

直流偏磁下でのけい素鋼板の交流磁気特性解析

Magnetic Properties of Silicon Steel Sheets with a Bias Field

新谷邦弘・齋藤弘一・宮沢永次郎*

福井工業高等専門学校, 鯖江市下司町 (〒916)

*総研電気(株), 東京都府中市押立町 1-3-9 (〒183)

K. Shinya, K. Saito, and E. Miyazawa*

Fukui National College of Technology, Geshi-cho, Sabae 916

*Soken Electric Co., Ltd., 1-3-9 Fuchu, Tokyo 183

The magnetic properties of silicon steel sheets with a bias field are described. In the analysis, the magnetization characteristics under a sinusoidal-flux condition are approximated by the Fourier series, and it is assumed that the eddy current factor is proportional to the rate of change of the flux. The magnetization characteristics with a bias field are modeled by three magnetization curves under a sinusoidal-flux condition with a different maximum flux density. The iron loss, maximum value and harmonic component of exciting current are obtained by the numerical analysis of the relation between the dc current. The results of the analysis were confirmed by experiments, and are used to show the magnetic properties of a power transformer with a bias field using magnetic properties under a sinusoidal-flux condition.

Key words: magnetization characteristics, bias field, analytical model, iron loss, exciting current

1. ま え が き

磁性材料の交流磁気特性は磁束正弦波条件で測定, 評価されている。これに対し, パワーエレクトロニクスの急速な発展により電気機器が半導体装置とともに使用される場合や, 電力系統で地磁気誘導電流が流入した場合に機器鉄心が直流偏磁される例が報告されている¹⁾。直流偏磁下の交流磁気特性に関しては実験により鉄損, 励磁電流などについて検討した結果が報告されている²⁾。また, 磁化特性を折れ線近似した解析により励磁電流について検討した結果などが報告されている³⁾。しかしながら, 鉄損を考慮した解析はなされていない。

本文は, 電力機器で広く使用されているけい素鋼板について, 鉄損を含む直流偏磁下での磁気特性解析モデルの検討を行ったものである。解析に当たって, 磁束正弦波条件で測定した磁化磁性をフーリエ級数で近似している。次に, 最大, 最小磁束密度, 直流成分に着目し, 3 個の磁束正弦波での磁化特性を用いて直流偏磁下での磁化特性モデルを作成し, 回路に調和平衡法を適用して磁束密度, 励磁電流の瞬時波形を得ている。これより, 直流偏磁量と鉄損, 励磁電流波高値, 高調波との関係, 電源電圧波形や回路抵抗の影響について解析し, 実験値と一致することを示した。解析結果は磁束正弦波での磁気特性から直流偏磁を受けた電力機器の磁気特性を求めるのに有用である。

2. 解 析

2.1 磁化特性モデル

ここでは, 磁束正弦波および直流偏磁下の磁化特性のモデル化について述べる。最大磁束密度 B_m で磁束正弦波で励磁された場合の交流磁化特性 (B_{ac} - H_{ac} 特性) は (1) 式で表されるものとする。すなわち, ヒステリシス特性 H_h は考慮すべき高調波の次数を n としてフーリエ級数で表されるものとする。ただし, H_{cj} は j 次の余弦項のフーリエ係数, H_{sj} は j 次の正弦項のフーリエ係数を表し, B_m を変化させて測定した結果を折れ線近似する。また, 等価うず電流磁界の強さ H_e は磁束の変化の割合に比例するものとし, 材質, 厚さなどにより定まる係数 K_e は実測により求めるものとする⁴⁾。

$$H_{ac} = f(B_{ac}) = H_h + H_e$$

$$H_h = \sum_{j=1}^n (H_{cj} \cos j\theta + H_{sj} \sin j\theta) \quad (1)$$

$$B_{ac} = B_m \sin \theta$$

$$H_e = -K_e \cdot dB_{ac}/dt$$

直流偏磁された場合の磁化特性は, 磁束密度 B の最大値を B_{max} , 最小値を B_{min} , $B_{dc} = (B_{max} + B_{min})/2$ とし, これらの値に着目して Fig. 1 のように三つの領域に分割してモデル化する。すなわち, まず $B_{max} \geq B > B_{dc}$ (領域 I) に対しては, 磁化特性は最大磁束密度に依存すると考え, Fig. 1(b) のように $B_m = B_{max}$ の磁束正弦波における磁化特性 (ループ 1) の $B = B_{max} \sim B_{dc}$ の領域の部分 (太線) を用いる。次に, $B_{dc} \geq B > 0$ (領域 II) では, Fig. 1(c) のように $B_m = (B_{max} - B_{min})/2$ における磁束正弦波の磁化特性 (ループ 2) の $B = 0 \sim -B_{dc}$ の部分を用いる。また, $0 \geq B > B_{min}$ (領域 III) では, 最小磁束密度に依存すると考え, Fig. 1(d) のように $B_m = -B_{min}$ の磁束正弦波における磁化特性 (ループ 3) の $B = 0 \sim B_{min}$ の部分を用いる。さらに, このようにして得られた磁化特性 (Fig. 1(e)・太線) に対し, $B = B_{dc}$ および 0 における磁界の強さ H が各ループの磁界の強さの平均値を有するように補正を施し, 破線のようにモデル化することとする。

2.2 解析方法

鉄心, 回路構成を Fig. 2 に示す。環状巻鉄心に巻数が N_1 回, N_2 回の 2 個の巻線 N_1, N_2 を施し, 各々に交流および直流電源を印加する。解析を明確とするために次の仮定を設ける。

- 1) 交流回路の全抵抗を r とし, 漏れ磁束は無視できるとす

る。

(2) 交流電源の電圧は (2) 式で与えられるものとする。

$$v = \sum_{k=1}^n V_k \cos(k\omega t + \phi_k) \quad (2)$$

このとき Fig. 2 の回路に対し (3) 式が成り立つ。ただし、鉄心の平均磁気回路長さを l 、有効断面積を A とする。

$$\begin{aligned} \nu - i \cdot r &= e = N_1 \cdot A \cdot dB/dt \\ H &= (N_1 \cdot i + N_2 \cdot i_{dc})/l \end{aligned} \quad (3)$$

ここでは、磁束密度、誘導起電力、励磁電流などの瞬時波形を (4) 式で表し、(3) 式に調平衡法を適用して (4) 式の各係数を求め、瞬時波形を得ることとする。ただし、磁束密度、起電力、電流の高調波成分の k 次の余弦項のフーリエ係数を B_{ck} 、 E_{ck} 、 I_{ck} 、正弦項のフーリエ係数を B_{sk} 、 E_{sk} 、 I_{sk} とする。

$$\begin{aligned} B &= B_{dc} + \sum_{k=1}^m (B_{ck} \cos k\omega t + B_{sk} \sin k\omega t) \\ e &= \sum_{k=1}^m (E_{ck} \cos k\omega t + E_{sk} \sin k\omega t) \\ i &= \sum_{k=1}^m (I_{ck} \cos k\omega t + I_{sk} \sin k\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

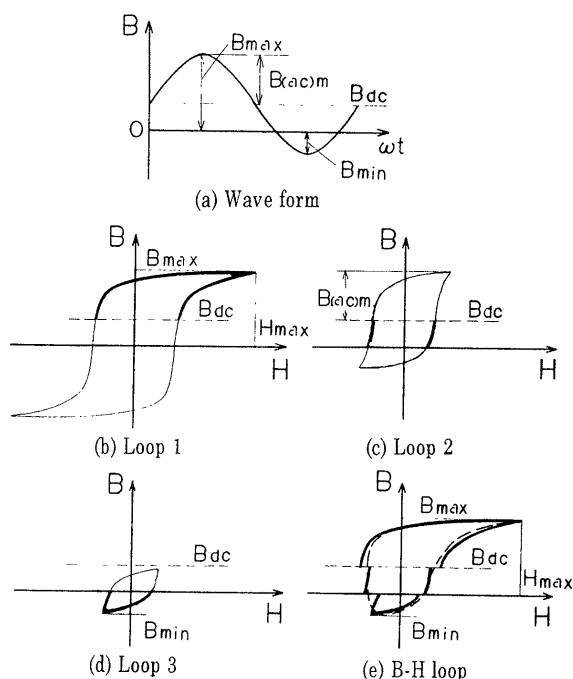


Fig. 1 Model of magnetization characteristics with a bias field.

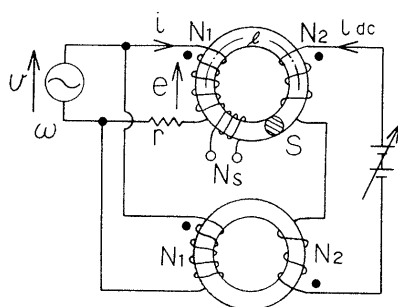


Fig. 2 Circuit configuration.

なお、鉄損 P_i は、電圧、電流の同一調波、同一成分の積となるから (5) 式より求めることができる。

$$P_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (E_{ck} \cdot I_{ck} + E_{sk} \cdot I_{sk}) \quad (5)$$

3. 解析および実験結果

ここでは、一例として方向性けい素鋼板 30P120 および無方向性けい素鋼板 35A270 について検討するものとし、 $i_{dc}=0$ の場合の磁化特性の測定結果を Fig. 3 に示す。内径 7.2 (cm)、外径 8.0 (cm)、高さ 2.0 (cm)、平均磁気回路長さ $l=0.239$ (m)、有効断面積 $A=7.76 \times 10^{-5}$ (m²) の環状巻鉄心に、 $N_1=100$ (回)、 $N_2=10$ (回) の巻線を施したものについて、周波数 $f=50$ (Hz) で実験を行った結果であり、以下この場合の解析、実験結果を示す。なお解析では、起電力、励磁電流の瞬時波形の誤差が基本波振幅の 2(%) 以下となるように $n=m=17$ とした。

3.1 励磁電流

Fig. 4 に励磁電流 i の解析および実験結果を示す。ほぼ良い一致が得られており、本解析モデルにより直流偏磁下の磁気特性について損失を含めた詳細な検討ができることがわかる。Fig. 5 に磁束密度振幅 B_m をパラメータとした直流偏磁量 H_{dc} と磁界の強さに換算した励磁電流の波高値 H_{max} ($=N_1 I_m/l$) との関係を示す。図において解析結果は実験結果とはほぼ一致しているが、 H_{max} が 500 (A/m) 以上では差異が大きくなる。これは、 $n=17$ 程度では B_m が 1.9 (T) を超える場合の磁化特性を高精度で近似できなくなることによると考えられる。また、 B_m が

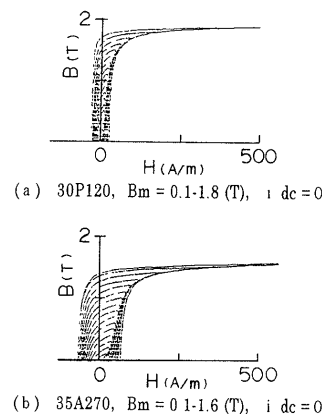


Fig. 3 Magnetization characteristics under a sinusoidal-flux condition.

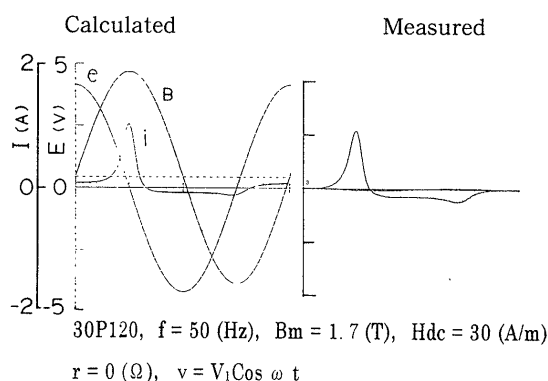


Fig. 4 Wave forms.

小さいところでも差異を生じているが、これは、 B_m が小では H_{dc} による B_{max} の変化が顕著となるため、Fig. 1 のように3個の領域に分割したモデル化では精度よく近似できていないことによる。なお、方向性材質の方が H_{dc} に対する H_{max} の増加の割合は大であり直流偏磁の影響を受けやすいことがわかる。これは、励磁電流波形の違いに基づくもので、Fig. 3 から明らかに方向性材質の励磁電流波形は無方向性材質に比べパルス状に近くて幅が小さく、同じ直流分を生ずるのに波高値がより大きくなる必要があるためと考えられる。

Fig. 6 に H_{dc} と励磁電流の各調波成分との関係を示す。図において、各調波成分の解析結果は実験結果とほぼ一致している。 $H_{dc}=0$ では奇数次のみであるのに対して直流偏磁下では偶数調波成分を生じ H_{dc} を増すと奇数、偶数調波成分ともにほぼ比例して増加する。なお、偶数調波成分は B_m が増加してもそれほど変化せず、主に H_{dc} に依存する。

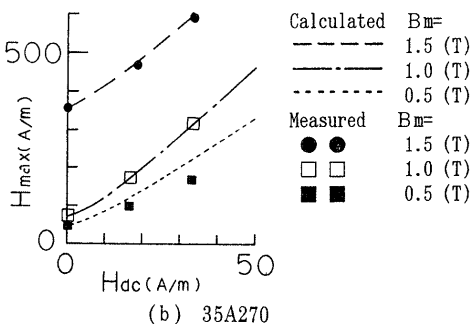
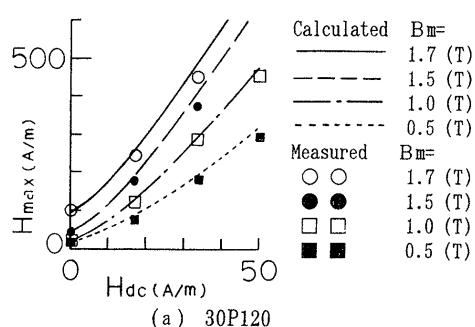
3.2 鉄損

Fig. 7 に H_{dc} と鉄損 P_i との関係を示す。図において、解析結果は実験結果とほぼ一致しているが $B_m=0.5$ (T) では先に述べ

た励磁電流の最大値の場合と同様の理由で解析結果にいくぶん差異を生じている。図より、 H_{dc} が増すと鉄損は増加し、 B_m が小さいところで顕著であることがわかる。これは、 H_{dc} が増すと B_{max} が大となり、Fig. 1 の領域 (III) では磁束正弦波の場合に比べループの面積が小さくなるが領域 (I) では大きくなって鉄損は増加し、 B_m が小ではその割合が顕著であることによる。なお無方向性材質の場合に比べ方向性の方が H_{dc} に対する鉄損 P_i の増加の割合が大きく、これは先に述べた励磁電流の波形の違いに基づくものである。

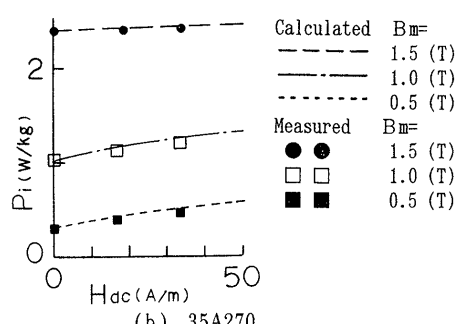
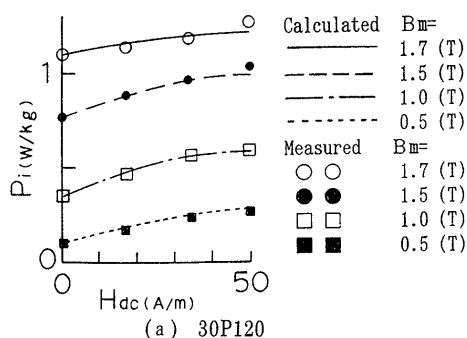
3.3 回路抵抗の影響

ここでは方向性材質の場合を例にとり回路抵抗が直流偏磁特性に与える影響を示す。回路抵抗 r をパラメータとした H_{dc} と H_{max} , P_i との関係を Fig. 8 に示す。ただし、 $r=0$ の場合に $B_m=1.7$ (T) となるように交流入力電圧 V_1 を定めてこれを一定として回路抵抗 r の影響を検討している。解析結果は実験結果とほぼ一致しており、回路抵抗が大きくなると電圧降下のため最大磁束密度 B_{max} は減少して H_{max} , 鉄損 P_i はいずれも小さくなり、直流偏磁の影響が少なくなることがわかる。



$f = 50$ (Hz), $r = 0$ (Ω), $v = V_1 \cos \omega t$

Fig. 5 Maximum value of the ac exciting current.



$f = 50$ (Hz), $r = 0$ (Ω), $v = V_1 \cos \omega t$

Fig. 7 Iron loss.

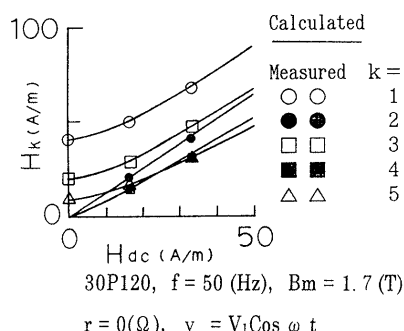


Fig. 6 Harmonic component of the ac exciting current.

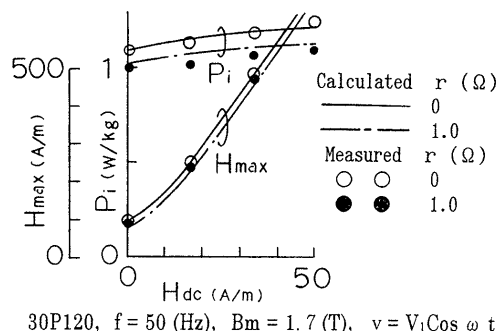
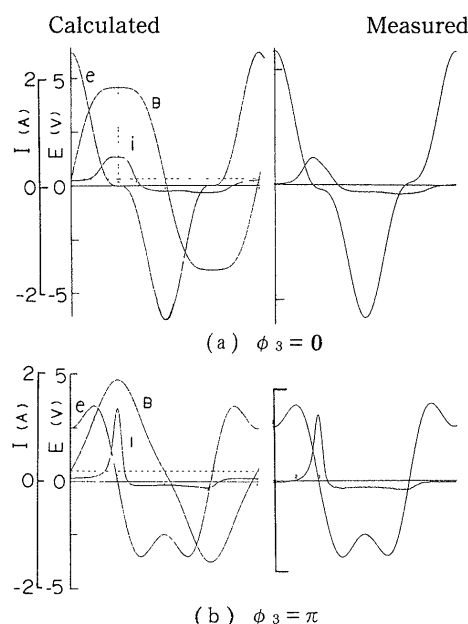
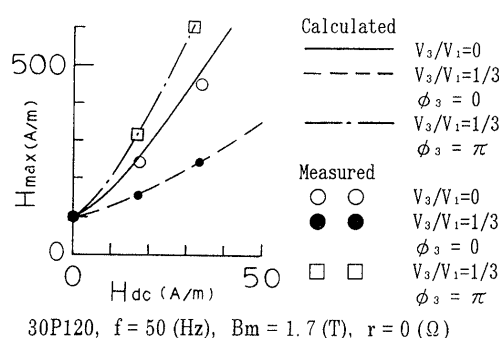


Fig. 8 Influence of the circuit resistance.



30P120, $f = 50$ (Hz), $V_3/V_1 = 1/3$, $B_m = 1.7$ (T), $r = 0$ (Ω)

Fig. 9 Wave forms with distorted input voltage.



30P120, $f = 50$ (Hz), $B_m = 1.7$ (T), $r = 0$ (Ω)

Fig. 10 Influence of the input voltage wave form.

3.4 電源電圧波形の影響

ここでは、電源電圧波形による直流偏磁下の磁気特性の違いについて述べる。一例として方向性材質を例にとり基本波に第3高調波を重畳させた場合の特性を示す。(2)式において $V_3/V_1 = 1/3$, $\phi_3 = 0$ および π , $B_m = 1.7$ (T) とした場合の動作波形を Fig. 9 に, $H_{\max}$ を Fig. 10 に示す。電源電圧波形が三角波に近い場合 ($\phi_3 = 0$) には正弦波に比べ, H_{dc} が増加した場合の $H_{\max}$ の増加の割合は小さくなるが, 台形波に近い場合 ($\phi_3 = \pi$) には $H_{\max}$ の増加の割合は正弦波の場合より大きくなることがわかる。したがって, 方形波の場合に直流偏磁の影響が最も大きい

と言える。これは Fig. 9 に示したように台形波に近い場合には励磁電流波形が正弦波の場合よりパルス状に近くなり, 同じ直流分を生ずるのに波高値が大となる必要があるためと考えられる。

4. あとがき

磁束正弦波での磁化特性をフーリエ級数で近似し, 直流偏磁下における磁化特性を最大磁束密度, 直流成分, 最小磁束密度に着目して三つの領域に分割したモデルを用いて直流偏磁下の磁気特性解析を行い, 次の結果を得た。

(1) 本解析モデルによる鉄損, 励磁電流波形の解析結果は実験結果とほぼ一致する。

(2) 無方向性材質に比べ方向性材質の方が直流偏磁の影響を受けやすく, 電流, 鉄損の増加が顕著である。これらは, 励磁電流波形の違いに基づくものである。

(3) 回路抵抗がある場合, 抵抗が大きいほど, 直流偏磁による最大磁束密度, 磁界の強さ, 鉄損の増加の割合は小さくなり, 直流偏磁の影響は小さい。

(4) 電源電圧が正弦波の場合に比べ, 三角波に近い場合には直流偏磁の影響が少なく, 台形波に近い場合には直流偏磁の影響が大きい。これらは, 励磁電流波形の違いに基づくものである。

本解析により, 直流偏磁下の鉄損, 励磁電流波高値, 高調波成分など磁気特性の詳細を検討することができる。また, 動作条件, 材質や電源電圧波形による直流偏磁の影響の違い, その原因などが明らかとなり, 直流偏磁下の磁気特性の理解が容易となる。解析結果は一般に広く使用されている磁束正弦波における磁気特性から直流偏磁を受けた電力機器の磁気特性を知る上で有用と言える。他の材質の場合など適用範囲の詳細については今後さらに検討したい。

文 献

- 1) 高須伸夫, 宮脇文彦, 齋藤 達, 藤原康夫: 電気学会論文誌 B, 113, 435 (1993).
- 2) 伊藤隆史, 原田和郎, 石原好之, 戸高敏之: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-94-187 (1994).
- 3) 山本文雄, 北村章夫, 芝原和人, 山田容士: 電気学会論文誌 B, 115, 1091 (1995).
- 4) 齊藤弘一, 新谷邦弘, 宮沢永次郎: 電気学会論文誌 D, 114, 520 (1994).

1996年10月11日受理, 1997年1月16日採録