

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS GERADAS POR INVERSORES EM USINAS FOTOVOLTAICAS NO MATLAB/SIMULINK

Alcy Monteiro Júnior^{1,2}, Manuel Losada y Gonzalez², Márcio Melquíades Silva², Selênio Rocha Silva².

¹Universidade Federal de Tocantins - UFT, Departamento de Engenharia Elétrica, Palmas – TO,

²Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte – MG, Alcy.monteiro@uft.edu.br, manuel@cpdee.ufmg.br, eletricidade@bol.com.br, selenios@dee.ufmg.br

Resumo - Este trabalho apresenta um estudo sobre os harmônicos gerados por inversores de frequência PWM para microgeração fotovoltaica conectada a rede de baixa tensão, com a utilização da ferramenta computacional *Matlab/Simulink* para simular as harmônicas geradas pelos inversores e a avaliação destes harmônicos utilizando como parâmetros as normas e recomendações.

Palavras-Chave - Frequência de chaveamento, Harmônicos, Inversor PWM, Microgeração.

COMPUTER SIMULATION OF HARMONIC DISTORTION GENERATED BY INVERTERS PV PLANTS IN THE MATLAB / SIMULINK

Abstract - This paper presents a study on the harmonics generated by the inverter PWM for photovoltaic micro generation connected to low-voltage network, using the computational tool *Matlab/Simulink*® to simulate the harmonics generated by the inverter and evaluation of these harmonics using parameters as the standards and recommendations.

Keywords - Harmonics, microgeneration, PWM inverter, switching frequency.

I. INTRODUÇÃO

As fontes fotovoltaicas (PV) tem um grande potencial para o fornecimento de energia com o mínimo impacto sobre o meio ambiente.

A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 da ANEEL [1], estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Com isso, existe uma expectativa de aumento da instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil em telhados de residências, comerciais, prédios públicos, estádios entre outros e sua

posterior conexão na rede pública, como está acontecendo na Alemanha, Itália, Espanha, Japão, China, Republica Tcheca dentre outros.

Entretanto, a operação dos inversores fotovoltaicos poderá trazer alguns impactos na rede elétrica como o aumento nos níveis de distorções harmônicas. Os inversores de frequência podem gerar inter-harmônicos e harmônicos de alta ordem. Por causa da alta frequência de chaveamento, alguma filtragem passa baixa e redes de amortecimento deverão ser incluídas nos inversores. Somam-se a isto, a presença de harmônicos de baixa ordem, além das configurações de sistemas monofásicos, comumente utilizados em soluções para teto de residências, em pequenos empreendimentos comerciais e nas redes trifásicas [2].

O objetivo deste artigo é analisar as distorções harmônicas geradas por inversores de frequência trifásicos utilizados em usinas fotovoltaicas. Inicialmente, apresenta-se as particularidades dos sistemas fotovoltaicos conectados a rede. Em seguida, realiza-se uma comparação dos requisitos indicados para os inversores em normas e recomendações internacionais com o objetivo de avaliar o enquadramento dos inversores nestas normas e recomendações. Finalmente, analisa se há impacto na rede elétrica que a microgeração está conectada.

II. REQUISITOS ACEITÁVEIS DE HARMÔNICAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

A. Distorções Harmônicas

Em uma rede elétrica sem sistemas fotovoltaicos, a principal causa da distorção harmônica na rede elétrica é a característica não-linear de alguns equipamentos. Esta não linearidade tende a causar uma distorção harmônica na corrente e, conseqüentemente, na tensão elétrica [3].

Correntes harmônicas nada mais são que correntes em frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental em que opera o sistema. Estas correntes harmônicas, quando somadas à fundamental, resultam em uma distorção harmônica na corrente, a qual, interagindo com a impedância da rede, tende a resultar em uma distorção harmônica também na tensão. Assim, mesmo que a tensão da fonte seja senoidal, a tensão no ponto de acoplamento comum(PAC) pode ser distorcida devido à interação das correntes harmônicas com a impedância da rede elétrica.

As documentações mais citadas a nível internacional são a IEC 61000-3-2 [4], IEC 61000-3-4 [5] e a IEEE 519 [6]. No Brasil existe o PRODIST módulo 8 [7]. Na seqüência será descrito sucintamente os requisitos destas, quando se trata de



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

distorções a serem medidas no ponto de acoplamento comum.

B. Recomendação IEEE 519/1992

A IEEE 519/1992 - recomenda como aceitáveis níveis de distorção harmônica de tensão, no ponto de acoplamento comum-PAC, inferiores a 3% quando se trata de distorção individual, sendo que a distorção harmônica total não pode ultrapassar 5%.

Os limites de distorção harmônica de corrente, estabelecidos pelo IEEE, mostrados na Tabela I, apresentam valores das ordens harmônicas para a classe de 120V a 69kV.

A IEEE 519 não recomenda aos fabricantes, limites de distorção harmônica especificamente para inversores de frequência.

Tabela I: Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas de distribuição (120V A 69kV), Segundo A IEEE 519/1992.

Máxima distorção harmônica de corrente (%) de I_{nom}				
Ordem das harmônicas individuais (harmônicas ímpares)				
I_{cc}/I_{nom}	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	THD
<20	4,0	2,0	1,5	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	20,0

I_{cc} é a corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum.

C. Norma IEC 61000-3-2

A norma européia IEC 61000-3-2, estabelece limites de distorção harmônica de corrente para equipamentos com corrente inferior a 16A por fase. Esta separa diferentes tipos de equipamentos por classes e estabelece limites de correntes equivalentes a cada harmônico contido no sistema.

Para inversores de frequência, que se enquadram na Classe A, a IEC61000-3-2 estabelece os limites de frequências harmônicas de corrente que são apresentados na Tabela II.

Tabela II: Limites de harmônicos de corrente em equipamentos de classe A estabelecidos pela Norma IEC 61000-3-2

Ordem do Harmônico	Limite de Corrente (A)
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21

Tabela III: Níveis individuais de tensões harmônicas em baixa tensão estabelecidos pela IEC 61000-3-2

Harmônicas Ímpares não Múltiplas de 3		Harmônicas Ímpares Múltiplas de 3	
Ordem (h)	Distorção (%)	Ordem (h)	Distorção (%)
3	6	6	5
5	5	9	1,5
7	3,5	15	0,4
9	3	21	0,3

Com relação os harmônicos de tensão, a IEC 61000-3-2 limita os níveis individuais das tensões harmônicas conforme o mostrado na Tabela III.

Com referência ao termo de compatibilidade da IEC 61000-3-4 em períodos superiores a um minuto, a norma limita o valor para a distorção harmônica total da tensão em 8%.

III. INVERSOR COM CONTROLE PWM

Inversores fotovoltaicos usam dispositivos semicondutores para transformar a tensão dos módulos fotovoltaicos CC em CA do sistema elétrico controlado usando Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*). A modulação PWM é a forma mais eficiente de geração de energia em CA, permitindo um controle flexível da amplitude e frequência. No entanto, todos os métodos de PWM geram harmônicos e ruídos originários dos altos dv/dt e di/dt transientes de chaveamento do semicondutor. A fim de reduzir o ruído da comutação e harmônicas, há necessidades de se adicionar uma filtragem externa [8]. A Figura 1 mostra como a tensão de saída CA é gerada na saída do estágio de potência do inversor com modulação PWM.

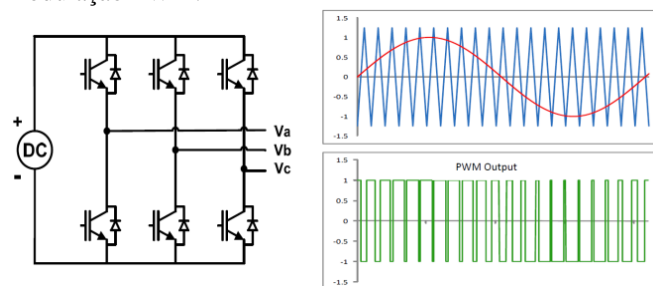


Fig.1. Retificador trifásico com modulação PWM [8]

A. Fasores espaciais e coordenadas bidimensionais para Controle Inversor de frequência

Matematicamente, o controle de conversores trifásicos sem nenhuma transformação de coordenadas seria um tanto quanto complicado devido à natureza alternada das correntes e tensões envolvidas, ao acoplamento característico das grandezas envolvidas, ao desbalanceamento presente no sistema e nas cargas, entre outros.

Nesse sentido, é de uso comum na engenharia de conversores de energia a conversão do sistema de coordenadas trifásico para as representações no plano rotativo dq . Essa representação é tratada com maior profundidade por [9], mas pode ser sintetizada pela Figura 2.

Partindo-se do sistema equilibrado trifásico caracterizado pelo conjunto de equações (1-3), a representação em fasor espacial pode ser obtida através da aplicação da transformada presente em (4).

$$f_a(t) = \cos(\omega t + \theta_0) \quad (1)$$

$$f_b(t) = \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$f_c(t) = \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3)$$

$$\vec{f}(t) = \frac{2}{3} \left[e^{j0} \cdot f_a(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot f_b(t) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot f_c(t) \right] \quad (4)$$

$$= \hat{f} \cdot e^{j\theta_0} \cdot e^{j\omega t}$$

Essa é a representação de um sistema de coordenadas trifásicas simétricas através de um fasor de amplitude constante e girando a uma velocidade constante percorrendo uma trajetória circular centrada no plano complexo (Figura 2).

De forma a representar também um sistema assimétrico e desacoplar as componentes naturalmente acopladas no sistema de coordenadas original, o fasor espacial é decomposto em suas coordenadas alfa e beta (5) para posteriormente sofrer uma transformação para coordenadas d e q (6), onde o valor de $\mathcal{E}(t)$ é escolhido conforme critérios de análise.

$$\vec{f}(t) = f_\alpha(t) + j \cdot s f_\beta(t) \quad (5)$$

$$f_\alpha + j \cdot f_\beta = [f_\alpha(t) + j \cdot f_\beta(t)] e^{j\omega t} \quad (6)$$

A grande vantagem do uso do plano rotativo dq reside justamente no fato da opção de escolha do valor de $\mathcal{E}(t)$ de maneira a simplificar a análise e o controle do conversor a ser utilizado.

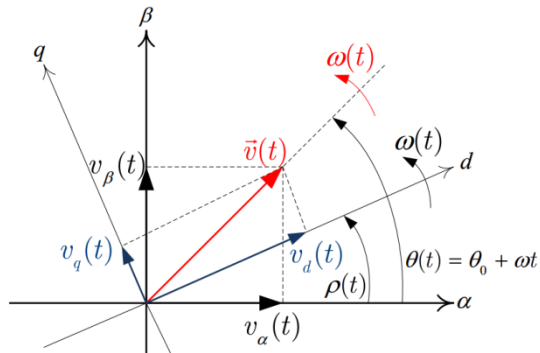


Fig.1. Fasor espaciais e coordenadas $\alpha\beta$ e dq [10].

B. Padrões de controle de ruídos e harmônicos em inversores

Há muitos padrões industriais que controlam o ruído e conteúdo harmônico em um sistema de inversor, como unidades de motor de CA, fontes de alimentação ininterrupta (UPS) ou outras aplicações de energia CA. No caso de uma rede conectada a inversores fotovoltaicos, o IEEE 1547 [11], UL 1741 [12] e normas FCC Parte 15B [13] especificam as diretrizes para controlar o conteúdo harmônico da corrente de saída e da interferência eletromagnética (EMI) gerados no inversor. As diretrizes garantem que:

- Os inversores não geram ruído e harmônicos em excesso, o que pode poluir a tensão de rede CA.
- Os inversores são imunes a ruídos elétricos e magnéticos a partir de outras fontes e fornecem uma operação confiável em um ambiente de alto ruído eletromagnético.
- Os inversores não geram radiação indesejada ou ruído, que pode perturbar o funcionamento estável de outros equipamentos acoplados eletricamente ou magneticamente.

C. Tempos Morto

No controle por modulação PWM, é necessário um tempo de sobreposição para os comandos de porta dos IGBTs do conversor de fonte de corrente, a fim de assegurar um fluxo de corrente contínua no barramento CC. Esse tempo é equivalente ao tempo morto do conversor de fonte de tensão.

Um tempo morto é adotado, para evitar o curto-circuito da fonte através das chaves semicondutoras (*shoot-through fault*).

O tempo de sobreposição gera harmônicos de baixa ordem, especialmente o quinto e o sétimo harmônico, nas correntes de fase. Harmônicos de baixa ordem, especialmente o sexto e décimo segundo, aparecem também de tensão CC no barramento e, portanto, sobrecorrente no barramento CC resultam do tempo morto. Estes harmônicos de baixa ordem são pouco atenuados porque o filtro CC e filtro de fornecimento de link são normalmente concebidos para os harmônicos de alta ordem que aparecem perto da frequência de comutação e seus múltiplos.

Por “tempo morto” e/ou variações no sinal de controle do conversor serão gerados harmônicos que não são característicos pelo equipamento.

Conforme descrito em [14], a presença de tempo morto no chaveamento do conversor PWM causa o aparecimento de harmônicos de baixa ordem na corrente. Esses harmônicos aparecem em especial, na ordem $6k \pm 1$ onde $k = 1, 2, 3, \dots, n-1$.

D. Harmônicos Gerados pelo Inversor

Os harmônicos na tensão de saída estão posicionados nas bandas laterais da frequência de chaveamento e seus múltiplos [15]. É comum, no caso de conversores trifásicos, escolher um valor m_f que seja ímpar e múltiplo de três [14]. Dessa forma, as ordens harmônicas são dadas pela equação (5), onde m_f é a razão de frequência de modulação, k e n são números inteiros. Para valores ímpares de k , só existe harmônicos para valores pares de n e vice-versa, conforme ilustrado na Figura 3.

$$h = k \cdot m_f \pm n \quad (5)$$

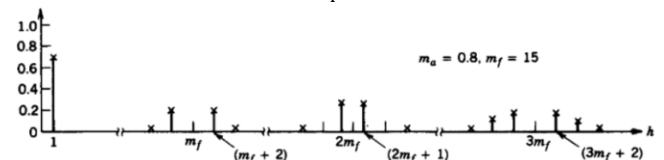


Fig.2. Espectro harmônico de um chaveamento PWM trifásico [14].

IV. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consiste na simulação de uma microgeração fotovoltaica com um inversor de PWM de três níveis (positivo, zero e negativo) controlado pela transformada dq utilizando a ferramenta computacional Matlab/Simulink para analisar a taxa de distorção harmônica (THD) gerada.

Nesta simulação foi considerado um sistema de 11kWpico conectado em uma rede de baixa tensão com potência de curto-circuito de 1MVA no ponto de acoplamento comum - PAC. Nesta simulação, a micro geração é representada por uma fonte de corrente.

Na Figura 4 é mostrada a rede de microgeração no Matlab/Simulink.

O sistema de controle do inversor foi dividido em três estágios. Foi utilizado um filtro *anti-aliasing* na entrada do sinal de tensão CA e CC e de corrente onde é responsável por impedir que ocorra o efeito de sobreposição em frequência e com isso evita-se um erro no procedimento de aquisição dos

dados das correntes. Após o filtro *anti-aliasing* o sinal vai para o sistema de controle em seguida é gerado o índice de modulação PWM responsável pelo chaveamento do inversor como mostrado na Figura 5.

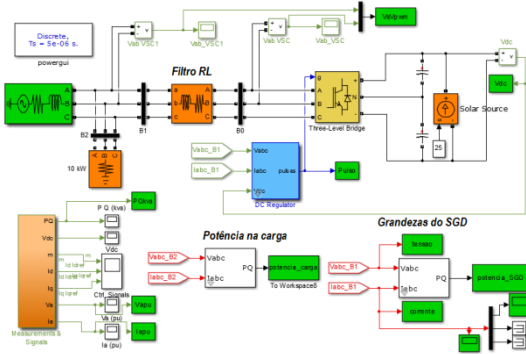


Fig. 3. Diagrama da rede de microgeração no Matlab/Simulink.

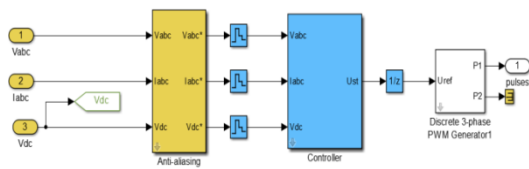


Fig.4. Sistema de controle do inversor

O diagrama do sistema de controle do inversor é mostrado na Figura 5.

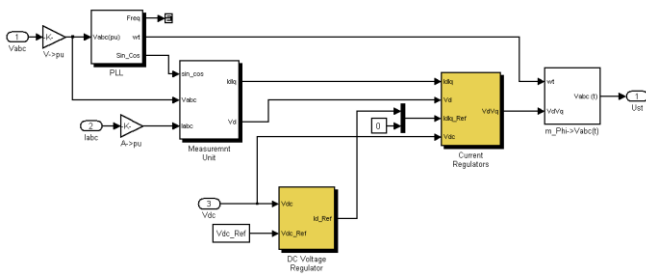


Fig.5. Sistema de controle do inversor utilizando transformada dq

A tensão no barramento CC, controlada pelo inversor é mostrado na Figura 6.

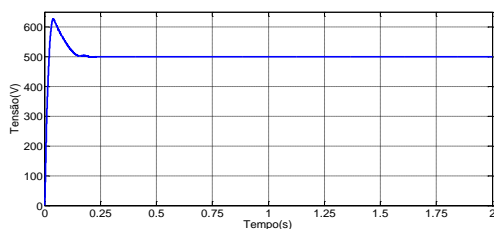


Fig.6. Tensão no barramento CC

Na Figura 7 é mostrado o sinal da potência gerada pelo inversor considerando o sistema trabalhando com nível de radiação máxima.

Para a análise das distorções produzidas pelo inversor testou-se o comportamento do mesmo com várias frequências de chaveamento (f_c).

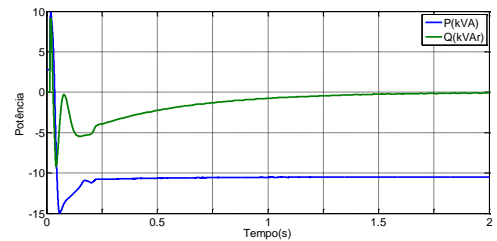


Fig.7. Potência gerada pelo inversor.

A tensão de saída do inversor antes da passagem pelo filtro é mostrada na Figura 8.

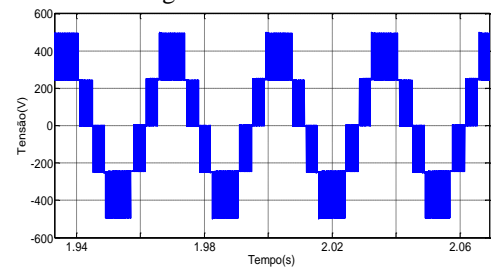


Fig. 8. Tensão de saída do inversor

Após passar por um filtro RL a tensão do inversor torna uma senóide quase pura conforme mostrado na Figura 9.

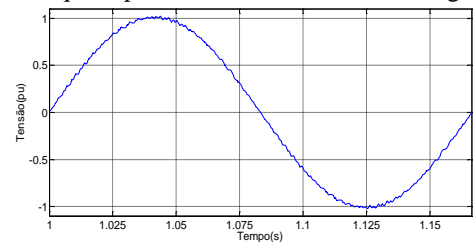


Fig. 9. Tensão após o filtro

Nas Figuras 10 e 11 são mostrados as distorções de corrente para uma frequência de chaveamento do inversor de 3kHz, a taxa de distorção harmônica de corrente - THDi é de 1,16%. Este valor está adequado com as normas e recomendações referente a harmônicos existentes.

Como previsto os harmônicos predominantes para esse tipo de inversor foram da ordem da $f_c \pm 1$. Mas observa-se na Figura 12 a presença de harmônicos não característicos de 5ª ordem sobressaindo em relação aos demais com um valor 0,37% em relação a fundamental e harmônicos de ordem par, ímpar e algumas inter-harmônicos de amplitude muito baixas.

As Figuras 13 e 14 mostram os espectros harmônicos de corrente após o filtro para algumas das frequências de chaveamento analisadas.

Observa-se que, quanto maior a frequência de chaveamento do inversor as ordens harmônicas produzidas são da ordem de $f_c \pm 1$. Isso tende a reduzir a THDi e facilita a mitigação desses harmônicos de alta ordem.

Em virtude de frequentes condições de sombreamento que painéis fotovoltaicos estão sujeitos, os inversores do tipo *string inverters* são os mais adequados para essas condições, ou seja, inversores de pequena potência normalmente são utilizados em instalações comerciais de menor porte. O intuito desta alternativa é de maximizar o aproveitamento da energia solar, uma vez que a associação de um grande

número de painéis em grandes *strings* conectada a inversores de elevada potência implicaria em uma limitação da máxima potência gerada, pelas condições de produção de energia dos painéis sombreados.

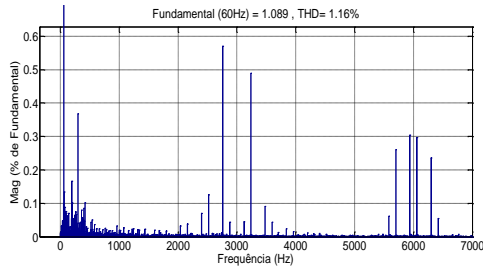


Fig.10. Espectro harmônico com frequência de chaveamento a 3kHz

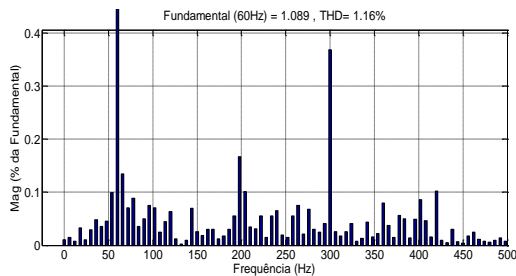


Fig.11. Espectro harmônico com frequência de chaveamento a 3kHz com as harmônicas de baixa ordem.

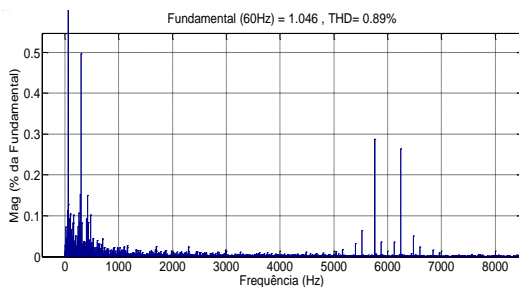


Fig.12. Espectro harmônico com frequência de chaveamento de 6kHz.

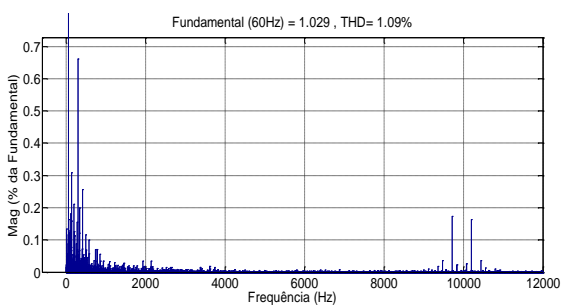


Fig. 13. Espectro harmônico com frequência de chaveamento de 9.96kHz

Para a situação de sombreamento o ideal é que o inversor trifásico possua três sistemas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – *maximum power point tracker*) independentes, sendo um para cada fase. Desta forma, pode-se trabalhar com a máxima potência disponível em cada fase.

O sombreamento total ou parcial de um painel do sistema pode causar efeitos indesejáveis como a diminuição da potência total gerada e quedas na tensão.

Diversos fatores determinam a quantidade de energia que é perdida devido ao efeito de sombras na matriz PV. Os mais importantes são o tipo de módulo fotovoltaico, a forma da sombra sobre o painel, a presença de diodos by-pass, a forma da conexão dos módulos (série ou paralelo) e os valores mínimo e máximo que limitam a busca do ponto de máxima potência (MPP).

Em aplicações conectadas à rede, o nível de tensão fornecido pela matriz deve ser o mais constante possível devido a sua interação com o sistema existente. Se isso não ocorrer, durante um tempo com sombreamento todo o painel pode ser visto como uma carga para a rede.

O inversor utilizado neste estudo de caso está utilizado apenas um MPPT para as três fases devido o sistema não ter nenhum obstáculo que venha a ocasionar sombreamento nos painéis com exceção das nuvem.

Para verificar o comportamento do inversor funcionando em condição desequilibrada simulou-se um desequilíbrio em duas fases e utilizando as mesmas frequências de chaveamento testadas anteriormente. O desequilíbrio utilizado nas fases A e B da carga utilizada foram respectivamente 25% acima e 5% abaixo da carga nominal da fase A.

Nas Figuras 14 e 15 são apresentados os espectros harmônico para $f_c = 3kHz$ e $7,5kHz$. Observa-se que apareceram harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem para a operação com carga desequilibrada. Já para circuito equilibrado só aparecem uma frequência atípica que predominava foi a de 3ª ordem.

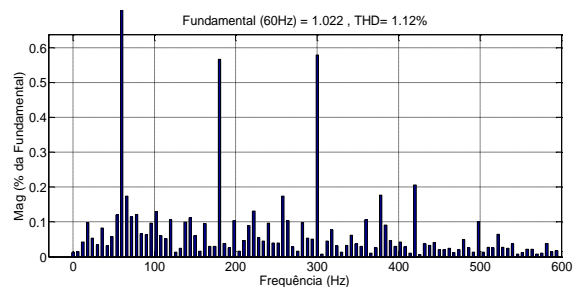


Fig. 14. Espectro harmônico com frequência de chaveamento a 3kHz com carga desequilibrada.

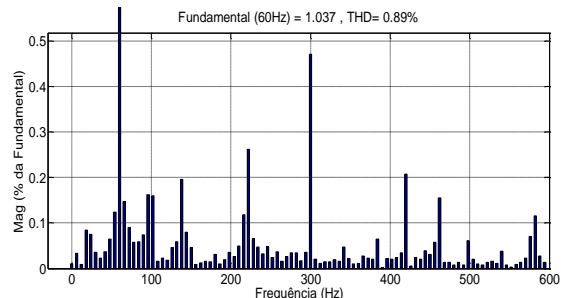


Fig. 15. Espectro harmônico com frequência de chaveamento a 7.5kHz com carga desequilibrada.

Na Tabela IV, a seguir, são mostradas as $THDi$ para o inversor com as dez frequências analisadas com sistema equilibrado e desequilibrado.

Analisando os dados da Tabela IV, não é garantida a redução da $THDi$ quando aumenta a frequência de

chaveamento. Observa-se que a menor $THDi$ é 0,85% nas frequências de 4,50kHz e 8,52kHz para a situação de equilíbrio do sistema. Em condições de desequilíbrio, os valores da $THDi$ é maior que em condições de equilíbrio.

Tabela IV: Frequência de chaveamento X $THDi$

Frequência de Chaveamento	$THDi$ equilibrado	$THDi$ desequilibrado	Varição
3,00kHz	1,16%	1,20%	0,04%
4,02kHz	1,01%	1,07%	0,06%
4,50kHz	0,85%	1,02%	0,17%
5,04kHz	0,89%	1,12%	0,23%
6,00kHz	0,89%	1,04%	0,15%
7,50kHz	0,89%	0,95%	0,06%
7,98kHz	0,90%	0,96%	0,06%
8,52kHz	0,85%	1,12%	0,27%
9,00kHz	1,01%	1,12%	0,11%
9,96kHz	1,09%	1,16%	0,07%

V. CONCLUSÃO

Os harmônicos gerados para o inversor teve valores dentro dos limites previstos nas normas e recomendações nacionais e internacionais.

A característica dos harmônicos produzidos pode variar de acordo com a frequência de chaveamento do inversor. Portanto quanto maior a frequência de chaveamento é utilizada estará fazendo com que os harmônicos característicos produzidos estejam na ordem da frequência de chaveamento ± 1 .

A presença do tempo morto no chaveamento do conversor PWM causou o surgimento de harmônicos de baixa ordem nas correntes. Esses harmônicos aparecem, em especial, na ordem $6k \pm 1$, sexta e décima segunda ordem e aparecem também na tensão CC do barramento.

Foi observado também o surgimento de harmônicos não característicos devido ao desequilíbrio da rede onde está instalado o inversor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG, Programa de P&D ANEEL e o Projeto Cemig D 470 pela colaboração neste trabalho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Resolução Normativa nº 482. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 17 Abril 2012. 1-6.
- [2] HALKOSAARI, T.; KUUSELA, K. and TUUSA, H. Effect of Non-Idealities on the Performance of the 3-Phase Current Source PWM Converter. IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC, Junho 2001. 654-659.
- [3] GALHARDO, M. A. B. e PINTO, J. T. Conceitos de Distorção e Não-Linearidades. Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia Elétrica-SBQEE - Aracaju, 2003.
- [4] IEC 61000-3-2. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current <16 per phase).
- [5] IEC 61000-3-4. “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A”. International Electrotechnical Commission, 2000.
- [6] IEEE STD. 519. Recommend Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 1992.
- [7] BRASIL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2009. 1-76.
- [8] HONG, S. and ZUERCHER-MARTINSON, M. Harmonics and Noise in Photovoltaic (PV) Inverter and the Mitigation Strategies. Solectria Renewables, 2012. 1-7.
- [9] YAZDANI, *et al.* Modeling Guide-Lines and a Benchmark For Power System Simulation Studies of Three-Phase Single-Stage Photovoltaic Systems. IEEE Transactions on Power Delivery , vol. 26, Abril 2011. 1247 –1264.
- [10] PARREIRAS, T. M. Análise das Distorções Harmônicas Geradas por um Parque de Turbinas Eólicas. Monografia de Final de Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica. PPGEE-UFGM, Belo Horizonte - MG, Março 2012. 1-75.
- [11] IEEE 1547™-2003. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 1-16, July 2003.
- [12] UL 1741. Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources, 2001.
- [13] FCC Part 15 Subpart C. For intentional radiators. Disponível em: <<http://www.cclab.com/fcc-part-15.htm>>. Acesso em: 15 Outubro 2013.
- [14] MOHAN, N.; UNDELAND, T. M. and ROBBINS, W. P. Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1995.
- [15] ARRILAGA, J. and WATSON, N. R. Power System Harmonics., p. 392, 2003.