磁気飽和領域におけるチョークコイルの特性解析

Performance Analysis of a Choke Coil in a Magnetically Saturated Region

一井義孝・平田勝弘・各務嘉郎・石原好之*

松下電工(株)評価技術センター, 門真市大字門真 1048 (〒571)

*同志社大学工学部, 京都府綴喜郡田辺町多々羅都谷 1-3 (〒610-03)

Y. Ichii, K. Hirata, Y. Kagami, and Y. Ishihara*

Evaluation & Reliability Technology Center, Matsushita Electric Works, Ltd., Kadoma, Osaka 571

*Faculty of Engineering, Doshisha Univ., Kyoto 610-03

This paper proposes a method for computing inductance that can be used in a magnetically saturated region by considering the nonlinear energy, and examines an improvement in the precision of choke coil performance analysis. This method applied to a model made of iron, and as a result the analytical precision was about 20% higher than two conventional methods were used.

Key words: choke coil, nonlinear inductance, magnetically saturated region, FEM, circuit simulation

1. 緒 言

チョークコイルは巻線部と空隙を有する鉄心部から構成されるが、この鉄心部において低コスト化を図る場合、安価な磁性材料を用いるか、鉄心の寸法を小さくすることなどが考えられる。しかし、いずれにおいても高電圧下では電流の増加により鉄心が磁気飽和現象を起こしやすくなる。そのため、設計段階において磁気飽和領域でのチョークコイル特性を把握することが非常に重要となってくる。

チョークコイルの設計では磁気回路を等価電気回路で表現してインダクタンスを求める方法があるが、この手法は精度良い漏れ磁束評価が困難なことや、扱える形状に制限があるという欠点がある。そこで、一般的には磁場解析を用いてチョークコイルの非線形インダクタンスを求めている。

ここで、チョークコイル特性はチョークコイルを非線形インダクタンスと抵抗の等価回路で表現し、回路シミュレーション

を行うことにより計算されるが、解析精度を上げるためにはこの非線形特性を精度よく求める必要がある。しかし、従来は線形領域におけるインダクタンス計算のみ行われており、磁気飽和領域でのインダクタンス計算についてはほとんど検討されてこなかった。

本論文では磁気飽和領域に対応できる非線形インダクタンス計算手法を提案し、チョークコイル特性解析を行った。それを実機に適用し、得られたチョークコイル電流を実測値および従来法と比較することにより有効性を確認したので報告する。

2. 解析モデル

本論文で検討するチョークコイルを Fig. 1 に示す。これは凸形の鉄心を E 形の鉄心で覆った構造になっており、鉄心は 0.5 mm 厚無方向性けい素鋼板を積層して構成されている。コイルの巻数は 860 ターンで、260 [V] 通電時での抵抗値は 72 [Ω] である。

3. 解析手法

3.1 チョークコイル特性計算の概要

Fig. 2 に本論文で用いたチョークコイル特性計算の流れ図を示す。まず、有限要素法により各電流値に対するチョークコイル各部の磁束分布を求め、その結果を用いてチョークコイルの非線形インダクタンスを求める。

さらに、上記非線形素子を含むチョークコイルの等価回路に対して回路シミュレータを用いることにより、チョークコイル電

Fig. 1 Specification of the choke coil.

Fig. 2 Flowchart of calculation of the choke coil characteristics.

流を計算することができる。今回はチョークコイル特性として、Fig. 2 の等価回路端子に電圧源を接続した場合のチョークコイル電流を求める。

3.2 磁気飽和領域でのインダクタンス計算手法

有限要素法によって計算した磁束分布からインダクタンスを求めるには、インダクタンスの蓄えるエネルギーと磁場のエネルギーを等しいと置き、それをインダクタンスについて求めることにより計算を行う。Fig. 3(a) に示すようにコイルに流れる電流と鎖交磁束数との間の非線形性のためインダクタンスは飽和特性を有する。また、磁場は鉄心部と空気部に分けられるが、鉄心部では (b) に示すように磁性材料の磁気特性も磁界の強さと磁束密度の間に非線形性を有する。インダクタンスの持つエネルギーは Fig. 3(a), 磁場が持つエネルギーは Fig. 3(b), (c) の斜線部と塗りつぶし部を合計した部分である。

斜線部は線形計算で用いられるエネルギーであり、従来このエネルギーを用いて以下の (1), (2) 式に示す計算手法によりインダクタンスを計算していた^{1)~3)}。

$$\frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \int_v \frac{B^2}{\mu} dv \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} LI^2 = \int_v \left(\int_0^{B_1} H \cdot dB \right) dv \quad (2)$$

(1) 式はインダクタンスエネルギー、磁場エネルギー共に線形計算を行っており、磁性材料の非線形性が小さな材料を用いている時など、線形領域で近似できる場合にしか適用できない。また、(2) 式は磁場エネルギーについて非線形計算を行っているもののインダクタンスエネルギーは線形計算のままであるの

(b) Energy stored in the iron (c) Energy stored in the air
Fig. 3 Energy stored in the coil and the iron in a magnetically saturated region.

で非線形のインダクタンス計算には不適切と考えられる。

そこで本論文では、磁気飽和領域に対応できるインダクタンス計算手法として以下の方法を提案する。

$$\int_0^{\Phi_1} I d\Phi = \int_v \left(\int_0^{B_1} H \cdot dB \right) dv \quad (3)$$

$$\Phi_1 = \int_0^I L(I) dI \quad (4)$$

ここで、 Φ は鎖交磁束数、 I はコイル電流、 H , B はそれぞれ磁界の強さ、磁束密度であり、 $L(I)$ は非線形インダクタンスである。

これは左辺のインダクタンスエネルギー、右辺の磁場エネルギーの両方について非線形計算を行い、Fig. 3(a), (b) の斜線部と塗りつぶし部の合計のエネルギーで方程式を立てたものである。

しかし、(3), (4) 式ではインダクタンスが直接求められる形ではなく、ここで以下のように (3) 式を整理する。

$$W(I) = \int_v \left(\int_0^{B_1} H \cdot dB \right) dv \quad (5)$$

(3), (5) 式から

$$\int_0^{\Phi_1} I d\Phi = W(I) \quad (6)$$

(6) 式の左辺を変数変換して

$$\int_0^I L(I) dI - \int_0^I \left(\int_0^I L(I) dI \right) dI = W(I) \quad (7)$$

さらに (7) 式を I について微分すると

$$\int_0^I L(I) dI + L(I)I - \int_0^I L(I) dI = \frac{dW(I)}{dI} \quad (8)$$

(8) 式を整理すると次のとおりである。

$$L(I) = \frac{1}{I} \frac{dW(I)}{dI} \quad (9)$$

実際に (9) 式を用いてインダクタンスを計算するには有限要素法で電流を微小変化させて $W(I)$ を求め、各電流値に対する微分値からインダクタンスを計算する。

4. 解析条件および結果

4.1 解析条件

前節までに述べたチョークコイル特性計算を検証するために Fig. 1 に示したモデルについて計算を行う。磁性材料の非線形性を扱うことから解析手法には有限要素法を用い、さらに三次元有限要素法により漏れ磁束によるインダクタンス成分は $[\mu\text{H}]$ オーダーであり、影響が少ないことを確認したので、本論文では二次元有限要素法によって解析を行った。

Fig. 4 に有限要素法の解析領域を示す。本モデルでは構造の対称性から半分の領域で解析を行っている。境界条件はチョークコイルから離れた遠方を自然境界とし、対称面は固定境界とした。

4.2 解析結果と考察

インダクタンスの非線形特性を求めるため、有限要素法では電流を 0 [A] から 3 [A] まで徐々に変化させて各電流におけるインダクタンスを求めた。その結果を従来法および実測値と比較し、Fig. 5 に示す。Fig. 5 での従来法 1、従来法 2 はチョークコイル特性解析におけるインダクタンス計算をそれぞれ (1)、(2) 式で行い、提案手法は (9) 式で行ったものである。この図から計算手法により、計算結果に大きな差があることがわかる。

次に Fig. 5 に示された非線形インダクタンスを用いて回路

Fig. 4 Region analyzed by FEM.

シミュレーションを行い、チョークコイル電流を求めた。その結果を従来法および実測値と比較し、Fig. 6, Table 1 にそれぞれ波形と実効値を示す。ここで、チョークコイルの入力電圧は、実測により磁気飽和現象が生じることが確認された 260 [V] とした。

Fig. 6 より実測波形では 0.7 [A] 付近から電流が急激に増加する磁気飽和特性を示しているが、従来法 1, 2 においては全く見受けられない。一方、提案手法では実測波形と比較してピーク値の生じる位置およびピーク値に相違はあるものの電流値が急激に増加する磁気飽和特性を示している。

また、Table 1 より実測値が 1.068 [A] に対し、従来法 1, 2 はそれぞれ 0.588 [A], 0.634 [A] と 40 [%] 以上の大きな誤差を

Fig. 5 Comparison of inductance calculation results.

Fig. 6 Wave form of the choke coil current.

Table 1 Computed value of the choke coil current

	Current (Arms)	Error (%)
Measured	1.07	----
Conventional method 1	0.59	44.9
Conventional method 2	0.63	40.6
Proposed method	1.31	22.5

Fig. 7 Hysteresis of the choke coil inductance.

生じている。しかし、提案手法は 1.309 [A] で約 20 [%] の誤差で抑えられており、従来法による計算結果と比較して 20 [%] 程度誤差が改善されている。よって、今回提案した手法は磁気飽和領域におけるチョークコイル特性解析に有用で、特に設計時における銅損評価において精度が向上するが、なお残る 20 [%] の誤差は無視できない。

チョークコイル電流波形の比較で実測波形に比べ電流増加が急激であることから、計算されたインダクタンスが実測と比較して小さく計算されていることが考えられる。そこで実測した電圧、電流波形から次式を用いてインダクタンスを逆算しインダクタンス比較を行った結果を Fig. 7 に示す。

$$L(I) = \frac{V(t) - RI(t)}{\frac{dI(t)}{dt}} \quad (10)$$

(10) 式は微分値で割り算を行っているため計算精度が良いと

は言えないが、Fig. 7 からインダクタンスはヒステリシス特性を持っていることがわかる。しかし、本論文で用いた有限要素法は磁性材料特性でヒステリシス特性を考慮していないため、解析結果に誤差を生じたものと考えられる。

また、飽和領域における磁気特性の影響も大きいと考えられるので、飽和領域における磁気特性測定の精度についても検討すべきである。

5. 結 言

有限要素法を用いて磁気飽和領域におけるチョークコイル特性解析を行った。本論文では磁気飽和領域における有効なインダクタンス計算法を提案し、検証用チョークコイルモデルにおいて従来法と比べチョークコイル電流の計算結果が約 20 [%] 改善されることを確認した。

実測値と比べなお 20 [%] 程度の誤差が存在するが、これは有限要素法に用いた磁性材料特性でヒステリシス特性を扱っていないことや飽和領域における磁気特性の測定精度に起因するものと考えられる。

今後、飽和領域の磁気特性を見直すとともに、ヒステリシス特性を考慮した有限要素法解析を行い、解析精度の改善を図っていく。

文 献

- 1) 平田勝弘、各務嘉郎、掛橋英典、戸高敏之、石原好之：電子通信学会電子信用電源技術研究会資料，PE88-67 (1988)。
- 2) 山口 崇、笹田一郎、原田耕介：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-92-62 (1992)。
- 3) 竹山説三：電磁気学現象理論，XIV 章，XV 章（丸善，東京，1994）。

1994 年 10 月 13 日受理，1995 年 1 月 20 日採録