

Estimador de distorção harmônica causada por inversores de frequência baseado em Sistema Neuro-Fuzzy

ANDRE L. DIAS¹, GUILHERME S. SESTITO², AFONSO C. TURCATO³, EDUARDO A. MOSSIN⁴, DENNIS BRANDAO⁵

¹ Doutorando em Engenharia Elétrica, USP Campus São Carlos, andreldias@usp.br.

² Doutorando em Engenharia Elétrica, USP Campus São Carlos, guilhermesestito@usp.br.

³ Doutorando em Engenharia Elétrica, USP Campus São Carlos, afonso.turcato@usp.br.

⁴ Professor, Instituto Federal de São Paulo, Campus Sertãozinho, emossin@ifsp.edu.br.

⁵ Livre docente, USP Campus São Carlos, dennis@sc.usp.br.

Apresentado no
1º Congresso de Pós-Graduação do IFSP
29 de novembro a 02 de dezembro de 2016 - Matão-SP, Brasil

RESUMO: Este trabalho tem por objetivo estimar o nível de distorção harmônica total de tensão em um sistema elétrico de potência causada por painéis elétricos de baixa tensão, equipados com inversores de frequência para acionamentos de motores elétricos. O aumento do uso de equipamentos com eletrônica de potência conectado a rede de alimentação resulta em poluição harmônica do sistema elétrico. A distorção harmônica é um dos fenômenos relacionados à qualidade de energia no que diz respeito à distorção da forma de onda senoidal do sistema. Estimar os níveis de harmônica na fase de projeto pode ajudar no planejamento elétrico, além de reduzir possíveis problemas nas fases de operação e manutenção do sistema. O estimador é implementado através de um sistema ANFIS (sistema neuro-fuzzy) a partir de dados de um fabricante de equipamentos elétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade de Energia; ANFIS; Distorção Harmônica.

Harmonic Distortion Estimator due to frequency inverters based on Neuro-Fuzzy System

ABSTRACT: This study aims to estimate levels of total voltage harmonic distortion in an electric power system due to low-voltage electrical panels, equipped with frequency converters for electric motors drives. The increasing use of equipment with power electronics connected to power supply results in harmonic pollution of the electrical system. Harmonic distortion is one of the phenomena related to power quality regarding distortion sine wave system. Estimate the harmonic levels at the design stage can help in electrical project planning, as well as reducing potential problems related to these phenomena in the operating phases and system maintenance. The estimator is implemented through a systems ANFIS (neuro-fuzzy system) from internal data of a manufacturer of electrical equipment.

KEYWORDS: Energy quality; ANFIS; harmonic distortion

INTRODUÇÃO

A qualidade de energia de um sistema elétrico consiste em evitar problemas relacionados ao fornecimento de energia, verificado através de tensão, corrente e frequência, que resultem em falha ou má operação dos equipamentos (Dugan, 1996). A distorção harmônica é um dos mais importantes problemas de qualidade de energia elétrica (Vlahinic, 2009). O nível de distorção harmônica é definido como o espectro de harmônica completo com magnitude e ângulo de fases de cada componente, porém é comumente utilizado um único fator como medida efetiva, conhecida como distorção harmônica total (THD) (Dugan, 1996). A equação 1 apresenta esta definição para distorção harmônica total em tensão do sistema elétrico

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{máx}} V_n^2}{V_1^2}} \times 100[\%] \quad (1)$$

onde:

THD_V - distorção harmônica total de tensão

V_n - valor eficaz de tensão de ordem n

V_1 - valor eficaz de tensão fundamental

n - ordem da componente harmônica

Essas distorções são causadas por cargas não-lineares e dispositivos eletrônicos conectadas ao sistema elétrico, como inversores de frequência. Seus principais efeitos são aquecimento de equipamentos e condutores elétricos, decréscimo de desempenho de motores e operação indevida dos disjuntores e relés de proteção, ocasionando paradas não programadas e redução da vida útil dos equipamentos (Dugan, 1996).

Inversores de frequência são vastamente aplicados em cargas industriais para acionamentos de bombas, exaustores, elevadores, esteiras, entre outras utilizadas no processo produtivo. Tratam-se de equipamentos de eletrônica de potência que convertem tensão alternada em tensão e frequência variável, permitindo o controle de velocidade, torque e até mesmo posição de motores elétricos (Dugan, 1996).

Algumas técnicas para redução do nível de distorção harmônica nos sistemas elétricos são a utilização de filtros passivos e ativos. Geetha (2013) utiliza sistemas inteligentes para elaboração de filtros ativos em fontes renováveis de energia.

MATERIAL E MÉTODOS

Atualmente o cálculo (na fase de projeto) do nível total de distorção harmônica gerado por inversores de frequência é dificultado devido à falta de informações disponíveis pelos fabricantes de equipamentos e pela grande quantidade de variáveis que são necessárias para o cálculo (Vlahinic, 2009).

Neste contexto, utilizar uma ferramenta para estimar o nível total de distorção harmônica de tensão em painéis elétricos, pode ajudar no planejamento elétrico do projeto, além de reduzir possíveis problemas relacionados a estes fenômenos nas fases de operação e manutenção do sistema, como por exemplo na utilização de bancos de capacitores e dimensionamento do fator K nos transformadores de média de tensão que alimentam o painel elétrico.

A proposta de solução ao problema apresentada neste trabalho se baseia na utilização de um sistema inteligente neuro-fuzzy denominado *Adaptive Network-based Fuzzy Inference System* (ANFIS), melhor descrito em Jang (1993), que será utilizado para estimar valores de distorção harmônica total de tensão gerada por inversores de frequência em painéis elétricos de baixa tensão.

A Figura 1 mostra um exemplo de diagrama unifilar típico de projetos de painéis elétricos com inversores de frequência, este será tomado como base no desenvolvido deste estimador.

O software utilizado é o MATLAB R2010a, que possui a ferramenta "ANFIS Editor", a qual elabora um sistema de inferência fuzzy a partir de dados de entrada e saída com objetivo de ser um aproximador de função. Sistemas neuro-fuzzy são uma poderosa estratégia alternativa para desenvolvimento de sistemas fuzzy, uma vez que é capaz de aprender e prover regras tipo Se-Então de forma linguística ou explícita. Entre estes modelos, o ANFIS tem sido reconhecido como referência, principalmente por seu caráter flexível e adaptável (Lima, 2002 e Jang, 1993).

No estimador desenvolvido, as variáveis de entrada do sistema inteligente são: potência do transformador de alimentação e quantidade de alguns inversores de frequência, classificados por sua potência. Para simplificação do problema, os dados técnicos dos transformadores foram limitados conforme abaixo:

- Potência: de 500kVA à 1500kVA
- Impedância: 5%
- Tensão no Primário: 13,8kV
- Tensão no Secundário: 480Vac
- Frequência: 60Hz

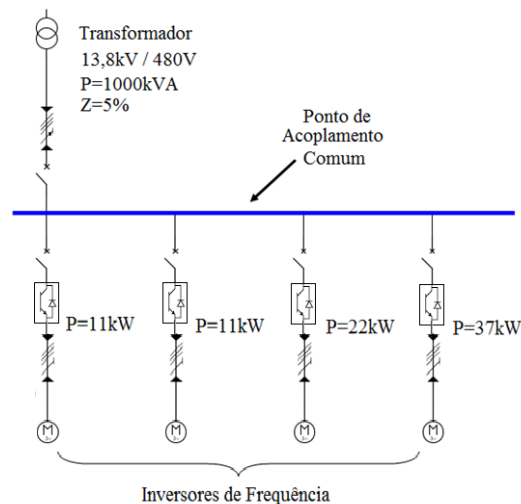


FIGURA 1: Exemplo de circuito com transformador de 1000kVA e inversores de 11kW, 22kW e 37kW

Os inversores de frequência considerados alcançam até a potência de 37kW, porém para redução do número de variáveis, considera-se a maior potência de cada tamanho físico da família de inversores produzida por um grande fabricante de equipamentos que foi objeto deste estudo. Assim, as características técnicas são potência até 11kW, entre 15 e 22kW e entre 30 e 37kW, carga em torno de 75% da potência.

A saída do sistema deve estimar o nível de distorção harmônica total de tensão (THDV) gerada pelo painel de baixa tensão no ponto de acoplamento comum, que nesta temática pode ser considerado o barramento principal entre o transformador de média tensão e os inversores de frequência, indicado na Figura 1.

Resumidamente, as variáveis de entrada e saída utilizadas neste trabalho são:

- Entrada 1: Potência do transformador
- Entrada 2: quantidade de inversores de até 11kW
- Entrada 3: quantidade de inversores de 15 a 22kW
- Entrada 4: quantidade de inversores de 30 a 37kW
- Saída: THDV - distorção harmônica total de tensão

Para treinamento e verificação de desempenho do sistema inteligente, faz-se uma coleta dos dados, oriundos de uma planilha de uso interno do fabricante, que disponibiliza dados de tensão harmônica total de tensão para diversas variações de inversores e transformadores em um sistema elétrico. Foram utilizadas 175 amostras para treinamento e 15 amostras para teste e verificação de desempenho.

Considerou-se 03 termos em cada variável e, para buscar melhores desempenhos, o sistema foi testado utilizando funções de pertinência com topologias triangular, gaussiana e sino com 200 pontos de discretização para o universo de discurso das variáveis. O critério de parada utilizado foi de 50 épocas com método de otimização de parâmetros do tipo híbrido, isto é, utilizando técnica *back propagation* e LMS.

O sistema é implementado para todas topologias e seu desempenho é verificado através do erro relativo médio (ERM) e sua variância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 apresenta os resultados para cada uma das topologias utilizadas na implementação, com indicação de erro relativo médio das amostras de teste.

Verifica-se que as topologias gaussiana e sino tiveram os melhores resultados, com menor valor de erro relativo médio entre os resultados das amostras de teste, sendo de 2,71% para a topologia gaussiana. Esses valores de erros podem ser considerados satisfatórios para o problema apresentado.

Analisando-se o limite de distorção harmônica total especificado pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) para sistema de baixa tensão (inferiores a 1kV), que é de 10% de distorção harmônica total em tensão, verifica-se que, tanto a topologia sino como a trapezoidal, o estimador desenvolvido é capaz de verificar a conformidade da distorção harmônica, considerando 100% de acertos nos casos das amostras de testes utilizadas.

CONCLUSÕES

Este trabalho pretende estimar o nível de distorção harmônica total de tensão causada por inversores de frequência de um painel elétrico de baixa tensão na fase de projeto, com intuito de oferecer suporte na tomada de decisões relativas ao planejamento elétrico e, reduzir possíveis problemas relacionados a estes fenômenos durante operação da planta industrial.

O sistema inteligente ANFIS foi utilizado para este fim, e concluiu-se que seu uso teve desempenho satisfatório, com erro relativo médio entre as amostras de teste no valor de até 2,71%, bastante aceitável em aplicações práticas. Verificou-se a grande capacidade de generalização no sistema estudado. A topologia tipo gaussiana apresentou os melhores resultados.

TABELA 1. Resultados das topologias do sistema ANFIS

Entradas				Valor Esperado	Topologia		
1	2	3	4		Triangular	Gaussiana	Sino
500	6	1	2	14,1	14,0	14,0	14,0
750	5	1	1	8,1	8,2	8,3	8,3
750	0	3	3	10,7	10,8	10,1	10,1
1000	0	5	5	15,9	14,2	16,5	16,7
1000	6	4	0	9,8	9,7	9,7	9,8
1000	0	3	6	15,2	17,2	16,6	16,4
500	5	1	1	10,4	10,4	10,4	10,4
1500	3	4	3	10,3	10,6	11,2	11,3
1500	7	7	6	20,2	20,1	20,0	19,7
1500	6	0	4	9,5	9,5	9,5	9,5
1000	2	5	5	17,4	16,3	17,1	17,8
1500	5	5	5	15,5	17,2	16,0	16,2
500	4	5	4	24,2	24,3	24,6	24,5
750	7	6	5	25,8	28,3	25,5	25,5
1500	7	1	5	12,6	12,8	12,7	11,8
ERM					4,02%	2,71%	3,37%
Variância					0,23%	0,09%	0,09%

REFERÊNCIAS

- GEHRKE, C.S.; LIMA, A.M.N.; OLIVEIRA, A.C. (2014). Controlling harmonics in electrical power systems for satisfying total and individual harmonic distortion constraints. In: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE
- DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, M. F. E WAYNE BEATY, H. (1996). "Electrical Power Systems Quality", MCGRAE-HILL.
- VLAHINIC, S. ; BRNOBIC, D. ; STOJKOVIC, N.. (2009) "Indices for Harmonic Distortion Monitoring of Power Distribution Systems" In: , IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. v. 58, pp.1771-1777.
- RUDERMAN, A. (2015). "About Voltage Total Harmonic Distortion for Single- and Three-Phase Multilevel Inverters". In: IEEE Transactions on Industrial Electronics. v.62, pp.1548-1551.
- FONSECA, A. L. A. et al. Behavioral and Statistical Analysis of Total Harmonic Distortion Input Frequency Converter of a Triggering an Industrial Fan: A Case Study. IN: Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on (2014). pp. 152-156.
- LIMA, C.A.M., COELHO, A.L.V. E VON ZUBEN, F.J. Fuzzy Systems Design via Ensembles of ANFIS. In: Fuzzy Systems, 2002. FUZZ-IEEE'02. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on.
- JANG, J.R. ANFIS : Adaptive-Ne twork-Based Fuzzy Inference System. In: IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics, VOL. 23, NO. 3, 1993. pp.- 665-685.
- GEETHA, K. ;SANGEETHA, B. Application of artificial intelligent technique to power quality issues in renewable energy sources (2013) .In: Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE), International Conference on. pp. 233-23