磁化特性が電磁力計算に与える影響

Influence of Magnetization Characteristics on Electromagnetic Force Analysis

光武義雄・原田和郎・石原好之・戸高敏之・平田勝弘*

同志社大学工学部, 京都市上京区今出川通烏丸東入 (〒602)

*松下電工(株)評価技術センター, 門真市大字門真 1048 (〒571)

Y. Mitsutake, K. Harada, Y. Ishihara, T. Todaka and K. Hirata*

Faculty of Engineering, Doshisha Univ., Kamigyo-ku, Kyoto 602

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

The influence on electromagnetic force analysis of the difference between the magnetization characteristic used for calculation and the real characteristic is evaluated in this paper. The electromagnetic force is calculated by Maxwell's stress tensor method and the virtual magnetic charge method. The magnetic field used in these methods is analyzed by the FEM, using a magnetization characteristic. Comparison of the results calculated by using a magnetization characteristic and those calculated by using its transformed characteristics shows that the influence of the magnetization characteristics is small at low reluctivity, and is independent of the fineness of the mesh in the FEM. In addition, there is little difference between the methods of calculating the electromagnetic force with regard to the influence of the magnetization characteristic.

Key words: magnetization characteristic, electromagnetic force, virtual magnetic charge method, Maxwell's stress tensor method, FEM

1. ま え が き

現在, 有限要素法等による磁界解析結果を用いた電磁力計算法としては Maxwell の応力法が一般的である¹⁾. その計算誤差の要因としては, 解析領域の分割の細かさ, 積分路の取り方, 積分路に与える磁束密度の算定方法等が検討されてきた. しかし, 有限要素法で用いられる磁化特性が実際のものとは異なることによる影響についてはあまり論じられていないように思われる.

そこで, 本稿では磁性体として SS400 をとりあげ, 基本となる磁化特性と, それを変形したのを用いた二次元直流磁界解析結果を用い, 筆者らの提案する仮想磁荷法^{2), 3)}と Maxwell の応力法で電磁力計算を行い, その計算結果への影響について調べたので報告する.

2. 電磁力計算方法

Fig. 1 のような物質の境界面を考えたとき, 磁界の強さは境界面で不連続となる. 筆者らの提案する仮想磁荷法は, この現象を境界表面に仮想的に磁荷が発生するためであるとし, 物質間に働く電磁力をこれらの磁荷によるクーロン力として求める手法である.

磁界の強さの表面発散をとると,

$$\text{Div} \mathbf{H} = (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n}_{12} = \frac{1}{\mu_0} \alpha_m \quad (1)$$

ここで, α_m は表面磁荷密度, $\mathbf{n}_{12}$ は境界面の法線ベクトル, μ_0 は真空の透磁率である.

また,

$$\mathbf{B}_{1n} = \mathbf{B}_{2n} = \mathbf{B}_n \quad (2)$$

とおき, $\mathbf{H} = \mu \mathbf{B}$ の関係を (1) 式に代入すると表面磁荷密度は次式で表される.

$$\alpha_m = \mu_0 (\mu_2 - \mu_1) \mathbf{B}_n \quad (3)$$

上式で求められる磁荷は, 境界面を構成する各線分の中点に置くものとする.

また, 二次元解析の場合, z 方向には一様な分布であると仮定するため, 磁荷は線状磁荷となる. 物体境界面において磁荷を算出し, 次式の磁荷に対するクーロンの法則より全体力が求められる.

Fig. 1 Boundary between two materials.

$$\mathbf{F}_{12} = d \sum_i \left(\sum_j \frac{\sigma_{mi} \sigma_{mj}}{2 \pi \mu_0 r_{ij}} \mathbf{t}_{ij} \Delta l_j \right) \Delta l_i \quad (4)$$

ここで、 l_i , l_j は物体 1, 2 の表面積分路, a_{mi} , a_{mj} は物体 1, 2 の表面磁荷, r_{ij} は二つの磁荷の距離, t_{ij} は二つの磁荷を結ぶ直線の単位方向ベクトル, d は解析対象の厚みである。

Maxwell の応力法についてはここでは省略する.

3. 解析モデルおよび磁化特性の変形

Fig. 2 に解析モデル (a) とした EI コアを示す。本稿では二次元モデルとみなし、Fig. 3 に示すように対称性を考慮して 1/2 の領域で解析を行った。Maxwell の応力法の積分路は図中に示すように、物体間中央、E 型表面、I 型表面の 3 種類で計算を行った。各積分路要素に与える磁束密度は、物体間中央では各線分を構成する二つの節点を含む全要素の磁束密度の平均値を、E 型表面およ

Fig. 2 Analyzed model (a).

Fig. 3 Boundary condition for the FEM and integral paths used in Maxwell's stress tensor method.

び I 型表面では境界の空気側の要素の磁束密度を用いた。仮想磁荷法の積分路は E 型表面と I 型表面になる。

また、モデル (a) は中央脚の磁束密度が外側脚の約 2 倍となるので、磁束密度と磁化特性の変形による電磁力の変動を検討するため、Fig. 4 に示すギャップ部で磁束密度がほぼ一定となるモデル (b) についても解析を行った。解析領域は、Fig. 5 に示すように対称性を考慮して 1/4 とした。さらに、分割の細かさとの関係も検討するため、分割の細かいものと粗いものの両方で解析を行った。細かい分割は 1 mm、粗い分割は 5 mm 間隔で鉄心

Fig. 4 Analyzed model (b).

Fig. 5 Boundary condition for the FEM and integral paths used in Maxwell's stress tensor method.

Fig. 6 Magnetization curves.

部付近の分割を行い、総要素数はそれぞれ 5446 と 372 である。Maxwell の応力法ではギャップの中央と磁性体の表面の二つの積分路を用いた。各積分路要素に与える磁束密度はモデル (a) と同様の近似を用いた。仮想磁荷法での積分路は磁性体の表面である。

磁化特性は折れ線近似を用い、磁化特性の変形は、全領域について B の値に対する H の値を一定倍することによって行った。また、磁化特性が大きく異なる場合についても検討するため、もとの磁化特性を 0.5 倍したものと 1.5 倍したものを磁化特性 A、磁化特性 B とし、これらの磁化特性を上記と同様の方法で 5% および 10% 変形したものについて電磁力計算を行い、計算結果の変動を調べた。これらの磁化特性を Fig. 6 に示す。

4. 結 果

4.1 磁化特性の影響

EI コアモデルにおいて、励磁電流を変化させて解析を行った。基本となる磁化特性を用いた場合の電磁力計

Fig. 7 Results of force calculation on original curve (Model (a)).

Fig. 8 Relation between the transformation ratio of the magnetization curve and the changing ratio of force on the original curve (Model (a)).

算結果を Fig. 7 に、磁化特性の変形率 5% の時と 10% の時の電磁力の変動率を Fig. 8 に示す。これより、磁化特性が電磁力計算に与える影響は磁化特性の変形率に比例し、仮想磁荷法と各積分路での Maxwell の応力法で、磁化特性の影響に差がないことがわかる。

また、Fig. 9 に基本磁化特性、磁化特性 A、磁化特性 B を用いた電磁力計算結果を、Fig. 10 に各磁化特性の変形率 5% の時の変動率を示す。これより磁化特性 B、基本特性、磁化特性 A の順に変動率が小さくなっていることがわかる。このことは、磁化特性の影響は磁気抵抗率の低いものほど小さくなることを意味している。

4.2 磁束密度との関係および分割の細かさとの関係

モデル (b) においては、モデル (a) と異なり励磁電流とギャップ部の磁束密度との対応が容易である。そこで、モデル (b) を用いて磁束密度との関係および分割の細かさとの関係について検討を行う。基本特性を用いた電磁力計算結果を Fig. 11 に示す。細かい分割での電磁力計算結果は、仮想磁荷法と Maxwell の応力法の二つ

Fig. 9 Results of force calculation on three magnetization curves (Model (a)).

Fig. 10 Relation between the changing ratio of magnetic force and magnetization curves at transformation ratio=5% (Model (a)).

Fig. 11 Results of force calculation on original curve (Model (b)).

Fig. 12 Relation between the changing ratio of force and flux density at transformation ratio=5% (Model (b)).

の積分路ではほぼ同じ値であり、これらはまとめて太線で示した。この曲線と粗い分割で磁性体表面に積分路をとった Maxwell の応力法の計算結果とはほぼ一致しているが、ギャップの中央に積分路をとった Maxwell の応力法では約25%、仮想磁荷法では約100%、値が変動

している。また、磁化特性の変形率5%での電磁力の変動率を Fig. 12 に示す。これから細かい分割と粗い分割で変動率はほぼ同じ曲線となっており、磁化特性の影響は分割の細かさにはあまり依存していないことがわかる。また、電磁力計算結果の変動率曲線と μ - B 曲線は傾向が良く一致している。

5. まとめ

本稿では、基本となる磁化特性とそれを変形したものを用いて磁界解析および電磁力計算を行い、計算結果への影響を調べることによって以下のことが明らかとなった。

- (1) 磁化特性間では磁気抵抗率の低いものほど磁化特性の影響の割合が小さく、一つの特性中でも磁気抵抗率の小さくなる近傍で磁化特性の影響の割合が小さくなる。
- (2) 電磁力計算結果は解析手法および分割の細かさに大きく影響を受ける。
- (3) 磁化特性の変化が電磁力に与える影響は解析手法および分割の細かさによる依存度は小さい。

今回の解析ではギャップを一定として行ったが、電磁力はギャップ長の影響を大きく受け、ギャップが広くなれば磁化特性の影響は相対的に小さくなる。

文 献

- 1) 竹山説三: “電磁気学現象理論”, 丸善 (1982).
- 2) Y. Ichii, Y. Ishihara, T. Todaka: “A Force Calculated Method Based on Virtual Magnetic Charges, ISEM-Nagoya, CP-2-7 (1992).
- 3) 三宮, 一井, 石原, 戸高: “電磁力計算法の検討”, The First MAGDA Conference, C-7 (1992).

1992 年 11 月 18 日受理, 1993 年 2 月 2 日採録