ANÁLISE DA INTERAÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO RESIDENCIAIS COM ALTA PENETRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Ivan Magela Corgozinho – ivan@imaxenergia.com.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Energia
Marcos Vinícius Eloy Xavier – mveloy@gmail.com
Selênio Rocha Silva – selenios@dee.ufmg.br
Wallace Couto Boaventura – wventura@ufmg.br
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. *Neste trabalho foi feita uma análise investigativa sobre os efeitos das interações harmônica em sistemas de distribuição residenciais de energia elétrica com diferentes níveis de penetração de sistemas fotovoltaicos. Foi escolhido um estudo de caso representativo de um sistema de distribuição de baixa tensão (220V), com transformador de 150 kVA, em uma análise de pior caso do ponto de vista de distorções harmônicas de tensão, a saber, os horários em que há maior demanda de potência pelas residências, ou seja, horário de pico noturno, em que há maior quantidade de injeção de harmônicos de correntes pelas cargas não lineares, como computadores, aparelhos de ar-condicionado, televisores, etc. O sistema foi modelado e simulado utilizando o software Power*tools for Windows (PTW). Ao fim do trabalho foi feita uma análise comparativa entre os níveis calculados de distorção de tensão no sistema e os limites estabelecidos nas principais normas e recomendações existentes.*

Palavras-chave: *inversor fotovoltaico, distorção harmônica, sistema de distribuição.*

1. INTRODUÇÃO

A partir da publicação da resolução 482 de abril de 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), espera-se uma inserção significativa de sistemas fotovoltaicos para geração distribuída de energia. Devido esta inserção de sistemas fotovoltaicos, vários aspectos precisam ser analisados com criteriosamente, entre eles os aspectos de qualidade da energia, em especial a alteração dos níveis de distorções harmônicas presentes no sistema. Nesse sentido, um dos principais problemas que podem vir a ser verificados, devido à alta penetração de sistemas fotovoltaicos é o aumento das distorções harmônicas de baixa ordem devido à redução da frequência de ressonância do sistema causada pela presença de capacitores que são utilizados para filtragem de harmônicos de alta ordem gerados pelo próprio inversor (Aprilia et al., 2012).

Para avaliação do fluxo de harmônicos nos sistemas de distribuição, medições experimentais do conteúdo harmônico nas ondas de tensão e corrente no sistema elétrico de distribuição podem e têm sido realizadas ao longo dos anos. No entanto, devido ao grande número e diversidade de componentes no sistema, entre outros complicadores práticos, torna praticamente impossível a realização de avaliações paramétricas dos efeitos das distorções harmônicas nos sistemas de distribuição através de medições. Nesse sentido, metodologias de simulação numérica tem sido largamente implementadas para realização de análises dos impactos de harmônicos em tais sistemas. Vários trabalhos relacionados ao tema foram publicados, como o de Mahmoud e Shultz (1982), que elaboraram um modelo de análise de harmônicos em redes de distribuição, baseando-se no princípio de que em regime permanente as correntes harmônicas podem ser consideradas como sendo originadas por uma fonte de corrente ideal. Cotten e Brandell (1989) apresentaram várias considerações para análise computacional de fluxo de harmônicos, incluindo uma gama de soluções possíveis para correção de distorções harmônicas, tanto na fase de projeto do sistema como analises e intervenções de sistemas existentes.

Gosbell e Ghezelayagh (1992) desenvolveram o programa *Power Eletronic Simulator* (PES) para análise em domínio do tempo de harmônicos em sistemas de distribuição e utilizaram a ferramenta para avaliar as interações entre fontes de harmônicos e componentes do sistema. Nesta mesma linha de desenvolvimento de algoritmos computacionais Tostes e Bezerra et al. (2004) utilizaram o método de soma de correntes para modelar sistemas com fluxo harmônico trifásico, com introdução de barramentos específicos para sistemas fotovoltaicos para facilidade de utilização em sistemas com geração distribuída. Para validação do modelo, foi simulado um sistema real localizado em Belém – PA, com 92 transformadores de diferentes capacidades e cargas de diferentes tipos e um total de 216 barras. Foi feita uma comparação dos resultados obtidos pela simulação com dados experimentais obtidos através de medições em 15 transformadores, estrategicamente selecionados.

Com objetivo de investigar o impacto de sistemas de geração distribuída nos níveis de harmônicos em redes de distribuição, Chen e Cheng (2006), executaram medições do conteúdo harmônico para cada patamar do perfil de carga

diário de um sistema de distribuição de 11,4kV, contendo 10 barras, localizado Taiwan. Os dados obtidos foram utilizados como variáveis de entrada para avaliação computacional do impacto da inserção de estações de geração fotovoltaicas em vários pontos da rede. Em 2009, o trabalho publicado por Paracha et al. apresentou uma nova metodologia para previsão dos níveis de harmônicos em redes de distribuição utilizando inteligência artificial. O modelo em redes neurais passou pelas etapas de treinamento, testes e validação a partir de dados coletados em redes de distribuição da cidade de Victoria, Austrália. Por outro lado, Yong e Chen (2010), propuseram um conjunto de parâmetros no domínio da frequência para modelagem de cargas não lineares típicas de residências e utilizaram estes parâmetros para simulações de fluxo de harmônicos em redes de distribuição.

Também no tocante ao tema de avaliação do efeito de sistemas fotovoltaicos nas redes de distribuição o trabalho realizado por Latheef et al. (2006) oferece contribuição significativa. Os autores simularam um sistema de 11kV considerando a inserção de correntes harmônicas de perfis típicos de inversores para sistemas fotovoltaicos residenciais. O sistema foi simulado no domínio da frequência utilizando uma matriz de impedância harmônica, cujos resultados foram utilizados para gerar recomendações para níveis máximos de utilização de sistemas fotovoltaicos residenciais do ponto de vista da qualidade da energia de todo o sistema de distribuição. De forma similar, Teng Au et al. (2010) avaliaram o efeito de inversores de médio porte para sistemas fotovoltaicos residenciais considerando os impactos da geração de correntes harmônicos no sistema de distribuição e em bancos de capacitores em condições de ressonâncias.

A contribuição deste trabalho, complementando os trabalhos realizados pelos autores acima citados, é avaliar os efeitos ressonantes da inserção de sistemas fotovoltaicos em sistemas de distribuição, através de um estudo de caso simulado com vários níveis de penetração utilizando o software PTW.

2. MODELO DESENVOLVIDO

O estudo considerado foi baseado em um sistema de 13,8kV, com transformador de distribuição de 150 kVA, ligado em delta-estrela aterrado. Uma distribuição típica de cargas residenciais foi adotada para completar as características elétricas do sistema. Foram consideradas as impedâncias dos cabos de distribuição com comprimentos de 40 m em cada ramo do sistema, modelado com parâmetros típicos de cabo de alumínio para baixas tensões disponíveis no PTW. Considerou-se o transformador com relação X/R igual a 8 e barramento infinito à montante. A Fig. 1 apresenta o modelo da rede elaborado no PTW.

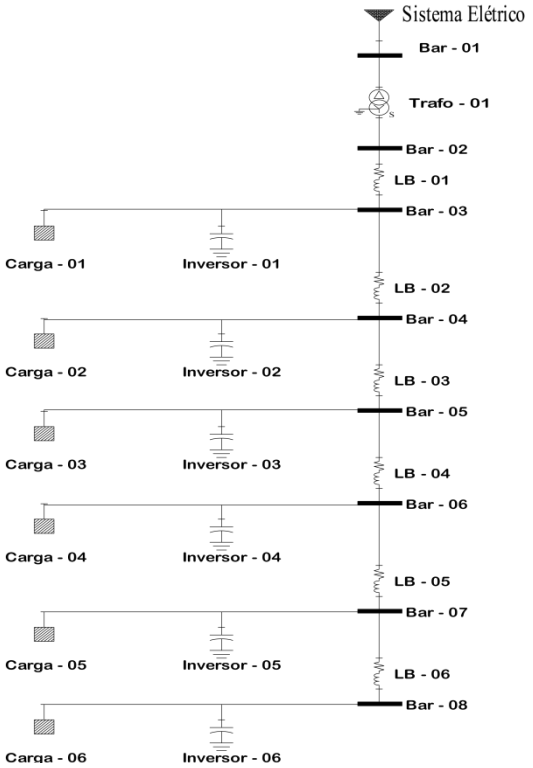

Figura 1 – Modelo da rede simulada

As cargas foram modelas como sendo igualmente distribuídas em cada ramo da rede simulada, cada uma representando um conjunto de cargas reais de 20kVA, sendo 2/3 composto de carga linear com fator de potência igual a 0,90 e 1/3 de carga não linear típica de dispositivos eletrônicos com retificadores por ponte chaveada. Na Fig. 2 e 3 é mostrado o perfil de corrente do modelo da carga adotado.

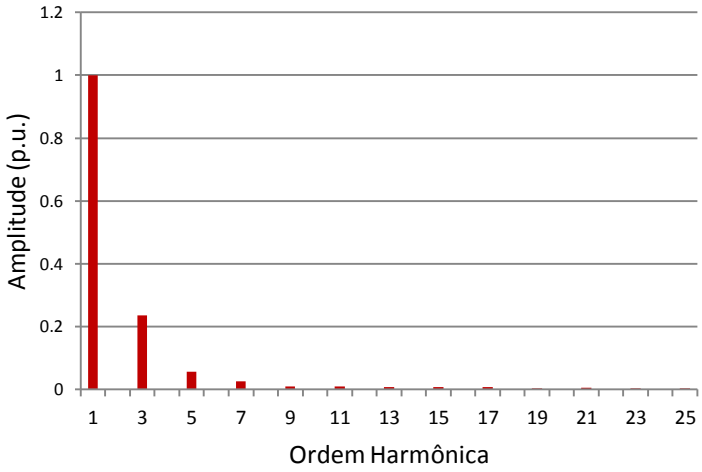

Figura 2 – Espectro de frequências da corrente da carga

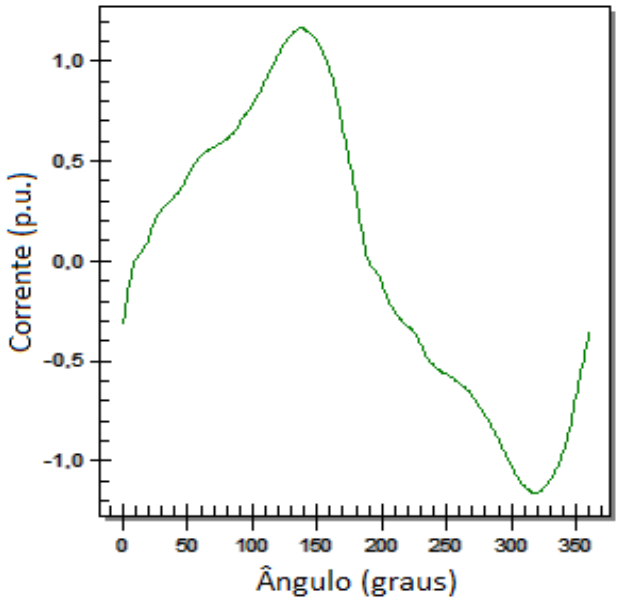

Figura 3 – Forma de onda da corrente da carga

Para avaliação de fluxo de harmônicos o inversor fotovoltaico pode ser modelado por um circuito elétrico equivalente. Equipamentos com potência nominal da ordem de 1,3kW podem ser modelados com um único capacitor de saída com capacitância entre 3,7 e 18,5μF (Aprilia et al., 2012). Para faixas superiores de potência, é conveniente considerar possíveis sofisticações no circuito elétrico equivalente do inversor.

As simulações foram realizadas com variações nos níveis de penetração de sistemas fotovoltaicos – isto é, a razão entre a potência do sistema fotovoltaico e a potência da carga – entre 5 e 100%, com intervalos de 5%. Devido à baixa potência instala de sistemas individuais de geração residencial, optou-se por considerar o modelo simplificado do inversor, consequentemente, as capacitâncias de inversores paralelos são somadas para variar o nível de penetração simulado.

Considerou-se um valor de capacitância intermediário aos valores sugeridos por REF 1, 7,7μF para cada kW instalado de inversores. O resultado do modelo é a rede mostrada na Fig. 1.

Finalmente, a partir dos resultados de distorção de tensão gerados pelo programa foram calculados os valores de distorção harmônica total (TDH), pela Eq.(1):

$$TDH_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{50} V_h^2}}{V_f} \tag{1}$$

Onde,

TDH_V Total de distorção harmônica de tensão [-];
h Ordem harmônica [-];
V_h Amplitude de tensão da harmônica de ordem h [V];
V_f Amplitude de tensão da onda fundamental [V].

3. RESULTADOS

O conjunto de 19 simulações realizadas mostra que o impacto de distorções harmônicas de corrente de cargas residenciais não lineares em sistemas de distribuição pode apresentar proporções significativas.

Em todos os casos, o efeito capacitivo dos inversores fotovoltaicos resultou na diminuição da frequência de ressonância do sistema, sendo o caso mais notável a simulação com 50% de penetração de sistemas fotovoltaicos onde a capacitância total paralela reduziu a frequência de ressonância para a ordem 13ª na barra 6, coincidindo com harmônicos de correntes injetados pelas cargas não lineares. Desta forma a corrente de 13º harmônico das cargas "enxergou" uma impedância relativamente alta no barramento, resultando em uma distorção harmônica de ordem 13 igual a 3,32% e TDHv de 5,67%, violando o limite individual e total de distorção estabelecidos pelo IEEE 519 e IEC61000.

A Fig. 4 mostra o gráfico de impedância para a barra 6 do modelo em função da frequência com 5 e 50% de penetração fotovoltaica. As Fig. 5 e 6 mostram os resultados de distorção harmônica na barra 6 para estes mesmos casos.

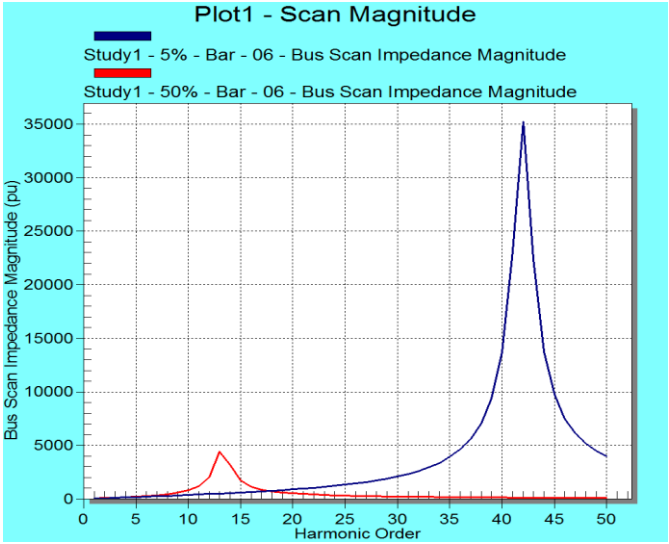

Figura 4 – Impedância vista pela barra 6 em função da frequência

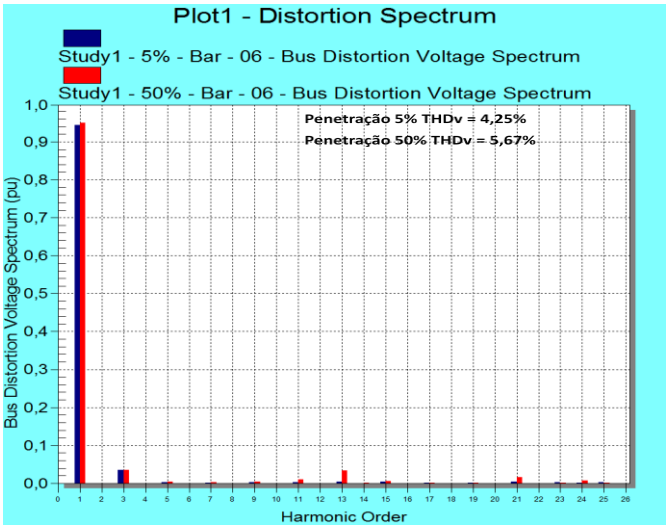

Figura 5 – Espectro de frequências de tensão na barra 6 com 5 e 50% de penetração fotovoltaica

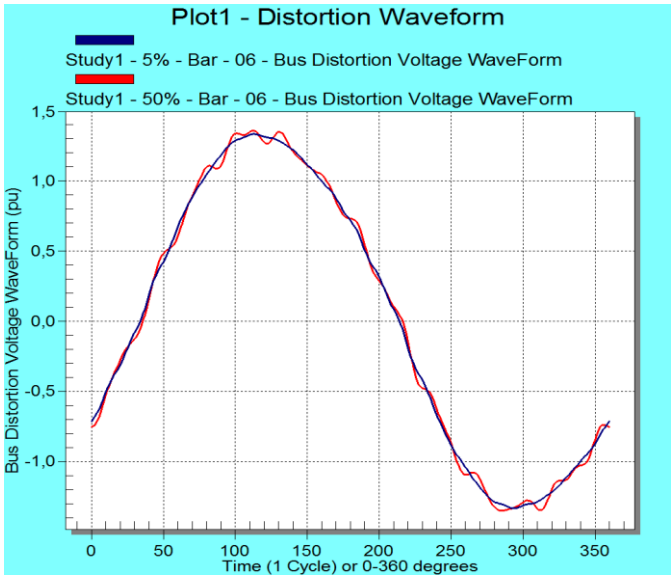

Figura 6 – Forma de onda de tensão na barra 6, com 5 e 50% de penetração fotovoltaica

Como uma avaliação geral das simulações realizadas, a Fig. 7 apresenta o número de barras do sistema estudado em que foram violados os limites de TDH de tensão para cada nível de penetração fotovoltaica.

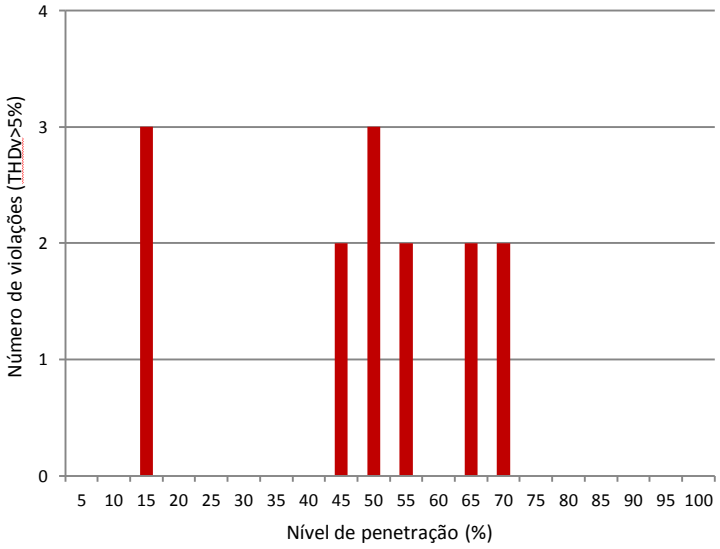

Figura 7 – Frequência de violação dos níveis de TDH

Observa-se que o aumento da TDH no sistema não é proporcional ao nível de penetração simulado, isto se explica pelo fato de que nem sempre a diminuição da frequência de ressonância coincidirá com a existência de um harmônico de corrente naquela frequência. Esta não linearidade faz com que a análise e definição de critérios para o nível de inserção de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica seja mais complexa.

Em situações práticas, as variações dinâmicas e desequilíbrio de fase das cargas geram um grande desafio em termos análise da qualidade da energia e previsão de possíveis falhas e defeitos de equipamentos causados por distúrbios de tensão. Além disso, até mesmo um estudo de pior caso, nem sempre garantirá a eliminação de todas as falhas do sistema provocadas por poluição harmônica, pois, a situação efetivamente mais crítica do ponto de vista da qualidade da energia é difícil de ser prevista, devido à imensa diversidade de situações possíveis, uma vez que o elevado número de variáveis como, configuração do sistema e distribuição física das cargas, nível de potência demandado em cada ponto do sistema e variação no perfil harmônico em cada residência torna a complexidade do problema exponencial.

No entanto, verificou-se que de forma geral as distorções harmônicas geradas por cargas residências podem violar os limites estabelecidos por norma, podendo ainda ser amplificados devido à presença de sistemas de geração distribuída, tomando-se este trabalho como um cenário crítico representativo.

Portanto, seria interessante equipar os inversores fotovoltaicos com sistemas de desligamento noturno automático ou preferencialmente com filtro ativo de potência, pelo que os inversores não somente deixariam de impactar negativamente a qualidade da energia no sistema, mas também contribuiriam para reduzir as emissões harmônicas de corrente pelas cargas lineares típicas de instalações residenciais.

4. CONCLUSÕES

Os inversores fotovoltaicos podem desempenhar papel significativo na amplificação de harmônicos no sistema de distribuição. O aumento dos níveis de TDH não é linear com o nível de penetração dos sistemas fotovoltaicos. Para perfeito atendimento das normas de qualidade da energia é aconselhável equipar os inversores com filtro ativo de harmônicos.

A realização de novos estudos de caso com sofisticações no modelo de agregação de harmônicos das cargas, no circuito elétrico equivalente do inversor e agregação dos harmônicos gerados pelo próprio equipamento, além de modelos estatísticos de desequilíbrio de carga são de importante relevância para consolidação dos conhecimentos tecnocientíficos sobre o tema, bem como trabalhos de avaliação experimental através e monitoramento das grandezas do sistema, indicados para pesquisa futura.

Agradecimentos

Trabalho desenvolvido no âmbito da Chamada Estratégica 13 do Programa de P&D Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL. À FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

Aprilia, E. C., Cuk, V., Cobben, J. F. G., Kling, W. L., 2012. Modeling the Frequency Response of Photovoltaic Inverters, IEEE Pes Isgt Europe.

Au, M. T., Navamany, J. S. e Yeoh, E. C., 2010. Impact of medium power inverter-based residential harmonic loads and PFCs on low voltage lines. IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010), Nov 29 - Dec 1, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia.

Cotten, William L., Brandell, P.E. e Sol, R., 1989. Analysis of harmonic pollution on power distribution systems. IEEE,Paper No. PCIC-89-46.

Gosbell, V.J. e Ghezelayagh, M., 1992. Time domain analysis of distribution system harmonics. I. Development of power electronic simulator, IEEE.

Gosbell, V.J. e Ghezelayagh, M., 1992. Time domain analysis of distribution system harmonics. II. Interaction between harmonic sources and power system component, IEEE.

Kefalas, T.D. e Kladas, A. G., 2010. Grid Voltage Harmonics Effect on Distribution Transformer Operation. 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion. Agia Napa, Cyprus (Paper No. MED10/161).

Latheef, A.A., Gosbell, V.J. e Smith, V., 2006. Harmonic Impact of Residential Type Photovoltaic Inverters on 11kV Distribution System. School of Electrical, Computer and Telecommunication Engineering University of Wollongong, Australia.

Lee, Y. D., Chen, C. S., Hsu, C. T. e Cheng, H. S., 2006. Harmonic Analysis for the Distribution System with Dispersed Generation Systems, International Conference on Power System Technology.

Mahmoud, Aly A. Shultz, Richard D., 1982. A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6.

Tostes, M.E. de Lima, Bezerra, U. H. Silva, R. D. S., Carvalho e Muller, C. C. M. E., 2004. Analysis of the impact caused by low voltage customers harmonic generation in the distribution grid by a harmonic three-phase load flow based on the current summation. IEEWPES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America.

Yong, J., Chen, L. e Chen, S., 2010. Modeling of Home Appliances for Power Distribution System Harmonic Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, nº. 4.

Zahir, J., Paracha, Kalam, A. e Ali, R., 2009. A novel approach of harmonic analysis in power distribution networks using artificial intelligence. IEEE.

ANALYSIS OF HARMONIC INTERACTION IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS WITH HIGH PENETRATION OF RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. *In this work an investigative analysis on the effects of harmonic interactions in residential distribution power systems with different penetration levels of PV systems was performed. A case study of a representative low voltage*

*electrical distribution network (220V) with 150 kVA transformer was chosen , in a worst-case analysis from the point of view of harmonic voltage distortion , notedly the time periods when there is greater power demand by households, i.e. nocturnal peak hours , where there is a greater amount of harmonic current injected by nonlinear loads such as computers , air - conditioning , TVs , etc. The system was modeled and simulated using the Power * Tools for Windows (PTW) software . With the obtained results, a comparative analysis between the calculated levels of voltage distortion in the system and limits on major existing standards and recommendations was carried out.*

Keywords: *Photovoltaic inverter , harmonic distortion , distribution network.*