

Modelagem Estática e Dinâmica do Comportamento de Materiais Magnéticos sob Regimes Senoidais Puro e Com Harmônicos

Sérgio H. L. Cabral*

Thair I. Mustafa* André Carvalho**

Jonas B. N. Coral**

*Fundação Universidade Regional de Blumenau

Departamento de Engenharia Elétrica (DEE)

Caixa Postal 1507 CEP 89010-971 - Blumenau - SC Fone/Fax 047 323 7200

scabral@furb.rct-sc.br

**Transformadores MEGA Ltda.

Caixa Postal 6302 CEP 89068-970 - Blumenau - SC Fone/Fax 047 337 2000

mega@braznet.com.br

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma metodologia para representação do laço de histerese de materiais ferromagnéticos, baseando-se no comportamento dos domínios magnéticos, em relação ao alinhamento. Apresentam-se alguns resultados de simulações, que motivam a realização de ensaios experimentais, futuramente. O resultado imediato do modelo é o controle de qualidade de perdas de funcionamento do material magnético.

Palavras-chave: histerese, materiais magnéticos.

Abstract: This work presents one model in which hysteresis curve is included based on the behaviour of the magnetic domains. Computational results encourage experimental tests, in view of certifying the theory.

Keyword: hysteresis; magnetic materials

1. INTRODUÇÃO

Os materiais ferromagnéticos utilizados na fabricação de transformadores e máquinas elétricas são solicitados constantemente em condições que diferem daquelas previstas para o regime permanente. Seja pela ocorrência de transitórios elétricos ou pela presença de harmônicos de tensão, que são cada vez mais freqüentes em instalações industriais, essas condições têm recebido maior atenção de Engenheiros Eletricistas de indústrias justamente por implicarem em custos, diretos ou indiretos, no funcionamento de transformadores e máquinas elétricas. O desempenho do material ferromagnético, por sua vez, pode ser avaliado através do aspecto da curva que exibe a relação entre fluxo magnético e corrente elétrica, que é a curva de histerese. Entretanto, esta apresenta dificuldades para sua representação analítica. Neste trabalho é apresentada uma proposta para a modelagem da relação entre fluxo magnético e corrente elétrica, em materiais ferromagnéticos, baseando-se no comportamento físico dos mesmos, sendo única para os diversos regimes. Para tanto, faz-se uso da existência da inércia mecânica para alinhamento dos domínios magnéticos, que vai permitir representar perdas

ativas associadas ao funcionamento dos circuitos magnéticos. Visando facilitar o entendimento da modelagem, um transformador monofásico em vazio é tomado como referência. Entretanto, a modelagem pode ser aplicada a máquinas elétricas e transformadores, em geral.

2. BASE DA MODELAGEM

Os Efeitos da Histerese. Usualmente, a modelagem para o funcionamento de um transformador sob o regime transitório da energização faz uso de funções não-lineares que não consideram o laço de histerese, mas somente a curva de magnetização [1,2]. Este procedimento implica numa forma conservativa de analisar o problema, uma vez que ao laço de histerese estão associadas perdas ativas, que atenuam a corrente transitória de energização do transformador. Para o regime senoidal puro, condição essa cada vez mais rara em instalações, a preocupação principal é a perda ativa associada ao funcionamento do transformador tanto pela própria histerese quanto pelo efeito Foucault. A sua modelagem é, normalmente, específica para o regime senoidal[3,4]. Atualmente, uma crescente preocupação de fabricantes de

transformadores é o desempenho dos mesmos frente à presença de harmônicos de tensão, mormente quanto às perdas.

O Comportamento do Material Magnético. Um material ferromagnético quando submetido a uma excitação, de fluxo magnético, como em transformadores, seus domínios magnéticos estarão sujeitos a um esforço de alinhamento. Os domínios irão responder à excitação, segundo seu grau de liberdade, de rotação, determinado pelo afastamento e atritamento dentre os mesmos. Considerando tais fatos, da mecânica clássica é possível avaliar que o esforço de oposição ao alinhamento dos domínios poderá ser diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo magnético no tempo. Desta forma um fluxo magnético constante não implicará em que cada domínio solicite energia ativa de alinhamento, em regime permanente. Já em regime alternado, cada domínio deverá requerer periodicamente energia para vencer o atrito, caracterizando o consumo de energia ativa.

A Curva de Magnetização. Simplificadamente, em se desconsiderando a presença da histerese, o comportamento de um material ferromagnético submetido à excitação elétrica que origine fluxo magnético, pode ser representado analiticamente por :

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}(i)$$

ou

$$i = i(\mathbf{f}),$$

onde \mathbf{f} representa o fluxo magnético e i representa a corrente elétrica decorrente da aplicação do fluxo magnético no material. A figura 1 apresenta o aspecto típico de uma curva de magnetização CA de um material magnético, que é obtida, experimentalmente, a partir de uma família de curvas de histerese CA do mesmo material [5]. Entretanto, esta curva não apresenta o laço de histerese, que é um elemento fundamental dos materiais ferromagnéticos, por estar associado às perdas ativas.

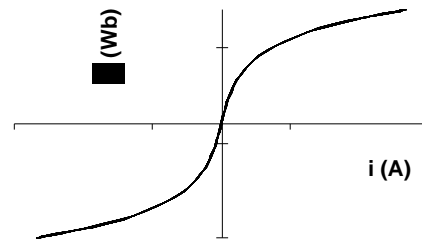


Figura 1 - Curva de magnetização CA

O elemento central da modelagem proposta consiste na inclusão do laço de histerese no comportamento do material. Primeiramente, convém representar a curva de magnetização na forma:

$$i = i(\mathbf{f})$$

e, então, incluir o termo relativo à influência da variação do fluxo magnético, que permitirá a consideração das perdas, sob a forma de corrente:

$$i = i(\mathbf{f}) + K \frac{d\mathbf{f}}{dt},$$

onde K é o fator que representa a intensidade da oposição dos domínios à mudança de orientação imposta pelo fluxo magnético. Sob o ponto de vista da representação circuital para um transformador em vazio, a inclusão do termo proporcional à taxa de variação do fluxo magnético vai permitir que representem-se as perdas ativas inerentes ao material ferromagnético, para alinhamento dos domínios. Na figura 2, o resistor do ramo de magnetização do transformador representa o consumo da energia ativa necessária para manter o regime cíclico de alinhamento.

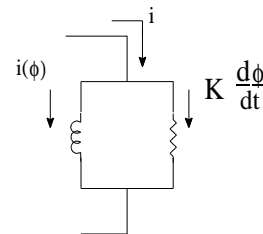


Figura 2 - Distribuição das correntes, segundo o modelo

A inclusão deste termo vai implicar que a curva de histerese, de cada material ferromagnético, possa ser tratada como o lugar geométrico dos pontos de uma função de fluxo magnético que satisfaz à equação diferencial originada. A princípio, o fator K depende da geometria do circuito magnético e da natureza do material ferromagnético, o que vai implicar que a mesma expressão da equação diferencial sirva para os regimes transitórios, senoidal puro ou senoidal com harmônicos.

3.ASPECTOS PRÁTICOS DA MODELAGEM

A representação analítica da curva de magnetização CA deve basear-se no critério de melhor ajuste dos dados experimentais, considerando a natureza física dos materiais ferromagnéticos para a escolha da função, como a saturação. O uso da curva de magnetização CA, por si, implica numa inerente margem de erro para o coeficiente K . Entretanto, presume-se que o erro torna-se aceitável frente às aplicações em Engenharia Elétrica, principalmente na avaliação de perdas ativas e reativas em circuitos magnéticos sob regime senoidal puro, ou com harmônicos. Embora o modelo possa ser diretamente aplicável ao material magnético virgem, tal fato é de execução questionável, sob o ponto de vista da praticidade, uma vez que um transformador é o produto final de um processo onde incide uma série de fatores, que provavelmente causaria um erro no fator K . Daí, decorre que o fator K deve ter uma natureza estocástica, e não determinística.

4.IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para fins do entendimento do modelo proposto, faz-se uso de um determinado circuito magnético de um transformador monofásico, que apresente a curva de magnetização CA, obtida experimentalmente, que possa ser ajustada por uma função do tipo hiperbólica, da seguinte forma:

$$i(\mathbf{f}) = \mathbf{a} \operatorname{senh}(\mathbf{b}\mathbf{f}),$$

onde \mathbf{a} e \mathbf{b} dependem do material utilizado, bem como da geometria do circuito magnético. A figura 3 mostra a curva citada, para $\mathbf{a} = 107,246 \cdot 10^{-6}$ A e $\mathbf{b} = 3,27 / \text{Wb}$

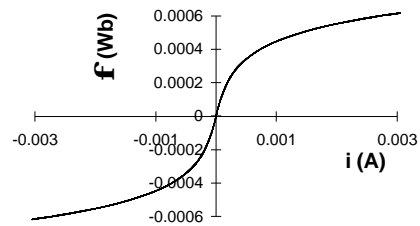


Figura 3 - Curva de magnetização CA do caso exemplo.

O circuito magnético é então simulado sob a uma excitação senoidal pura do tipo

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}_m \operatorname{sen}(\omega t + \mathbf{y}),$$

sendo $\mathbf{V}_m = 220 \sqrt{2}$ V, $\omega = 2\pi 60 \text{ rad/s}$ e ψ é um ângulo qualquer, dada a preocupação com o regime permanente, neste caso. A figura 4 mostra o circuito magnético, que tem $N = 1380$ espiras, $A = 5,0 \text{ cm}^2$ e $\ell_{\text{médio}} = 0,4 \text{ m}$.

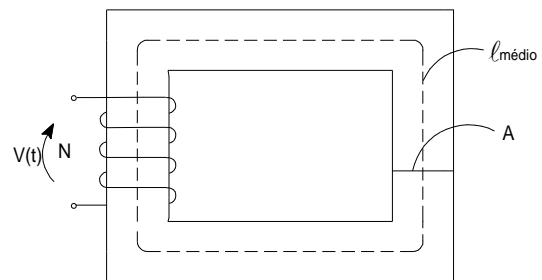


Figura 4 - Circuito magnético do caso exemplo

A relação entre o fluxo e a corrente torna-se, então :

$$i(\mathbf{f}, t) = \mathbf{a} \operatorname{senh}(\mathbf{b}\mathbf{f}) + K \frac{d\mathbf{f}}{dt}$$

A equação básica da tensão nos terminais do enrolamento considera a sua resistência série, r , originando a seguinte equação :

$$\mathbf{V}_m \operatorname{sen}(\omega t + \mathbf{y}) = r i(\mathbf{f}, t) + N \frac{d\mathbf{f}}{dt},$$

sendo $r = 0,5 \Omega$. Nesta equação diferencial básica $i(\mathbf{f}, t)$ é substituída pela sua expressão na

primeira equação, originando equação diferencial em f , que resolvida numericamente, apresenta a curva de histerese mostrada na figura 5. Considera-se $K = 0,002 (1 / \Omega)$.

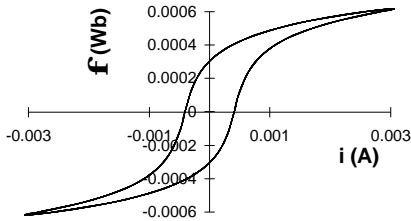


Figura 5 - Curva de histerese do circuito magnético do caso exemplo.

Testes Básicos para o Modelo - Com o mesmo circuito são simuladas duas condições que testam a adequação física do modelo:

- 1 - Regime senoidal puro em estado permanente:
 - Variação da frequência, mantendo-se fixa a amplitude máxima de fluxo
 - Variação da frequência, mantendo a amplitude máxima de tensão.

2 - Regime senoidal com terceiro harmônico, em estado permanente

Tomando-se como referência o comportamento da histerese na condição básica citada para o modelo, as figuras 6 a 10 mostram o comportamento da curva de histerese as condições teste citadas:

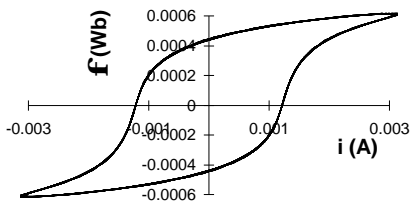
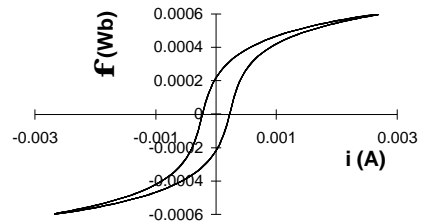


Figura 6 - Curva de histerese para $f = 180$ Hz, mantida a amplitude máxima de fluxo magnético.



7 - Curva de histerese para $f = 30$ Hz, mantida a amplitude máxima de fluxo magnético.

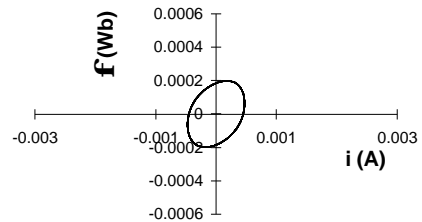


Figura 8 - Curva de histerese para $f = 180$ Hz, mantida a amplitude máxima de tensão.

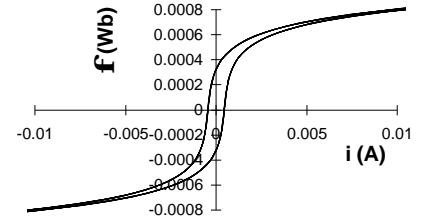


Figura 9 - Curva de histerese para $f = 30$ Hz, mantida a amplitude máxima de tensão.

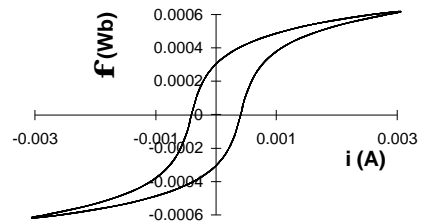


Figura 10 - Curva de histerese para o regime senoidal, com 10% de 3º harmônico de tensão

Dos gráficos, observa-se que o modelo responde coerentemente, uma vez que o aumento da frequência da rede, em se mantendo o fluxo máximo, representa maior perda ativa no material, como denota a maior área do laço de histerese, devido a mesma representar, inerentemente o efeito Foucault. Tal efeito tornou-se possível devido ao fator K . Também, a simples variação da frequência, mantendo-se a amplitude da tensão aplicada, causa a alteração do laço de histerese, devendo esse exibir maior saturação para a diminuição da frequência e uma tendência a tornar-se uma elipse para a elevação da frequência, devido a predominância do trecho linear da curva de magnetização CA para baixos valores de fluxo magnético. Verifica-se, ainda, que pelo fato do fluxo magnético ser praticamente uma grandeza integral da tensão aplicada, os harmônicos, em níveis normais, terão seus efeitos diluídos no laço de histerese.

5. A OBTENÇÃO DO FATOR K

Considerando-se a necessidade de conhecer-se o fator K , de forma a se utilizar o modelo, sugere-se a seguir uma forma de avaliação deste. A curva de magnetização CA deve ser obtida para um material ferromagnético para diversas amplitudes de tensão, inclusive aquelas que causam um fluxo magnético próximo ao de saturação. A frequência de excitação deve ser a nominal do material. Obtida, após o ajuste, a curva de magnetização CA, o fator K deve ser encontrado, por tentativa, através de simulação computacional, até que a curva de histerese simulada tenha o menor erro possível em relação a curva de histerese experimental das condições nominais. Alguns testes devem ser feitos com as demais curvas experimentais, usando-se o mesmo valor de K .

Este valor, por ser inerente ao material ferromagnético e ao circuito magnético, poderá ser aplicado nas simulações computacionais para regimes transitórios e para a avaliação da presença de harmônicos na tensão.

O uso do fator K para o fabricante de transformadores - Segundo a proposta deste trabalho, cada projeto de transformador deverá apresentar pois, um valor típico para K , com seus respectivos valores limites, decorrentes do processo de execução do projeto do transformador. Em fazendo uso da proposta, o fabricante de transformadores poderá avaliar a

qualidade do material magnético utilizado e também o processo de fabricação do transformador, no sentido de conseguir produzi-lo com reduzidas perdas em regime, possibilitando tornar seu produto competitivo, controlando o fator de perdas ativas, K .

Conforme já citado anteriormente, o fator K é suposto como sendo uma característica de um material ferromagnético e da geometria do circuito magnético. Dessa forma, também o fabricante de lâminas de aço poderá controlar a qualidade de seu produto através do fator K .

6. CONCLUSÃO

Como conclusão, pode-se depreender que o modelo proposto significa uma possibilidade de avaliação da qualidade de um material ferromagnético, de um equipamento que o utilize, bem como do processo de fabricação do equipamento. Comprovadamente, as simulações para o regimes transitório para fontes de tensão contínua e alternada apresentam resultados coerentes. A comprovação experimental das simulações está em fase de realização.

7. REFERÊNCIAS

- [1] - Portela, Carlos M.J.C.M., "Regimes Transitórios", apostila COPPE/UFRJ, vol. 1, Rio de Janeiro, 1983.
- [2] - Rivas, J.; Zamarro, J. M. ; Martin, E.; Pereira, C., "Simple Approximation for Magnetization Curves and Hysteresis Loops", IEEE Trans . MAG-17, No, 4, July 1981, pp. 1498-1502
- [3] - Lin, C. E.; Wei, J. B.; Huang, C. L.; Huang, C. J., "A New Method for Representation of Hysteresis Loops", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 413-420, January 1989.
- [4] - Macki, J. W. ; Nistri, P.; Zecca, P., Mathematical Models for Hysteresis, SIAM Review, vol. 35, No, 1, pp. 94-123, March 1993
- [5] - Slemon, G. R., "Equipamentos Magnetelétricos", Ed. LTC, Rio de Janeiro, 1974.