

ANÁLISE DE UMA PROPOSTA DE CONDICIONADOR DE POTÊNCIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA MELHORAR A QUALIDADE DE ENERGIA

Jaqueline O. Rezende^{1,2}, Geraldo C. Guimarães², Paulo Henrique O. Rezende², Thales L. Oliveira³,
Leonardo R. C. Silva³, Anderson R. Piccini⁴

¹Instituto Federal de Goiás (UFG), Jataí – GO, Brasil

²Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia – MG, Brasil

³Instituto Federal de Goiás (IFG), Campi Itumbiara, Itumbiara – GO, Brasil

⁴Instituto Federal do Paraná (IFPR), Campi Paranavaí, Paranavaí – PR, Brasil

e-mail: jaqueline.rezende@ifg.edu.br, gcaixeta@ufu.br, paulohenrique.rezende@ufu.br, thales.oliveira@ifg.edu.br,
leonardo.silva@ifg.edu.br, anderson.piccini@ifpr.edu.br

Resumo – Neste artigo, um condicionador de potência de quatro fios é proposto para conectar os painéis fotovoltaicos à rede elétrica. Este condicionador visa injetar potência ativa na rede e, ao mesmo tempo, melhorar a qualidade da energia quando há cargas desequilibradas e não lineares no sistema elétrico. Assim, são realizadas simulações computacionais para uma rede elétrica composta por dois sistemas fotovoltaicos conectados a um sistema elétrico e um conjunto de cargas com características desequilibradas, harmônicas e lineares. Inicialmente, os dois sistemas fotovoltaicos são conectados à rede por meio de inversores trifásicos. Em seguida, um dos inversores é substituído pelo condicionador de potência proposto. Com este estudo, constatou-se que o condicionador de potência proposto utilizado para conectar a geração fotovoltaica à rede elétrica contribui significativamente para suprimir correntes harmônicas e desequilibradas, trazendo melhorias significativas na qualidade de energia do sistema elétrico analisado.

Palavras-Chave – Carga desequilibrada, Carga não linear, Condicionador de potência, Qualidade da energia, Sistema fotovoltaico.

ANALYSIS OF A PROPOSED POWER CONDITIONER IN PHOTOVOLTAIC GENERATION TO IMPROVE POWER QUALITY

Abstract – In this article, a four-wire power conditioner is proposed to connect the photovoltaic panels to the power grid. This conditioner aims to inject active power into the network, and at the same time, improve the quality of energy when there are unbalanced and nonlinear loads in the electrical system. Thus, computer simulations are carried out for an electrical network consisting of two photovoltaic systems connected to an electrical system and a set of loads with unbalanced, harmonic and linear

characteristics. Initially, the two photovoltaic systems are connected to the network by means of three-phase inverters. Then, one of the inverters is replaced by the proposed power conditioner. With this study, it was found that the proposed power conditioner used to connect the photovoltaic generation to the grid contributes significantly to suppress harmonic and unbalanced currents, bringing significant improvements in the power quality of the analyzed electrical system.

Keywords – Nonlinear load, Photovoltaic system, Power conditioner, Power quality, Unbalanced load.

I. INTRODUÇÃO

A geração de energia solar fotovoltaica utiliza painéis, os quais são constituídos por células. Essas células, através do efeito fotovoltaico, convertem a radiação solar em corrente contínua. Dessa forma, para que essa energia seja injetada no sistema elétrico é necessário convertê-la em corrente alternada, uma vez que essa é a forma como o sistema elétrico opera. A conversão de corrente contínua para corrente alternada é realizada tradicionalmente por inversores [1].

Os painéis fotovoltaicos também podem ser conectados à rede elétrica utilizando condicionadores de potência, os quais contribuem para diminuir os problemas relacionados a qualidade de energia. Esses problemas têm sido constantes no sistema elétrico, uma vez que a presença de cargas não lineares e desequilibradas na rede elétrica tem aumentado ao longo dos anos e essas cargas são responsáveis por correntes desequilibradas, aumento excessivo da corrente que circula no neutro do alimentador e também por distorção harmônica.

Na literatura, há condicionadores de potência utilizados para a conexão dos painéis fotovoltaicos que são constituídos por dois inversores, sendo um conectado em série e o outro em paralelo que compartilham o mesmo link-dc [2]. No trabalho [3], os painéis fotovoltaicos são conectados a esse link-dc através de um conversor boost. No estudo [4], os inversores em série e em paralelo do condicionador de potência são conectados à linha de distribuição através de indutores e os

painéis fotovoltaicos também são conectados ao link-dc utilizando um conversor boost.

Na referência [5] o inversor em série do condicionador é conectado à rede através de um filtro LC e o inversor em paralelo utiliza um filtro LCL. Nesse trabalho, os painéis são conectados da mesma forma que os trabalhos mencionados anteriormente. No trabalho [6] é apresentado um condicionador de potência que utiliza um filtro passa-baixa para conectar o inversor em série à linha de distribuição e um filtro de potência ativa para conectar o inversor em paralelo.

O estudo [7] apresenta um condicionador de potência no qual os inversores são conectados à rede através de indutores, e também são utilizados filtros de ondulação em paralelo com cada inversor. Além disso, os painéis fotovoltaicos são conectados por meio de um conversor boost ao inversor em série. A referência [8] utiliza um condicionador de potência que os inversores em série e em paralelo utilizam uma indutância e um filtro passa-alto RC para realizarem a conexão com a rede. Ademais, os painéis são conectados em paralelo ao inversor shunt através de um conversor boost.

Além disso, há condicionadores de potência de estágio único, como o descrito na referência [9], o qual apresenta três braços, cada um com duas chaves, e sua conexão com a rede elétrica é realizada através de indutâncias. O condicionador de potência dos trabalhos [10] e [11], com um estágio, também apresenta três braços, com duas chaves cada. Porém, são utilizados dois capacitores no link-dc e entre esses capacitores é realizada a conexão com o neutro da carga. O estudo [12] apresenta um condicionador de potência com três braços, cada um composto por três chaves e esse é conectado em paralelo à rede elétrica, utilizando indutâncias em ambos os lados. A referência [13] propõe um condicionador com três braços, sendo dois braços com três chaves e um com duas chaves. Esse condicionador também é conectado em paralelo à rede, utilizando indutâncias e capacitâncias para fazer essa conexão.

Além disso, os estudos que utilizam o condicionador de potência para a conexão dos painéis fotovoltaicos presentes na literatura operam com uma potência reduzida, sendo inferior a 25 kW [5]-[8], [14]-[18]. Assim, há a necessidade de pesquisas que apresentem o comportamento dos condicionadores quando são utilizados para a conexão de painéis com uma potência superior à 200 kW.

Nesse contexto, esse artigo possui como objetivo apresentar as melhorias na qualidade de energia que um condicionador de potência, constituído de estágio único, e o seu controle traz a um sistema fotovoltaico de 212,4 kW de potência ativa. Este condicionador, é constituído por quatro braços, com duas chaves cada, o qual utiliza apenas indutância para conectar à rede elétrica.

Além disso, para o condicionador de potência é proposto um controle que o permite injetar a potência ativa dos painéis fotovoltaicos na rede elétrica, melhorar a qualidade da energia, suprimindo correntes harmônicas e desequilibradas, e injetar potência reativa na rede elétrica proveniente da fonte alternativa. Esse controle se difere dos demais apresentados na literatura pelo cálculo realizado para obter as correntes compensadas que serão utilizadas no controle por histerese e também pelo emprego das correntes compensadas de eixo zero e neutro.

Para verificar a atuação do condicionador, são realizadas simulações computacionais para uma rede elétrica constituída de dois sistemas fotovoltaicos conectados a um sistema elétrico e a um conjunto de cargas com característica desequilibrada, harmônica e linear, conforme é apresentado na Figura 1. São investigados dois estudos de casos. Inicialmente, o sistema elétrico apresentado na Figura 1 é analisado sem a utilização do condicionador, assim, os dois sistemas fotovoltaicos possuem inversor trifásico. No segundo caso, um inversor é substituído pelo condicionador de potência, o que possibilitou verificar que as correntes harmônicas e desequilibradas provenientes das cargas são totalmente suprimidas e a corrente do neutro do alimentador é eliminada. Desta forma, constatou-se que o condicionador de potência proposto contribuiu com melhorias significativas na qualidade da energia, e ao mesmo tempo permitiu que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico fosse injetada no sistema elétrico analisado.

As seções a seguir apresentam o desenvolvimento da metodologia proposta neste artigo. Os componentes do sistema elétrico analisado serão detalhados na seção 2. A metodologia de controle utilizada no inversor trifásico é explicada na seção 3. Em seguida, a seção 4 descreve a metodologia de controle empregada no condicionador de potência. Os resultados obtidos nessa pesquisa são apresentados e discutidos na seção 5. Por fim, a seção 6 apresenta as conclusões dessa pesquisa.

II. SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

O sistema elétrico analisado nessa pesquisa é composto por dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. No primeiro estudo de caso, ambos os sistemas fotovoltaicos possuem inversor trifásico. No segundo estudo de caso, um inversor é substituído pelo condicionador de potência proposto. Além disso, nesse sistema há três cargas distintas, as quais são desequilibrada, não-linear e equilibrada. Esse sistema é ilustrado na Figura 1.

Todos componentes do sistema elétrico analisado serão detalhados na sequência.

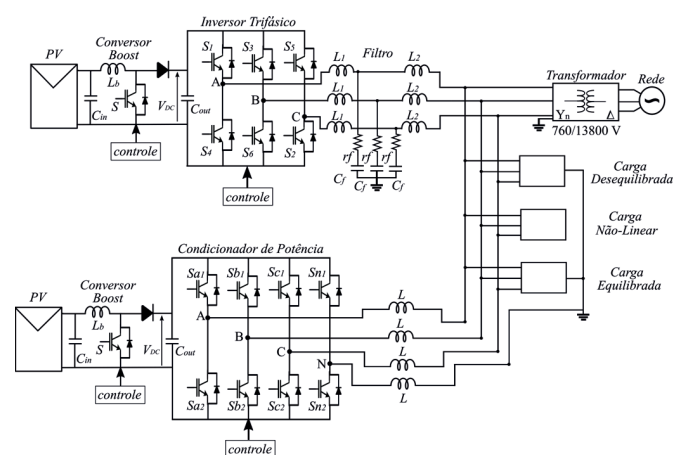


Fig. 1 Sistema elétrico analisado.

A. Painéis Fotovoltaicos

Para o presente estudo, foi utilizado o módulo fotovoltaico SPR-415E-WHT-D do fabricante SunPower. Esse módulo apresenta potência máxima de 414,801 W, tensão de máxima potência de 72,9 V e corrente de máxima potência de 5,69 A [19]. O sistema elétrico analisado é composto por dois sistemas fotovoltaicos com potências iguais. Em cada sistema fotovoltaico foram utilizados oito módulos conectados em série e sessenta e quatro módulos em paralelo, totalizando 212,4 kW de potência em cada sistema. Portanto, o sistema elétrico total, composto pelos dois sistemas fotovoltaicos, apresenta 424,8 kW de potência.

B. Conversor Boost

O conversor *boost* foi utilizado nos sistemas fotovoltaicos dotados com inversor trifásico e condicionador de potência. Esse possui como objetivo aumentar o valor da tensão proveniente dos painéis fotovoltaicos, de 583,2 V, para o nível de tensão de entrada do inversor e do condicionador de potência, cujo valor definido foi de 1000 V.

O valor dos componentes do conversor boost foram determinados utilizando as seguintes equações:

$$L_b = \frac{V_{in} \cdot D}{f_d \cdot \Delta I} \quad (1)$$

$$C_{in} = \frac{I_{in} \cdot D}{f_d \cdot \Delta V_{in}} \quad (2)$$

$$C_{out} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{V_{dc}} - \frac{1}{\eta \cdot V_{dc}}\right) \cdot P_{in}}{2\pi f \cdot \Delta V_{dc}} \quad (3)$$

Onde L_b é o valor da indutância, V_{in} é a tensão de entrada do conversor, D é a razão cíclica do conversor, f_d é a frequência de chaveamento, ΔI é a ondulação da corrente de entrada, C_{in} é o valor do capacitor de entrada, I_{in} é a corrente de entrada do boost, ΔV_{in} é a ondulação da tensão de entrada, C_{out} é o valor da capacitância de saída, V_{dc} é a tensão de saída do conversor, η é o rendimento do boost, P_{in} é a potência de entrada do boost, f é a frequência da rede, e ΔV_{dc} é a ondulação da tensão de saída do conversor.

No conversor boost, foi considerado como chave o MOSFET de carboneto de silício (SiC), porque ele apresenta menores perdas de energia por chaveamento e possibilita que se trabalhe com elevada frequência [20]-[22]. Diante disso, foi empregado no conversor boost uma frequência de chaveamento de 50 kHz.

Considerando a tensão de entrada de 583,2 V, a razão cíclica de 0,4168, a ondulação da corrente de entrada de 10%, a corrente de entrada de 364,2 A, a ondulação da tensão de entrada de 1%, a tensão de saída de 1000 V, a ondulação da tensão de saída de 1%, a frequência da rede em 60 Hz e o rendimento de 96%, o indutor apresenta valor de 0,1335 mH, o capacitor de entrada possui 0,521 mF e o capacitor de saída 10,489 mF.

O controle do conversor *boost* foi realizado utilizando uma técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

C. Inversor Trifásico

O inversor possui como finalidade converter a tensão continua fornecida em seus terminais de entrada em uma tensão de saída alternada. Nessa pesquisa, foi utilizado o inversor trifásico com configuração em ponte.

D. Filtro

O filtro LCL (indutor-capacitor-indutor) foi utilizado para conectar o inversor trifásico à rede elétrica, objetivando minimizar as distorções harmônicas presente na corrente de saída do inversor. Os valores dos componentes do filtro [23] foram obtidos com as seguintes equações:

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{6 \cdot f_{SW} \cdot \left[0,1 \cdot \left(\frac{P_n \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot V_{ph}}\right)\right]} \quad (4)$$

$$c_f = 0,05 \cdot \left[\frac{1}{\omega_g \cdot \left(\frac{E_n^2}{P_n}\right)}\right] \quad (5)$$

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{k_a^2} + 1}}{c_f \cdot (2\pi f_{SW})^2} \quad (6)$$

$$r_f = \frac{1}{3 \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot c_f}}\right) \cdot c_f} \quad (7)$$

Onde L_1 é o valor da primeira indutância do filtro, V_{DC} é a tensão do link-dc, f_{SW} é a frequência de chaveamento do inversor, P_n é a potência nominal do sistema fotovoltaico, V_{ph} é a tensão de fase na saída do inversor, c_f é a capacitância do filtro, ω_g é a velocidade angular da rede, E_n é a tensão eficaz na saída do inversor, L_2 é o valor da segunda indutância do filtro, k_a é o fator de atenuação, e r_f é a resistência em série com o capacitor.

Nesse estudo, foi considerado a tensão do link-dc de 1000 V, a frequência de chaveamento do inversor de 10 kHz, a potência do sistema fotovoltaico de 212,4 kW, a tensão de fase na saída do inversor trifásico de 438,79 V, a velocidade angular da rede de 377 rad/s, a tensão eficaz na saída do inversor de 760 V e o fator de atenuação de 0,2. Assim, a primeira indutância apresentou valor de 0,7303 mH, a segunda indutância de 31,17 μ H, a capacitância de 48,76 μ F e a resistência de 0,261 Ω .

E. Condicionador de Potência

O condicionador de potência proposto possui estágio único, sendo composto por quatro braços. Cada braço é formado por duas chaves, constituídas por transistores IGBT. Esse condicionador é conectado à rede elétrica através de indutâncias, onde é utilizada uma indutância para cada fase e para o neutro. A constituição desse condicionador é ilustrada na Figura 1.

O condicionador de potência apresentado possui como objetivo injetar a potência ativa advinda da geração

fotovoltaica na rede elétrica, com rendimento de 98%, e simultaneamente melhorar os indicadores de qualidade da energia elétrica. Esse condicionador possibilita a redução de 94,56% do fator de desequilíbrio e realiza a compensação da corrente que circula no neutro do transformador, quando há cargas com característica desequilibrada no sistema elétrico. No que tange à carga não linear conectada ao sistema, o condicionador promove uma redução de 75,16% na distorção harmônica total de corrente. Ademais, o condicionador de potência possibilita a injeção de potência reativa no sistema elétrico, proveniente da geração fotovoltaica, contribuindo significativamente para uma melhor regulação de tensão em toda a extensão do alimentador de distribuição de energia elétrica.

F. Indutâncias

O condicionador de potência é conectado à rede elétrica através de indutâncias. São utilizadas em cada fase e no neutro uma indutância com valor de 0,36 mH.

G. Cargas

Foram utilizadas três cargas trifásicas. A primeira carga é desequilibrada com potências ativa e reativa, respectivamente, de 50 kW e 10 kVAr para a fase *a*, de 30 kW e 5 kVAr para a fase *b* e de 90 kW e 15 kVAr para a fase *c*.

A segunda carga é não-linear, sendo representada por um retificador trifásico de seis pulsos não controlado, no qual é conectado uma carga resistiva com potência de 200 kW. Por fim, a última carga é equilibrada e possui potência ativa de 40 kW e potência reativa de 15 kVAr.

III. CONTROLE DO INVERSOR TRIFÁSICO

O controle empregado nos dois inversores trifásicos é denominado de Quadro de Referência Síncrona (em inglês *Synchronous Reference Frame*) [24]. Nesse controle, há uma malha para controlar a potência reativa, uma malha destinada a controlar a tensão do link-dc e uma malha responsável por gerar os pulsos de comando das chaves do inversor.

Para a realização do controle, os valores de tensão e de corrente representados no sistema trifásico “*abc*” são convertidos para o sistema de coordenadas síncronas “*dq0*”, utilizando a Transformada de Park, conforme é descrito na equação (8). Essa transformação possibilita que os componentes do sistema trifásico, tensão ou corrente, com valores que variam de forma senoidal no tempo, sejam representados por um sistema com componentes que apresentam valores constantes em regime permanente e com a mesma velocidade do sistema original [24].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde V_d , V_q e V_0 são as tensões de eixo direto, eixo em quadratura e eixo zero, respectivamente. V_a , V_b e V_c são as

tensões da fase *a*, *b* e *c*, respectivamente, e θ é a posição angular do eixo *d* em relação ao eixo da fase *a* (considerado como referência).

O controle da potência reativa é realizado em malha fechada. Inicialmente, é necessário converter os valores de tensão e de corrente do ponto de acoplamento comum para o sistema de coordenadas síncronas. Para isso, é determinado a posição angular da tensão da rede utilizando um PLL. Em seguida, é calculado o valor instantâneo da potência reativa, conforme a equação (9).

$$Q_{inst} = \frac{2}{3} \cdot (V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q). \quad (9)$$

Onde Q_{inst} é a potência reativa instantânea, V_q é a tensão de eixo em quadratura, I_d é a corrente de eixo direto, V_d é a tensão de eixo direto, e I_q é a corrente de eixo em quadratura.

A diferença da potência reativa instantânea e o valor de potência que se deseja absorver ou fornecer ao sistema elétrico (Q^*) é submetido a um controlador proporcional integral. O ganho proporcional é de 0,08 e o ganho integral é de 8,0, determinados segundo a metodologia descrita em [25].

A malha de controle da tensão do link-dc objetiva realizar o controle da tensão contínua presente nos terminais de entrada do inversor. Para isso, o controle realiza a diferença da tensão do link-dc monitorada nos terminais do inversor (v_{ac}) e o valor de referência dessa grandeza (V_{dc}^*), o qual é de 1000 V. O erro desses sinais é enviado a um controlador proporcional integral, com ganho proporcional de 15,0 e ganho integral de 0,0015, determinados segundo a metodologia descrita em [25]. O sinal proveniente do controlador é multiplicado pela tensão do link-dc medida, originando o valor de potência ativa.

Em seguida, a tensão do ponto de acoplamento comum é convertida para o sistema de coordenadas síncronas. Assim, as correntes de referência de eixo direto e eixo em quadratura são calculadas pela equação (10).

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_d^2 + v_q^2} \begin{bmatrix} v_d & -v_q \\ v_q & v_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Onde i_d^* e i_q^* são as correntes de referência de eixo direto e eixo em quadratura, respectivamente, v_d e v_q são as tensões de eixo direto e eixo em quadratura, respectivamente, P é a potência ativa, e Q é a potência reativa proveniente da malha de controle de potência reativa.

A malha de controle de corrente é responsável por controlar a corrente proveniente da rede e fornecer os pulsos de comando para as chaves do inversor. Primeiramente, a corrente do ponto de acoplamento comum é transformada para o sistema de coordenadas síncronas. Na sequência, a corrente de eixo direto é comparada com a sua referência (i_d^*), obtida anteriormente. O erro é submetido a um controlador integral com ganho proporcional de 0,1 e ganho integral de 1,0, determinados segundo a metodologia descrita em [25]. Em seguida, o sinal é adicionado ao valor da tensão de eixo direto e à componente de desacoplamento, a qual possui a finalidade de acelerar o controle, e pode ser calculada pela equação (11). Essa somatória resulta na tensão de referência de eixo direto.

$$\omega L = \omega(L_1 + L_2). \quad (11)$$

Onde ωL é a componente de desacoplamento, ω é a velocidade angular da rede, L_1 e L_2 são a primeira e a segunda indutância do filtro, respectivamente.

O mesmo procedimento é aplicado à corrente de eixo em quadratura, incluindo os mesmos ganhos do controlador, resultando na tensão de referência do eixo em quadratura. As tensões de referência são submetidas a Transformada Inversa de Park para obter a tensão trifásica que será utilizada como sinal de referência na modulação por largura de pulso (PWM). Assim, o PWM é o responsável por gerar os pulsos de comando da operação de abertura e fechamento das seis chaves do inversor trifásico. O diagrama de blocos do controle do inversor trifásico é apresentado na Figura 2.

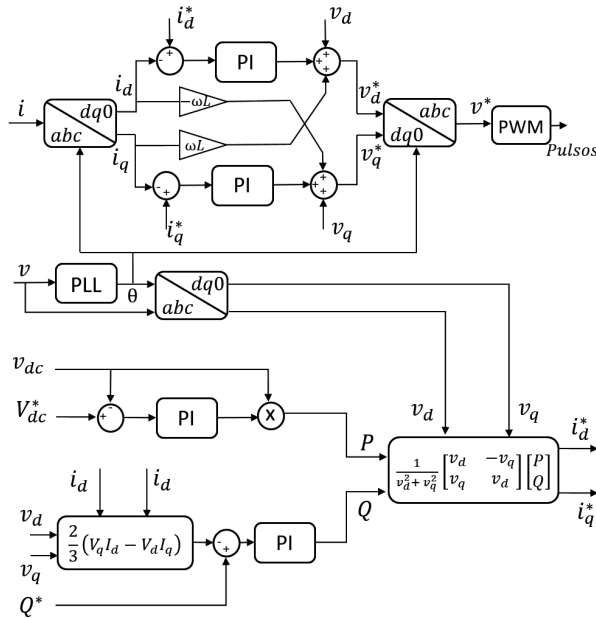


Fig. 2 Diagrama de blocos do controle do inversor trifásico.

IV. CONTROLE DO CONDICIONADOR DE POTÊNCIA

Para o condicionador de potência é proposto um controle que permite converter a energia proveniente dos painéis fotovoltaicos de corrente contínua para corrente alternada, e, simultaneamente, melhorar os indicadores de qualidade da energia elétrica. O controle proposto permite reduzir o fator de desequilíbrio, diminuir a distorção harmônica e eliminar a circulação da corrente no neutro do transformador. Além disso, esse controle também permite que a fonte alternativa possa injetar energia reativa na rede elétrica.

Inicialmente é realizado o controle da tensão do link-dc. O erro proveniente da diferença da tensão de referência (V_{dc}^*), cujo valor é 1000 V, e a tensão do link-dc medida (v_{dc}) é enviado a um controlador proporcional integral. Este controlador possui ganho proporcional de 15,0 e ganho integral de 1,5.

Na sequência, é realizado o cálculo da potência instantânea. Para isso é necessário converter a tensão e a corrente do ponto de acoplamento comum, representadas no sistema trifásico "abc", para o sistema de coordenadas estacionárias "αβ0",

utilizando a Transformada de Clarke, conforme é apresentado na equação (12). Essa transformação possibilita que se represente um sistema com três variáveis que variam no tempo em um sistema com duas componentes ortogonais que são estacionárias.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Onde V_α , V_β e V_0 são as tensões de eixo α , β e zero, respectivamente. V_a , V_b e V_c são as tensões da fase a , b e c , respectivamente.

Com os valores de tensão e corrente no sistema de coordenadas estacionárias, as potências instantâneas são obtidas pela equação (13).

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha\beta} \\ Q_{\alpha\beta} \\ P_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ v_\beta & -v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Onde $P_{\alpha\beta}$ é a potência ativa, $Q_{\alpha\beta}$ é a potência reativa, P_0 é a potência de sequência zero, v_α é a tensão de eixo α , v_β é a tensão de eixo β , i_α é a corrente de eixo α , i_β é a corrente de eixo β , e i_0 é a corrente de eixo zero.

Em seguida, são determinadas as correntes compensadas no sistema de coordenadas estacionárias, de acordo com a equação (14).

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ v_\beta & -v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (P_{\alpha\beta} + P_0 + P_g - \bar{P} - P_{perdas}) \\ (Q_{\alpha\beta} + Q_g) \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Onde $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ e i_{c0} são as correntes compensadas de eixo α , β e zero, respectivamente. v_α é a tensão de eixo α , v_β é a tensão de eixo β , $P_{\alpha\beta}$ é a potência ativa (obtida pela equação (13)), P_0 é a potência de sequência zero (obtida pela equação (13)), P_g é a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos (obtida na saída dos painéis fotovoltaicos), \bar{P} é o valor médio da potência ativa, P_{perdas} é a potência necessária para carregar o capacitor presente no link-dc, $Q_{\alpha\beta}$ é a potência reativa (obtida pela equação (13)), Q_g é a potência reativa que se deseja injetar na rede, e i_0 é a corrente de sequência zero (utilizada para compensar a circulação de corrente no neutro do alimentador do sistema).

As correntes compensadas, que serão utilizadas no controle por histerese, no sistema trifásico "abc" são obtidas pela Transformada Inversa de Clarke. Além disso, para gerar os pulsos das oito chaves do condicionador de potência é necessário calcular a corrente de compensação do neutro a partir das correntes trifásicas no sistema "abc", conforme a equação (15).

$$i_{cn} = -(i_{ca} + i_{cb} + i_{cc}). \quad (15)$$

Onde i_{cn} , i_{ca} , i_{cb} e i_{cc} são as correntes compensadas do neutro, fase a , fase b e fase c , respectivamente.

Por fim, os pulsos de comando de abertura e fechamento das oito chaves do condicionador de potência são obtidos com o controle por histerese. Esse controle foi empregado devido sua velocidade de resposta [26] e por ser utilizado na literatura apresentando desempenho satisfatório [27] [28], embora seja relatado outros tipos de controle com histerese na literatura [29]-[31]. Assim, no controle por histerese utilizado, inicialmente é realizada a diferença da corrente compensada e a corrente medida na saída do condicionador. O sinal resultante é submetido a histerese para originar os pulsos. O controle de cada fase e do neutro origina um par de pulsos, pois a operação de abertura e fechamento de chaves posicionadas no mesmo braços do condicionador são complementares, ou seja, quando uma está operando a outra está bloqueada. O diagrama de blocos do controle do condicionador de potência é apresentado na Figura 3.

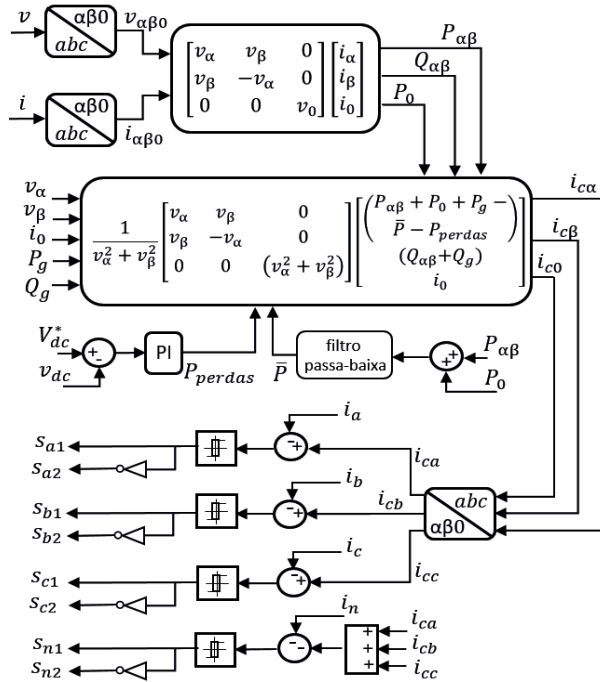


Fig. 3 Diagrama de blocos do controle do condicionador de potência.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados dois estudos de casos para analisar o desempenho do condicionador de potência proposto. No primeiro estudo de caso, os dois sistemas fotovoltaicos possuem inversor trifásico, ou seja, sem a utilização do condicionador de potência. No segundo estudo de caso, um inversor foi substituído pelo condicionador de potência.

Em ambos os estudos de casos, os painéis fotovoltaicos foram submetidos a uma irradiação solar de 1000 W/m^2 e temperatura ambiente de 25°C . Além disso, as três cargas são conectadas ao sistema elétrico em instantes distintos, objetivando analisar a influência do condicionador em cada tipo de carga. Assim, a carga desequilibrada permanece

conectada ao sistema entre os instantes 0,05 a 0,15 segundos, a carga não-linear entre 0,2 a 0,3 segundos e a carga equilibrada entre 0,35 a 0,45 segundos.

A. Sistema Sem o Condicionador de Potência

A Figura 4 apresenta as potências ativa e reativa injetadas na rede elétrica. Os sistemas fotovoltaicos injetam $368,3 \text{ kW}$ de potência ativa na rede elétrica quando não há cargas conectadas ao sistema, $193,9 \text{ kW}$ quando apenas a carga desequilibrada está conectada, $164,9 \text{ kW}$ com a conexão da carga não-linear e $327,7 \text{ kW}$ quando apenas a carga linear se encontra conectada. O controle dos inversores permite que os sistemas fotovoltaicos injetem ou absorvam potência reativa na rede elétrica. Na Figura 4.b é apresentado o comportamento da potência reativa quando é solicitado o fornecimento de 10 kVar . Observa-se que essa potência se mantém constante independente da conexão das cargas ao sistema. Além disso, a injeção de potência reativa na rede pode ser confirmada pelo gráfico da tensão de fase e da corrente de fase no lado de baixa do transformador, os quais apresentam fases opostas, conforme é mostrado na Figura 5.

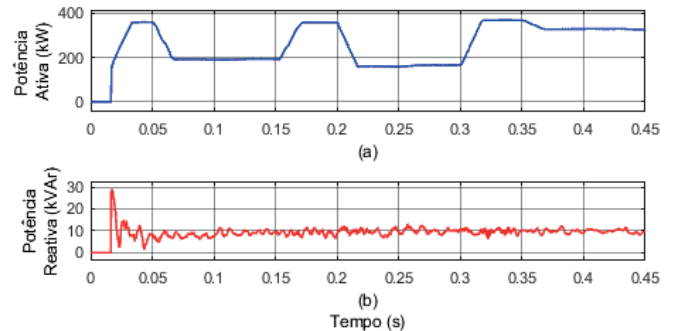


Fig. 4 Potências do sistema: (a) ativa e (b) reativa.

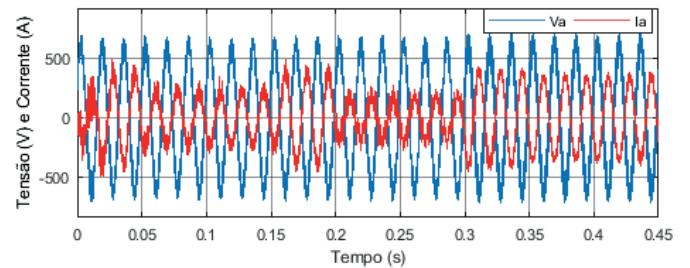


Fig. 5 Tensão da fase a e corrente da fase a .

As cargas foram conectadas em instantes distintos no sistema elétrico e a corrente apresentada por essas é mostrada na Figura 6.a. Assim, a carga desequilibrada apresenta corrente de pico de $164,7 \text{ A}$ na fase a , $98,0 \text{ A}$ na fase b e $294,2 \text{ A}$ na fase c . A carga não-linear apresenta uma corrente de $225,1 \text{ A}$ e a carga equilibrada $45,9 \text{ A}$.

A Figura 6. b apresenta as correntes no lado de baixa tensão do transformador. Ao analisar essas correntes, verifica-se um severo desequilíbrio quando a carga desequilibrada está conectada ao sistema. Na presença dessa carga, as correntes das fases a , b e c no lado de baixa tensão do transformador são $236,9\angle 36,05^\circ \text{ A}$, $299,4\angle -88,95^\circ \text{ A}$ e $112,2\angle 170,5^\circ \text{ A}$, respectivamente. Gerando correntes de sequência positiva e negativa de $214,61\angle 36,21^\circ \text{ A}$ e $60,64\angle 99,86^\circ \text{ A}$, o que

fornece um fator de desequilíbrio de corrente de 28,26%, conforme a equação (16).

$$F.D. = \frac{I_{a2}}{I_{a1}} \times 100\% = \frac{60,64}{214,61} \times 100\% = 28,26\% . \quad (16)$$

Onde $F.D.$ é o fator de desequilíbrio, I_{a2} é a corrente de sequência negativa, e I_{a1} é a corrente de sequência positiva.

Além disso, quando a carga não-linear está conectada ao sistema elétrico, observa-se que a distorção harmônica total de corrente (THD_i) é de 39,57%, conforme o espectro harmônico apresentado na Figura 7.

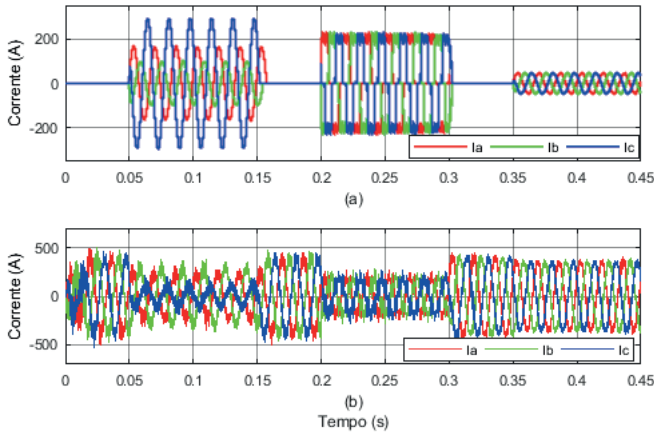


Fig. 6 Correntes: (a) nas cargas e (b) no lado de baixa tensão do transformador.

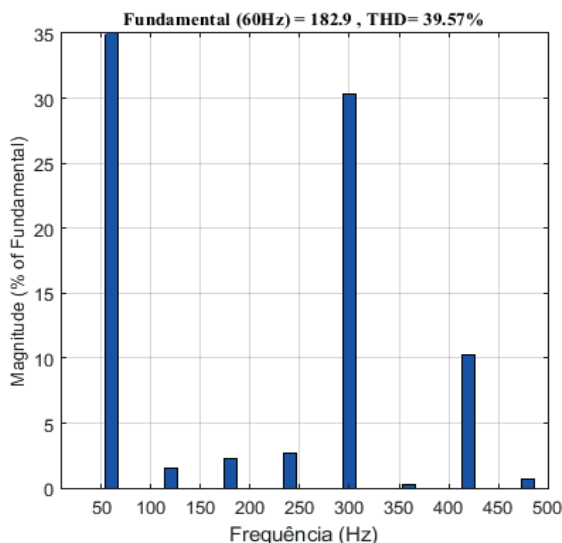


Fig. 7 Espectro harmônico da corrente quando a carga não-linear está conectada ao sistema elétrico sem a atuação do condicionador de potência.

Na Figura 8.a é apresentada a corrente que circula no neutro da carga desequilibrada. Essa apresenta 167,8 A de valor de pico e está presente no período que a carga desequilibrada fica conectada ao sistema elétrico. Na Figura 8.b é mostrada a corrente no neutro do transformador, observa-se que há corrente circulando quando a carga desequilibrada está conectada ao sistema elétrico, uma vez que há um caminho para a circulação da componente homopolar dessa corrente. A corrente que circula no neutro do transformador possui o mesmo valor da corrente que circula no neutro da carga desequilibrada, ou seja, 167,8 A de pico.

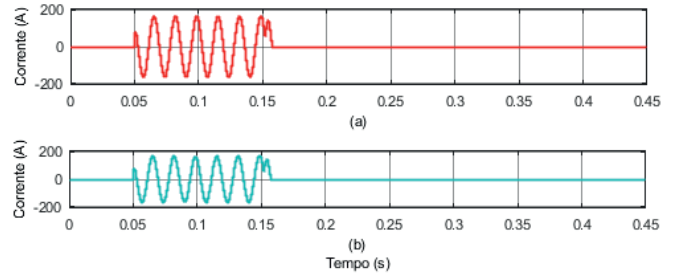


Fig. 8 Correntes: (a) no neutro da carga desequilibrada e (b) no neutro do transformador.

B. Sistema Com o Condicionador de Potência

A Figura 9 apresenta as potências ativa e reativa fornecidas à rede elétrica com a presença do condicionador de potência proposto no sistema. Quando não há cargas conectadas ao sistema elétrico, a potência ativa apresenta o mesmo valor da simulação sem o condicionador de potência, ou seja, 368,3 kW. Quando a carga desequilibrada está conectada, é fornecido 206,8 kW de potência ativa, representando um aumento de 7,04% em relação a simulação anterior. Considerando a carga não-linear presente no sistema, a potência ativa apresenta valor de 169,9 kW, o que significa um aumento de 3,03%. Quando há apenas a carga equilibrada no sistema, essa potência também é igual a simulação anterior, com valor de 327,7 kW.

Para a potência reativa, também foi solicitado o fornecimento de 10 kVAr. Observa-se pela Figura 9.b, que o condicionador de potência fornece a quantidade requerida de potência, independente da conexão das cargas ao sistema elétrico. Esse fornecimento de potência reativa também pode ser confirmado pelo gráfico da tensão de fase e corrente de fase no lado de baixa do transformador, os quais apresentam defasagem opostas, conforme é mostrado na Figura 10.

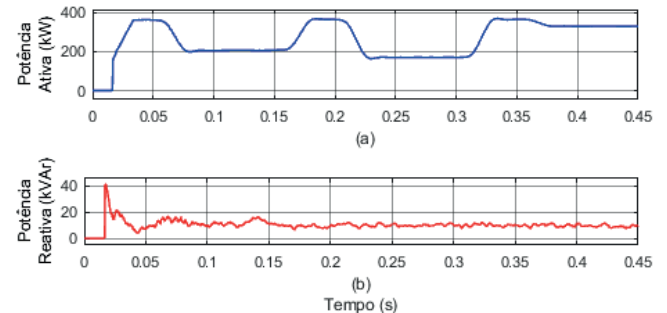


Fig. 9 Potências do sistema com o condicionador de potência: (a) potência ativa, (b) potência reativa.

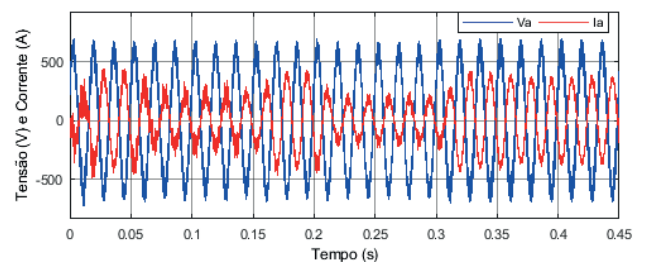


Fig. 10 Tensão da fase a e corrente da fase a com o condicionador de potência.

A Figura 11 apresenta as potências instantâneas originadas pelo controle do condicionador de potência. Observa-se que

as potências instantâneas ativa e reativa existem apenas quando as cargas estão conectadas no sistema elétrico. Isso evidencia o funcionamento do condicionador de potência, uma vez que esse possui como objetivo melhorar a qualidade da energia na presença de cargas no sistema. Além disso, a potência instantânea de sequência zero possui valor não nulo apenas quando a carga desequilibrada está conectada ao sistema elétrico.

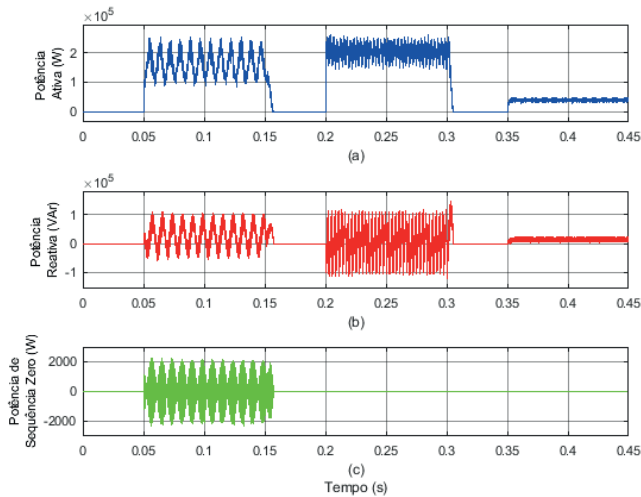


Fig. 11 Potências instantâneas do controle do condicionador de potência: (a) potência ativa ($P_{a\beta}$), (b) potência reativa ($Q_{a\beta}$), (c) potência de sequência zero (P_0).

A Figura 12 apresenta as correntes compensadas pelo controle do condicionador de potência. Quando a carga desequilibrada está conectada ao sistema, as correntes das fases a , b e c são 210,2 A, 148,7 A e 341,6 A, respectivamente. Na presença da carga não-linear, essas são 210,2 A, 231,0 A e 228,6 A. Quando a carga equilibrada está conectada, as correntes passam a ser 241,6 A, 225,6 A e 223,1 A para as fases a , b e c , respectivamente. Nota-se também, que a corrente compensada do neutro existe apenas quando a carga desequilibrada está conectada ao sistema elétrico, com um valor de pico de 164,3 A.

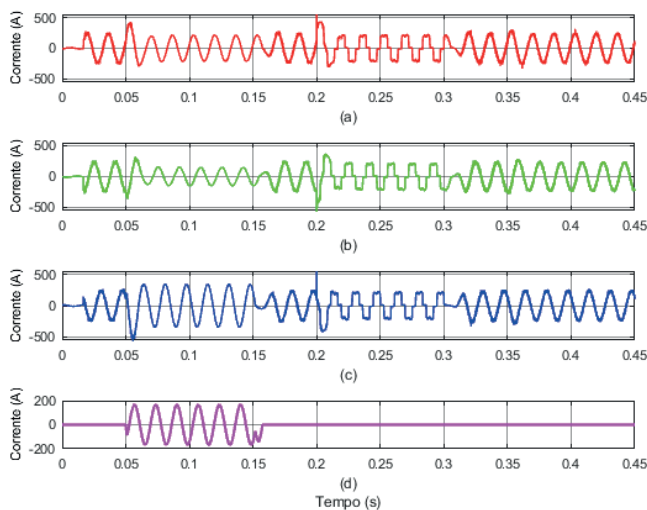


Fig. 12 Correntes compensadas pelo condicionador de potência: (a) corrente da fase a , (b) corrente da fase b , (c) corrente da fase c , (d) corrente do neutro.

A Figura 13 ilustra o comportamento das correntes no lado de baixa tensão do transformador. Quando a carga desequilibrada está em operação, o valor eficaz das correntes das fases a , b e c são 232,6 \angle 31,74° A, 234,0 \angle -89,65° A e 228,0 \angle 150,6° A, respectivamente. Gerando correntes de sequência positiva e negativa de 231,52 \angle 30,89° A e 3,54 \angle 107,31° A, o que fornece um fator de desequilíbrio de corrente de 1,53%, conforme a equação (17). Dessa forma, o condicionador de potência contribuiu para uma redução de 94,56% no fator de desequilíbrio de corrente.

$$F.D. = \frac{I_{a2}}{I_{a1}} \times 100\% = \frac{3,54}{231,52} \times 100\% = 1,53\%. \quad (17)$$

Onde $F.D.$ é o fator de desequilíbrio, I_{a2} é a corrente de sequência negativa, e I_{a1} é a corrente de sequência positiva.

Ademais, quando a carga não-linear está conectada ao sistema elétrico, a distorção harmônica total de corrente é de 9,83%, conforme pode ser observado no espectro harmônico da Figura 14. Assim, o condicionador de potência proposto contribuiu com uma redução de 75,16% na distorção harmônica total de corrente.

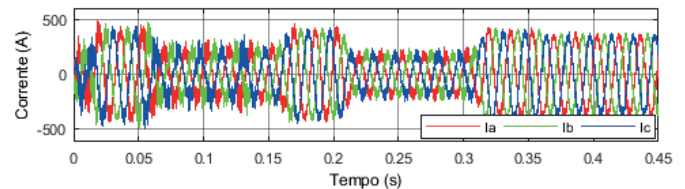


Fig. 13 Correntes no lado de baixa tensão do transformador com o condicionador de potência.

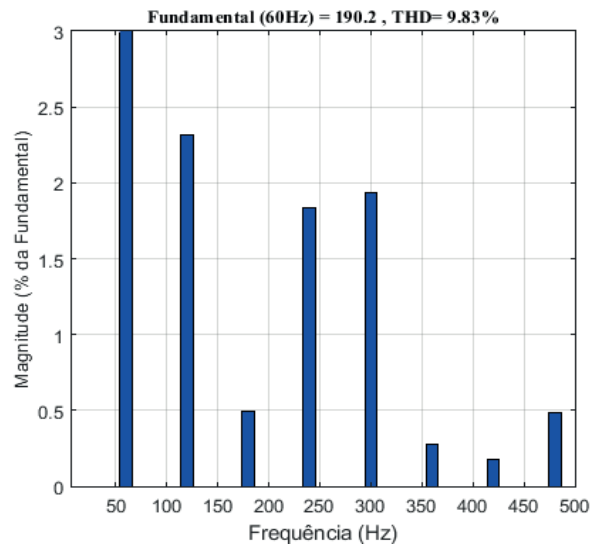


Fig. 14 Espectro harmônico da corrente quando a carga não-linear está conectada ao sistema elétrico considerando a atuação do condicionador de potência.

A Figura 15.a apresenta a corrente no neutro da carga desequilibrada e no neutro do condicionador de potência. Essas correntes apresentam amplitudes iguais, porém fases opostas, uma vez que o condicionador contribuiu para que a corrente de circulação no neutro do transformador seja anulada, conforme é apresentado na Figura 15.b.

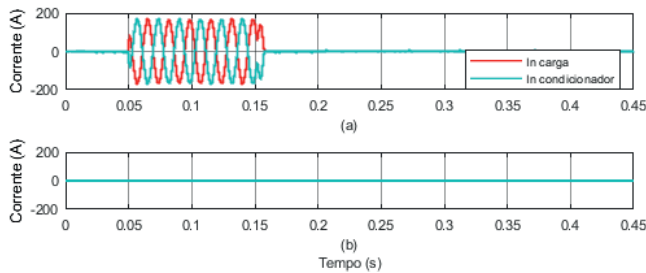


Fig. 15 Correntes com o condicionador de potência: (a) no neutro da carga desequilibrada e (b) no neutro do transformador.

A Tabela I sintetiza os resultados obtidos em ambos os estudos de caso. Com a observação dessa tabela nota-se a eficiência do condicionador de potência para reduzir significativamente o fator de desequilíbrio e a distorção harmônica. Além disso, o condicionador é responsável pela compensação da corrente no neutro do transformador.

TABELA I
Comparação dos Estudos de Casos

	Dois Inversores	Inversor e Condicionador de Potência
Fator de Desequilíbrio	28,26%	1,23%
Distorção Harmônica	39,57%	9,83%
Corrente no Neutro do Transformador	Presente	Ausente

VI. CONCLUSÕES

Nesse artigo, foi proposto um condicionador de potência e seu controle para realizar a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica e simultaneamente melhorar a qualidade de energia quando há cargas com características desequilibradas e não-lineares no sistema elétrico. A forma de calcular as correntes compensadas pelo controle do condicionador e a utilização das correntes compensadas de eixo zero e neutro permitem que esse atinja seus objetivos. Com a realização dos estudos de caso, pode-se concluir que o condicionador de potência apresentado atingiu os objetivos propostos. O fator de desequilíbrio sem o condicionador foi de 28,26% e, após a sua utilização, passou para 1,23% contribuindo com uma redução de 94,56%. A distorção harmônica total de corrente foi de 39,57% sem o condicionador e, com o seu emprego, passou para 9,83%, reduzindo em 75,16%. O condicionador também foi responsável pela eliminação da corrente que circula no neutro do transformador. Além disso, com a utilização do condicionador de potência e o seu controle proposto o sistema fotovoltaico também pode fornecer potência reativa à rede elétrica, sendo necessário apenas essa especificação em seu controle.

REFERÊNCIAS

[1] Y. Zhu and J. Fei, "Disturbance Observer Based Fuzzy Sliding Mode Control of PV Grid Connected Inverter," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 21202–21211, Apr. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2825678.

[2] B. Han, B. Bae, H. Kim, and S. Baek, "Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 330–338, Dec. 2006, doi:

10.1109/TPWRD.2005.852843.

[3] M. Davari, S. M. Aleemran, H. Nafisi, I. Salabeigi, and G. B. Gharehpetian, "Modeling the combination of UPQC and photovoltaic arrays with Multi-Input Single-Output DC-DC converter," in *2009 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2009, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICIT.2009.4939547.

[4] S. Sindhu, M. R. Sindhu, and T. N. P. Nambiar, "Implementation of photovoltaic integrated unified power conditioner for power quality enhancement," in *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914305.

[5] S. K. Dash and P. K. Ray, "Novel PV-tied UPQC topology based on a new model reference control scheme and integral plus sliding mode dc-link controller," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 28, no. 7, p. e2564, Jul. 2018, doi: 10.1002/etep.2564.

[6] P. Kumar, A. Kumar, and V. Gupta, "Design and implementation of solar PV fed UPQC with advanced MPPT technique," in *2017 International Conference on Innovations in Control, Communication and Information Systems (ICICCI)*, 2017, pp. 1–9, doi: 10.1109/ICICCIS.2017.8660829.

[7] S. Devassy and B. Singh, "Discrete SOGI based control of solar photovoltaic integrated unified power quality conditioner," in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/NPSC.2016.7858966.

[8] A. Patel, H. D. Mathur, and S. Bhanot, "A new SRF-based power angle control method for UPQC-DG to integrate solar PV into grid," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 1, p. e2667, Jan. 2019, doi: 10.1002/etep.2667.

[9] A. Awasthi and D. Patel, "Implementation of adaptive hysteresis current control technique for shunt active power conditioner and its comparison with conventional hysteresis current control technique," in *2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/SPICES.2017.8091304.

[10] C. Y. Jeong, J. G. Cho, Y. Kang, G. H. Rim, and E. H. Song, "A 100 kVA power conditioner for three-phase four-wire emergency generators," in *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No.98CH36196)*, 1998, vol. 2, pp. 1906–1911 vol.2, doi: 10.1109/PESC.1998.703442.

[11] I. Vechiu, G. Gurguiatu, and E. Rosu, "Advanced Active Power Conditioner to improve power quality in microgrids," in *2010 Conference Proceedings IPEC*, 2010, pp. 728–733, doi: 10.1109/IPEC.2010.5697021.

[12] L. Zhang, P. C. Loh, and F. Gao, "An integrated nine-switch power conditioner," in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, 2010, pp. 2663–2669, doi: 10.1109/IPEC.2010.5542338.

[13] R. A. Wanjari, A. B. Parit, and H. T. Jadhav, "An integrated eight-switch power conditioner for current and voltage profile improvement," in *2017*

- International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICCPCT.2017.8074271.
- [14] S. Devassy and B. Singh, “PLL-less d-q control of solar PV integrated UPQC,” in *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914293.
- [15] M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, B. A. Amaral, and F. A. S. Neves, “Unified power quality conditioner in a grid-connected photovoltaic system,” *Electr. Power Qual. Util. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 59–69, Dec. 2006.
- [16] Amirullah, A. Soeprijanto, Adiananda, and O. Penangsang, “Power Transfer Analysis Using UPQC-PV System Under Sag and Interruption With Variable Irradiance,” in *2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA)*, 2020, pp. 1–7, doi: 10.1109/ICoSTA48221.2020.1570615953.
- [17] A. Patel, S. K. Yadav, H. D. Mathur, S. Bhanot, and R. C. Bansal, “Optimum sizing of PV based UPQC-DG with improved power angle control,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 182, p. 106259, May. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106259>.
- [18] G. M. Pelz, S. A. O. da Silva, and L. P. Sampaio, “Distributed generation integrating a photovoltaic-based system with a single- to three-phase UPQC applied to rural or remote areas supplied by single-phase electrical power,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 117, p. 105673, May. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105673>.
- [19] Solar Hub, “PV Module SPR-415E-WHT-D Details,” 2019. [Online]. Available: <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/4197-SPR-415E-WHT-D-SunPower>. [Accessed: 12-Jan-2019].
- [20] M. Golzar, H. Van Khang, and A. M. M. Versland, “Control of ultra-high switching frequency power converters using virtual flux-based direct power control,” in *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8055976.
- [21] B. Callanan, “Application considerations for Silicon Carbide MOSFETs.” Cree Inc.
- [22] L. Abbatelli, M. Macaudo, and G. Catalisano, “Fully SiC based high efficiency boost converter,” in *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, 2014, pp. 1835–1837, doi: 10.1109/APEC.2014.6803555.
- [23] A. Reznik, M. G. Simões, A. Al-Durra, and S. M. Muyeen, “LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1225–1232, Jul. 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2274612.
- [24] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley, 2011.
- [25] A. C. de Souza, “Sistemas fotovoltaicos trifásicos com compensação de reativo, armazenamento interno de energia e inércia virtual,” Universidade Federal de Uberlândia, 2020.
- [26] J. k. Sahu, S. Sahu, J. P. Patra, S. K. Maharana, and B. Panda, “Harmonics analysis of a PV integrated Hysteresis current control inverter connected with grid and without grid,” in *2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 2019, pp. 1154–1157, doi: 10.1109/ICSSIT46314.2019.8987864.
- [27] S. Sahoo, S. K. M. ishra, and J. K. Sahu, “Standalone PV System Integrated with Hysteresis Current Controlled Inverter using MPPT Techniques,” in *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICES)*, 2019, pp. 2024–2029, doi: 10.1109/ICES45898.2019.9002384.
- [28] J. Liu, Y. Wu, L. Fan, Z. Si, and Z. Jia, “Current Hysteresis Control Design of Motorized Spindle Driven System Based on Semi-Physical Simulation Model,” in *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2020, pp. 1110–1115, doi: 10.1109/CCDC49329.2020.9164078.
- [29] S. Agarwal and A. Maity, “A 10-MHz Current-Mode Fixed-Frequency Hysteretic Controlled DC-DC Converter With Fast Transient Response,” in *2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Oct. 2019, pp. 945–948, doi: 10.1109/MWSCAS.2019.8885176.
- [30] M. Kanzian, M. Agostinelli, and M. Huemer, “Digital hysteresis sliding mode control for interleaved DC–DC converters,” *Control Eng. Pract.*, vol. 90, pp. 148–159, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.07.001>.
- [31] R. Viswadev, A. Mudlapur, V. V. Ramana, B. Venkatesaperumal, and S. Mishra, “A Novel AC Current Sensorless Hysteresis Control for Grid-Tie Inverters,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 67, no. 11, pp. 2577–2581, Dec. 2020, doi: 10.1109/TCSII.2019.2960289.

DADOS BIOGRÁFICOS

Jaqueline Oliveira Rezende, concluiu a graduação em 2012 e obteve a titulação de mestre em 2015 em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é professora do Instituto Federal de Goiás - Campus Jataí e aluna de doutorado em Engenharia Elétrica da UFU. Suas pesquisas se concentram na área de energia solar fotovoltaica, sistemas de energia elétrica e dinâmica de sistemas elétricos.

Geraldo Caixeta Guimarães, graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em 1977. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1984 e o grau de PhD em Engenharia Elétrica pela Universidade de Aberdeen, Aberdeen, Reino Unido, em 1990. Atualmente é professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU. Suas pesquisas se concentram na área de geração distribuída, dinâmica e sistemas elétricos.

Paulo Henrique Oliveira Rezende, concluiu a graduação em 2010, o mestrado em 2012 e o doutorado em 2016 em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Suas pesquisas se concentram na área de qualidade da energia elétrica, limites de suportabilidade e sensibilidade de eletrodomésticos frente a distúrbios elétricos e transmissão de energia em corrente contínua.

Thales Lima Oliveira, concluiu a graduação no ano de 2014, obteve a titulação de mestre em 2016 e de doutor em 2019 em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor do Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara. Suas pesquisas se concentram na área de fluxo de carga, desenvolvimento de *software* para análise de sistemas elétricos de potência e curto-circuito.

Leonardo Rosenthal Caetano Silva, concluiu a graduação em Engenharia Elétrica no ano de 2012, na Universidade de Uberaba, obteve a titulação de mestre em 2015 e de doutor em 2019 pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor do Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara. Suas pesquisas se concentra nas áreas de geração solar fotovoltaica e geração distribuída de energia.

Anderson Rodrigo Piccini, graduado em Tecnologia em Eletrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná em 2004. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em 2014. É professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná IFPR - Campus Paranavaí. Atualmente é aluno de doutorado do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica na UFU. Suas pesquisas se concentram na área de energia solar fotovoltaica.