Iron Loss and Acoustic Noise of Model Transformer Core under DC Biased Magnetization

H. Inoue, T. Ueyama, H. Yamaguchi, S. Okabe, and M. Ishida

Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, *Kawasakidori 1, Mizushima, Kurashiki 712-8511, Japan*

The iron losses and acoustic noises of a model transformer core made of grain-oriented electrical steel sheets were investigated under DC biased magnetization while altering the amplitude of magnetic flux density, B_m , and the DC biased magnetic field, H_{DC} , applied by the third windings. The iron loss increased as H_{DC} increased up to 100 A/m, while over 100 A/m, the increment of iron loss by DC biased field rapidly decreased. The increase in iron loss at the same H_{DC} was largest at B_m : 1.1–1.5 T. Meanwhile, the acoustic noise increased monotonically as H_{DC} increased. The acoustic noise of odd-order harmonics was drastically increased under DC biased magnetization, and this is the primary cause of the increase in acoustic noise.

Key words: DC biased magnetization, transformer, iron loss, noise, electrical steel sheet

直流偏磁したモデル変圧器の鉄損と騒音特性

井上 博貴・上山 哲平・山口 広・岡部 誠司・石田 昌義

JFE スチール株式会社スチール研究所, 倉敷市水島川崎通り 1 丁目 (〒712-8511)

1. はじめに

変圧器鉄心として用いられる方向性電磁鋼板は、通常の条件下では、交流正弦波励磁の下で使用される。しかし、近年パワーエレクトロニクスの発展により、交流励磁磁界に加えて、直流磁界が重畳する条件下で電磁鋼板が用いられる機会が増えてきた。例えば、パワーエレクトロニクスを応用した直流送電システムや系統安定化機器の導入が進んでいる¹⁾。直流送電システムでは、交直変換機におけるスイッチングずれや、長距離送電における地磁気の影響²⁾により、変圧器に直流成分が重畳することが予想されている。

これまで、電磁鋼板の直流偏磁下での鉄損や励磁電流量、偏磁量の評価について、環状試料や単板磁気試験器、モデル変圧器を用いた調査が行われてきた^{3)–15)}。これらの調査では、直流偏磁により、鉄損や騒音が大幅に増加することが報告されている。

過去の調査では、励磁する交流磁束密度は 1.0 T までの低磁束密度領域、又は 1.7 T 付近の実変圧器の動作領域であり、同じ装置で低磁束密度から高磁束密度まで系統的に磁束密度と偏磁量を変えて調査された例は少ない。また、騒音特性については鉄損と比べ測定例が非常に少なく、直流偏磁が鉄損、騒音に及ぼす影響について系統的に理解するのは困難であった。

そこで本研究では、モデル変圧器を用いて、交流磁束密度を 0.5 T から 1.8 T、直流重畳磁界を 800 A/m までと広い範囲で変え、直

流偏磁が変圧器の鉄損、騒音に及ぼす影響を調査した。

2. 実験方法及び測定条件

2.1 モデル変圧器の測定システムと構造

Fig.1 に、モデル変圧器の測定システムを示す。モデル変圧器は、単相励磁であり、交流で励磁する 1 次巻線、無負荷の誘起電圧を測定する 2 次巻線、さらに直流磁界を励磁するための 3 次巻線からなる。ここで、3 次巻線の回路は、直流電源と電流計、交流の重畳を防止するためのチョークコイルとから構成される。

Fig.2 にモデル変圧器の鉄心構造を示す。鉄心は単相 2 脚の積み鉄心、外形 500mm×500mm、積層厚 15mm、鉄心重量約 20 kg である。積層方法は 2 枚重ねの 5 段ステップラップ積みとし、1 段のラップ幅は 2mm とした。モデル変圧器の鉄心は平面上に平積みし、さらに 15mm 厚のベークライト製の板で挟みこみ、均等に約 0.1 MPa の加重をかけ固定した。これは、通常の大変圧器において、脚およびヨーク部が加圧固定した状態で使用されることを考慮したものである。尚、コイル巻き線をベークライト板に組み込むことにより、巻き線部も同じように加圧固定している。

鉄心素材として用いた試料は、SST で測定した磁気特性にて、 B_8 が 1.89 T、 W_{1750} が 1.11 W/kg の方向性電磁鋼板 30G120 を、

Fig. 1 Schematic of model transformer under DC biased magnetization.

Fig. 2 Core structure of model transformer.

スリット・斜角剪断したものを用いた。

2.2 測定諸量の定義

次に、測定諸量の定義を述べる。Fig.3 は、直流成分重畳前後のヒステリシスカーブの模式図である。磁束密度の振幅値 $B_m(T)$ は、(1)式より求めた。

$$B_m = V_{2mn} / (4 f N_2 A). \quad (1)$$

B_m : 磁束密度振幅値(T)

V_{2mn} : 2 次巻線の誘起電圧の平均値(V)

f : 基本周波数(Hz)

N_2 : 2 次巻線の巻線数

A : 断面積(m²)

直流偏磁量は、3 次巻線による直流重畳磁界 H_{DC} (A/m) で評価し、それを(2)式で求めた。

$$H_{DC} = I_{DC} N_3 / l. \quad (2)$$

H_{DC} : 3 次巻線による直流重畳磁界(A/m)

I_{DC} : 3 次巻線の直流電流値(A)

N_3 : 3 次巻線の巻線数

l : 実効磁路長(m), 本実験では 1.6 m とした

また、磁束密度偏磁量 $\Delta B(T)$ を(3)式で定義した。

$$\Delta B = (B_{max} + B_{min}) / 2. \quad (3)$$

B_{max} : 直流偏磁時の磁束密度最大値 (T)

B_{min} : 直流偏磁時の磁束密度最小値 (T)

2.3 励磁方法

励磁方法は以下の通りとした。まず、1 次巻線により鉄心を周波数 50Hz で交流励磁し、一次電圧の増減により(1)式における V_{2mn} を変化させ B_m を所定値に設定した。次に、3 次巻線の直流励磁電流 I_{DC} を変化させ、直流重畳磁界 H_{DC} を設定した。本実験では、交流磁束密度振幅値は一定で、直流偏磁量のみが変化した場合の影響を調査するため、 H_{DC} が変化しても、 B_m が一定となるように励磁した。そのため、直流重畳磁界を励磁後、再び V_{2mn} を調整し所定の B_m とした。

2.4 測定方法

直流励磁用と交流励磁用の二つの励磁系を用いた測定システムでは、直流励磁系 (3 次巻線) に交流成分が重畳し、その影響により交流励磁系で測定される鉄損と励磁電流が大きくなるという問題がある。そこで、直流励磁系に 3.2 H のチョークコイルを配置し、直流インダクタンスに対し交流インダクタンスを大きくすることで、交流成分の重畳を抑制した。しかし、完全には直流励磁系への交流成分の重畳を抑制できず、Table1 に示すように、直流励磁回路を短絡した場合は、開放した場合と比べて鉄損が 0.15 W/kg 増加した。

そこで、浅野らの補正方法¹⁰⁾を参考に、励磁電流から直流励磁系の交流成分重畳分を差し引く補正を行った。1 次巻線に流れる交流励磁電流 I_{AC} と、3 次巻線に誘起される交流電流 I_{3AC} を測定し、(4)式により直流系の影響を除くように補正し、励磁電流 $I(A)$ を求めた。

$$I = I_{AC} - I_{3AC} \times (N_1 / N_3). \quad (4)$$

I : 補正した交流電流(A)

I_{AC} : 1 次巻線の交流電流(A)

I_{3AC} : 3 次巻線の交流電流(A)

N_1 : 1 次巻線の巻線数

N_3 : 3 次巻線の巻線数

さらに、補正した交流電流 I と 2 次巻線の誘起電圧 V_2 とから鉄損を求めた。上記補正を行った結果、Table1 に示すように、直流励磁回路を開放した場合と同等の鉄損となった。

磁化力 H は、補正した励磁電流 I より算出される交流磁界の強さ H_{AC} と、3 次巻き線の直流電流より誘起される H_{DC} の和とした。

一方、騒音は、A 特性による補正を加えた騒音レベルを巻線部中央 2 箇所とヨーク部中央 2 箇所の表面より上方に 20 cm 離れた位置で測定し、コイル巻き線部 2 箇所、ヨーク部 2 箇所の 4 箇所の平均値を取った。偏磁がない状態では、4 箇所の騒音値は同等であるが、偏磁状態では、コイル巻き線部の方が 2~3 d B 騒音が大きくなった。

3. 実験結果及び考察

3.1 鉄損特性

Fig. 4 に、磁束密度振幅値 B_m が 0.5~1.8 T での鉄損と直流重畳磁界 H_{DC} との関係を示す。いずれの B_m でも、 H_{DC} の増加に伴い、鉄損は増加するが、 H_{DC} が 100 A/m を超える範囲ではその増加率が著しく小さくなった。

直流偏磁による鉄損増加量の H_{DC} に伴う変化について検討するため、直流成分重畳前後のヒステリシスループを比較した。磁束密度偏磁量 ΔB を評価するために、過去の調査例¹⁷⁾を参考に、直流成分重畳後のヒステリシスループにおいて H が最大値をとる瞬間をループ先端とし、この先端が偏磁がない場合のループ先端を結んだ交流磁化曲線に乗るようヒステリシスループを B 軸方向に平行移動した。この時の移動量が、磁束密度における偏磁量 ΔB と一致すると仮定した。この方法は、過去の調査例¹⁷⁾によると、低磁束密度では、フラックスメータによる実測とよく合うものの、高磁束密度では合わなくなることが指摘されており、この推定法

Fig. 3 Definition of measuring quantity.

Table 1 Comparison of iron loss with and without DC magnetizing circuit (B_m : 1.7T, H_{DC} : 0 A/m)

	Without DC circuit	With DC circuit	With DC circuit (correction)
Iron loss (W/kg)	1.05	1.20	1.04

を用いて求めた偏磁量 ΔB はおおよそその値である。

Fig.5は、 B_m を0.5 Tとして、 H_{DC} を0～200 A/mにしたときのヒステリシスループの比較である。直流重畳磁界 H_{DC} を増加させると、ヒステリシスループは B が増加する方向にシフト（偏磁）し、磁化力 H の振幅が大きくなり、 B の上限付近で H 軸方向に長く伸びた形状となる。直流偏磁による鉄損増加は、このヒステリシスループの H の影響が大きいと考えられる。そこで、このヒステリシスループの形状変化による鉄損増加量を評価するため、Fig.6に示すように、鉄損を表すヒステリシスループ内の領域を分

Fig. 4 Relationship between DC magnetic field, H_{DC} and iron loss, W .

Fig. 5 Hysteresis curves at $H_{DC} = 0-200$ A/m, $B_m = 0.5$ T.

Fig. 6 Definition of division of iron loss into W_{2A} and W_{2B} .

離した。偏磁前の磁界の振幅値を H_1 とし、偏磁後のヒステリシスループにおいて、磁界 H が最小値から H_1 増加するまでの領域の鉄損を W_{2A} 、残りの領域の鉄損を W_{2B} と定義し、 W_{2B} をヒステリシスループの伸長による鉄損の増分として評価した。ここで、Fig.6中に示した ΔH は、偏磁前後の磁界振幅値の増分を表す。

Fig.7に、直流偏磁による鉄損増加量 ΔW 、 W_{2B} と H_{DC} の関係を示す。 H_{DC} の増加に伴い、 ΔW 、 W_{2B} は共に増加し、 H_{DC} が100 A/m以上の領域では増加率が低下する傾向を示す。 ΔW に対する W_{2B} の比率が大きいことから、直流偏磁による鉄損増加は主にヒステリシスループが H 軸に沿って伸長して生じたと考えられる。また、 H_{DC} が100 A/m以上で ΔW の増加率が減少するのは、 W_{2B} の増加率が低下したためと考えられる。

さらに、この W_{2B} の増加率低下について検討する。Fig.8は、 B_m が0.5 Tのときの、偏磁量 ΔB 、磁界振幅の増加 ΔH と H_{DC} の関係を示す。 ΔB は H_{DC} が100 A/m以上になると増加はわずかなが、 ΔH は一樣に増加する。 H_{DC} が100 A/m以上の場合、Fig.5からわかるように、 B の最大値付近におけるループ伸長部分でのヒステリシスが小さくなる。例えば、 B_m が0.5 T、 H_{DC} が100 A/mの条件では、 H が300 A/mでの B のヒステリシスは0.026 T、 H が500 A/mでは0.003 Tと非常に小さい。よって、この領域で ΔH が増加しても鉄損増加量は小さい。これは、 B が大きい領域では、不可逆的な磁壁の移動よりも、磁化回転などの可逆的な過程で磁化が進行するためと考えられる。よって、 H_{DC} 100 A/m以上では W_{2B} の増加率が低下する傾向を示したと考えられる。また、100

Fig. 7 Relationship between DC magnetic field, H_{DC} , and ΔW , W_{2B} at $B_m = 0.5$ T.

Fig. 8 Relationship between DC magnetic field, H_{DC} , and ΔB , ΔH at $B_m = 0.5$ T.

A/m という値は、偏磁量 ΔB が飽和する点と一致しており、 B が飽和磁束密度に近い領域で動作することで、上記の理由から ΔW の増加率は減少する。

次に、変圧器の動作磁束密度の影響を検討する。 H_{DC} が 15, 50, 100 A/m において、直流偏磁による鉄損増加量 ΔW と、 B_m の関係を Fig. 9 に示す。 ΔW は B_m が大きくなるに従い増加し、 B_m が 1.1 T から 1.5 T 付近で極大を持ち、さらに B_m が大きくなると減少した。

ΔW が極大値を持つ理由を考察するため、偏磁後の鉄損を W_{2A} と W_{2B} に分離した。Fig.10 に ΔW 、 W_{2B} と B_m の関係を示す。 Δ

Fig. 9 Relationship between magnetic flux density, B_m and increase of iron loss, ΔW , at $H_{DC}=15$ A/m, 50 A/m, and 100 A/m.

Fig. 10 Relationship between magnetic flux density, B_m and ΔW , W_{2B} at $H_{DC}=100$ A/m.

Fig. 12 Relationship between magnetic flux density, B_m and ΔB , ΔH at $H_{DC}=100$ A/m.

W に対する W_{2B} の比率は大きく、 W_{2B} は ΔW が極大値を持つ B_m が 1.1 T で極大となる。つまり、ヒステリシスループの伸長による鉄損の増分が ΔW の増減において支配的であることがわかる。

Fig.11(a)–(c)に、 B_m が 0.5, 1.1, 1.7 T の各条件で、 H_{DC} を 0 A/m と 100 A/m としたときのヒステリシスループを示す。 B_m が増加するに従い、ヒステリシスループのシフト量 ΔB は小さくなるが、ループの H 軸に沿った伸長量は大きくなることがわかる。Fig.12 に ΔB 、 ΔH と B_m の関係を示す。偏磁量 ΔB は、 B_m が大きくなるに従い単調に減少するが、磁界の増加量 ΔH は B_m が 1.6 T まで

(a)

(b)

(c)

Fig. 11 Comparison of hysteresis curves between at $H_{DC}=0$ A/m and at $H_{DC}=100$ A/m, (a) $B_m=0.5$ T, (b) $B_m=1.1$ T, (c) $B_m=1.7$ T.

は増加し、1.7 T 以上でわずかに減少した。

B_m が 1.1 T までの領域では、 ΔH が B_m に従い大きくなるため、つまりヒステリシスループが H 方向に伸長するため、その分ヒステリシスループの伸長による鉄損の増分 W_{2B} が増大したと考えられる。

それに対し、 B_m が 1.5 T 以上の領域では、 ΔH は 1.6 T までは増加するものの、それ以上では減少に転じ、ヒステリシスループが H 方向に伸長することによる鉄損増加は小さくなる。さらに、 B_m が大きくなればなる程、先にも述べたように、磁化回転などの可逆的な過程で磁化が進行する割合が増え、ループの伸長部でのヒステリシスは小さくなる。よって、 B_m が 1.5 T 以上の領域では、 B_m の増大に従い W_{2B} は減少したと考えられる。

3.2 騒音特性

Fig. 13 に B_m , H_{DC} に対する騒音の変化を示す。いずれの磁束密度でも、 H_{DC} の増加に伴い、騒音は増加するが、鉄損の場合と異なり高 H_{DC} 領域でも増加が顕著であった。

鉄損は上述したように、 H_{DC} が増加し ΔB の増加率が減少するため、及び高磁束密度域（高 B 域）での磁化過程のヒステリシスが小さいために増加率が小さくなる。それに対し、騒音の原因となる磁歪は、Fig. 14 に示すように、非偏磁状態ではその振幅は特に高 B_m 域において増大し、またその波形の時間変化も急峻となる。その結果、 B_m が大きくなると騒音は大幅に増加する。同じく偏磁状態においては、 ΔB の増加が小さくても、動作領域が高 B 域側

Fig. 13 Relationship between DC magnetic field, H_{DC} , and noise level.

Fig. 14 Relationship between magnetic flux density, B_m and magnetostriction, λ_{0p} .

にシフトすることで、騒音が顕著に増加したと考えられる。

Fig. 15 に、 B_m が 1.7 T, H_{DC} が 0, 15, 100 A/m の騒音の音圧波形を FFT 解析し、騒音スペクトルを求めた結果を示す。偏磁が

Fig. 15 Spectrum of harmonics of acoustic noise at $B_m = 1.7$ T.

Fig. 16 Comparison of waveform between B wave and wave of acoustic noise; (a) non-DC-biased magnetization ($B_m = 1.9$ T, $H_{DC} = 0$ A/m), (b) under DC biased magnetization ($B_m = 1.7$ T, $H_{DC} = 100$ A/m).

Fig. 17 Comparison of intensity of acoustic noise between odd-order harmonics and even-order harmonics (measured at $B_m = 1.7$ T, $f = 50$ Hz).

ない場合は、100, 200, 300Hz といった励磁周波数 50 Hz の偶数倍の高調波が生じた。それに対し、直流偏磁した場合は、偶数倍の高調波に加えて、150, 250, 350Hz といった奇数倍にもピークが現れた。この結果は、過去の直流偏磁下でのモデル変圧器や磁歪の測定結果^{12)–15)}と一致する。

奇数倍の高調波が生じる原因は、磁歪波形の観点から次のように説明できる。通常、直流偏磁がない場合は、消磁状態からの磁束密度変化が正負対称なため、磁歪のカーブも対称となり、 $+B_m$ 、 $-B_m$ でピークを持つため、磁歪周期は励磁周期の半分となる。それに対し、直流偏磁した場合は、磁束密度の対称性が崩れるため、磁歪のカーブが非対称となり、磁歪周期は励磁周期と同じとなる。よって、偏磁後においては励磁周波数の整数倍の高調波が生じるために、偶数倍の高調波だけでなく、奇数倍の高調波も生じたと考えられる。

Fig.16 は、偏磁前後での騒音の音圧波形と磁束密度波形 (B 波形) の代表例を示す。 B 波形は、前記と同じ方法でヒステリシスループ先端が交流磁化曲線に乗るよう平行移動した波形を示す。偏磁がない場合は、磁束密度の最大最小の 2 箇所、音圧波形もピークを持ったのに対し、偏磁がある場合には、磁束密度最大の点で、音圧波形が最大のピークを持った。この結果は、上記の磁歪波形による説明を支持している。

Fig.17 に、騒音レベルを奇数倍と偶数倍の高調波による騒音に分離した結果を示す。直流偏磁がない場合は、奇数倍の高調波による騒音は無視できる程度であるが、 H_{DC} が 15 A/m では、奇数倍の高調波による騒音が大幅に増加し両者は同等となった。さらに H_{DC} が 100 A/m では、奇数倍、偶数倍共に騒音レベルは大きくなった。偏磁前後での、奇数倍、偶数倍の高調波による騒音レベル増加量を比較すると、奇数倍の増加量が大きく、偏磁による騒音増大の主因となっている。

本論文では、磁歪の観点から考察を行ったが、偏磁に伴う漏れ磁束の増加により、鋼板接合部における電磁振動も増加することが考えられる。今後、この影響も含めた騒音増大原因の調査を行いたい。

4. まとめ

本研究では、交流磁束密度 B_m を 0.5–1.8 T、直流重畳磁界 H_{DC} を 800 A/m まで変え、直流偏磁した変圧器の鉄損、騒音特性を詳細に調査した。結果、以下の知見を得た。

- (1) いずれの B_m でも、 H_{DC} が大きくなるに従い鉄損は増加したが、偏磁量 ΔB が飽和する H_{DC} が 100 A/m 超える領域では、増加率が減少した。また、 H_{DC} が一定の条件では、直流偏磁による鉄損増加量は、 B_m が 1.1 T から 1.5 T 付近で極大を持った。
- (2) 騒音も、 H_{DC} が大きくなるに従い増加したが、鉄損と異なり H_{DC} が大きい領域でも増加が顕著であった。直流偏磁下では、励磁周波数の奇数倍の高調波による騒音が増加し、偏磁による騒音増加の主因となっている。

References

- 1) T. Yokota, S. Kobayashi, and J. Arai: *TOSHIBA REVIEW*, **55**, No.8, 2 (2000) (in Japanese).
- 2) N. Takasu, F. Miyawaki, S. Saitou, and Y. Fujiwara: *T. IEE Japan*, **113-B**, No.4, 435 (1993) (in Japanese).
- 3) T. Ito, K. Takeda, K. Harada, Y. Ishihara, and T. Todaka: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-93-184, 43 (1993) (in Japanese).
- 4) T. Ito, K. Takeda, Y. Ishihara, and T. Todaka: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-94-187, 45 (1994) (in Japanese).
- 5) S. Takada, T. Sasaki, and T. Yasuda: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-95-89, 21 (1995) (in Japanese).
- 6) Y. Tani, and M. Okabe: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-95-90, 29 (1995) (in Japanese).
- 7) M. Enokizono, and Y. Takeshima: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-98-62, 51 (1998) (in Japanese).
- 8) M. Enokizono, and Y. Takeshima: *T. IEE Japan*, **119-A**, No.11, 1330 (1999) (in Japanese).
- 9) S. Yanase, Y. Okazaki, and Y. Asano: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-99-77, 7 (1999) (in Japanese).
- 10) M. Uchiyama, S. Yanase, and Y. Okazaki: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-09-41, 13 (2009) (in Japanese).
- 11) K. Nishimura, K. Fujiwara, Y. Ishihara, and Y. Yamada: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-09-239, 7 (2009) (in Japanese).
- 12) S. Wada, and T. Yagisawa: *J. Magn. Magn. Mater.*, **19**, 39 (1980).
- 13) H. Mogi, and T. Kumano: *J. Mag. Soc. Japan*, **24**, 667 (2000) (in Japanese).
- 14) A. Nishimizu, N. Uchiyama, and S. Saitou: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-99-78, 11 (1999) (in Japanese).
- 15) K. Shinya, H. Takai, and S. Saitou: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-01-205, 31 (2001) (in Japanese).
- 16) T. Asano, S. Takada, T. Sasaki, and Y. Okazaki: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-97-175, 25 (1997) (in Japanese).
- 17) T. Asano, S. Yanase, Y. Okazaki, and T. Sasaki: The papers of Technical Meeting, *IEE Japan*, MAG-98-61, 47 (1998) (in Japanese).

2011 年 11 月 4 日受理, 2012 年 1 月 6 日再受理, 2012 年 1 月 18 日採録