

INVERSORES MULTIFUNCIONAIS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

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

Ramon Marquioli Domingos² – ramon.domingos@ufv.br

Heverton Augusto Pereira^{1,2} – heverton.pereira@ufv.br

Wadaed Uturbey da Costa¹ – wadaed@cpdee.ufmg.br

Selênio Rocha Silva¹ – selenios@cpdee.ufmg.br

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

² Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs s/nº, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

Resumo. Um elemento fundamental no controle de sistemas fotovoltaicos conectados à rede é o conversor eletrônico. Este componente tem como principal função injetar toda a potência gerada na rede elétrica. Apesar disso, em grande parte do seu período de funcionamento, o conversor não opera injetando corrente nominal. Neste contexto, este trabalho pretende estudar a aplicação da teoria da potência conservativa (CPT) no controle de inversores monofásicos conectados à rede a fim de possibilitar ao conversor trabalhar de forma multifuncional. Tal multifuncionalidade engloba a injeção de toda a potência gerada, a operação como filtro ativo de potência e compensação de reativos. Com esta estratégia pretende-se reduzir o impacto de cargas não lineares na rede elétrica.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Teoria da Potência Conservativa, Compensação de Harmônicos, Qualidade de Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

O grande número de cargas não lineares conectadas à rede elétrica atualmente causa diversos impactos na qualidade de energia elétrica. O alto índice de distorção de corrente gerado por alguns dispositivos tende a degradar a qualidade da tensão no ponto de acoplamento comum (PCC) prejudicando cargas mais sensíveis (Arrilaga, 1997).

Aliado a este fato, a geração distribuída tem crescido consideravelmente nos últimos anos. A possibilidade de gerar energia nas proximidades dos consumidores permite eliminar os custos de transmissão de energia e aumenta consideravelmente a confiabilidade do sistema elétrico (Simões, Kyriakides, et. al., 2012). O elemento básico de um sistema fotovoltaico é o inversor PWM, o qual conecta a fonte (painéis solares) à rede de distribuição (Cupertino, Carlette, 2013).

Na maioria das aplicações o inversor trabalha injetando toda a potência gerada na rede elétrica e com fator de potência unitário. Em particular, no caso dos sistemas fotovoltaicos, devido à variação da radiação solar durante o dia, em poucas situações o inversor trabalha injetando potência nominal. Desta forma o inversor apresenta uma margem de atuação (em termos de corrente) que não é explorada ao longo do ciclo diário de funcionamento.

Neste contexto, alguns trabalhos na literatura propõem a utilização multifuncional de inversores PWM. Este conceito consiste em agregar ao algoritmo de controle do inversor a capacidade de compensar reativos e trabalhar como filtro ativo de potência (FAP), compensando assim os harmônicos da carga (Bonaldo e Pomílio, 2013). Esta filosofia permite que um sistema fotovoltaico melhore os índices de qualidade de energia de uma determinada instalação. Assim, se o sistema fotovoltaico já está instalado, uma modificação no algoritmo de controle pode ser uma solução interessante se comparada com a instalação de filtros passivos. Esta filosofia permite que um sistema fotovoltaico melhore os índices de qualidade de energia de uma determinada instalação. Assim, se o sistema fotovoltaico já está instalado, uma modificação no algoritmo de controle pode ser uma solução interessante se comparada com a instalação de filtros (He, Wei Li, et al., To be published).

A complexidade do algoritmo de controle de um inversor multifuncional é influenciada basicamente pelos seguintes fatores:

- Método de detecção de harmônicos;
- A estrutura de controle;
- O gerenciamento de quais funções serão executadas devido à limitação de corrente das chaves semicondutoras.

Quanto à forma de detecção utilizada, diversas metodologias são propostas na literatura: o esquema de detecção usando a teoria da potência instantânea (Akagi, Kanazawa e Nabae, 1984), o método de detecção baseado na

transformada de Fourier (Mcgrath, Holmes e Galloway, 2005), utilização de integradores generalizados de segunda ordem (SOGI) (Rodríguez, Luna, et al., 2011) e a utilização de um método baseado no cancelamento de sinais atrasados no tempo (Wang e Li, 2013). Apesar de sua eficácia, todos estes métodos apresentam um aumento considerável no esforço computacional do processamento do algoritmo de controle, o que pode não ser aceitável dependendo do projeto (He, Wei Li, et al., To be published).

Em relação ao tipo de controlador utilizado, podem-se citar o controlador proporcional-integral (PI), o controlador proporcional-ressonante (PR) e os controladores não lineares (Cupertino, Carlette, 2013), (Wang, Duarte, et al., 2011). Em aplicações monofásicas, muitos trabalhos sugerem a aplicação dos controladores ressonantes, já que os sinais de referência são senoidais. Apesar disso, a multifuncionalidade exige a implementação de um controlador ressonante para cada harmônico. A título de exemplo, He, Wei Li, et al. (To be published) utiliza controladores ressonantes desde a frequência fundamental até o 15º harmônico. Isto aumenta consideravelmente a complexidade do algoritmo de controle.

Por sua vez, Bonaldo e Pomílio (2013) propõe uma técnica interessante para extração das componentes harmônicas da corrente na carga baseada na utilização da teoria da potência conservativa (CPT), proposta por Tenti, Paredes e Mattavelli (2011). Esta metodologia permite obter separadamente as componentes ativa, reativa e harmônica de uma forma de onda não senoidal. Assim não é necessária uma estrutura separada para a extração de cada harmônico, o que permite robustez perante a variação das características harmônicas da carga. Além disso, é proposta a utilização de um controlador PI na malha de corrente que simplifica consideravelmente a complexidade do sistema.

Apesar disso, Bonaldo e Pomílio (2013) modela o painel solar como uma fonte de corrente e despreza a dinâmica do algoritmo de máxima potência. A grande questão é que estes dois fatores tem uma influência considerável na dinâmica da tensão do barramento CC e da corrente injetada na rede.

Este trabalho apresenta resultados de simulação de um inversor fotovoltaico multifuncional conectado a rede de distribuição a fim de validar o algoritmo de controle proposto. Em seguida é apresentado um estudo de caso com 5 sistemas residenciais conectados em uma mesma rede de distribuição e é avaliada a melhoria obtida no perfil de tensão do PCC quando a multifuncionalidade é utilizada. O sistema estudado é apresentado na Fig. 1.

A modelagem dos componentes é apresentada na seção II. A seção III apresenta os resultados obtidos.

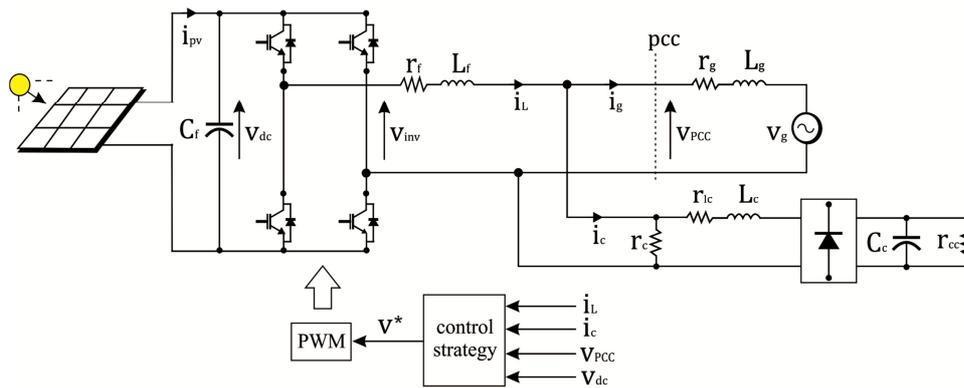


Figura 1– Sistema fotovoltaico conectado à rede baseado em um inversor multifuncional.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

2.1 Modelagem do Painel Solar

O modelo do painel fotovoltaico neste trabalho é o proposto por Villalva, Gazoli e Filho (2009) e é mostrado na Fig. 2. A Tab. 1 apresenta os parâmetros do painel SM48KSM, produzido pela empresa Kyocera, a qual é utilizado neste trabalho.

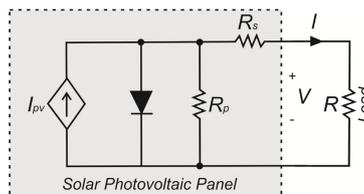


Figura 2 – Modelo do Painel Solar.

Tabela 1 – Parâmetros do painel utilizado.

Parâmetro (<i>unidade</i>)	Símbolo	Valor
Potência máxima (<i>W</i>)	P_{max_e}	48
Tensão de máxima potência (<i>V</i>)	V_{mp}	18,6
Corrente de máxima potência (<i>A</i>)	I_{mp}	2,59
Tensão de circuito aberto (<i>V</i>)	V_{oc_n}	22,1
Corrente de curto circuito (<i>A</i>)	I_{sc_n}	2,89
Coefficiente de temperatura de V_{oc_n} (<i>V/K</i>)	K_v	-0,07
Coefficiente de temperatura de I_{sc_n} (<i>A/K</i>)	K_i	0,00166

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:

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

$\Delta T = T - T_n$ (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/m^2), 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:

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

I_{sc_n} é a corrente de curto-circuito nominal, V_{oc_n} é a tensão de circuito aberto nominal e K_v é 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.

Um algoritmo para ajuste de R_s e R_p é proposto por Villalva, Gazoli e Filho (2009). Na verdade, existe somente um par $\{R_s, R_p\}$ que satisfaz $P_{max_{model}} = P_{max_e}$. Utilizando informações presentes em Eq.(1), pode-se obter:

$$R_p = \frac{V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} R_s)}{V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a V_t} \right)} - 1 \right] - P_{max_e}} \quad (6)$$

Utiliza-se o processo iterativo mostrado na Fig. 3. Os valores iniciais de R_s e R_p são (Villalva, Gazoli e Filho, 2009):

$$V(s) = \frac{v'_\alpha}{v_\alpha} = \frac{k \omega_r s}{s^2 + k \omega_r s + \omega_r^2} \quad (8)$$

ω_r é a frequência fundamental da rede e k é um fator de amortecimento. $k = \sqrt{2}$ resulta numa resposta criticamente amortecida (TEODORESCU, LISERRE e RODRÍGUEZ, 2011) e foi adotado neste trabalho.

A malha interna de corrente também é baseada em controladores PI. A compensação de harmônicos e reativos da carga (operação multifuncional) é realizada adicionando-se o conteúdo indesejado da carga na referência de corrente da malha interna.

A malha de corrente calcula o índice de modulação do inversor. Esta variável é utilizada pelo algoritmo de PWM que calcula os pulsos das chaves do inversor.

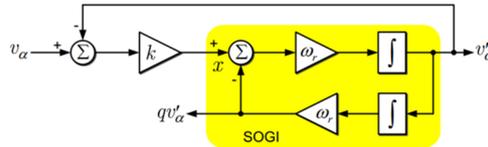


Figura 6 – Filtro passa-banda baseado no SOGI (Almeida, 2011).

A malha interna de corrente também é baseada em controladores PI. A compensação de harmônicos e reativos da carga (operação multifuncional) é realizada adicionando-se o conteúdo indesejado da carga na referência de corrente da malha interna. Esta malha calcula o índice de modulação do inversor. Esta variável é utilizada pelo algoritmo de PWM que calcula os pulsos das chaves do inversor.

2.3 Método de detecção baseado na TPC

A teoria da potência conservativa permite decompor um sinal de corrente em três parcelas ortogonais entre si: a parcela ativa, reativa e harmônica. A descrição completa desta teoria é detalhada em (Tenti, Paredes e Mattavelli, 2011). Aqui só são apresentados alguns resultados importantes.

De acordo com essa teoria, a potência ativa é definida por:

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(t)i(t)dt \quad (9)$$

Onde v e i representam os valores instantâneos das tensões e correntes. T representa o inverso da frequência fundamental da rede.

Desta forma a parcela a ser compensada (correspondente à potência reativa e harmônicos) é calculada como:

$$\begin{cases} i_a = \frac{P}{V} \\ i_{comp} = i - i_a \end{cases} \quad (10)$$

Onde V é o valor RMS de $v(t)$.

2.4 Projeto dos controladores

O inversor apresenta um filtro indutivo em sua saída com a finalidade de eliminar os harmônicos produzidos pelo chaveamento do inversor. O projeto deste componente é apresentado na referência (SOARES, 2012). Os parâmetros do sistema são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Parâmetros do sistema.

Carga		Inversor e rede	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
r_{lc}	1 mΩ	L_f	6,1 mH
L_c	10 mH	R_f	10 mΩ
C_c	0,3 mF	C_f	1 mF
r_{cc}	40 Ω	L_g	3,4 μH
r_c	2500 W / 127 V	R_g	3 μΩ

A modelagem do sistema considera somente a dinâmica da componente fundamental. Portanto:

$$v_{inv} - V_{PCC} = L_f \frac{di_L}{dt} + R_f i_L \quad (11)$$

Considerando V_{PCC} como um distúrbio, é possível obter a seguinte função de transferência:

$$G_i(s) = \frac{v_{inv}(s)}{i_d(s)} = \frac{1}{sL_f + R_f} \quad (12)$$

É utilizado um controlador PI dado por pela Eq. (13).

$$C_i(s) = 3 + \frac{7000}{s} \quad (13)$$

Por sua vez, a dinâmica do barramento CC é dada por:

$$C_f \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{pv} - i_{dc} \quad (14)$$

Desprezando-se as perdas do conversor, pode ser obtido que:

$$v_{dc} i_{dc} \cong V_{dc}^* i_{dc} = \frac{V_g I_L}{2} \Leftrightarrow i_{dc} = \frac{V_g}{2 V_{dc}^*} I_L \quad (15)$$

O termo i_{dc} é considerado uma perturbação em malha fechada. Desprezando-se este termo e considerando que a malha interna é suficientemente rápida, teremos que:

$$G_{dc}(s) = \frac{V_{dc}(s)}{i_{CLR}(s)} = \frac{V_g}{2 C_f V_{dc}^* s} \quad (16)$$

Em inversores monofásicos, a oscilação de 120 Hz presente na tensão do barramento CC pode piora a resposta do controlador. Desta forma, na medição da tensão do barramento CC é utilizado um filtro passa baixas com frequência de corte igual a 25 Hz.

O controlador da tensão do barramento CC foi projetado pelo método ótimo simétrico e é apresentado na Eq. (17).

$$C_{dc}(s) = 1,7 + \frac{67}{s} \quad (17)$$

3. RESULTADOS

3.1 Análise 1: Comportamento de um único sistema

O sistema foi simulado com 45 painéis. Os painéis foram conectados em 3 *strings* com 15 painéis em série cada. Foi utilizada uma frequência de chaveamento de 6 kHz. O algoritmo de MPPT trabalhou com uma frequência de amostragem de 256 Hz e com um passo de tensão de $\Delta V = 0,3$ V. A medição de corrente dos painéis utilizada pelo algoritmo de MPPT passou também por uma filtragem passa baixas com uma frequência de corte de 25 Hz.

O perfil de radiação simulado iniciou-se com 1000 W/m^2 , passou para 700 W/m^2 no instante $t = 2$ segundos e atingiu 400 W/m^2 no instante $t = 4$ segundos. Todas as variações foram realizadas em degrau. Finalmente, no instante $t = 6$ segundos o painel é desconectado do barramento CC simulando o funcionamento do sistema a noite. A conexão do inversor à rede é realizada no instante $t = 0,5$ segundos. A Fig. 7 apresenta a resposta da tensão do barramento CC. As potências ativa e reativa são apresentadas na Fig. 8. O comportamento das correntes é ilustrado nas Fig.9 e 10.

Observa-se que o controle do barramento CC é capaz de seguir a tensão de máxima potência do arranjo. Antes da conexão a tensão de saída do arranjo vai para o ponto de circuito aberto. Após iniciada a conexão do inversor, a tensão rapidamente alcança o ponto de potência máxima. Quando os painéis são desconectados (durante a noite), o barramento CC é controlado em 260 V e o algoritmo de MPPT é desativado.

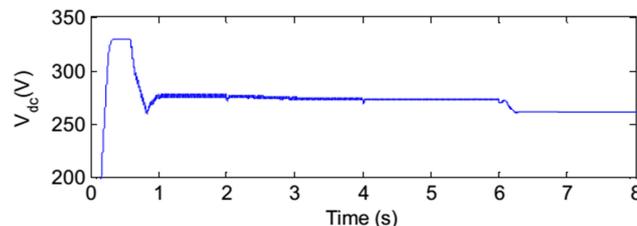


Figura 7 – Comportamento da tensão no barramento CC.

Pode ser observado que após o transitório de conexão do sistema a potência reativa drenada da rede se anula (Fig. 7). Além disso, o sistema fotovoltaico compensa grande parte do conteúdo harmônico gerado pela carga deixando a corrente na rede com um aspecto próximo do senoidal como ilustrado na Fig. 10 (a).

Finalmente a Fig. 10 (b) mostra o instante na qual os painéis solares são desconectados do barramento CC e o inversor começa a trabalhar como um filtro ativo puro. Nota-se que esta operação é caracterizada por um pequeno consumo de potência ativa da rede correspondente às perdas do inversor. Este resultado valida a estratégia de controle proposta.

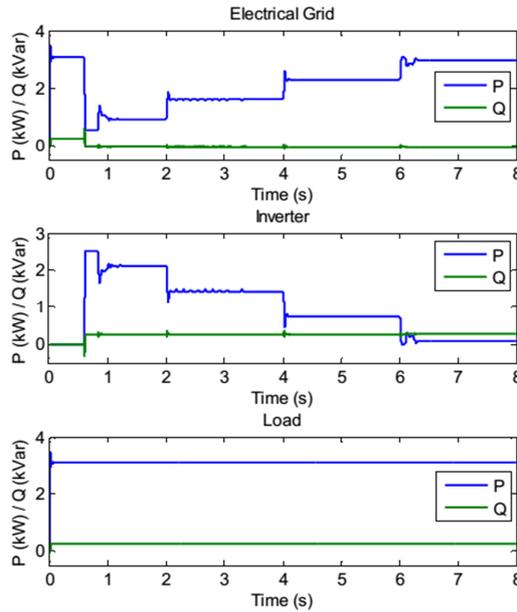


Figura 8 – Potências ativa e reativa para a rede, inversor e carga

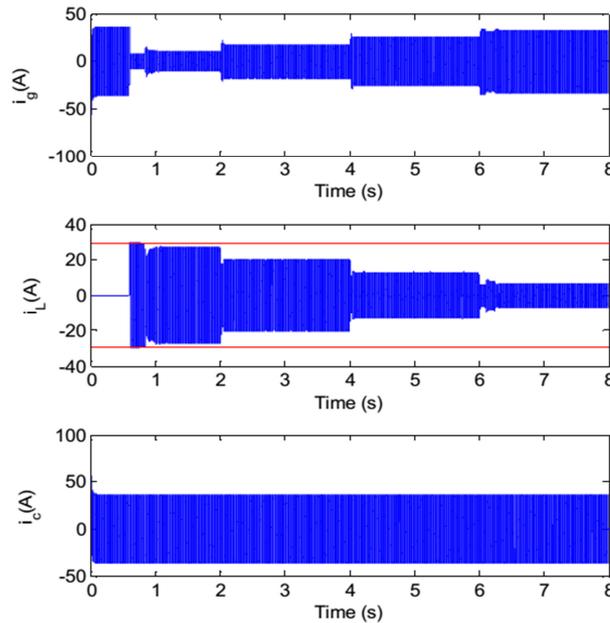


Figura 9 – Comportamento das correntes na rede, no inversor e na carga.

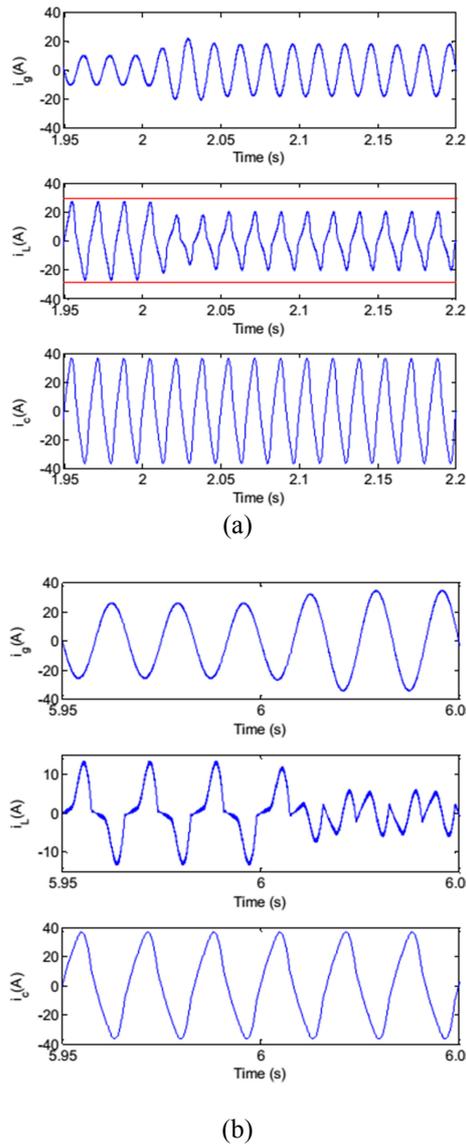


Figura 10 – Detalhe das respostas transitórias da Fig. 9.

3.2 Análise 2: Impacto de vários inversores multifuncionais na qualidade da tensão do PCC

Nesta situação foram simulados 5 sistemas iguais ao descrito na seção anterior conectados à rede. Foram avaliados 2 cenários:

- 1º cenário: Nenhum dos inversores apresenta multifuncionalidade ($n_c = 0$);
- 2º cenário: Todos os inversores apresenta multifuncionalidade ($n_c = 5$).

Como pode ser observado na Fig.11, a multifuncionalidade, que compensa os harmônicos e reativos na carga, melhora consideravelmente a qualidade de energia da rede local, atuando principalmente na redução de harmônicos de baixa frequência.

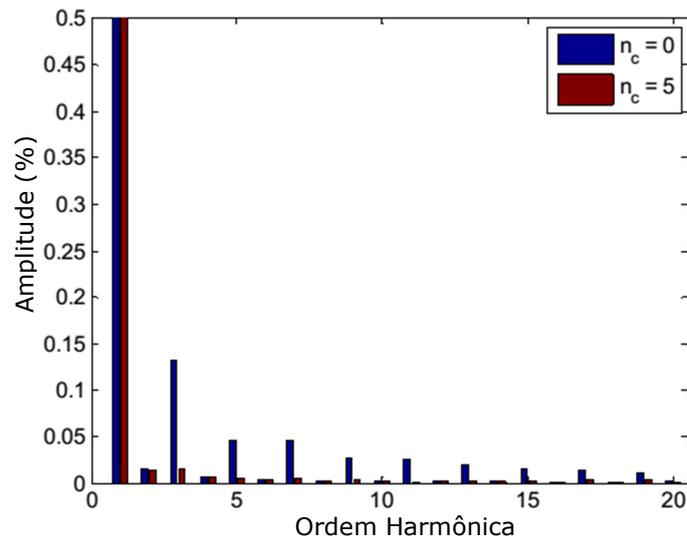


Figura 11 – Variação do espectro de tensão do PCC com o número de conversores com multifuncionalidade.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um sistema fotovoltaico conectado à rede baseado em inversores multifuncionais. Como contribuições este trabalho acrescentou em relação a referência principal a inclusão da dinâmica do algoritmo de MPPT além apresentação de resultados de simulação para o sistema operando durante a noite.

Os resultados obtidos mostram que a estratégia de controle proposta mantém os painéis operando no ponto de máxima potência além de compensar harmônicos e reativos da carga, melhorando os índices de qualidade de energia da instalação. A aplicação da multifuncionalidade melhorou consideravelmente o perfil de tensão do ponto de conexão.

Como limitações, não foi proposta uma estratégia inteligentes para a compensação parcial dos distúrbios. Desta forma, em algumas situações o inversor pode injetar harmônicos de baixa ordem, associados com a saturação da referência de corrente.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES – Brasil. Além disso, os autores os autores agradem ao CNPq e à FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components. *Ieee Transactions On Industry Applications*, P. 625 - 630, May 1984.
- Almeida, P. M. D. Modelagem E Controle De Conversores Estáticos Fonte De Tensão Utilizados Em Sistemas De Geração Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica De Distribuição. Uffj. Juiz De Fora, P. 190. 2011. (Master Thesis).
- Arrilaga, J. *Power System Harmonic Analysis*. New York: Wiley, 1997.
- Bonaldo, J. P.; Pomilio, J. A. Multi - Functional Use Of Single-Phase Power. *Ieee Pes Innovative Smart Grid Technology Conference*, São Paulo, April 2013.
- Cupertino, A. F. et al. Use Of Control Based On Passivity To Mitigate The Harmonic Distortion Level Of Inverters. *Ieee Pes Smart Grid Technology Conference*, São Paulo, April 2013.
- He, J. et al. Active Harmonic Filtering Using Current Controlled Gridconnected Dg Units With Closed-Loop Power Control. *Ieee Transactions On Power Electronics*, To Be Published.
- Mcgrath, B. P.; Holmes, D. G.; Galloway, J. J. H. Power Converter Line Synchronization Using A Discrete Fourier Transform (Dft) Based On A Variable Sample Rate. *Ieee Transactions On Power Electronics*, P. 877-884, April 2005.
- Meza, C. et al. Lyapunov-Based Control Scheme For Single-Phase Grid-Connected Pv Central Inverters. *Ieee Transactions On Control Systems Technology*, V. 20, N. 2, P. 520-529, March 2012.
- Rodríguez, P. et al. Multiresonant Frequency-Locked Loop For Grid Synchronization Of Power Converters Under Distorted Grid Conditions. *Ieee Transactions Industrial Applications*, P. 127-138, January 2011.
- Simões, M. et al. A Comparison Of Smart Grid Technologies And Progresses In Europe And The U.S. *Ieee Transactions On Industry Applications*, V. 48, P. 1154-1162, July 2012.

- Soares, L. T. F. Contribuição Ao Controle De Um Conversor Reversível Aplicado A Um Aerogerador Síncrono A Ímãs Permanentes. Ufmg. Belo Horizonte, P. 166. 2012. (Dissertação De Mestrado).
- Tenti, P.; Paredes, H. K. M.; Mattavelli, P. Conservative Power Theory, A Framework To Approach Control And Accountability Issues In Smart Microgrids. Ieee Transactions On Power Electronics, P. 664-673, March 2011.
- Teodorescu, R.; Liserre, M.; Rodríguez, P. Grid Converters For Photovoltaic And Wind Power Systems. [S.L.]: John Wiley And Sons, 2011.
- Villalva, M. G.; Gazoli, J. R.; Filho, E. R. Analysis And Simulation Of The P&O Mppt Algorithm Using A Linearized Photovoltaic Array Model. 10th Brazilian Power Electronics Conference, Cobep. . . 2009. P. .
- Villalva, M. G.; Gazoli, J. R.; Filho, E. R. Comprehensive Approach To Modeling And Simulation Of Photovoltaic Arrays. Ieee Transactions On Power Electronics, 2009.
- Wang , Y. F.; Li, Y. W. Three-Phase Cascaded Delayed Signal Cancellation Pll For Fast Selective Harmonic Detection. Ieee Transactions On Industrial Electronics, P. 1452-1463, April 2013.
- Wang, F. et al. Modeling And Analysis Of Grid Harmonic Distortion Impact Of Aggregated Dg Inverters. Ieee Transactions On Power Electronics, V. 26, P. 786-797, March 2011.

MULTIFUNCTIONAL INVERTERS IN GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. *Power converters are fundamental elements in the grid-connected photovoltaic systems. This device injects all generated power to the grid. However, generally the converter does not work at the rated operation point. In this context this work studies the multifunctional operation of a grid-connected single phase inverter applied in a photovoltaic system. The proposed control algorithm compensates harmonics and reactive power. Simulation results show the performance of the control strategy which can operate the system during the day and at night when there is no generated power.*

Key words: Solar PV energy, Conservative Power Theory, Harmonics compensation, Power Quality.