

APLICAÇÃO DE INVERSORES MULTIFUNCIONAIS TRIFÁSICOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Ramon Marquioli Domingos¹ - ramon.domingos@ufv.br

Allan F. Cupertino^{2,1} – allan.cupertino@yahoo.com.br

Heverton A. Pereira^{1,2} – hevertonaugusto@yahoo.com.br

¹ Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs s/nº, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. O conversor eletrônico é um elemento fundamental no controle de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Este conversor não opera durante todo o período de seu funcionamento injetando a corrente nominal, devido a variações de radiação no painel solar. Esta folga pode ser utilizada para compensar harmônicos gerados por cargas não lineares da própria instalação. Quando o conversor trabalha assim, ele é conhecido como inversor multifuncional. A maioria dos trabalhos existentes acerca do assunto trata de inversores multifuncionais monofásicos, porém, neste trabalho será abordado o inversor multifuncional trifásico. É utilizada a Teoria da Potência Instantânea para obter as componentes harmônicas da corrente na carga. Esta corrente, que é transformada para coordenadas dq , é utilizada no controle do inversor para que faça a compensação harmônica e reduza os efeitos dessas cargas na rede elétrica.

Palavras-chave: Inversor multifuncional, Teoria da Potência Instantânea, Energia Solar, Compensação de Harmônicos.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os inversores eletrônicos de potência estão sendo cada vez mais utilizados para conectar fontes alternativas de energia à rede elétrica. Contudo, alguns trabalhos da literatura têm proposto mitigar distúrbios utilizando o mesmo equipamento (Carnieletto, et al., 2009). Em particular, no caso de sistemas fotovoltaicos, como a radiação solar varia durante o dia, em poucas situações o inversor trabalha injetando a potência nominal, apresentando assim uma margem de atuação que pode ser utilizada para melhorar a qualidade de energia da instalação.

Desta forma, podem ser agregadas a estrutura do conversor estratégias de compensação de harmônicos, amortecimento de ressonâncias e também suprimento da demanda de reativos (Bonaldo, et al., 2013). No caso da compensação de harmônicos é necessária uma estrutura de detecção do conteúdo harmônico da carga e uma estrutura de controle capaz de seguir a referência de corrente não senoidal necessária para a compensação.

O método de detecção utilizado neste trabalho é baseado na Teoria da Potência Instantânea proposto por (Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A., 1984). Através deste método, é possível separar as componentes de potência relacionadas a cada tipo de distúrbio (Watanabe, et al.) e, então, gerar a corrente de referência para a compensação. Resultados mostram que é possível realizar a compensação harmônica, bem como será feito neste trabalho.

Grande parte dos trabalhos sobre inversores multifuncionais abordam topologias de inversores monofásicos, como pode ser observado em (Bonaldo, et al., 2013), (He, et al., To be published) (Cupertino, et al., to be published) e (Cupertino, et al., to be published). Porém, neste trabalho, será destacada a utilização de inversores multifuncionais trifásicos, uma vez que com eles pode-se aumentar o range para potências mais altas.

A estrutura de controle foi baseada no controle em coordenadas síncronas com controladores do tipo proporcional-integral (PI), que respondem melhor quando se está utilizando o sistema trifásico. A modelagem do sistema e o detalhamento da estrutura de controle completa são apresentados a seguir.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

2.1 Modelagem do painel solar

O modelo do painel utilizado é o proposto por (Villalva, et al., 2009) e está representado pela Fig.1. Na Tab.1 são apresentados os parâmetros utilizados no painel solar simulado. Neste sistema, utilizou-se 80 desses painéis em um arranjo de cinco blocos paralelos e cada um desses blocos com 16 painéis em série.

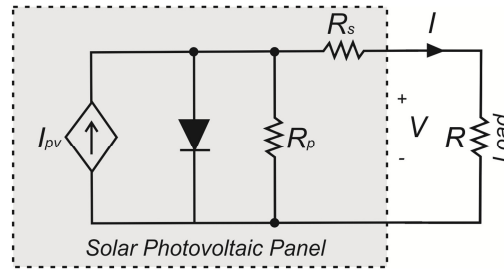


Figura 1 – Modelo do Painel Solar.

Tabela 1 - Especificações elétricas do painel solar para as condições de radiação de 1000 W/m² e temperatura do painel de 25 °C.

PARÂMETRO	VALOR
Potência Máxima	250 W
Tensão de Máxima Potência	31,29V
Corrente de Máxima Potência	7,99 A
Tensão de Circuito Aberto	37,5 V
Corrente de Curto-Circuito	8,5 A
Coefficiente K_i	4,3 mA/°C
Coefficiente K_v	-313 mV/°C

A corrente no painel solar é:

$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{V+I R_s}{a V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde I_{pv} é dado por:

$$I_{pv} = (I_{pv_n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_{ref}} \quad (2)$$

I_{pv_n} é a corrente em condições nominais, dada por:

$$I_{pv_n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc_n} \quad (3)$$

Tem-se que $\Delta T = T - T_n$ (T é a temperatura do painel solar e T_n é a temperatura do painel solar nas condições nominais); G e G_{ref} são os valores de radiação solar incidente e a radiação de referência (W/m²), respectivamente; K_i é o coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito (A/K).

A corrente de fuga reversa do diodo, I_0 é:

$$I_0 = \frac{I_{sc_n} + K_i \Delta T}{e^{\left(\frac{(V_{oc_n} + K_v \Delta T)}{a V_t} \right)} - 1} \quad (4)$$

Sendo I_{sc_n} a corrente de curto-circuito nominal, V_{oc_n} a tensão de circuito aberto nominal e K_v o coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto (V/K). A variável “a” é a constante de idealidade do diodo, que varia de $1 \leq a \leq 1,5$. Finalmente V_t é calculado por:

$$V_t = \frac{k T}{e} \quad (5)$$

Onde k é a constante de Boltzman, T é a temperatura do painel (K) e “e” é a carga de um elétron.

As resistências R_s e R_p não são informadas pelo fabricante. A estimação destas variáveis em função dos parâmetros informados pelo fabricante é realizada através de um algoritmo apresentado em detalhes em (Villalva, et al., 2009).

2.2 Modelo do inversor PWM

No inversor, a modelagem de seus parâmetros é feita considerando inicialmente um sistema trifásico equilibrado. É utilizado um filtro LCL a fim de proporcionar um bom padrão de qualidade de energia, reduzindo os harmônicos causados pelo chaveamento dos conversores. Os parâmetros do filtro são calculados de acordo com a metodologia proposta por (Liserre, et al., 2005).

Desprezando-se o efeito do capacitor do filtro na frequência fundamental (ω_n), as equações do sistema em coordenadas dq podem ser escritas como mostrado nas Eq. (6) e (7) (Liserre, et al., 2005), (Chaudhary, et al., 2009).

$$v_d = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_n L i_q + V_d \quad (6)$$

$$v_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_n L i_d + V_q \quad (7)$$

Onde v_d e i_d são as componentes de eixo direto e v_q e i_q as componentes de eixo de quadratura da tensão e corrente, respectivamente. L representa a soma das indutâncias do filtro e R é a soma das resistências do filtro.

Neste trabalho, faz-se uso da estrutura DSOGI-PLL (do inglês, *Double Second Order Generalized Integrator phase-locked loop*) proposta por (Rodríguez, et al., 2006) para obter o ângulo de orientação do sistema dq . O diagrama de blocos da DSOGI-PLL é apresentado na Fig. 3.

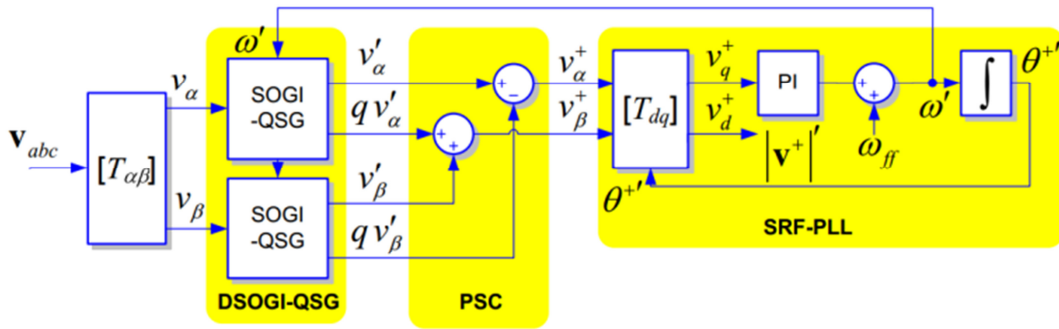


Figura 2 Diagrama de blocos da DSOGI-PLL (Almeida, 2011)

2.3 Método de Detecção Baseado na Teoria de Potência Instantânea

Através da teoria da potência instantânea pode-se decompor um sinal de corrente em três parcelas ortogonais entre si: a parcela ativa, reativa e harmônica. A descrição completa dessa teoria está representada em (Watanabe, et al.). Neste tópico serão apresentados apenas alguns resultados importantes.

A potência real p , imaginária q e de sequência zero p_0 são dadas pela Eq. (8).

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

As correntes e tensões na Eq. (8) são instantâneas e genéricas podendo conter desequilíbrios e harmônicos. Assim, no caso mais geral em que estas imperfeições estão presentes pode-se dizer que as potências instantâneas real, imaginária e de sequência zero terão componentes de valores médios e oscilantes. Isto está exemplificado na Eq. (9).

$$\begin{aligned} p_0 &= \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \\ p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (9)$$

Por fim, através da equação (10), podemos extrair as correntes α e β oscilantes, representadas por i_α e i_β respectivamente, que contemplam as informações do conteúdo harmônico da carga.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3. METODOLOGIA

Inicialmente, o painel solar descrito pelo tópico 2.1 foi simulado e validado utilizando o *Matlab/Simulink*. As características desse painel são as representadas pela Tab. 1.

Em seguida, foi simulada a conexão do arranjo fotovoltaico na rede elétrica através do inversor. Foram realizadas variações no conteúdo harmônico da carga e na radiação solar incidente sobre os painéis. Um filtro LCL foi conectado a este inversor e apresenta os dados conforme mostra a Tabela 2. Vale lembrar que há um segundo indutor presente no transformador ligado ao inversor. Os demais parâmetros do inversor estão especificados também conforme mostra a Tab. 2

Tabela 2 – Parâmetros dos componentes do sistema.

INVERSOR	
Potência	20 kW
Frequência de chaveamento	9 k Hz
Tensão de saída – RMS	220 V
Frequência da rede	60 Hz
FILTRO LCL	
Capacitância	54,805 μ F
Primeira Indutância	3,9m H
Resistor de Amortecimento	3,2 Ω
TRANSFORMADOR	
Potência	30k VA
Impedância	3,5 %
Razão X/R	8
Tensão primária	13,8 k V
Tensão Secundária	220 V
REDE	
Tensão	13,8 k V
Potência de curto circuito	189.2 MVA _r
Razão X/R	14,2
Frequência	60 Hz

Uma carga trifásica foi conectada ao sistema do lado de baixa tensão do transformador com a finalidade de gerar distorções e harmônicos para que o inversor possa atuar e fazer a compensação. É neste ponto que entra o trabalho proposto por (Watanabe, et al.) para compensação de harmônicos na rede onde, através da separação das partes oscilantes de p e q , serão obtidas as correntes para a compensação harmônica.

A separação das partes oscilantes $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$ de p e q é feita através de um filtro de sinal passa alta devidamente calculado para este fim. A partir de $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$, utilizando-se da Eq. (10), as corrente $i_{\alpha-\beta}$ oscilantes foram extraídas. Depois, utilizando-se a Eq. (11), transformou-se os valores encontrados em Eq.(10) para coordenadas abc . Assim, através da Transformação de CLARK e PARK, respectivamente, transformou-se estas correntes das coordenadas abc para $dq0$. Logo, serão encontradas as correntes oscilantes $\tilde{i}_d$ e $\tilde{i}_q$. Essas correntes serão adicionadas ao controle PWM do inversor conforme mostrado na Fig. 3, destacado em vermelho, e, então, espera-se que amenize os efeitos dos harmônicos gerados pela carga em questão. O diagrama representado na Fig. 4 mostra todos os passos discutidos até agora no que diz respeito à detecção das potências ativa e reativa oscilantes e também as correntes de compensação. Este modo de detecção foi proposto por (Akagi, 1996). Vale ressaltar que, na Fig. 3, os itens em preto correspondem à parte do controle convencional do inversor e os itens em vermelho correspondem às partes necessárias para que o inversor trabalhe no modo multifuncional.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

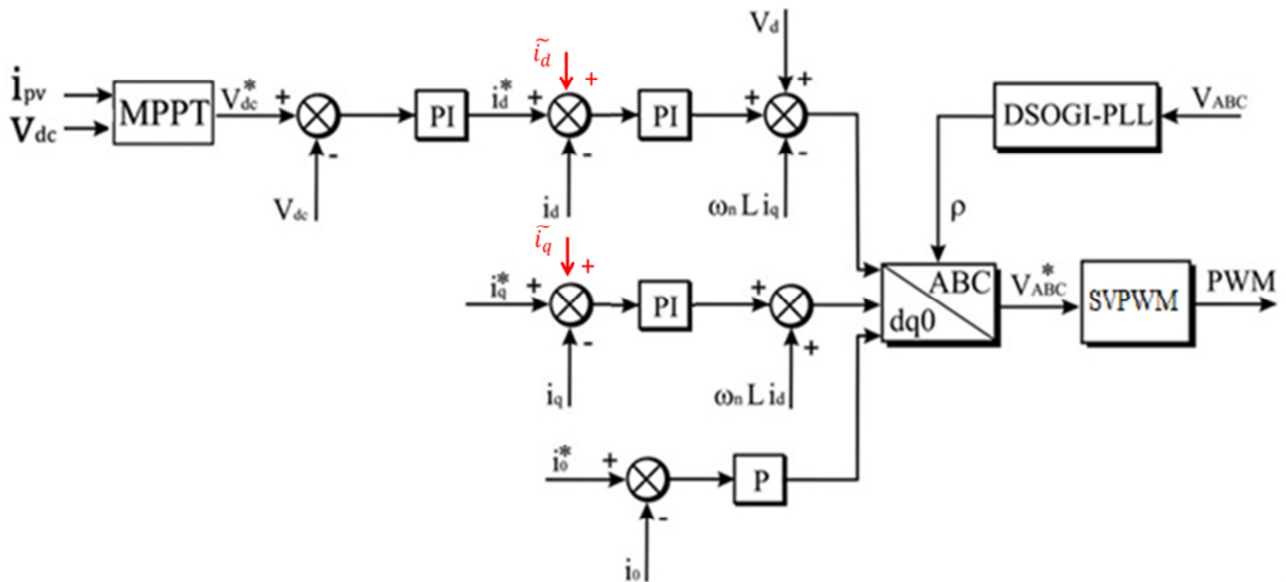


Figura 3 – Compensação harmônica no controle do inversor.

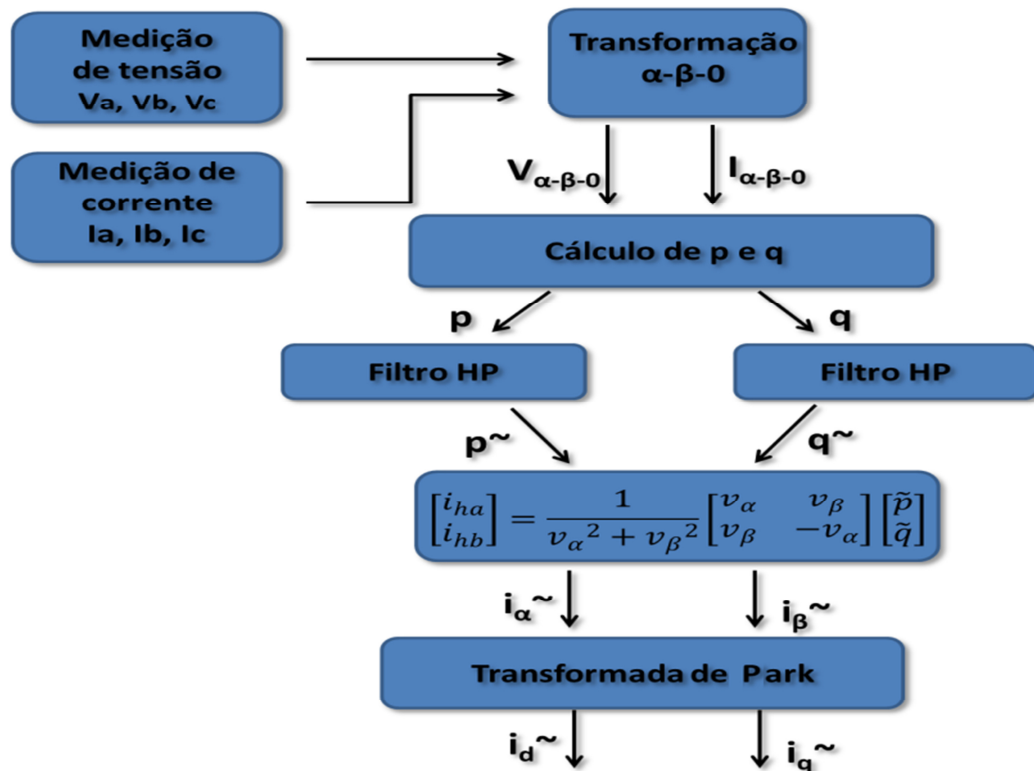


Figura 4 – Diagrama do algoritmo de cálculo de $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$.

É utilizado o algoritmo de MPPT baseado na condutância incremental, que apresenta uma resposta superior em relação a outras técnicas apresentadas na literatura (Villalva, 2010). O princípio de funcionamento deste algoritmo baseia-se no cálculo da derivada da curva de potência do painel que será nula apenas no ponto de máxima potência (Almeida, 2011). Este algoritmo calcula a tensão de referência do barramento CC do inversor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento das correntes na Fase A durante todo o processo na rede, no inversor e na carga está representado na Fig. 5. Inicialmente, quando o inversor está funcionando em seu modo normal, pode-se perceber a distorção provocada na rede pela carga. Esta distorção está evidente na Fig. 5 até o tempo de 3 segundos, onde a corrente na rede, representada por I_a , está visivelmente distorcida.

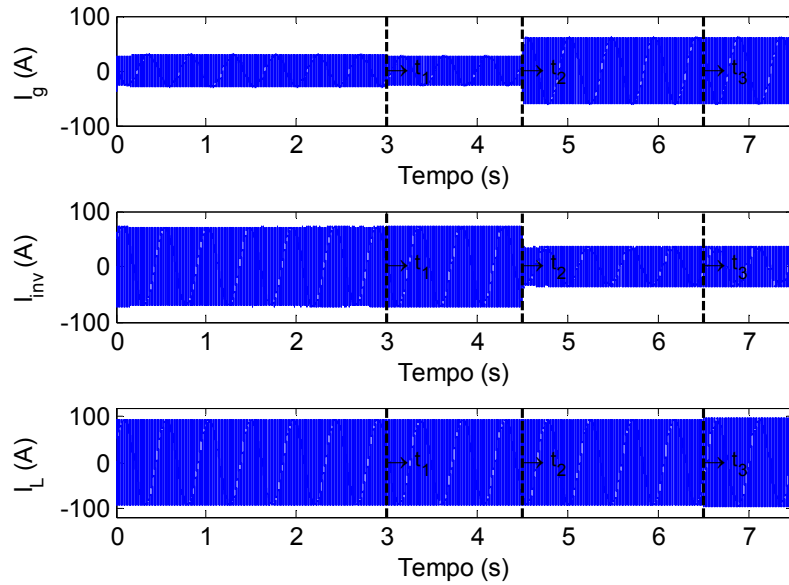


Figura 5 – Correntes na rede, no inversor e na carga.

No instante $t_1 = 3$ segundos, é iniciada a compensação, onde o inversor começa a trabalhar como inversor multifuncional. Ainda de acordo com a Fig.5 pode-se perceber que a corrente na rede, I_g , é compensada pelo inversor e sua distorção reduz consideravelmente. Como o inversor está injetando corrente harmônica para que ocorra a compensação, é esperado que sua corrente, representada por I_{inv} , fique mais distorcida. A corrente na carga, I_L , permanece a mesma, uma vez que a carga não foi alterada. Pode-se comprovar esta compensação na rede observando a Tab. 3 onde a distorção total da corrente cai de 11,7 para 5,2%. A distorção na carga permanece constante e no inversor aumenta, conforme esperado.

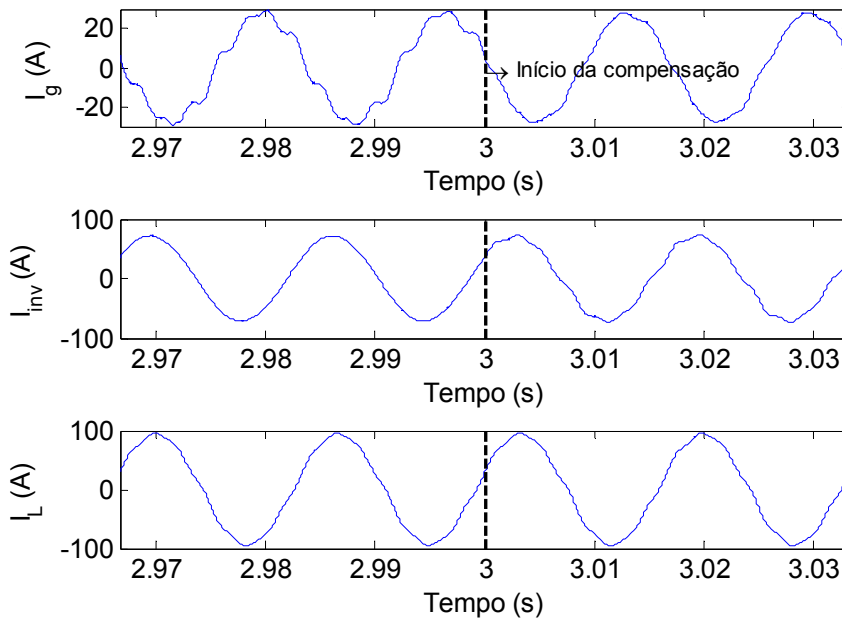


Figura 6 – Início da compensação pelo inversor multifuncional.

No instante $t_2 = 4,5$ segundos acontece uma queda da radiação de 1000 para 500 W/m². Neste instante, a corrente no inversor diminui e o MPPT atua no sistema para que o mesmo continue trabalhando no ponto de máxima potência. Pode-se perceber a atuação do MPPT na Fig. 7, no instante t_2 . Como mostra a Fig. 8, neste instante a distorção no inversor aumenta porque ele injeta menos corrente fundamental na rede. Isto implica em uma redução na distorção total

da corrente da rede associada a um aumento da componente fundamental, como pode ser observado pela Tab.3 em $t_2 \leq t \leq t_3$.

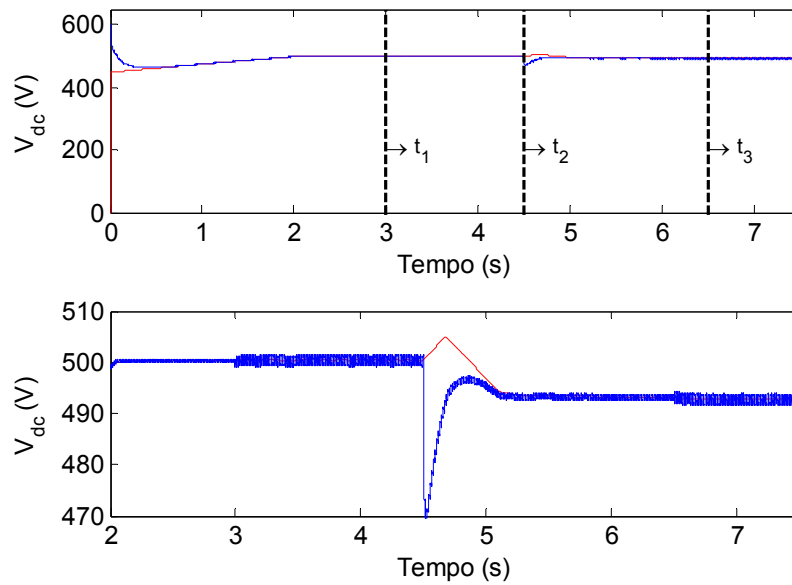


Figura 7 – Comportamento da tensão do barramento CC durante a operação multifuncional e operação do MPPT.

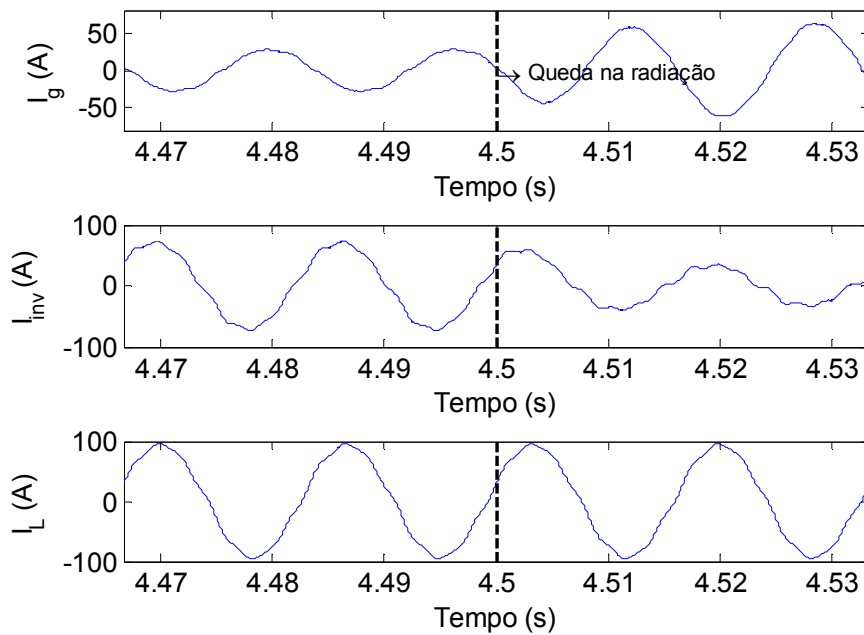


Figura 8 – Queda na radiação sobre o painel solar.

No instante $t_3 = 6,5$ s ocorre uma variação na carga. De acordo com a Fig. 9, observa-se que as distorções das correntes na rede, I_g , no inversor, I_{inv} , e na carga, I_L , aumentem. Isso se deve ao fato do conteúdo harmônico na carga dobrar, consequentemente fazendo a mesma injetar harmônicos no sistema. Porém, pode-se observar através da THD na Tabela 3 que, mesmo com a variação na carga, ainda acontece a compensação pelo inversor sobre a rede, sendo que o THD fica em 5,0%.

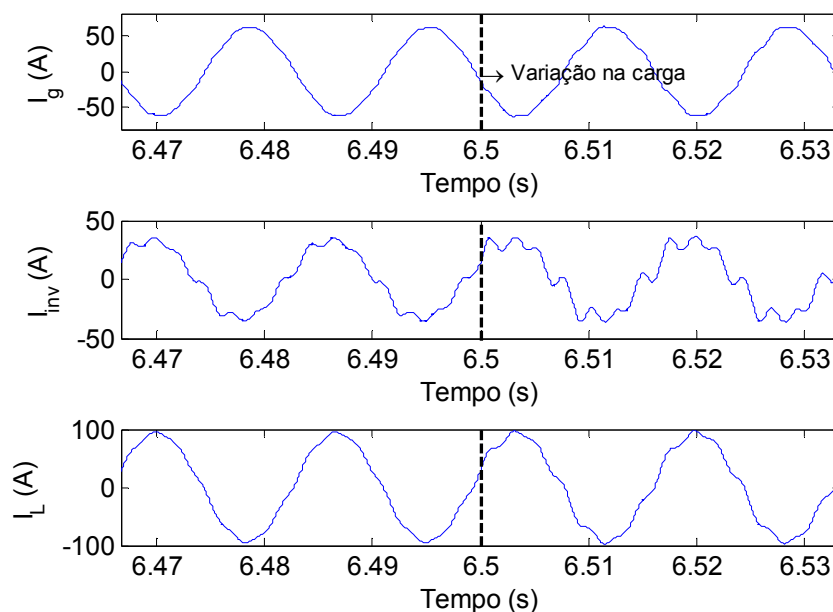


Figura 9 – Variação do valor da carga.

Tabela 3- THD de corrente.

Corrente/Intervalo	$0 \leq t \leq t_1$	$t_1 \leq t \leq t_2$	$t_2 \leq t \leq t_3$	$t \geq t_3$
Carga	3,9 %	3,9 %	3,9 %	7,9 %
Inversor	0,6 %	5,7 %	12,4 %	24,1 %
Rede	11,7 %	5,2 %	2,3 %	5,0 %

Apesar da redução considerável da THD da corrente na rede, observa-se que o inversor não consegue levar o THD para um valor próximo de zero. Isso se deve ao fato de as correntes I_d e I_q , não seguirem exatamente a referência, conforme mostrado na Figura 10. Este erro pode ser reduzido se a faixa de passagem do controle de corrente for aumentada. Neste trabalho utilizou-se uma faixa de passagem para a malha de corrente de 900 Hz, correspondente a 1/10 da frequência de chaveamento do conversor.

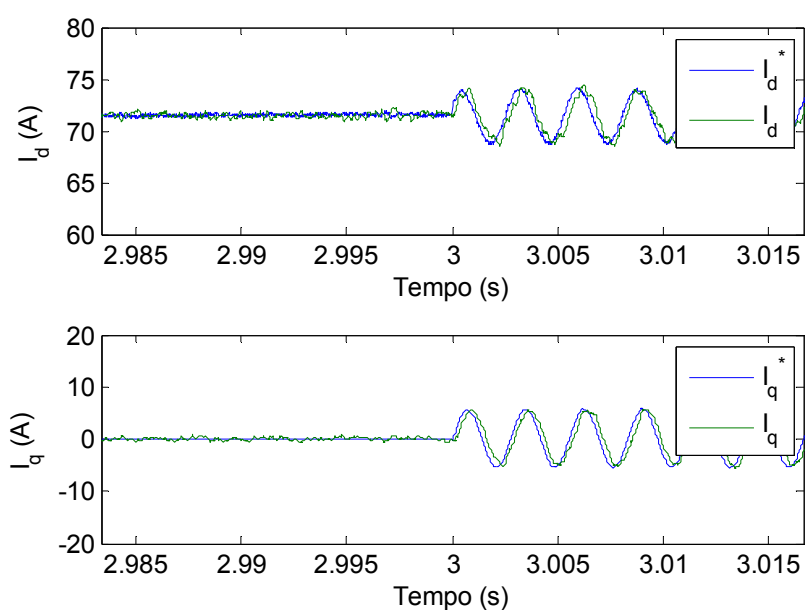


Figura 10 – Corrente no controle PWM.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um inversor trifásico multifuncional aplicado em sistemas fotovoltaicos. Os resultados obtidos mostraram que a estratégia de controle do inversor, quando trabalhando como inversor multifuncional, compensou os harmônicos da carga, melhorando a qualidade de energia da rede.

Além disso, a multifuncionalidade não influenciou na busca do ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico. Logo, a multifuncionalidade mostrou-se uma ferramenta positiva, principalmente para concessionárias de energia. Uma limitação desse sistema é que, como a corrente não segue exatamente a referência, a compensação harmônica não acontece totalmente. Uma proposta seria a utilização de controladores ressonantes ajustados na frequência de cada harmônico o qual se deseja compensar.

REFERÊNCIAS

- Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning [Article] // IEEE. - 1996. - pp. 1312-1322.
- Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components [Article] // IEEE Trans. Ind. Appl.. - 1984. - pp. 625-630.
- Almeida Pedro Machado de Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição [Report] / UFJF. - Juiz de Fora : [s.n.], 2011. - p. 190. - Master thesis.
- Bonaldo J.P. and Pomilio J.A. Multi-Functional Use of Single-Phase Power Converters [Article] // ISGT LA . - 2013.
- CARNIELETTO R. [et al.] A Multifunctional Single-Phase Voltage Source Inverter in Perspective of the Smart Grid Initiative [Article] // Industry Applications Society Annual Meeting. - October 2009. - pp. 1-7.
- Chaudhary S. K. [et al.] Chopper Controlled Resistors in VSC-HVDC Transmission for WPP with Full-scale Converters [Journal] // IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy. - 2009. - p. 8.
- CUPERTINO A.F. [et al.] Inversores Multifuncionais Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica [Article] // Congresso Brasileiro de Energia Solar. - Recife : [s.n.], to be published.
- CUPERTINO A.F. [et al.] Multifunctional Inverters Applied in Grid-Connected Photovoltaic System [Article] // Simpósio Brasileiro Sobre Sistemas Elétricos. - Foz do Iguaçu : [s.n.], to be published.
- He Jinwei [et al.] Active Harmonic Filtering Using Current Controlled GridConnected DG Units with Closed-Loop Power Control [Journal] // IEEE Transactions on Power Electronics. - To be published.
- Liserre Marco, Blaabjerg Frede and Hansen Steffan Design and Control of an LCL- Filter-Based Three-Phase Active Rectifier [Article] // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. - September 2005. - pp. 1281-1291.
- Rodríguez Pedro [et al.] New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions [Journal] // 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. - Barcelona, Aalborg and Bari : [s.n.], 2006. - p. 7.
- Villalva Marcelo Gradella Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica [Report]. - Campinas : [s.n.], 2010.
- Villalva Marcelo Gradella, Gazoli Jonas Rafael and Filho Ernesto Ruppert Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays [Journal] // IEEE Transactions on Power Electronics. - March 2009. - 1 : Vol. 24. - pp. 1198-1208.
- Watanabe E.H. and Aredes M. Teoria de Potência ATiva e Reativa Instantânea e Aplicações [Article].

APPLICATION OF THREE-PHASE MULTIFUNCTIONAL INVERTERS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. *The electronic converter is a fundamental element in grid connected PV systems. This converter generally doesn't operate at the rated point due to variations in radiation on the solar panel. This margin can be used to compensate harmonics generated by non-linear loads of the installation. In this work, is used the Instantaneous Power Theory to obtain the harmonics components of current at the load. This current, which is transformed to dq coordinates, is used in the inverter to do the harmonic compensation and reduces the total harmonic distortion of grid current.*

Key words: *Multifunctional Inverter, Instantaneous Power Theory, Solar Energy, Harmonics Compensation.*