

Modelagem da Histerese Magnética em Materiais Magnéticos Utilizando o Modelo de Jiles-Atherton

Luiz Guilherme Luttke da Silva¹, Jorge Roel Ortiz¹, Jonatas Policarpo Américo¹

¹DAELE – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Via do Conhecimento, Km 1 – 85503-390 – Pato Branco – PR –

luisil@alunos.utfpr.edu.br, {jlortiz, jonatasamerico}@utfpr.edu.br

Abstract. *Magnetic materials are used in electrical machines, power transformers, inductors and others magnetic devices. These devices present nonlinear behaviour which difficult magnetic field and flux calculations. The Jiles-Atherton model, based in experimental measurements, is used to represent the nonlinear behaviour in magnetic materials. In this work, this model is applied in a monofasic transformer.*

1. Introdução

O projeto de dispositivos magnéticos, como máquinas elétricas e indutores, está ligado diretamente ao material magnético utilizado. O comportamento não linear de materiais magnéticos influencia a eficiência dos dispositivos devido às perdas que produz no núcleo. Com o objetivo de considerar esta não linearidade, são utilizados modelos matemáticos que visam representar este comportamento. Os modelos mais utilizados são o de Preisach e de Jiles-Atherton, pois ambos os modelos utilizam parâmetros obtidos por meio de medidas experimentais a fim de representar o comportamento não linear, ou seja, a curva característica do material ensaiado. O modelo de Jiles-Atherton é baseado no processo físico da magnetização em materiais ferromagnéticos, e na sua forma escalar tem por premissa a colinearidade entre os vetores de densidade de fluxo e campo magnético e cinco parâmetros característicos, a , α , k , c e M_s [Leite 2002], [Mendes 2017].

O modelo de Jiles -Atherton visa estabelecer o comportamento não linear por meio de uma equação diferencial transcendental de primeira ordem, equação (1), de forma que relaciona a magnetização irreversível M_{irr} e o campo efetivo de Weiss H_e , com a magnetização sem histerese M_{an} . O termo δ é relacionado para garantir que a dissipação devido à histerese seja sempre uma perda, independente da direção do campo H aplicado, conforme equação (2) [Batistela 2001].

$$\frac{dM_{irr}}{dH_e} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta} \quad (1)$$

$$\delta = \begin{cases} +1, & \text{para } \frac{dH}{dt} \geq 0 \\ -1, & \text{para } \frac{dH}{dt} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

A variável H_e é definida por meio da equação (3), de forma que o termo αM indica o acoplamento magnético entre domínios. A equação (4) representa a consideração do modelo de Jiles-Atherton, de forma que a magnetização M pode ser escrita em termos

da soma entre as magnetizações pelo movimento irreversível M_{irr} e reversível M_{rev} . A variável M_{rev} pode ser calculada por meio da equação (5), que a relaciona com M_{irr} e a magnetização sem histerese M_{an} . A equação (6) apresenta o cálculo de M_{an} . O modelo inverso de Jiles-Atherton, uma variação do modelo original, tem por premissa a adequação da magnetização e campo magnético em função da densidade de fluxo [Leite 2002], [Mendes 2017].

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$

$$M = M_{irr} + M_{rev} \quad (4)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (5)$$

$$M_{an} = M_s \left[\coth \left(\frac{H_e}{a} \right) - \left(\frac{a}{H_e} \right) \right] \quad (6)$$

2. Metodologia

Os parâmetros que caracterizam o modelo de Jiles-Atherton foram obtidos por intermédio de ensaios realizados em um transformador monofásico, obtendo-se medidas experimentais que representam o comportamento não linear do material, conforme Figura 1. Por meio da curva não linear experimental do material ensaiado, os parâmetros do modelo de Jiles-Atherton são calculados a partir de um conjunto inicial de susceptibilidades em regiões específicas da curva medida. Após aplicação em algoritmo numérico utilizando o método da secante, resulta nos cinco parâmetros do modelo. Um novo algoritmo iterativo foi implementado utilizando o método de Euler, visando a solução numérica da equação diferencial transcendental do modelo, equação (1) [Leite 2002], [Batistela 2001].

As curvas não lineares experimental e obtida pelo modelo apresentaram diferenças que podem ser atribuídas à forma de determinação dos parâmetros. Para minimizar esta diferença, foi desenvolvido um algoritmo de otimização iterativo baseado no cálculo do erro médio quadrático MSE na comparação entre curvas, conforme equação (7). O MSE é calculado por meio da diferença entre curvas de campo medido experimentalmente H_{exp} e obtido pelo modelo H_{calc} , n representa o número de pontos do ciclo especificado, de forma que o erro calculado determina o incremento ou decremento no parâmetro otimizado [Li et al. 2012].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{calc} - H_{exp})^2 \quad (7)$$

3. Resultados

Os parâmetros otimizados obtidos resultaram em $M_s = 2621700$ A/m, $a = 101,61$ A/m, $c = 0.49759$, $k = 93,566$ e $\alpha = 0.0001125$. A aplicação do modelo de Jiles-Atherton resultou na curva apresentada na Figura 1, de forma que ilustra a comparação entre o

comportamento não linear do transformador medido por meio de ensaio e calculado pelo modelo.

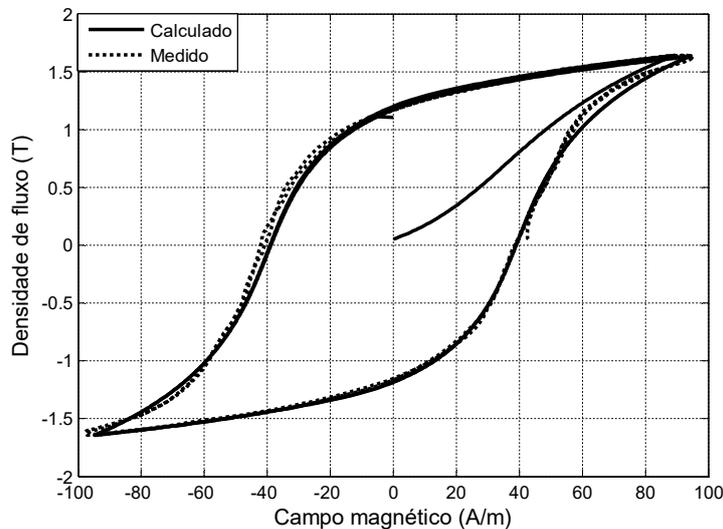


Figura 1. Comparação entre curvas não lineares medidas e calculadas pelo modelo

4. Conclusão

O modelo inverso de Jiles-Atherton aplicado conseguiu representar o comportamento não linear do transformador ensaiado, de forma que diferenças na comparação entre curvas ocorreram em regiões específicas, como na região do campo coercitivo e próxima da saturação, assim, o problema se resumiu na otimização no cálculo dos parâmetros do modelo. A otimização por meio do erro médio quadrático se mostrou eficaz, contudo, o principal problema consiste no alto número de iterações necessárias para se obter uma boa concordância na comparação entre curvas medidas experimentalmente e calculada por meio dos parâmetros otimizados. A continuidade do trabalho consiste na inserção do modelo em *software* de simulação de circuitos de forma a se verificar os efeitos da saturação de elementos magnéticos em conversores CC-CC.

Referências

- Batistela, N. J. (2001). *Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço silício*. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Leite, J. V. (2002). *Análise de modelos diferenciais de histerese magnética considerando laços menores de indução*. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Li, J., Qiu, C., Luo, B., Li, X., et al. (2012). Modeling and simulation of transformer under dc bias based on jiles-atherton model. In *Electricity Distribution (CICED), 2012 China International Conference on*, pages 1–4. IEEE.
- Mendes, F. B. R. (2017). *Uma contribuição para identificação dos parâmetros do modelo escalar de histerese de Jiles-Atherton*. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.