

# **DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADOR SOB CARGAS NÃO-LINEARES**

Cairo Rezende dos SANTOS; Paulo César M. MACHADO; Luiz Roberto LISITA

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG

cairorezende@hotmail.com, pcmmachado@gmail.com, Irlisita@gmail.com

EEEC/UFG Mestrado – Órgão Financiador: CAPES

Palavras-chave: Transformadores, carga não-linear, distorção harmônica.

## **1. INTRODUÇÃO**

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência os equipamentos ligados aos sistemas elétricos de energia evoluíram, melhorando em rendimento, controlabilidade e custo. Contudo, esses equipamentos têm a desvantagem de não funcionarem como cargas lineares, consumindo correntes não senoidais e dessa forma poluindo a rede elétrica de alimentação com harmônicos [1]. Essa poluição traz várias consequências para a instalação elétrica e para os transformadores. Em transformadores causa acréscimo de perdas no cobre e no ferro, aumento da temperatura e diminuição da sua vida útil. Portanto, faz-se necessário calcular o valor máximo da corrente a ser fornecida pelo transformador na alimentação de cargas lineares e não-lineares. Neste trabalho será feito um planejamento do dimensionamento de transformadores pela aplicação do princípio da superposição das componentes harmônicas de correntes de mesma ordem das cargas analisadas.

## **2. METODOLOGIA**

A metodologia a ser utilizada para o planejamento do dimensionamento do transformador baseia-se no levantamento do espectro harmônico de cada carga individual, linear e não-linear, bem como da corrente total referente a estas cargas combinadas. Com este procedimento obtém-se o modelo das correntes totais com seus espectros harmônicos, que será utilizado para verificar a credibilidade do dimensionamento do transformador. Este dimensionamento será realizado obedecendo-se aos critérios da norma IEEE Std C57.110-2008 [2]. Isto é feito utilizando-se do Fator de Perdas Harmônicas ( $F_{HL}$ ). Este fator é proporcional à perda nos enrolamentos do transformador causada pela utilização de cargas não-lineares.

O  $F_{HL}$  é definido pela norma conforme eq. (1). Outro indicador da presença de harmônicos nas correntes das cargas é a Distorção Harmônica Total de corrente ( $THDi$ ) [3], conforme eq. (2). Com o  $F_{HL}$  calculado e utilizando-se do valor da Perda por Correntes Parasitas em enrolamentos sob condição de carga linear nominal ( $P_{EC-Rpu}$ ), determina-se a corrente máxima em pu ( $I_{m\acute{a}x(pu)}$ ) conforme eq. (3) [4].

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} (I_h^2 \cdot h^2)}{\sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} (I_h^2)} \quad (1)$$

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=h_{m\acute{a}x}} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

$$I_{m\acute{a}x(pu)} = \sqrt{\frac{1+P_{EC-Rpu}}{1+(P_{EC-Rpu} \times F_{HL})}} \quad (3)$$

Onde:

$h$  ,  $h_{m\acute{a}x}$  – ordem harmônica e harmônica máxima de potência significativa

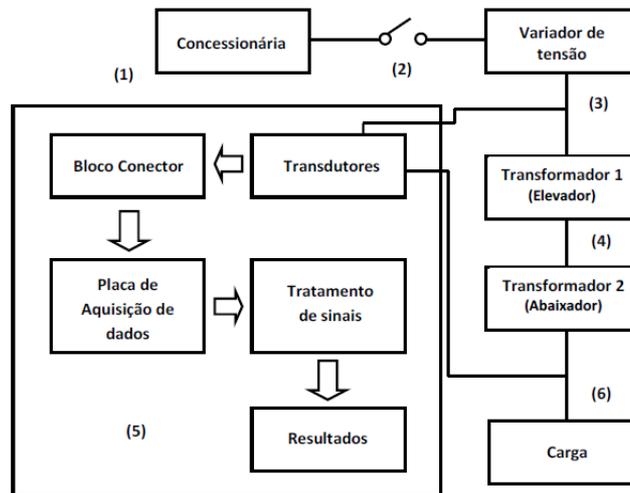
$I_h$  ,  $I_1$  - componente da corrente harmônica de ordem  $h$  e corrente fundamental

O princípio da superposição é utilizado para prever o valor da corrente total gerada pelas cargas individuais (supondo-se que as componentes harmônicas de cada carga individual estejam em fase). Esses valores obtidos são comparados com os valores medidos com o funcionamento simultâneo das cargas analisadas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições foram realizadas com tensão trifásica de 380 V em todas as alimentações das cargas ensaiadas. A Figura 1 mostra o diagrama funcional do sistema de aquisição e tratamento de dados. Nesta figura tem-se a energia entregue pela concessionária (1), uma chave geral para proteção (2), um variador de tensão (3), dois transformadores na configuração *back-to-back* (4), o sistema de aquisição de dados (5) e a carga conectada ao transformador (6). Os transdutores utilizados possuem uma largura de faixa de 0 a 300 kHz com precisão de  $\pm 0,2$  % (tensão) e de 0 a 500 kHz com precisão de  $\pm 0,1$  % (corrente). Outro componente do sistema é o software (LabVIEW) [5]. O transformador analisado é o segundo da configuração *back-to-back* da bancada de ensaios.

Foram utilizados dois transformadores em série devido à comodidade e precisão na aquisição de dados pelas tensões inferiores de ambos transformadores. Os transformadores são do tipo seco com potências de 5 kVA, relação de transformação de 2000/380 V em Y e 60 Hz. A Tabela 1 mostra as cargas utilizadas.



**Figura 1 - Sistema de aquisição e tratamento de dados**

Primeiramente foram realizados os ensaios em curto-circuito e resistência de enrolamentos. Desses ensaios, obteve-se o valor de 0,056 pu para a  $P_{EC-Rpu}$ .

**Tabela 1. Tipos de cargas.**

CARGAS	DESCRIÇÃO
C1	Carga Linear + Motor de Indução Trifásico (MIT)
C2	Carga Linear + Lâmpadas Eletrônicas (LE)+ Computadores
C3	LE + Computadores + Motor de Indução Trifásico (MIT)
C4	LE + Computadores + Ponte 6 diodos com filtro capacitivo

O dimensionamento do transformador, para as cargas mostradas na Tabela 1, foi realizado de maneira teórica (de forma planejada com cargas individuais) e de maneira real (com os dados obtidos referentes aos ensaios com as cargas operando em conjunto). Salienta-se que as aquisições de dados das tensões e das correntes bem como os espectros harmônicos dessas correntes foram obtidas na saída do segundo transformador em uma das fases (*fase C*).

Em seguida foi realizado o dimensionamento do transformador de forma teórica através do estudo individual das cargas e levando-se em consideração suas

composições harmônicas. Desta forma encontrou-se um valor máximo para a corrente do transformador, tendo como base o somatório das componentes harmônicas de mesma ordem das cargas individuais.

O dimensionamento real do transformador foi realizado com as cargas combinadas (C1 a C4), considerando-se os espectros harmônicos das correntes totais nos cálculos das correntes máximas ( $I_{máxpu}$ ). Assim pode-se comparar o resultado obtido de forma teórica com o obtido de forma real. A Tabela 2 exibe os espectros harmônicos (até a 25ª) para as cargas analisadas de forma teórica ( $I_{Th}$ ) e medida ( $I_{Mh}$ ), as correntes totais ( $I_{total}$ ),  $THDi$ ,  $F_{HL}$ , as correntes máximas ( $I_{máxpu}$ ) e os erros percentuais. As harmônicas pares não apresentaram potências significativas.

**Tabela 2. Espectros harmônicos, correntes e erros das cargas analisadas.**

$h$	$I_{Th} (C1)$	$I_{Mh} (C1)$	$I_{Th} (C2)$	$I_{Mh} (C2)$	$I_{Th} (C3)$	$I_{Mh} (C3)$	$I_{Th} (C4)$	$I_{Mh} (C4)$
1	12,90	11,28	11,81	11,72	7,132	6,370	13,60	13,47
3	0,057	0,043	2,440	2,172	2,442	2,031	2,470	2,436
5	0,316	0,213	1,600	1,053	1,577	0,682	4,800	2,890
7	0,035	0,024	0,520	0,334	0,517	0,344	0,890	0,452
9	0,009	0,001	0,240	0,161	0,230	0,167	0,274	0,589
11	0,028	0,026	0,315	0,220	0,307	0,229	0,875	0,389
13	0,011	0,009	0,170	0,097	0,164	0,144	0,410	0,196
15	0,007	0,003	0,086	0,055	0,079	0,047	0,090	0,060
17	0,006	0,005	0,120	0,076	0,121	0,102	0,311	0,240
19	0,001	0,000	0,086	0,023	0,082	0,046	0,231	0,142
21	0,004	0,004	0,060	0,037	0,057	0,050	0,067	0,084
23	0,006	0,004	0,065	0,027	0,060	0,059	0,150	0,143
25	0,003	0,002	0,054	0,011	0,053	0,030	0,117	0,131
$THDi$	2,520	1,960	25,42	20,96	41,67	34,50	41,02	28,90
$F_{HL}$	1,016	1,010	2,061	1,578	3,556	2,533	4,869	2,827
$I_{total} (A)$	12,91	11,28	12,18	11,97	7,727	6,739	14,70	14,02
$I_{máxpu}$	0,999	0,999	0,973	0,985	0,938	0,962	0,911	0,955
$Erro\%$	0		1,218		2,422		4,618	

Na Figura 2 nota-se que as correntes máximas do transformador, para as medições diretas das cargas, foram maiores que as correntes máximas obtidas do cálculo teórico. Isto se deve ao fato de que as correntes harmônicas de mesma ordem de cada carga individual podem não estar em fase. A Figura 3 mostra a evolução do erro percentual entre as duas formas de cálculo da corrente máxima em função da  $THDi$  medida. A carga C4 com  $THDi$  de 28,9% apresentou o maior erro entre as correntes máximas teóricas e medidas.

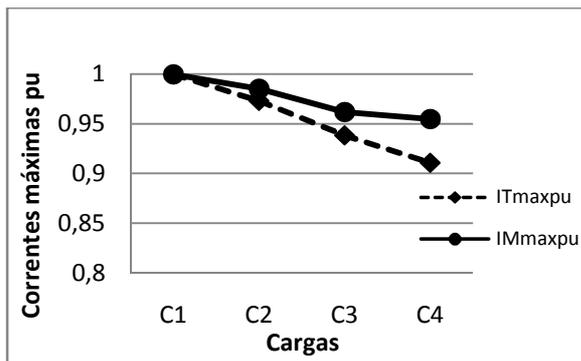


Figura 2 – Correntes máximas (pu).

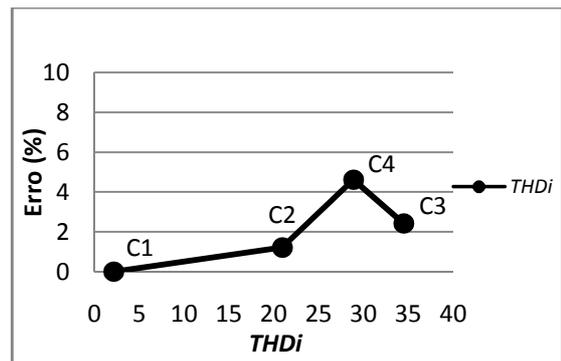


Figura 3 – Erro de acordo com o  $THD_i$ .

#### 4. CONCLUSÕES

O planejamento do dimensionamento de um transformador alimentando cargas lineares e não-lineares pelo princípio da superposição de cargas, considerando que as harmônicas de mesma ordem apresentam amplitudes máximas no mesmo instante, mostrou-se válido por ser planejamento de aquisição de equipamento.

Verificou-se que os erros entre os valores teóricos e práticos das correntes máximas aumentam com a Distorção Harmônica Total de corrente ( $THD_i$ ), sendo que a maior diferença ocorreu para a carga C4 (4,618%). Os valores das correntes máximas do transformador para as medições diretas das cargas foram maiores que as correntes máximas referentes aos cálculos teóricos. Isso tem como consequência uma margem maior de segurança para o dimensionamento do transformador.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S. *Qualidade de energia elétrica na indústria*, EUVEO, pp. 1-35, 2003.
- [2] IEEE *IEEE Std C57.110 - Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. IEEE Standards. - 2008
- [3] GUIMARÃES M. B. *Comparação entre Métodos de Cálculo de Perdas em Transformadores Alimentando Cargas Não-Lineares*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, UFG, 2006.
- [4] IEEE *IEEE Std. 1459-2000 // Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. 2000.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS, *LabVIEW v. 6.1 User Manual*, 2002.