibrada, onde uma das fases opera à potência nominal e as demais permanecem a vazio.

Inicialmente, na Figura 7(a), o circuito auxiliar opera apenas com a função de equilíbrio de tensão e posteriormente a função de redução da ondulação de corrente é acionada. A Figura 7(b) mostra um zoom na operação sem redução de corrente e a Figura 7(c) um zoom na operação com redução de corrente nos capacitores do barramento CC.

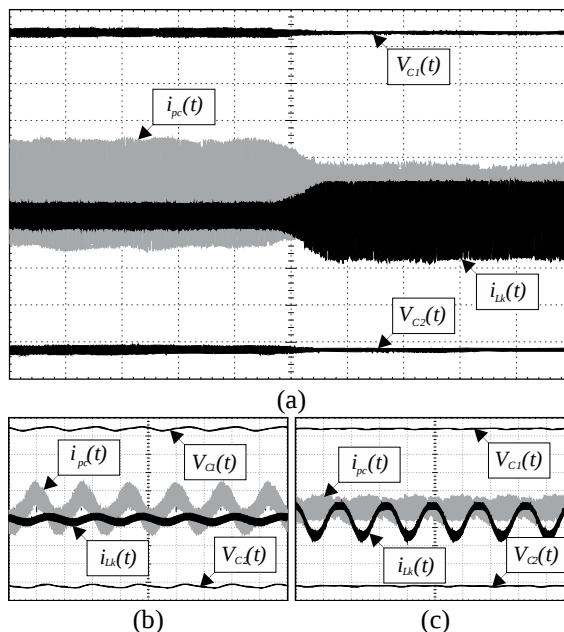


Figura 7. Resultado experimental. Carga linear desequilibrada. (a) Operação sem e com redução; escala de tempo 1 s/div. (b) Zoom na operação sem redução; escala de tempo 10 ms/div. (c) Zoom na operação com redução; escala de tempo 10 ms/div. Tensões do barramento CC (50 V/div), corrente no ponto central do divisor capacitivo e corrente do circuito auxiliar (50 A/div).

Comparando o sistema com e sem a presença do circuito auxiliar operando com função de redução da corrente, pode-se observar uma redução de 62% na

ondulação de tensão dos capacitores de barramento, com a utilização do circuito. As correntes harmônicas de baixa frequência do ponto central do divisor capacitivo também foram reduzidas, o que pode ser melhor observado na Figura 8.

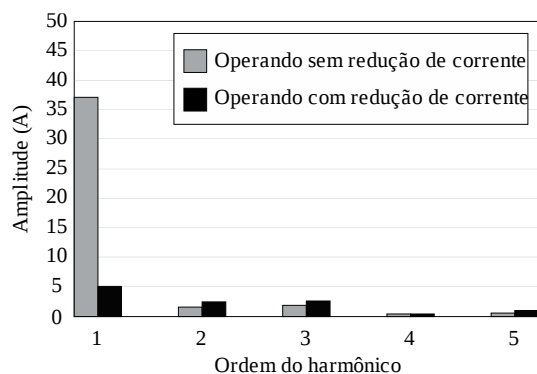


Figura 8. Resultado experimental. Espectro harmônico da corrente no ponto central do divisor capacitivo para desequilíbrio de carga linear com circuito auxiliar operando com e sem a função de redução de corrente.

5 Conclusão

Neste trabalho foi proposta a utilização de um circuito auxiliar para realizar a equalização de tensão e redução de correntes harmônicas no ponto central do divisor capacitivo do barramento CC de uma UPS trifásica sem transformador. Resultados experimentais mostram que com a utilização deste circuito é obtida uma redução significativa da ondulação de tensão, bem como da corrente no ponto central do divisor capacitivo e nos capacitores de barramento para a situação de carga analisada (linear e desequilibrada). Apesar de se obter uma redução na ondulação das tensões do barramento CC, a tensão de saída da UPS não deve ser impactada, uma vez que, mesmo para a operação do sistema sem o filtro de corrente, a ondulação de tensão já apresentava um valor reduzido devido ao elevado valor de capacitância necessário para atender ao requisito de *hold-up time*. No entanto, a distorção harmônica das correntes de entrada deve ser reduzida, uma vez que a tensão do barramento CC é realimentada nas malhas de controle dessas correntes. Além disso, pode-se proporcionar uma redução na degradação dos capacitores eletrolíticos do barramento CC, uma vez que essa degradação ocorre em função do aumento da temperatura de funcionamento dos capacitores, que por sua vez, acontece devido a ondulação de corrente, principalmente em baixas frequências.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- Ibrahim, G., Üstüntepe, B., Hava, A. M. (2009). Modern Transformerless Uninterruptible Power Supply (UPS) Systems. In Procs. of ELECO, pp. 316- 320.
- Kieferndorf, F. D., Förster, M., Lipo, T. A. (2004). Reduction of DC-Bus Capacitor Ripple Current With PAM/PWM Converter. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 2, pp. 607- 614.
- Kim, E.-H., Kwon, J.-M., Kwon, B.-H. (2008). Transformerless Three-phase On-line UPS with High Performance. IET Power Electronics, Vol. 2, No 2, pp. 103- 112.
- Lai, Y.-S., Su Z.-J., C, W.-S. (2014). New Hybrid Control Technique to Improve Light Load Efficiency While Meeting the Hold-up Time Requirement for Two-Stage Server Power. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 9, pp. 4763- 4775.
- Lei, H., Xiao, E., Xiong, J., Lin, X., Kang, Y. (2011). Modeling and Analysis of Three-Phase Four-Leg PWM Boost-Type Rectifier for Double Conversion Transformerless UPS. In Procs. of IECON, pp. 1444- 1449.
- Loeffler, C. (2009). What your IT equipment needs from a UPS. Whitepaper.
- Sato, E. K., Kinoshita, M., Sanada, K. (2010). Double DC-DC Converter for Uninterruptible Power Supply Applications. In Proceedings of IPEC, pp. 635- 642.
- Tracy, J. G., Pfitzer, H. E. (2005). Achieving high efficiency in a double conversion transformerless UPS. in Proceedings of IECON.
- Zhang, R. (1998). High performance power converter systems for nonlinear and unbalanced load/source. PHD Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State, Virginia.
- Zhang, R., Prasad, V. H., Boroyevich, D. (2002). Three-Dimensional Space Vector Modulation for Four-Leg Voltage-Source Converters. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 3, pp. 314- 326.