

SISTEMA DE ENERGIA ININTERRUPTA TRIFÁSICO BASEADO NO CONVERSOR DE NOVE CHAVES

Anderson Lopes, Marcelo C. Cavalcanti, Gustavo M. S. Azevedo, Leonardo R. Limongi, Márcio Gomes
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Elétrica, Recife – PE, Brasil
E-mail: anderson.lopes@garanhuns.ifpe.edu.br, marcelo.ccavalcanti,gustavo.msazevedo,leonardo.limongi@ufpe.br@ufpe.br

Resumo – Neste trabalho é apresentada uma topologia de conversor usando como base o conversor de nove chaves, sendo utilizada como uma alternativa para fontes ininterruptas de energia na eletrônica de potência, vislumbrando uma melhor qualidade de energia para o sistema elétrico. Esta topologia é aplicada como uma alternativa aos conversores convencionais (back-to-back), tendo em vista a diminuição da quantidade de chaves semicondutoras. O conversor proposto tem dois terminais trifásicos, lado série sem conexão com o neutro e lado paralelo composto com o neutro, em que ambos os terminais funcionam como filtros para a realização do condicionamento de energia. O lado série funciona como uma fonte de corrente senoidal e o lado paralelo trabalha como um fonte de tensão senoidal. A topologia faz uso de controladores proporcional mais multi-ressonantes (PMR) para atuar no controle das correntes de entrada e tensões de saída. Resultados experimentais comprovam a efetividade do sistema proposto.

Palavras-chave – Conversores, Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia.

THREE-PHASE UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY BASED ON THE NINE SWITCH CONVERTER

Abstract – This work presents a converter topology based on the nine-switch converter, being used as an alternative to uninterruptible power supplies in the power electronics, envisioning a better quality of energy for the electrical system. This topology is applied as an alternative to conventional converters (back-to-back), in order to reduce the number of semiconductor switches. The proposed converter has two three-phase terminals composed or not with the neutral, series and shunt sides, in which both terminals work as filters to perform the energy conditioning. The series side acts as a sinusoidal current source and the shunt side acts as a sinusoidal voltage source. The topology makes use of PI controllers (proportional-integral) to control the input currents and output voltages. Experimental results prove the effectiveness of the proposed system.

Keywords – Converters, Power Electronics, Power Quality.

I. INTRODUÇÃO

Para evitar as paradas de algum processo industrial por interrupções ou falhas no suprimento de energia é necessário dispor de um equipamento capaz de suprir a carga durante estes eventos. Esses equipamentos são dotados de armazenamento de energia (geralmente um banco de baterias) e são capazes de fornecer energia em condições adversas, sendo chamados de fontes ininterruptas de energia, ou *Uninterruptible Power Supply* (UPS).

Atualmente, as cargas são muito sensíveis à qualidade do fornecimento de energia. Assim, as UPS tornam-se cada vez mais necessárias em instalações elétricas. Suas principais aplicações são para cargas vitais, como por exemplo, instalações médicas, sistemas de armazenamento de dados, sistemas informatizados, equipamentos de emergência, telecomunicações, processamento industrial e sistemas de gerenciamentos *online* [1],[2].

As UPS constituídas apenas por conversores estáticos são chamadas de UPS estáticas e, segundo as normas IEC 62040-3 [3], NBR 15014 [4] e NBR 15204 [5], são classificadas em três tipos conforme a maneira de interação com a rede elétrica e quanto à independência em tensão e frequência da rede:

- UPS *offline*, espera passiva ou de simples conversão: são dependentes da tensão e frequência da rede;
- UPS *online* ou de dupla conversão [6]: são independentes da tensão e frequência da rede;
- UPS *line-interactive* (UPS-LI) ou interativa com a rede: são independentes da tensão, mas dependentes da frequência da rede.

As UPS-LI surgiram na década de 1990 como um compromisso entre a UPS *online*, mais cara e de melhor desempenho, e a UPS *offline*, menos dispendiosa e de baixo desempenho [7]. No início, sua gama de aplicações estava na faixa de baixa e média potência, entretanto, atualmente, as novas UPS-LI têm aplicações em instalações de até poucos MW [8]–[11].

Na Figura 1.a, é mostrado uma UPS-LI típica composta por uma chave estática, um indutor série, um conversor bidirecional e um banco de baterias [1]. No modo de operação *standby*, quando a rede elétrica está dentro dos parâmetros predefinidos, a rede alimenta a carga diretamente e o conversor bidirecional desempenha o papel de carregador para o conjunto de baterias. Nesse modo de operação, o conversor também é capaz de regular a tensão da carga ou melhorar o fator de potência de entrada da UPS dependendo do tipo de controle escolhido [8],[10],[12]. No modo de operação *backup*, quando a rede elétrica não está disponível, o conversor bidirecional alimenta a carga com a energia acumulada nas baterias e a chave estática fica aberta para evitar energizar a

Manuscript received 11/16/2020; first revision 02/25/2021; accepted for publication 04/09/2021, by recommendation of Editor Demercil de Souza Oliveira Jr. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2021.2.0065>.

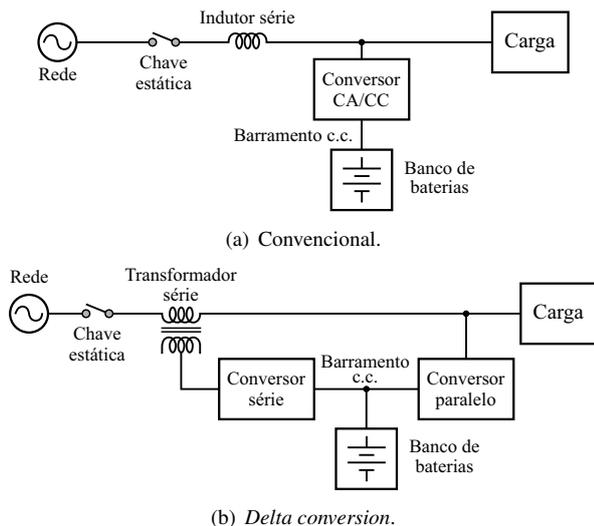


Fig. 1. Topologias de UPS-LI.

rede. A duração desse modo (tempo de *backup*) é predefinida ou vai até a rede ser restabelecida dentro da faixa de tolerância.

As principais vantagens da UPS-LI são simplicidade, alta confiabilidade, menor custo e maior rendimento em comparação com as UPS *online*. Uma desvantagem desta topologia de UPS-LI é a baixa capacidade de regulação da tensão da carga ou do fator de potência [1], [10].

Outra topologia de UPS-LI foi proposta em [8], [10] com a capacidade de regular a tensão na carga e obter fator de potência unitário ao mesmo tempo. Essa topologia é chamada de UPS *delta conversion* e é formada por um transformador série, dois conversores bidirecionais, um banco de baterias e uma chave estática, conforme mostrado na Figura 1.b. O conversor série processa apenas uma pequena parcela da potência de carga, portanto é comum adotar uma potência nominal para este conversor de apenas 20% da potência da UPS [10]. O conversor paralelo é projetado para 100% da potência da UPS, já que ele deve atender toda a demanda de carga no modo *backup*. Geralmente, o conversor série é controlado em corrente para garantir corrente de entrada senoidal e em fase com a tensão de entrada e o conversor paralelo é controlado em tensão para garantir que a carga tenha uma tensão senoidal com amplitude constante.

No modo de operação *standby*, a maior parte da energia é fornecida diretamente da rede para a carga e apenas uma pequena parte desta potência, geralmente até 15%, flui através dos conversores série e paralelo. Essa potência é necessária para compensar as diferenças entre as tensões da rede e carga, e para tornar o fator de potência de entrada unitário. Uma vez que a maior parte da energia flui sem qualquer conversão entre rede e carga, a eficiência dessa topologia é relativamente alta [10].

No modo de operação *backup*, a bateria fornece energia para a carga através do conversor paralelo e o conversor série fica desabilitado e com a chave estática aberta. Quando a tensão da rede é restabelecida, o conversor paralelo sincroniza sua tensão com a da rede e a chave estática é fechada e a UPS retorna para o modo *standby*. Nos dois modos de operação, o conversor paralelo é controlado em tensão e, portanto, não há tempo de transferência entre os modos de operação.

A versão trifásica para redes elétricas a quatro fios da UPS *delta conversion* foi proposta em [13] e [14] e usam conversores série e paralelo com quatro braços. Porém, se a corrente de neutro for integralmente suprida pelo conversor paralelo, o conversor série não precisa ter quatro braços para dar um caminho para a corrente de neutro e ele se tornará, naturalmente, uma alta impedância para a corrente de neutro. Percebendo isso, em [15] é proposta uma UPS *delta conversion* com conversor série de três braços e conversor paralelo de quatro braços.

Neste artigo, é proposta uma nova topologia de UPS-LI *delta conversion* para redes trifásicas a quatro fios com apenas 11 chaves. O conversor série e paralelo é formado por um conversor CA/CA de nove chaves [16] em conjunto com um braço convencional (de duas chaves) para prover a corrente de neutro do conversor paralelo. A principal vantagem da topologia é a redução do número de chaves (de 14 para 11) sem comprometer a funcionalidade da UPS. O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II é apresentada a topologia da UPS proposta, seu princípio de funcionamento e controle; na Seção III são mostrados os resultados experimentais e na Seção IV as conclusões deste trabalho.

II. UPS BASEADA NO CONVERSOR NOVE CHAVES

Na Figura 2 é mostrada a UPS-LI *delta conversion* proposta. O conversor série é formado pela unidade superior de um inversor nove chaves (*Nine Switch Inverter – NSI*) [16], um filtro L_1C_1 e os transformadores série. Note que os enrolamentos do lado do conversor estão conectados em Y, então não é possível circular corrente homopolar (corrente de neutro) em nenhum dos lados dos transformadores (os transformadores formam uma alta impedância de sequência zero). Consequentemente, os transformadores isolam as componentes homopolares de tensão, de forma que possíveis tensões de sequência zero da rede não aparecem do lado da carga e vice-versa. O conversor paralelo é formado pela unidade inferior do NSI, um braço adicional (com duas chaves) para o neutro e um filtro L_2C_2 . Note que a corrente de neutro da carga é suprida integralmente por este conversor. O barramento CC do conversor é alimentado pelo banco de baterias e a conexão/desconexão com a rede é feita pelas chaves estáticas.

O NSI pode ser dividido em duas unidades (superior e inferior), cada uma com uma saída trifásica a três fios. As chaves superiores e inferiores são comutadas como em um inversor de dois níveis convencional, enquanto as chaves intermediárias são comutadas conforme a operação lógica *ou exclusivo* entre as chaves superiores e inferiores. Assim, evita-se que o barramento CC seja curto-circuitado [16].

A tensão de qualquer saída superior deve ser sempre maior que a tensão de qualquer saída inferior. Portanto, as tensões de referência de cada saída devem ser deslocadas e limitadas conforme sugerido no exemplo da Figura 3. Então, a amplitude máxima é dividida em duas bandas sem sobreposições, uma para a unidade superior (M_s) e uma para a unidade inferior (M_i). Portanto, a tensão do barramento CC é compartilhada na proporção M_sV_{dc} para a unidade superior e M_iV_{dc} para a unidade inferior.

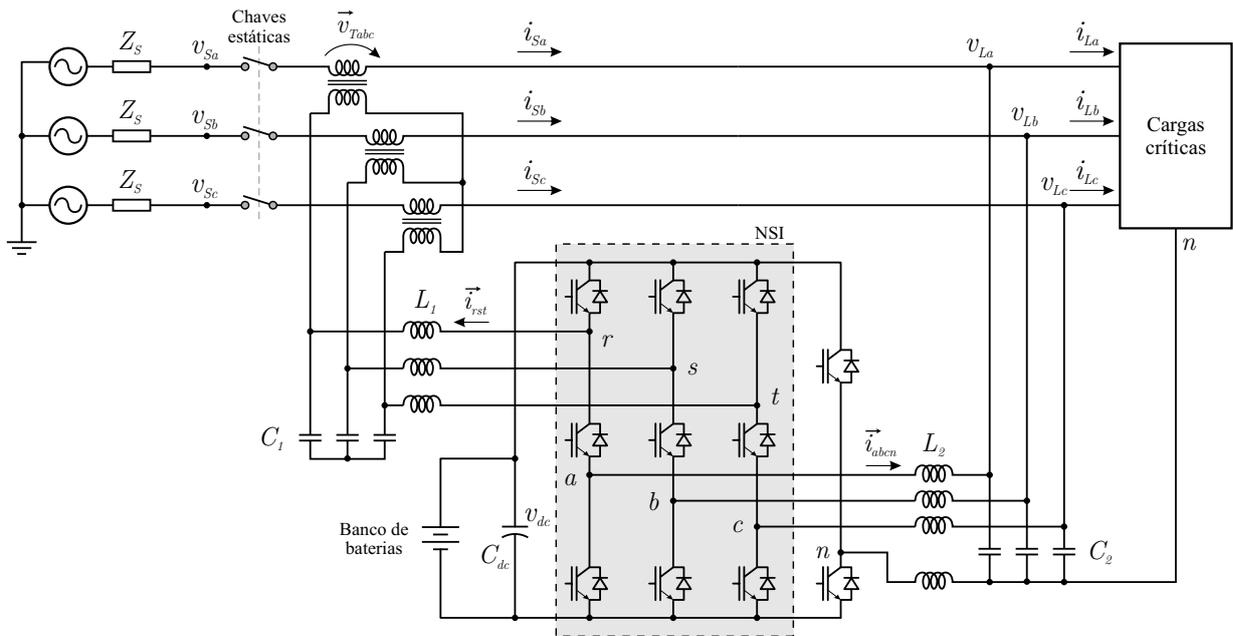


Fig. 2. Nova proposta de UPS-LI *delta conversion* baseada no NSI.

O conversor série precisa de uma tensão pequena para impor a corrente da rede porque as tensões da rede e carga são próximas e a impedância destas malhas é pequena. Assim, a banda para a unidade superior pode ser pequena, em torno de 20%. Por outro lado, o conversor paralelo precisa sintetizar a tensão da carga, logo, a parcela de tensão correspondente à banda da unidade inferior ($M_i V_{dc}$) deve ser suficiente para sintetizar a tensão de carga. Deste modo, $M_i V_{dc}$ deve ser igual ao valor de tensão do barramento c.c. da topologia convencional de UPS-LI. Portanto, na topologia proposta, a tensão do barramento c.c. deve ser de 20% maior do que na topologia convencional para atender a necessidade de tensão da unidade superior.

Cada unidade do NSI pode usar a modulação por largura de pulso vetorial (*Space Vector Pulse Width Modulation – SVPWM*) baseada em portadora. Nesse modulador, uma componente de sequência zero é adicionada à cada uma das três fases para ampliar a utilização do barramento c.c.. De forma geral, essa componente de sequência zero pode ser

obtida por

$$u_0 = -\frac{1}{2} [\max(v_1^*, v_2^*, v_3^*) + \min(v_1^*, v_2^*, v_3^*)], \quad (1)$$

em que v_1^* , v_2^* e v_3^* são as tensões de referência de cada fase e as funções *max* e *min* retornam os valores máximos e mínimos entre seus argumentos, respectivamente.

Após a adição do sinal de sequência zero, o próximo passo é normalizar as tensões de referência por v_{dc} , já que a portadora triangular está na faixa de 0 a 1 (Figura 3). Finalmente, os ciclos de trabalho das chaves são obtidos deslocando as referências de acordo com a banda M_i . Assim, para a unidade superior, os ciclos de trabalho são

$$\begin{aligned} d_r &= \frac{v_r^* + u_{0rst}}{v_{dc}} + \frac{(1 + M_i)}{2}, \\ d_s &= \frac{v_s^* + u_{0rst}}{v_{dc}} + \frac{(1 + M_i)}{2}, \\ d_t &= \frac{v_t^* + u_{0rst}}{v_{dc}} + \frac{(1 + M_i)}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

em que u_{0rst} é calculado usando (1) considerando as tensões de referência do conversor série. De forma similar, para a unidade inferior, os ciclos de trabalho são calculados por

$$\begin{aligned} d_a &= \frac{v_a^* + u_{0abc}}{v_{dc}} + \frac{M_i}{2}, \\ d_b &= \frac{v_b^* + u_{0abc}}{v_{dc}} + \frac{M_i}{2}, \\ d_c &= \frac{v_c^* + u_{0abc}}{v_{dc}} + \frac{M_i}{2}, \\ d_n &= \frac{u_{0abc}}{v_{dc}} + \frac{M_i}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

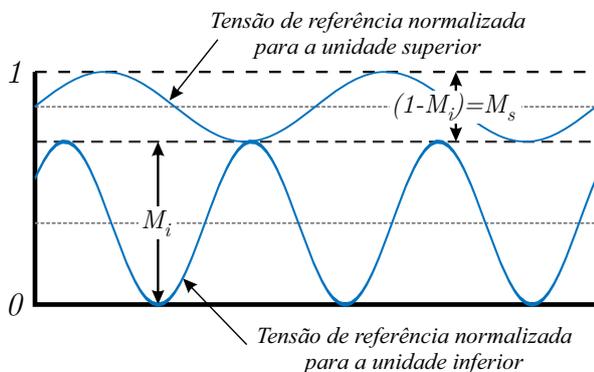


Fig. 3. Exemplo do compartilhamento de tensão do barramento c.c. entre as unidades superior e inferior do NSI.

de trabalho d_n é usado para comandar as chaves do braço do neutro. Observa-se que d_n possui apenas a componente de frequência zero u_{0abc} que também é obtida usando (1).

A. Controle do Conversor Paralelo

O conversor paralelo é controlado em tensão independentemente do modo de operação da UPS (standby ou backup). O controle é feito em referencial estacionário $\alpha\beta 0$, conforme mostrado na Figura 4. Como o conversor mais o SVPWM se comportam como uma fonte de tensão controlada, a tensão de referência $\vec{v}_{\alpha\beta 0}^*$ é enviada diretamente para o modulador (ação *feedforward*). Porém, esta ação *feedforward* não garante que a tensão de saída seja igual a referência devido à queda de tensão no filtro L_2C_2 e as não linearidades (queda de tensão nas chaves e tempo morto). Para compensar essa diferença, também é adicionado um controle em malha fechada em que a referência $\vec{v}_{\alpha\beta 0}^*$ é comparada com a tensão de saída $\vec{v}_{L\alpha\beta 0}$ (tensão sobre a carga) resultando no erro $\vec{e}_{\alpha\beta 0}$. Para minimizar esse erro é utilizado um controlador proporcional mais multi-ressonantes (PMR). A função de transferência deste controlador é

$$C_v(s) = k_{pv} + \sum_h \frac{k_{rvh} 2s}{s^2 + (h\omega_1)^2}, \quad (4)$$

em que k_{pv} é o ganho proporcional, k_{rvh} é o ganho ressonante para a componente harmônica de ordem h e ω_1 é a frequência angular da componente fundamental. Embora a tensão de referência seja senoidal, a tensão de saída do conversor pode conter harmônicos quando alimentando cargas não lineares. Assim, foi escolhido usar múltiplos controladores ressonantes sintonizados na frequência fundamental e nas harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem. Estas harmônicas foram escolhidas porque são as predominantes do retificador monofásico a diodos com barramento c.c. capacitivo (carga padrão determinada pela norma [3]).

A tensão de referência é gerada a partir da tensão da rede de forma que a tensão sobre a carga tenha a mesma componente de sequência positiva da tensão da rede (amplitude e fase). Desta forma, o conversor série injetará a menor tensão possível apenas para controlar a corrente da rede.

Na Figura 5, é mostrado o diagrama de blocos do sistema de geração da tensão de referência. A tensão de sequência positiva da rede, $\vec{v}_{s\alpha\beta}^+$, é obtida com o *Dual Second Order Generalised Integrator - Frequency-Locked Loop* (DSOGI-FLL) proposto em [17]. Essa tensão é transformada para o referencial síncrono dq e um controlador Proporcional-Integral (PI) é usado para alinhar o eixo d com o vetor espacial $\vec{v}_{s\alpha\beta}^+$ como no *Synchronous Reference Frame - Phase-Locked Loop* (SRF-PLL) tradicional [17]. Contudo, esse funcionamento só deve ocorrer quando a UPS estiver conectada à rede (modo *standby*), por isso há um conjunto de chaves seletoras para mudar o comportamento deste gerador de tensão de referência de acordo com o modo de operação da UPS. No modo *standby*, o gerador de referência se comporta como um SRF-PLL e $\vec{v}_{\alpha\beta 0}^* = \vec{v}_{s\alpha\beta}^+$. No modo *backup*, o gerador de referência se comporta como um oscilador e $\vec{v}_{\alpha\beta 0}^*$ é um vetor espacial de amplitude constante V_{nom} girando com frequência angular constante $\omega_{ff} = 2\pi 60 \text{ rad/s}$.

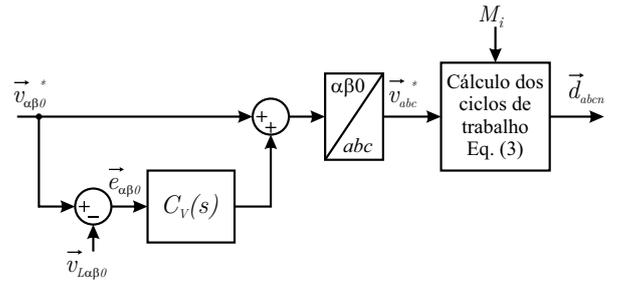


Fig. 4. Diagrama de blocos do controle de tensão do conversor paralelo.

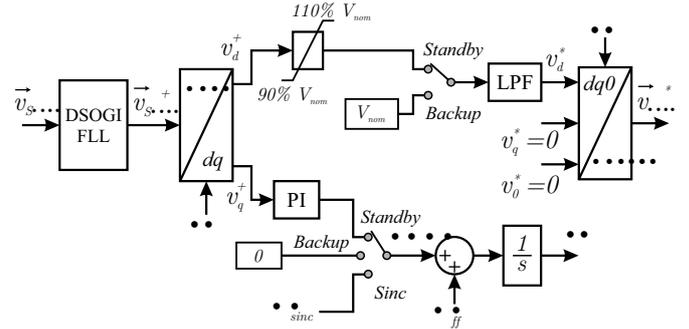


Fig. 5. Diagrama de blocos do sistema de geração da tensão de referência para o conversor paralelo.

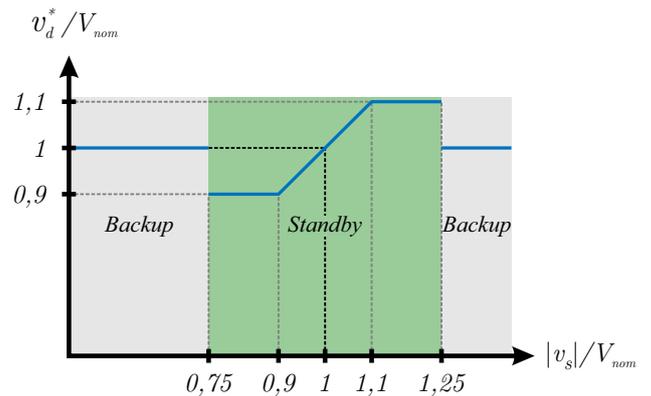


Fig. 6. Característica de compensação de tensão.

Note que a amplitude da tensão de referência $\vec{v}_{\alpha\beta 0}^*$ só é igual a amplitude de $\vec{v}_{s\alpha\beta}^+$ ($= v_d^+$) se esta estiver em uma faixa segura de operação para a carga (aqui considerado 90% a 110% de V_{nom}). Assim, o conversor série não precisa compensar tensão de sequência positiva. Se v_d^+ ultrapassa estes limites, mas ainda está em uma faixa que o conversor série é capaz de compensar, v_d^+ satura em 90% ou 110% de V_{nom} . Se esta faixa limite de compensação do conversor série é ultrapassada, a UPS se desconecta da rede e passa a operar no modo *backup*. Na Figura 6 é mostrada a relação entre a amplitude da tensão de referência e a da rede e os modos de operação da UPS. Para que as transições de amplitude de v_d^* sejam suaves durante as mudanças do modo de operação da UPS, um filtro passa baixas (Low-Pass Filter – LPF) é usado.

A posição *Sinc* (sincronismo) da chave seletora na Figura 5 é usada para acelerar o sincronismo da tensão da carga com a tensão da rede quando a UPS está na transição do modo *backup* para *standby*.

B. Controle do Conversor Série

O conversor série é controlado em corrente e funciona apenas quando a UPS está conectada à rede. A corrente controlada é a corrente do indutor de filtro do conversor série que é considerada aproximadamente igual a corrente da rede (transformador 1:1). Essa aproximação é válida porque a corrente de magnetização do transformador é muito baixa já que ele opera na maior parte do tempo com tensão inferior a nominal e a corrente no capacitor de filtro é predominantemente de alta frequência. Também é usado um controlador PMR em referencial $\alpha\beta$, conforme mostrado na Figura 7. Diferentemente do controle de tensão, neste caso a corrente homopolar não é considerada no controle porque ela não existe (os transformadores possuem alta impedância para a componente homopolar). A corrente de referência $\vec{i}_{\alpha\beta}^*$ é comparada com a corrente medida $\vec{i}_{\alpha\beta}$ e o erro passa pelo controlador PMR, cuja função de transferência é dada por

$$C_i(s) = k_{pi} + \sum_h \frac{k_{rih}2s}{s^2 + (h\omega_1)^2}, \quad (5)$$

em que k_{pi} é o ganho proporcional, k_{rih} é o ganho ressonante para a componente harmônica de ordem h . Neste caso, os ressonantes foram sintonizados nas harmônicas de ordem 5, 7, 11, 13 e 17. As harmônicas triplas não são consideradas porque são de sequência homopolar e são bloqueadas naturalmente pelos transformadores série. A tensão do transformador $v_{T\alpha\beta} = v_{L\alpha\beta} - v_{S\alpha\beta}$ é adicionada à saída do controlador para prover uma ação *feedforward* e melhorar a resposta do controle de corrente.

A corrente de referência é determinada de forma que a rede elétrica forneça a potência ativa que a carga demanda P_L mais uma eventual parcela de potência para carregar o banco de baterias P_{bat} . Para que esta corrente seja sempre senoidal e em fase com a tensão de sequência positiva da rede, é usada

$$\vec{i}_{\alpha\beta}^* = \frac{2}{3} \frac{\vec{v}_{S\alpha\beta}^+}{v_{S\alpha}^+{}^2 + v_{S\beta}^+{}^2} (P_L + P_{bat}). \quad (6)$$

Note que $\vec{v}_{S\alpha\beta}^+$ está disponível na saída do DSOGI-FLL (Figura 5). A potência média consumida pela carga (P_L) é obtida filtrando, com um LPF, a potência ativa instantânea da carga que é dada por

$$P_L = \frac{3}{2} (v_{\alpha}i_{L\alpha} + v_{\beta}i_{L\beta} + v_0i_{L0}). \quad (7)$$

É usado um filtro de primeira ordem com frequência de corte de apenas 2 Hz já que p_L pode conter componentes harmônicas de diferentes frequências quando alimentando cargas não lineares e/ou desequilibradas.

C. Gerenciamento dos Modos de Operação

O modo de operação da UPS depende da disponibilidade da rede elétrica. Uma forma fácil de obter essa informação é monitorando a tensão da rede. As três fases podem ser monitoradas ao mesmo tempo usando a amplitude do vetor espacial tensão normalizada por seu valor nominal, i.e., $v_{\Sigma} = \sqrt{v_{Sa}^2 + v_{Sb}^2 + v_{Sc}^2} / V_{nom}$. Na Figura 8 é mostrado o fluxograma

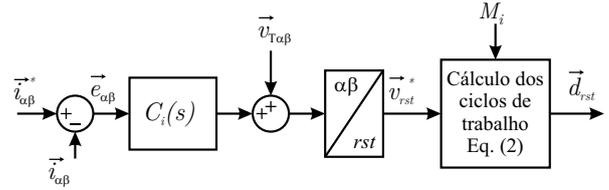


Fig. 7. Diagrama de blocos do controle de corrente do conversor série.

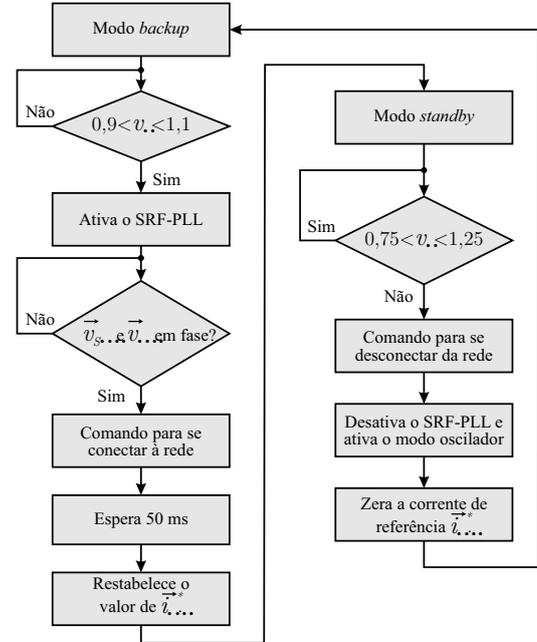


Fig. 8. Fluxograma do gerenciamento dos modos de operação.

do sistema que gerencia os modos de operação da UPS. Enquanto v_{Σ} estiver na faixa de 75% a 125% de V_{nom} , a UPS se mantém conectada à rede. Se essa faixa for violada, a UPS inicia o processo de desconexão que termina com a UPS no modo *backup*. Quando no modo *backup*, uma tentativa de conexão com a rede só ocorrerá quando v_{Σ} estiver em uma faixa mais estreita (90% a 110% de V_{nom}) e o comando para conectar-se à rede só é enviado quando as tensões da rede e carga estiverem em fase. A corrente da rede é restabelecida após 50 ms para garantir que a chave de conexão com a rede esteja fechada.

D. Estudo Comparativo

Um estudo comparativo entre a topologia proposta e a topologia tradicional (*back-to-back* [15]) é apresentado na Tabela I. Os esforços nas chaves estão associados à tensão e a corrente máximas nas chaves. Em termos de esforços de corrente a topologia proposta é vantajosa, pois a topologia proposta tem 11 chaves enquanto a topologia *back-to-back* tem 14 chaves, com as chaves suportando a mesma corrente máxima. Para a mesma tensão máxima de saída, a topologia proposta precisa ter uma tensão do barramento um pouco superior em relação a tensão da topologia *back-to-back* (aproximadamente 20%). Na simulação, realizada usando MATLAB/Simulink, as topologias *back-to-back* e proposta têm tensão do barramento de 420 V e 500 V, respectivamente. Com essa tensão do barramento a topologia *back-to-back*

teria aproximadamente 35 baterias de 12 V e a topologia proposta teria aproximadamente 41 baterias de 12 V. Por outro lado, a capacidade (Ah) do banco de baterias poderia ser a mesma, o que implica em necessidade de menor capacidade de cada bateria para o caso proposto, resultando em aproximadamente mesmo custo para os dois bancos de baterias. O número e o volume de magnéticos e capacitores são idênticos, pois os filtros LC de saída são os mesmos para as duas topologias. A complexidade de controle é similar, pois existe apenas diferença na implementação do PWM, mas que não aumenta a complexidade de controle da topologia proposta em relação à topologia *back-to-back*. Em termos de custo, as baterias, magnéticos e capacitores apresentam custos similares, conforme explicado anteriormente. Pode-se ainda estimar que em termos de semicondutores a topologia proposta (11 chaves) tem um custo inferior à topologia *back-to-back* (14 chaves), pois os barramentos de tensão com 420 V e 500 V implicam em um mesmo tipo de semicondutor (1200 V), enquanto as correntes nas chaves são idênticas.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma visão geral do protótipo construído é mostrada na Figura 9. O conversor de 11 chaves da Figura 2 foi construído usando os módulos IGBT SKM50GB123D da SEMIKRON. A plataforma de hardware usada para controlar o protótipo é um sistema modular da dSPACE que usa uma placa de processamento DS1005 e várias outras placas específicas para cada tarefa, ou seja, uma placa chamada DS5101 para geração PWM, uma placa DS2004 para conversão A/D, uma placa DS4002 I/O. Todos esses sistemas estão hospedados em gabinete de expansão dSpace PX10 que se comunica de forma bidirecional com o PC através de uma Placa DS817 usando fibras ópticas.

Os ensaios realizados foram baseados em uma UPS classe 3 da norma IEC 62040-3 [3], em que a UPS deve suportar afundamentos de tensões de 20% e sobretensões de 10% em regime permanente. Contudo, condições mais severas foram usadas para afundamentos, sobretensões, etc. Além disso, as transições entre os modos de operação foram testadas com a UPS-Li proposta conectada a uma carga não linear.

Os distúrbios da rede foram emulados com uma fonte CA trifásica programável modelo FCAT 3000-38-15 da Supplier®. A carga trifásica foi construída com três retificadores monofásicos ponte completa com barramento

TABELA I

Tabela Comparativa entre a UPS Proposta e a Topologia Tradicional com Conversor Back-to-Back

Parâmetro	Back-to-back	Proposta
Número de chaves	14	11
Relação barramento/tensão saída	3,3 (1pu)	3,9 (1,2pu)
Tensão máxima nas chaves, V	420 (1pu)	500 (1,2pu)
Corrente máxima nas chaves, A	50 (1pu)	50 (1pu)
Número mínimo de baterias	35 de 12V	41 de 12V
Capacidade do banco de baterias	Igual	
Complexidade de controle	Igual	
Número de magnético/capacitor	Igual	
Volume de magnético/capacitor	Igual	

c.c. capacitivo ($2350\mu F$) alimentando uma carga resistiva ($48,4\Omega$). A distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion* - THD) dessa carga é 121,05%. Outros parâmetros do sistema e da UPS são mostrados na Tabela II. A seguir são apresentadas seis condições de operação em que a UPS proposta foi avaliada.

A. Condição 1: Operação em Regime Permanente

Nesta condição de operação, a rede elétrica está com tensão nominal e a UPS no modo *standby* sem carregar a bateria ($P_{bat} = 0$). Na Figura 10 são apresentadas as tensões da carga v_{Labc} e as da rede v_{Sabc} . As THD das tensões da rede são 0,91%, 0,81% e 0,77% nas fases *a*, *b* e *c*, respectivamente,

TABELA II
Parâmetros do Protótipo

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão eficaz da rede, V_s	220	V
Indutância do filtro série, L_1	0,83	mH
Capacitância do filtro série, C_1	4,7	μF
Indutância do filtro paralelo, L_2	0,54	mH
Capacitância do filtro paralelo, C_2	22	μF
Capacitância do barramento c.c., C_{dc}	4.700	μF
Tensão de referência do barramento c.c.	500	V
CONTROLE DE TENSÃO - CONVERSOR PARALELO		
Ganho proporcional, k_{pv}	1	-
Ganho ressonante, k_{rv1}	1	s^{-1}
Ganhos ressonantes, $k_{rv(h=[3,5,7,9])}$	20	s^{-1}
CONTROLE DE CORRENTE - CONVERSOR SÉRIE		
Ganho proporcional, k_{pi}	5	Ω
Ganho ressonante, k_{ri1}	500	Ωs^{-1}
Ganhos ressonante, $k_{ri(h=[5,7,11,13,17])}$	200	Ωs^{-1}



Fig. 9. Visão geral do protótipo.

enquanto as THDs das tensões da carga são 4,93%, 4,53% e 4,75% para as fases *a*, *b* e *c*, respectivamente. As correntes de carga i_{Labc} , de neutro i_{Ln} , e as correntes da rede i_{Sabc} são mostradas na Figura 11. Observe que as correntes de carga i_{Labc} são bastante distorcidas e que a corrente de neutro i_{Ln} tem a mesma amplitude das correntes de fases. A THD da corrente da carga é superior a 121% (em todas as fases). Porém, as correntes da rede i_{Sabc} são praticamente senoidais e equilibradas. As THD destas correntes são 4,60%, 3,96% e 4,27% nas fases *a*, *b* e *c*, respectivamente. Esse resultado comprova a capacidade de compensação da corrente de carga da UPS-LI proposta.

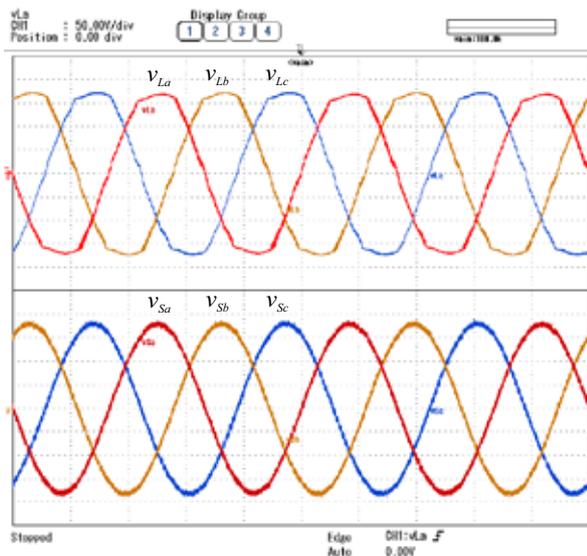


Fig. 10. Operação em regime permanente da UPS-LI proposta. De cima pra baixo (5ms/div): Tensões da carga v_{Labc} (50V/div); Tensões da rede v_{Sabc} (50V/div).

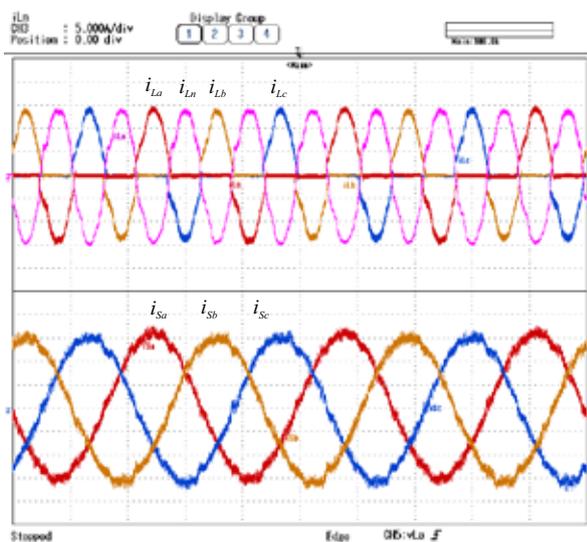


Fig. 11. Operação em regime permanente da UPS-LI proposta. De cima pra baixo (5ms/div): Correntes de carga i_{Labc} e corrente de neutro i_{Ln} (5A/div); Correntes da rede i_{Sabc} (2A/div).

B. Condição 2: Operação em Regime com Carga Desequilibrada

Nesta condição de operação, a carga é desequilibrada desconectando a carga da fase *a* e aumentando as cargas das fases *b* (resistência do lado c.c. reduzida pela metade) e *c* (resistência c.c. reduzida em 1/4). Os fatores de crista das correntes de carga são 2,73, 2,17 e 2,5 para as fases *b*, *c* e o neutro *n*, respectivamente. Dessa forma, a UPS passa a alimentar uma carga fortemente desequilibrada. Na Figura 12 são mostradas as tensões da carga v_{Labc} , correntes de carga i_{Labc} , as tensões da rede v_{Sabc} e as correntes da rede i_{Sabc} . As THD das correntes da rede i_{Sabc} são 2,73%, 2,61% e 2,77% nas fases *a*, *b* e *c*, respectivamente. Os resultados mostram a mitigação do conteúdo harmônico das corrente de carga, resultando em correntes da rede aproximadamente senoidais e equilibradas.

C. Condição 3: Operação de Desconexão da Rede

Neste teste é mostrado o resultado da desconexão da UPS da rede devido a uma falta de energia (simulada desconectando a fonte c.a. com um disjuntor). Assim, a UPS muda do modo *standby* para *backup*. Na Figura 13 são mostradas as tensões da carga v_{Labc} , correntes de carga i_{Labc} , as tensões da rede v_{Sabc} e as correntes da rede i_{Sabc} . É possível notar que as tensões da carga v_{Labc} e as correntes de carga i_{Labc} não sofrem perturbações significativas. As tensões da rede v_{Sabc} não vão imediatamente para zero por causa dos tempos de abertura dos contactores (usados no lugar das chaves estáticas) de aproximadamente 30 ms.

D. Condição 4: Operação de Reconexão com a Rede

Neste teste é mostrado a reconexão automática da UPS à rede elétrica quando é detectada que a rede está novamente

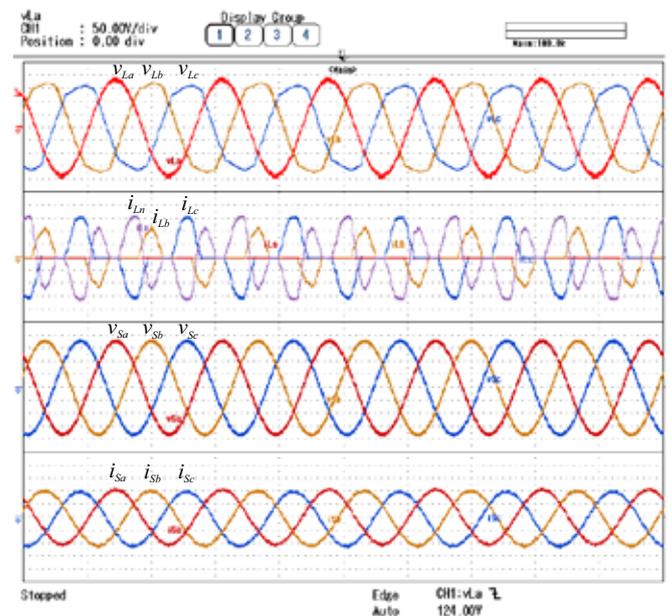


Fig. 12. Operação em regime permanente com carga desequilibrada da UPS-LI proposta. De cima pra baixo (10ms/div): Tensões da carga v_{Labc} (50V/div); Correntes da carga i_{Labc} e corrente de neutro i_{Ln} (10A/div); Tensões da rede v_{Sabc} (50V/div); Correntes da rede i_{Sabc} (10A/div).

disponível. O retorno da rede é simulado fechando o disjuntor que conecta o protótipo à fonte c.a. programável. É considerado o caso mais crítico, uma vez que a tensão da rede pode retornar completamente defasada da tensão da carga. O resultado da reconexão é mostrado na Figura 14. O degrau em azul representa o comando para fechar o contactor da UPS. Este contactor leva um pouco mais de 20 ms para fechar os contatos. Todo o processo de sincronização e conexão leva aproximadamente 600 ms.

E. Condição 5: Operação em Regime Transitório Durante Afundamento Trifásico

O comportamento da UPS é também avaliado durante variações de tensão de curta duração. Nessa condição, um afundamento de tensão trifásico de 20% com duração de três ciclos é programado na fonte trifásica. Note que este afundamento não é suficiente para provocar a desconexão da UPS (Figura 6), e a sua rápida operação garante a manutenção da tensão de alimentação à carga. Os resultados são mostrados na Figura 15. Como é possível verificar, as tensões da carga v_{Labc} não apresentam distúrbio significativo, mantendo-se dentro da faixa aceitável segundo as normas.

F. Condição 6: Operação em Regime Transitório Durante Sobretensão Trifásica

Nesta operação, o comportamento da UPS é avaliado durante uma sobretensão trifásica de 20% com duração de três ciclos. Os resultados são mostrados na Figura 16. Novamente, é observado que as tensões da carga v_{Labc} não apresentam distúrbios significativos.

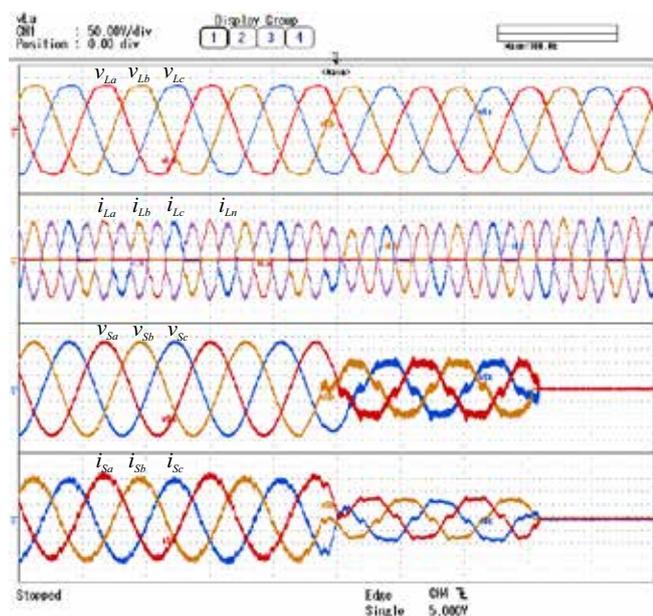


Fig. 13. Operação de desconexão com a rede da UPS-LI proposta. De cima pra baixo (10ms/div): Tensões da carga v_{Labc} (50V/div); Correntes da carga i_{Labc} e corrente de neutro i_{Ln} (5A/div); Tensões da rede v_{Sabc} (50V/div); Correntes da rede i_{Sabc} (2A/div).

IV. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RENDIMENTOS POR SIMULAÇÃO

As perdas da topologia proposta (Figura 2) foram analisadas por simulação e comparadas com uma UPS

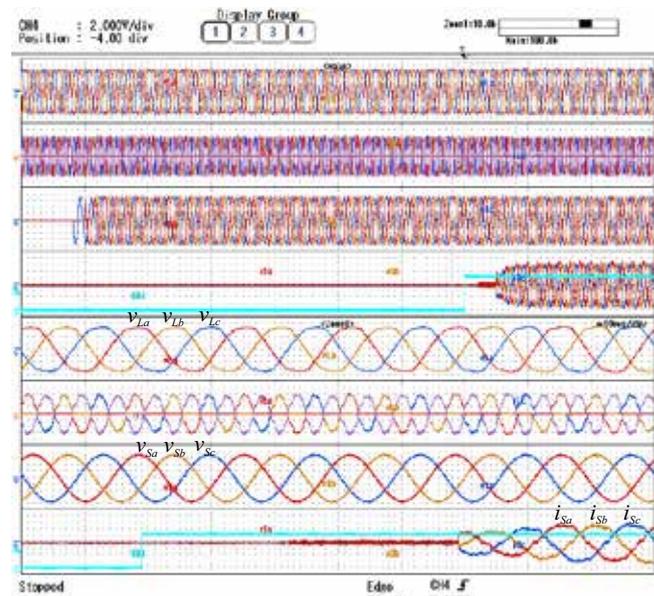


Fig. 14. Operação de reconexão com a rede da UPS-LI proposta. De cima pra baixo: Tensões da carga v_{Labc} (50V/div,100ms/div); Correntes da carga i_{Labc} e corrente de neutro i_{Ln} (5A/div,100ms/div); Tensões da rede v_{Sabc} (50V/div,100ms/div); Correntes da rede i_{Sabc} (2A/div,100ms/div); Zoom das tensões da carga v_{Labc} (50V/div,10ms/div); Zoom das correntes da carga i_{Labc} e corrente de neutro i_{Ln} (5A/div,10ms/div); Zoom das tensões da rede v_{Sabc} (50V/div,10ms/div); Zoom das correntes da rede i_{Sabc} (2A/div,10ms/div);

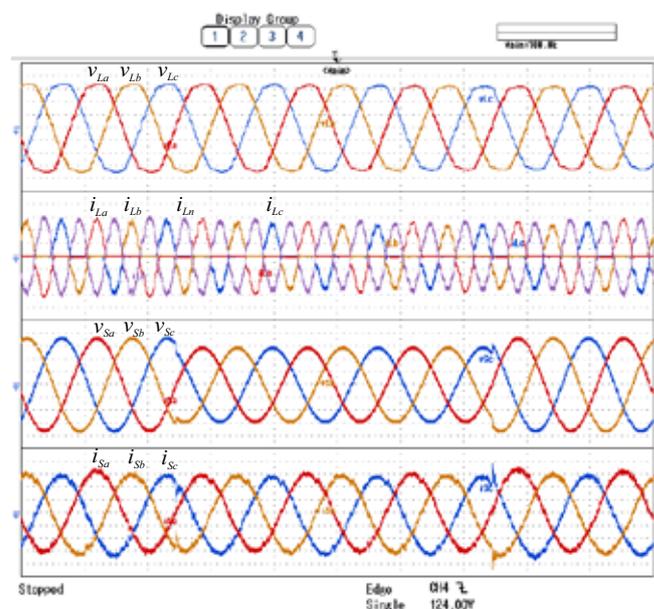


Fig. 15. Operação em regime transitório da UPS-LI proposta durante afundamento trifásico. De cima pra baixo (10ms/div): Tensões da carga v_{Labc} (50V/div); Correntes da carga i_{Labc} e corrente de neutro i_{Ln} (5A/div); Tensões da rede v_{Sabc} (50V/div); Correntes da rede i_{Sabc} (2A/div).

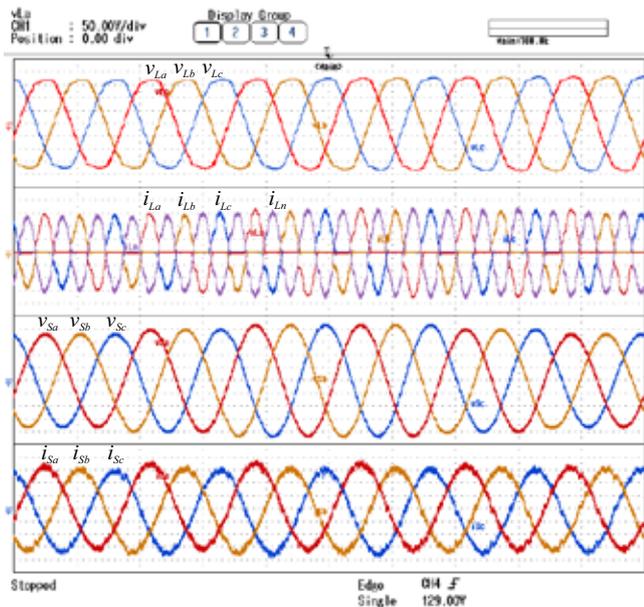


Fig. 16. Operação em regime transitório da UPS-LI proposta durante sobretensão trifásica. De cima pra baixo (10ms/div): Tensões da carga v_{Labc} (50V/div); Correntes da carga i_{Labc} e corrente de neutro i_{Ln} (5A/div); Tensões da rede v_{Sabc} (50V/div); Correntes da rede i_{Sabc} (2A/div).

implementada com a topologia *back-to-back* [15]. É sabido que as perdas produzidas nos conversores consistem principalmente de perdas por condução e perdas por chaveamento. Portanto, a técnica usada nesse artigo é baseada na seguinte metodologia [18]: construir tabelas de perdas a partir dos resultados fornecidos nas folhas de dados dos fabricantes; gerar equações de perdas; introduzir esses modelos em um programa de simulação para o conversor; e calcular as perdas para um ciclo completo de operação. Na Tabela III é mostrado um estudo comparativo de rendimento em função da potência da carga, variando de aproximadamente 25% até 100% da carga nominal (8 kW).

Foram realizados dois testes. No primeiro, os rendimentos foram calculados considerando ambas as estruturas implementadas com o módulo SKM50GB123D da SEMIKRON. Os resultados encontrados mostram rendimento baixo, com superioridade da topologia *back-to-back* que

TABELA III
Comparação dos Rendimentos entre a Topologia Proposta e a Back-to-Back para Dois Tipos de Chaves Diferentes

Chave SKM50GB123D		
Potência (W)	Proposta	Back-to-back
2.500	85,3%	86,3%
4.500	89,0%	89,5%
6.300	90,4%	90,7%
7.900	91,1%	91,3%
Chave SK45MAHT12SCp		
Potência (W)	Proposta	Back-to-back
2.500	96,5%	97,1%
4.500	96,4%	97,0%
6.300	96,3%	96,9%
7.900	96,1%	96,8%

utiliza mais chaves. No segundo teste, as simulações foram repetidas considerando ambas as estruturas implementadas com módulos mais modernos, como o SK45MAHT12SCp (SiC MOSFET), também da SEMIKRON. Os resultados obtidos, também mostrados na Tabela III, mostram rendimentos bem superiores em toda a faixa de potência analisada, diminuindo consideravelmente a diferença de rendimento entre as duas topologias.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposta uma UPS trifásica a quatro fios baseada no conversor de nove chaves. A principal vantagem do sistema proposto é o número reduzido de chaves (onze chaves) quando comparado com o conversor ponte completa convencional na configuração *back-to-back* (catorze chaves). Diversos resultados experimentais foram mostrados considerando 6 diferentes cenários: operação em regime permanente; operação de conexão da UPS à rede; etc. Em termos de esforços de corrente a topologia proposta é vantajosa, pois possui 11 chaves enquanto a topologia *back-to-back* usa 14 chaves, com as chaves suportando a mesma corrente máxima. À paridade de tensão máxima de saída, a topologia proposta precisa ter uma tensão no barramento um pouco superior em relação a tensão da topologia *back-to-back* (aproximadamente 20%). Por essa razão, é possível utilizar o mesmo tipo de chave em ambas as topologias (semicondutor de 1200 V). Além disso, um estudo comparativo de perdas foi realizado e, considerando o uso de chaves mais modernas como a SK45MAHT12SCp (SiC MOSFET), os rendimentos são bem parecidos tornando a topologia proposta bastante competitiva.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pela CAPES, CNPq (processo No. 305901/2015-0) e FACEPE (processo No. APQ-0777-3.04/14).

REFERÊNCIAS

- [1] S. B. Bekiarov, A. Emadi, “Uninterruptible power supplies: classification, operation, dynamics, and control”, in *Proceedings of the 17th IEEE Applied Power Electronics Conference*, pp. 597–604, 2002.
- [2] W. A. Venturini, H. Jank, M. L. S. Martins, L. A. C. Lopes, F. E. Bisogno, “Modelagem de pequenos sinais no espaço de estados para estruturas de controle hierárquico em eixos síncronos aplicado ao paralelismo de UPS trifásicas”, *Revista Eletronica de Potencia*, vol. 25, no. 1, pp. 53–64, Março 2020.
- [3] IEC62040-3, “Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements”, *INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 62040-3 International Std*, 1999.
- [4] NBR-15014, “Conversor e semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta com saída em corrente alternada (nobreak) - Terminologia”, *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS*, 2004.

- [5] NBR-15204, “Conversor e semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta com saída em corrente alternada (nobreak) - Segurança e desempenho”, *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS*, pp. 1–5, 2005.
- [6] W. A. Venturini, J. M. Lenz, H. Jank, J. R. Pinheiro, L. A. C. Lopes, F. E. Bisogno, “Fonte ininterrupta de energia de dupla conversão bidirecional para integração de painéis fotovoltaicos e rastreamento do ponto de máxima potência”, *Revista Eletronica de Potencia*, vol. 25, no. 1, pp. 74–84, Março 2020.
- [7] S. Karve, “Three of a kind [UPS topologies, IEC standard]”, *IEE Review*, vol. 46, no. 2, pp. 27–31, Mar. 2000.
- [8] F. Kamran, T. G. Habetler, “A novel on-line UPS with Universal Filtering Capabilities”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, pp. 410–418, May 1998.
- [9] S.-J. Jeon, G.-H. Cho, “A Series-Parallel Compensated Uninterruptible Power Supply with Sinusoidal Input Current and Sinusoidal Output Voltage”, in *Power Electronics Specialists Conference*, pp. 297–303, 1999.
- [10] S. Rathmann, H. A. Warner, “New Generation UPS Technology, the Delta Conversion Principle”, in *31st IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 2389–2395, 1996.
- [11] S. O. da Silva, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo, “A Three-Phase Series-Parallel Compensated Line-Interactive UPS System with Sinusoidal input Current and Sinusoidal output Voltage”, in *IEEE Industry Applications Conference*, pp. 826–832, 1999.
- [12] J.-C. Wu, H.-L. Jou, “A new UPS scheme provides harmonic suppression and input power factor correction”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, pp. 629–635, Dec 1995.
- [13] S. A. Silva, R. A. Modesto, A. Goedtel, C. F. Nascimento, “Compensation Algorithms Applied to Power Quality Conditioners in Three-Phase Four-Wire Systems”, in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 730–735, 2010.
- [14] M. Ucar, S. Ozdemir, “3-Phase 4-leg unified series-parallel active filter system with ultracapacitor energy storage for unbalanced voltage sag mitigations”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 49, pp. 149–159, July 2013.
- [15] R. A. Modesto, S. A. Silva, A. A. Júnior, V. D. Bacon, “A Versatile Unified Power Quality Conditioner Applied to Three-Phase Four-Wire Distribution Systems Using a Dual Control Strategy”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 5503–5514, Aug. 2016.
- [16] C. Liu, B. Wu, N. R. Zargari, D. Xu, J. Wang, “A Novel Three-Phase Three-Leg AC/AC Converter Using Nine IGBTs”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1151–1160, May 2009.
- [17] P. Rodriguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, “Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions”, in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 5173–5178, 2006.
- [18] M. Cavalcanti, G. Azevedo, B. Amaral, K. de Oliveira, F. Neves, Z. Lins, “Efficiency Evaluation in Grid Connected Photovoltaic Energy Conversion Systems”, in *PESC 2005 - IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, pp. 269–275, 2005.

DADOS BIOGRÁFICOS

Anderson Alves Lopes recebeu os títulos de Bacharel, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, em 2006, 2009 e 2020, respectivamente. Atualmente é professor do Instituto Federal de Pernambuco. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em eletrônica de potência, medidas elétricas, magnéticas e eletrônicas e instrumentação.

Marcelo Cabral Cavalcanti recebeu o grau de Engenheiro Eletricista em 1997 pela Universidade Federal de Pernambuco e os graus de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande em 1999 e 2003, respectivamente. De outubro de 2001 a agosto de 2002, fez Doutorado-sanduíche no *Center for Power Electronics Systems, Virginia Tech, USA*. Desde 2005, atua como professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. Recebeu *The Best Paper Award* em duas conferências organizadas pelo IEEE: International Conference on Power Electronics and Intelligent Control for Energy Conservation, 2005, e International Symposium on Industrial Electronics, 2011. De setembro de 2012 a agosto de 2013, fez Pós-Doutorado na Universidad de Alcalá, Espanha. Foi Vice-Presidente da SOBRAEP e Editor da Revista Eletrônica de Potência durante o biênio 2016-2017. Foi Presidente da SOBRAEP durante o biênio 2018-2019. Foi Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco de março de 2016 a fevereiro de 2020. Faz parte do Comitê Assessor de Engenharia Elétrica e Biomédica do CNPq desde outubro de 2018. Sua área de pesquisa é aplicações de eletrônica de potência em sistemas fotovoltaicos e qualidade da energia elétrica.

Gustavo Medeiros de Souza Azevedo recebeu os graus de Engenheiro Eletricista, e de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2005, 2007 e 2011, respectivamente. Trabalhou como pesquisador visitante na Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha, de 2008 a 2009 como parte do programa de doutorado sanduíche. Desde janeiro de 2014, atua como Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. Tem atuado na área de eletrônica de potência, principalmente nos seguintes temas: microrredes, geração distribuída, energias renováveis, sistemas fotovoltaicos e qualidade de energia.

Leonardo Rodrigues Limongi nasceu em Recife em 1978. Recebeu o grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco em 2006 e o grau de Doutor em Engenharia Elétrica pela *Politecnico di*

Torino, Itália, em 2009. Desde 2010, ele é Professor efetivo do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE. Prof. Limongi é autor de mais de 50 artigos publicados em anais de congressos internacionais e revistas técnicas e é bolsista de produtividade do CNPq nível 2 desde 2016. Seus interesses de pesquisa incluem os campos de eletrônica de potência dedicada a sistemas de condicionamento de energia e geração distribuída.

Márcio Dilermano Bezerra Gomes recebeu o grau de Engenheiro Eletricista em 2011 pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte e os graus de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco em 2014 e 2019, respectivamente. Atualmente é engenheiro do Instituto Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica de potência e na área de Informática, com ênfase em montagem e manutenção de microcomputadores.