

# POLUIÇÃO HARMÓNICA

## E

### NORMALIZAÇÃO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Manuel Vaz Guedes

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Porto

#### Sumário

Neste artigo apresenta-se a forma adoptada para desclassificar um transformador, o que leva à definição do factor  $K$ . Apresentam-se, também, alguns argumentos de justificação da necessidade de desenvolvimento e adopção de normas para a desclassificação de máquinas eléctricas que funcionam em redes eléctricas afectadas por poluição harmónica.

#### 1. INTRODUÇÃO

Actualmente as máquinas eléctricas são, frequentemente, alimentadas por grandezas eléctricas com forma de onda não sinusoidal.

Devido à existência de cargas não lineares nas redes eléctricas, como os conversores electrónicos de potência com elementos semicondutores em comutação, dá-se uma deformação das ondas das grandezas eléctricas que alimentam as máquinas eléctricas. Estas grandezas, com formas de onda ricas em termos harmónicos, são responsáveis por alterações das características de funcionamento das máquinas eléctricas. Mas essas situações ainda não se encontram previstas nas normas portuguesas para máquinas eléctricas.

A necessidade de um melhor controlo do regime de funcionamento das máquinas eléctricas levou à utilização de sistemas conversores electrónicos de potência. Tais sistemas possuem elementos semicondutores em comutação, como os tiristores ou os triacs, o que provoca a distorção da forma de onda das grandezas eléctricas das redes de

distribuição de energia a montante do conversor e a distorção das grandezas eléctricas de alimentação das máquinas eléctricas.

A distorção da forma de onda das grandezas eléctricas pode ser caracterizada pela existência de termos harmónicos na sua decomposição em série de Fourier, mas habitualmente utilizam-se alguns factores — factor de distorção, factor harmónico telefónico, factor  $K$  — para caracterizar essa distorção, [1].

A presença dos termos harmónicos na forma de onda das grandezas eléctricas de alimentação da máquina eléctrica provoca a alteração das respectivas características de funcionamento: aumento das perdas de energia e consequente aumento do aquecimento, desenvolvimento de binários parasitas, alteração da distribuição do campo magnético com o aumento do ruído e das vibrações das máquinas.

Embora algumas das situações de alteração das formas de onda das grandezas características das máquinas eléctricas estejam previstas nas normas [2] [3], a situação de aumento das perdas de energia, da análise e caracterização desse aumento, e a imposição de medidas preventivas (*desclassificação da máquina eléctrica*) não estão prevista na normalização nacional até agora publicada. No entanto, para os transformadores, existe já uma norma internacional IEEE C57.110, [4], onde foi apresentado o factor  $K$ , que actualmente é adoptado pelos fabricantes de transformadores secos, e que já faz parte dos valores fornecidos pelos mais modernos aparelhos de medida de grandezas eléctricas

não sinusoidais.

Atendendo à necessidade de uma futura adopção dos conceitos estabelecidos na norma IEEE C57.110, faz-se nesta comunicação uma análise da fundamentação desses conceitos, exemplifica-se a sua utilização, constata-se a sua importância e analisa-se a sua aplicação a outro tipo de máquinas eléctricas.

## 2. DISTORÇÃO HARMÓNICA E PERDAS DE ENERGIA

Uma grandeza física periódica (com período T) com variação não sinusoidal no tempo ou no espaço, desde que verifique certas condições (condições de Dirichlet) é decomponível numa série de termos harmónicos, ou série de Fourier,

$$g(t) = A_0 + \sum_h B_h \cdot \cos(h\omega t) + \sum_h C_h \cdot \sin(h\omega t)$$

em que h é a ordem do termo harmónico. Para caracterizar a distorção da forma de onda não sinusoidal g(t) existem diversos factores, [1].

**Factor de Forma (FF)** — é a razão entre o valor eficaz (ou valor médio quadrático) e o valor médio absoluto da grandeza.

$$FF = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T g^2(t) dt} \bigg/ \frac{1}{T} \int_0^T |g(t)| dt$$

**Factor de Pico** (ou factor de vértice) — é a razão entre o valor máximo da grandeza e o seu valor eficaz (ou valor médio quadrático).

$$\text{Factor de Pico} = \frac{G_{\max}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T g^2(t) dt}}$$

**Factor de Distorção (FDH)** (ou factor harmónico) — é a razão entre o valor eficaz (ou valor médio quadrático) de todos os termos harmónicos e o valor eficaz (ou valor médio quadrático) do termo fundamental (frequentemente exprime-se em percentagem).

$$\text{Factor de Distorção} = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^n G_h^2}{G_1^2}}$$

**Factor Harmónico Telefónico** — FHT — é a razão entre o valor eficaz (ou valor médio quadrático) ponderado de todos os termos harmónicos e o valor eficaz da tensão nos terminais da máquina. Exprime-se em percentagem. É calculado numa gama de frequências de 0 a 5 kHz.

$$FHT = \left( \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^n G_h^2 \lambda_h^2}{U^2}} \right) \cdot 100 \%$$

O valor  $\lambda_h$  do factor de ponderação para os diferentes termos harmónicos, ou para as diferentes frequências, entra em consideração com a sensibilidade do ouvido humano às diferentes frequências dos termos harmónicos, e é fornecido por uma tabela, ou por um gráfico:  $f = 150 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = 0,00665$ ;  $f = 750 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = 0,895$ ;...

Estes diferentes factores caracterizam a distorção da forma de onda, mas dão pouca

informação sobre a alteração do comportamento de um sistema eléctrico provocada por essa distorção.

No caso do aquecimento de uma máquina eléctrica, provocado pela degradação da energia de perdas, é necessário considerar um outro tipo de análise, em que surge a definição de novos factores

Para uma máquina eléctrica estática, como um transformador, torna-se mais simples analisar os problemas criados pela distorção da forma de onda da corrente eléctrica da máquina.

A distorção da forma de onda da tensão, que provoca um aumento de perdas magnéticas, encontra-se limitada: THD = 5 % em vazio e THD = 10 % em carga, [3].

Quando se considera a definição do valor eficaz da intensidade da corrente eléctrica, associando-o à quantidade de calor libertada numa resistência eléctrica, verifica-se que no caso das grandezas eléctricas não sinusoidais há um aumento desse valor eficaz,

$$I = \sqrt{\sum_h I_h^2}$$

O aumento do valor eficaz da intensidade da corrente eléctrica, devido aos termos harmónicos, provoca um aumento das perdas por efeito Joule nos circuitos eléctricos da máquina eléctrica; desde que a frequência do termo harmónico de maior ordem considerado não provoque o aparecimento do efeito pelicular nos condutor (o que equivale a considerar que a resistência eléctrica é constante). Nessa situação as perdas de energia por efeito Joule são:  $P_J = R \cdot I^2$  com  $I^2 = \sum_h I_h^2$ .

Devido à variação no tempo do campo magnético criado pelas correntes eléctricas aparecem perdas de energia provocadas pelas correntes de Foucault ( $P_{CF}$ ) nos circuitos eléctricos da máquina. Este tipo de perdas adicionais é proporcional ao quadrado da corrente eléctrica de carga e ao quadrado da frequência do harmónico da corrente eléctrica considerado:  $P_{CF} = K_{CF} \cdot h^2 \cdot I_h^2$ .

Nas máquinas eléctricas existe ainda outro tipo de perdas de energia, com difícil caracterização e que ocorrem nos órgãos estruturais: são as perdas adicionais. Algumas dessas perdas de energia adicionais ( $P_{ad}$ ) também são alteradas pela distorção da forma de onda da corrente eléctrica de carga.

Pode-se ainda considerar a presença de um termo contínuo ( $I_0$ ) em certas formas de onda não sinusoidal da corrente eléctrica de carga de uma máquina; o que aumenta o valor das

perdas Joule da máquina e, consequentemente, do respectivo aquecimento.

Globalmente as perdas de energia variáveis com a carga de um transformador ( $P_V$ ) aumentam com a distorção da forma de onda da corrente eléctrica de alimentação da máquina.

$$P_V = P_J + P_{cF} + P_{ad} = R \cdot I^2 + P_{cF} + P_{ad} \quad (1)$$

É o aumento exagerado do aquecimento da máquina eléctrica face à sua situação nominal ( $I_n$ ;  $P_{Jn} = R \cdot I_n^2$ ), provocado pelas diversas perdas de energia variáveis com a carga da máquina que são afectadas pela forma de onda não sinusoidal da corrente eléctrica de carga, que tem de ser caracterizado. Para isso recorre-se a valores reduzidos (p.u.) das perdas.

Para redução dos valores das perdas de energia escolhe-se com valor base as perdas Joule à corrente nominal  $R \cdot I_n^2$ , caracterizadas pela densidade de energia de perdas por unidade de massa do condutor {watt/quilograma}.

A forma da reduzida da equação da densidade das perdas variáveis (1) é:

$$P_{Vr} = 1 + P_{cFr} + P_{adr}$$

Atendendo à dependência das perdas por correntes de Foucault nos condutores com a intensidade de corrente eléctrica e com a frequência, resulta que:

$$\begin{aligned} P_{cF} &= \sum_h P_{cFh} = \sum_h K_{cF} \cdot h^2 \cdot I_h^2 = \\ &= \sum_h (K_{cF} \cdot I_n^2) \cdot h^2 \cdot (I_h/I_n)^2 = \\ &= P_{cFn} \cdot \sum_h h^2 \cdot (I_h/I_n)^2 = \\ &= P_{cFn} \cdot \sum_h h^2 \cdot I_{hr}^2 \end{aligned}$$

Verifica-se, assim, que a alimentação da máquina com uma forma de onda de corrente eléctrica distorcida, provocou um aumento das perdas de energia por efeito Joule face ao seu valor em regime nominal:

$$P_{cFr} = P_{cFn} \cdot (factor\_K)$$

O aumento é caracterizado pelo *factor\_K*; tal que:  $factor\_K = \sum_h h^2 \cdot I_{hr}^2$ .

Verifica-se que é necessário conhecer o valor da intensidade da corrente eléctrica nominal do transformador ( $I_n$ ) para se determinar o valor reduzido dos termos harmónicos da corrente ( $I_{hr}$ ), e depois o valor do *factor\_K*.

O valor deste *factor\_K*, que resulta de uma mera operação algébrica com grandezas resultantes de uma análise harmónica da forma de onda da corrente eléctrica de carga

da máquina [1], já é determinado pelos modernos aparelhos de medida das grandezas eléctricas de redes afectadas por poluição harmónica.

Quando se podem desprezar as perdas de energia adicionais nos elementos estruturais ( $P_{ad}$ ), como no caso dos transformadores com isolamento seco, as perdas variáveis reduzidas, para um regime de carga qualquer ( $I$ ), são:

$$P_{Vr} = \sum_h I_{hr}^2 + P_{cFnr} \cdot factor\_K \quad (2)$$

Desta expressão (2) é possível retirar um resultado importante.

$$\begin{aligned} P_{Vrns} &= \sum_h I_{hr}^2 + P_{cFnr} \cdot \sum_h h^2 \cdot I_{hr}^2 = \\ &= \sum_h (I_{hr}/I_1)^2 \cdot I_1^2 + P_{cFnr} \cdot \sum_h h^2 \cdot I (I_{hr}/I_1)^2 \cdot I_1^2 = \\ &= I_1^2 \cdot [\sum_h (I_{hr}/I_1)^2 + P_{cFnr} \cdot \sum_h h^2 \cdot I (I_{hr}/I_1)^2] \end{aligned}$$

Considerando o valor reduzido da densidade das perdas variáveis que se admitiu, durante a fase de projecto, existirem no transformador em regime permanente nominal sinusoidal ( $P_{Vrns}$ ), é possível calcular o valor máximo da intensidade corrente eléctrica de carga reduzida ( $I_1 = I_{maxr}$ ) que pode alimentar a máquina.

$$I_{maxr} = \sqrt{\frac{P_{Vrns}}{1 + \left( \frac{\sum_h (I_h/I_1)^2 \cdot h^2}{\sum_h (I_h/I_1)^2} \right) \cdot P_{cFnr}}}$$

Como esse valor será menor do que a unidade ( $I_{nr} = 1$ ), a potência nominal da máquina terá de ser reduzida — a máquina terá de ser *desclassificada* — atendendo ao valor real dessa intensidade de corrente eléctrica.

Um exemplo simples, sugerido por [4], permite uma rápida compreensão deste assunto.

Um transformador trifásico é alimentado por uma corrente eléctrica não sinusoidal com a seguinte composição de termos harmónicos (expressos em valores eficazes reduzidos)

h	1	5	7	11	13
( $I_h/I_n$ )	0,978	0,171	0,108	0,044	0,028

A intensidade de corrente nominal ( $I_n$ ) é de 1200 A, e a densidade das perdas Joule admissíveis nos condutores é de 15 %, no regime não sinusoidal.

O valor do *factor\_K* é dado por

$$factor\_K = \sum_h h^2 \cdot I_{hr}^2 = 2,626$$

A densidade de perdas variáveis reduzidas para a situação de corrente não sinusoidal é:

$$P_{Vr} = 1 + 0,15 \cdot 2,626 = 1,394$$

O valor reduzido da intensidade da corrente eléctrica máxima admissível será:

$$I_{\max r} = \sqrt{1,15 / (1 + (2,7452 / 1,0456) \times 0,15)} = 0,908$$

e a intensidade de corrente eléctrica máxima

$$I_{\max} = 1200 \times 0,908 = 1090 \text{ A}$$

Este valor da intensidade da corrente eléctrica obrigava a *desclassificar* o transformador, que passaria a ter uma potência nominal de cerca de 90 % da potência nominal em regime sinusoidal.

Este exemplo permite verificar, a forma de determinar um valor para a intensidade de corrente eléctrica admissível num transformador em regime não sinusoidal, tal como está prescrito na norma IEEE C57.110 [4].

Para outro tipo de máquinas eléctricas, essencialmente máquinas eléctricas rotativas, não existe uma norma análoga; o que obriga ao desenvolvimento de uma análise crítica profunda dos fenómenos que poderão provocar a desclassificação desse tipo de máquinas.

### 3. NORMALIZAÇÃO

Quando se pretende caracterizar o efeito da distorção das grandezas eléctricas de alimentação de uma máquina eléctrica verifica-se que não existem normas adequadas, e que uma norma existente a nível internacional [4] tem aplicação apenas no caso de máquinas eléctricas estáticas: transformadores.

A adopção pelos fabricantes de transformadores com isolamento seco do *factor K*, como indicador do efeito da distorção sobre o aquecimento da máquina, tem relevância devido à importância exclusiva das perdas de energia variáveis (por efeito Joule e por correntes de Foucault) nos condutores dos enrolamentos dos transformadores.

Nas máquinas eléctricas rotativas a sua alimentação com grandezas eléctricas não sinusoidais dá origem ao aparecimento de campos girantes de grandezas magnéticas directos e inversos, conforme a ordem do termo harmónico que os cria. As correntes eléctricas responsáveis pela criação desses campos contribuem para o aquecimento da máquina.

O aquecimento exagerado da máquina pode afectar o circuito rotórico da máquina no caso deste ser bobinado.

Nas máquinas eléctricas rotativas, devido aos seus aspectos construtivos, existem outro tipo de perdas eléctricas de energia (adicionais),

que dependendo do estado da carga, não dependem da frequência. No entanto, esse tipo de perdas tem um valor percentual reduzido.

Numa máquina rotativa típica à plena carga ( $I_N$ ) e em regime sinusoidal, pode-se considerar que a distribuição das perdas é a seguinte:

*perdas constantes* = 9% de perdas mecânicas + 20% de perdas no ferro = 29 %;

*perdas variáveis* = 55 % de perdas por efeito Joule + 16 % de perdas adicionais = 71 %.

Nas perdas adicionais são precisamente as perdas que não dependem da frequência — perdas devido ao efeito de extremidade da máquina, perdas magnéticas superficiais devidas aos fluxos de fugas, perdas magnéticas devidas à inclinação dos condutores — que têm maior importância. Também o efeito pelicular nos condutores contidos em ranhuras fechadas (ou semi-fechadas) tem um outro comportamento que no caso dos transformadores.

Assim, para as máquinas eléctricas rotativas há que procurar outros métodos para caracterizar o efeito das grandezas eléctricas distorcidas, resultantes da poluição harmónica da rede eléctrica de alimentação. Essa caracterização terá de ser feita, então, através do aquecimento da máquina e recorre ao desenvolvimento de métodos computacionais expeditos de determinação da respectiva desclassificação [5].

### 4. CONCLUSÃO

Torna-se necessário adoptar normas para a desclassificação das máquinas eléctricas que funcionam em redes eléctricas afectadas por poluição harmónica.

### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Manuel Vaz Guedes; “*Grandezas Periódicas Não Sinusoidais*”, NEME-FEUP, 1992
- [2] CEI-34.1 A; “*Recommandations pour les Machines Électriques Tournantes — irrégularités de la forme d’onde*”, Comissão Electrotécnica Internacional, 1965
- [3] ANSI/IEEE C57.12.00; “*IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*”, IEEE, 1987
- [4] ANSI/IEEE C57.110; “*IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*”, IEEE, 1986
- [5] P. K. Sen and H. A. Landa; “*Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion*”, IEEE Trans. IA-26, (6), pp. 1102-1107, December 1990