

C205

変圧器励磁過渡突入磁束分布軌跡の可視化

松尾 佳祐[○], 齋藤 兆古(法政大学大学院), 堀井 清之(白百合女子大学)

Visualization of Transient Exciting Magnetic Flux Locus in Transformer Keisuke MATSUO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

This paper studies nonlinear phenomena caused by ferromagnetic materials. To represent nonlinear properties of ferromagnetic materials used in the electrical transformer, we employ a Chua-type magnetization model. By the backward Euler method with automatic modification, the transient analysis of this initial value problem is carried out. As a result, it is clarified that ferroresonance phenomenon could be observe only primary current in transformer.

Keywords: Nonlinear, Ferromagnetic materials, Ferroresonance, Electric machine

1. 緒 論

磁性材料の特性を積極的に利用し多彩な機能を有する電気機器が数多く開発され、実用化されている。しかし、磁性材料の持つ磁気飽和、ヒステリシス、渦電流等、時として磁性材料を用いる電気機器において、予測困難で複雑なシステム応答を示す場合がある。したがって、磁性材料を含む電磁界解析の高信頼化は、高度化する電気機器の設計に必要な不可欠である。

本論文は、以前から早野・齋藤らが提案するChua型磁化特性モデル¹⁾を用いて、変圧器を含んだ直列鉄共振回路における非線形現象の可視化に関してするものである。Chua型磁化特性モデルの構成方程式より導出される回路方程式を状態変数法で表現し、逐次修正型後方オイラー法²⁾を用いて過渡解析を行う。その結果、変圧器の1次側では鉄共振現象が観察されるにもかかわらず、2次側では鉄共振現象が観察されないことを報告する。

2. 鉄共振回路

2.1 Chua 型磁化特性モデル

鉄共振回路の過渡解析を行うために、式(1)で表現されるChua型磁化特性モデルの構成方程式を用いる。

$$H = \frac{1}{\mu} B + \frac{1}{s} \left(\frac{dB}{dt} - \mu_r \frac{dH}{dt} \right) \quad (1)$$

式(1)の右辺第1項は静的な磁区状態を表し、第2項は動的な磁区状態を表す。ここで、 H 、 B はそれぞれ磁界の強さ[H/m]と磁束密度[B/T]を表し、 μ 、 μ_r 、 s は、Chua型磁化特性モデルのパラメタであり、それぞれ透磁率[H/m]、可逆透磁率[H/m]、ヒステリシス係数[Ω/m]である。これら3パラメタは、過去の履歴や駆動周波数に依存しない方法で導出、測定されることが磁化特性モデル構成に関する最大のキーポイントである³⁾。

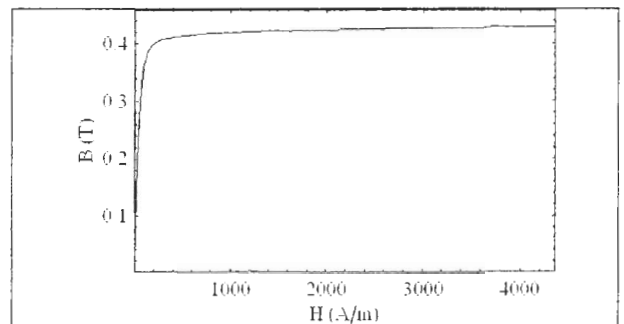


Fig.1 Magnetization Curve Giving Permeability μ (TDK H5A)

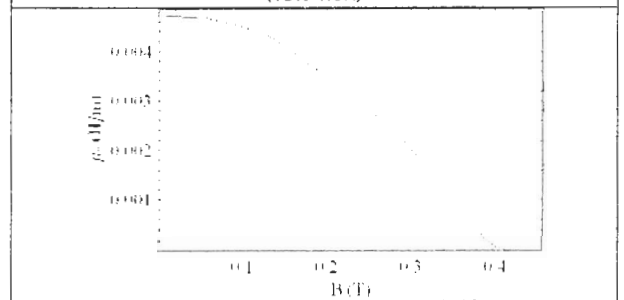


Fig.2 Reversible Permeability μ_r (TDK H5A)

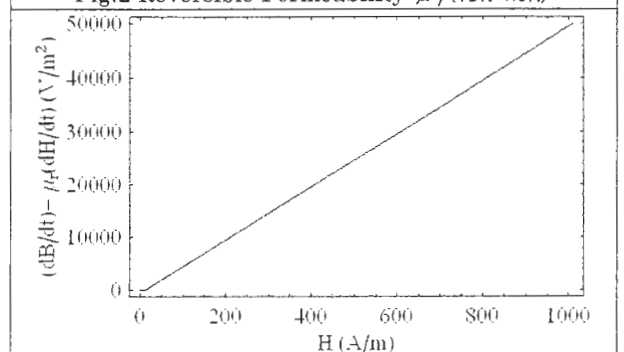


Fig.3 Hysteresis Parameter s (TDK H5A)

磁化特性モデルは、磁気履歴を表現しようとするものであり、モデルを構成するパラメタが過去の履歴に依存

するようなものであってはならない。Figs.1・3 は本論文で用いるパラメタ μ , μ_r , s と与える曲線である⁴⁾。

2.2 変圧器を含む直列鉄共振回路の定式化

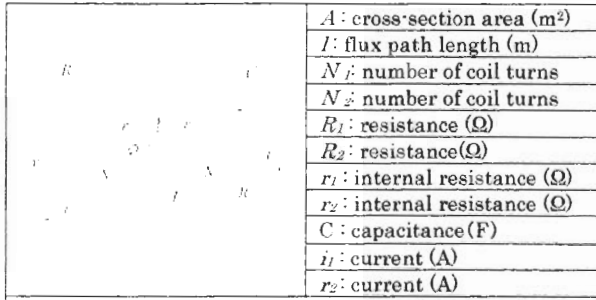


Fig.4 Series ferroresonance circuit with transformer

変圧器を含む直列鉄共振回路は、Fig.4 に示す変圧器の2次側を R-L-C 直列回路にしたものである。

式(1)の構成方程式を変圧器として用いられるトロイダルコアの磁路 l に沿って線積分することで、電流 i_1 , i_2 と磁束 ϕ の関係式(2)を得る。

$$\begin{aligned} N_1 i_1 - N_2 i_2 + \frac{\mu_r}{s} (N_1 \frac{di_1}{dt} - N_2 \frac{di_2}{dt}) \\ = \frac{l}{\mu A} \phi + \frac{l}{sA} \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

Fig.4 に示す回路より、電流 i_1 , i_2 は式(3), (4)でそれぞれ与えられる。

$$i_1 = (v - N_1 \frac{d\phi}{dt}) / (r_1 + R) \quad (3)$$

$$i_2 = -(N_2 \frac{d\phi}{dt} + V_{out}) / (r_2 + R_2) \quad (4)$$

式(3), (4)を電流 i_1 , i_2 と磁束 ϕ の関係式である式(2)に代入し、解くべき連立微分方程式(5), (6)を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\mu_r}{s} \left(\frac{N_1^2}{r_1 + R_1} - \frac{N_2^2}{r_2 + R_2} \right) \frac{d^2 \phi}{dt^2} = - \frac{l}{\mu A} \\ - \left(\frac{N_1^2}{r_1 + R_1} - \frac{N_2^2}{r_2 + R_2} + \frac{l}{sA} - \frac{\mu_r}{s} \frac{N_2^2}{c(r_2 + R_2)^2} \right) \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

$$+ \left(\frac{N_1}{r_1 + R_1} - \frac{\mu_r}{s} \frac{N_2}{c(r_2 + R_2)^2} \right) V_{out} + \frac{N_1}{r_1 + R_1} v + \frac{\mu_r}{s} \frac{N_1}{r_1 + R_1} \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{1}{c} (N_2 \frac{d\phi}{dt} + V_{out}) / (r_2 + R_2) \quad (6)$$

式(5),(6)から式(7)の状態変数方程式が導かれる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi \\ \frac{d\phi}{dt} \\ V_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ \frac{d\phi}{dt} \\ V_{out} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)の非線形状態変数方程式を逐次修正型後方オ일러法を適用して解く⁴⁾。

2.3 解析結果

Table.1 に示す定数を用いて変圧器を含む直列鉄共振回路の過渡解析を行った。Figs.5, 6 はそれぞれ1次電流

と2次電流の解析結果の時間波形である。駆動電源は、周波数 3.0kHz で駆動を開始し、周波数を徐々に低下させる。その後鉄共振現象が始まる $t=9.8\text{ms}$ で 1.117kHz 固定とする。Fig.5 は、 $t=9.8\text{ms}$ 付近で急激に電流が増加し、持続する典型的な鉄共振現象を示す。一方、Fig.6 では、 $t=9.8\text{ms}$ 後も電流は変化せず鉄共振現象が顕著に観察されない。

Table 1 Parameters used in the computation

μ : permeability (H/m)	Fig. 1
μ_r : reversible permeability (H/m)	Fig. 2
s : hysteresis parameter(Ω/m)	Fig. 3
A : cross-section area (m^2)	48.0×10^{-6}
l : flux path length (m)	75.4×10^{-3}
N_1 : number of coil turns	100
N_2 : number of coil turns	50
R_1 : resistance (Ω)	1.0
R_2 : resistance(Ω)	90
r_1 : internal resistance (Ω)	0.4
r_2 : internal resistance (Ω)	0.2
C : capacitance (F)	4.9×10^{-7}

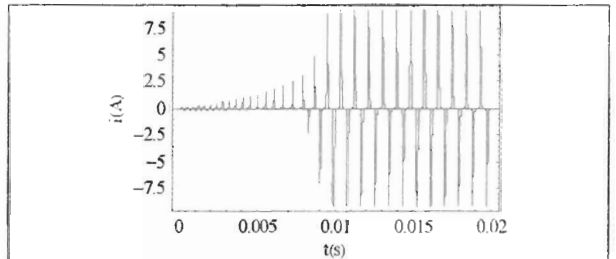


Fig.5 Primary current with transformer

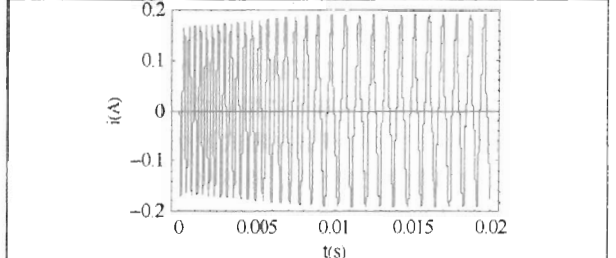


Fig.6 Secondary current with transformer

3. まとめ

本論文では、Chua 型磁化特性モデルを用いて、変圧器を含む直列鉄共振回路の過渡解析を行い、1次側には鉄共振現象が見れるが、2次側には鉄共振の影響が少ないことを明らかにした。

参考文献

- 1) 早野誠治, “磁性材料の構成方程式に関する研究”, 法政大学学位論文 (1995-1)
- 2) R. S. Varga, “Matrix Iterative Analysis”, Prentice-Hall, NJ (1962)
- 3) 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆吉, “可飽和インダクタンスを含む回路解析に関する考察”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-139 (2002-10)
- 4) 田中祐司, 齋藤兆吉: 磁化特性のモデリングと電気機器可視化解析への応用, 第 15 回 MAGDA コンファレンス in 桐生 講演論文集, pp104-109, (2006-11)