地磁気誘導電流による変圧器の 直流偏磁現象の検討

正員 高 須 伸 夫 (東京電力)

正員 宮 脇 文 彦 (東 芝)

正員 斎 藤 達 (日 立)

正員 藤 原 康 夫 (三菱電機)

DC Excitation of Transformer Cores due to Geomagnetically-Induced Currents

Nobuo Takasu, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc.), Fumihiko Miyawaki, Member (Toshiba Corporation), Sadamu Saitou, Member (Hitachi, Ltd.), Yasuo Fujiwara, Member (Mitsubishi Electric Corporation)

This paper describes experimental results concerning with the effects of DC excitation of transformer core caused by geomagnetically-induced currents (GIC).

As a first step, we investigated the response to DC excitation using three different small scale core models.

The results demonstrated that a single phase three-legged core form is most susceptible to DC excitation, and that a three phase three-legged core form is not affected by DC currents.

We also fabricated large scale single phase shell and core form transformers to evaluate local heating effect caused by DC excitation, since this single phase core form is most susceptible to DC excitation. The results of these experiments showed that transformer heating levels caused by DC currents can be quantitatively estimated.

キーワード：変圧器，直流偏磁，磁気嵐，地磁気誘導電流

1. ま え が き

地磁気の不規則な変動のうち，地球的な規模で起こる大きな変動を磁気嵐と呼んでおり，その発生メカニズムは太陽の黒点活動に起因している。すなわち，太陽黒点近傍で発生する太陽面爆発により，太陽からプラズマ状態の陽子と電子が地球に向かって放出される。これらの荷電粒子が移動することで生じる電流は磁界を形成し，地磁気に影響を与えるとともに，地表面に電位差を発生させる。この地表面電位差により直接接地系統などのY結線変圧器中性点から電流が流入するが，この電流を地磁気誘導電流と呼んでいる。この地磁気誘導電流は周期が5～15分と非常に長い準直流電流であるため，その大きさによっては変圧器

鉄心が直流偏磁して鉄心内磁束密度の最大値が飽和領域に近づき，励磁電流の増加，漏れ磁束の増大による内部構造物の温度上昇などを引き起こすことが懸念される^{(1)～(3)}が，これまで定量的な検討はなされていない。

そこで，この直流偏磁現象を定量的に解明し，地磁気誘導電流による温度上昇が変圧器の運転に影響を及ぼすレベルであるかどうか，変圧器モデルによる試験を実施して検討した。

温度上昇は小規模モデルでは精度良く推定することができないことから，実器相当の大きさの変圧器モデルを製作し，交流電圧を印加した状態で直流電流を流す直流偏磁試験を行った。また，直流偏磁現象は小規模モデルでも精度良く推定できるので，小規模モデル

を用いて、鉄心構造（単相3脚、三相3脚、三相5脚）の違いによる直流偏磁現象の様相の差について検討した。

その結果、これまで検討されていなかった鉄心の磁気飽和領域付近（約2T）での、直流偏磁時の変圧器各部の漏れ磁束と温度上昇の大きさの関係について、新たな知見を得ることができた。

2. 変圧器の直流偏磁現象

〈2・1〉 直流偏磁現象 磁気嵐に起因する地磁気誘導電流は準直流電流であり、電力系統の商用周波数に対してはほぼ直流電流とみなせる。このような地磁気誘導電流が変圧器巻線に流入すると、直流偏磁によって変圧器鉄心を磁気飽和させることがある。

図1に示すように、巻数の等しい2個の巻線を有する変圧器において一方の巻線に準直流電流 i_{dc} が流れ、交流電圧源 E に接続された他方の巻線に電流 i_1 が流れているとき、この変圧器の励磁電流 i_0 は(1)式で表せる。

$$i_0 = i_1 + i_{dc} \quad \cdots \cdots (1)$$

また、交流側電源系統のインダクタンスを L 、変圧器の巻線抵抗を含む交流側系統の抵抗分を R とすると、変圧器の端子電圧 V_{tr} は(2)式で表せる。

$$E - L di_1/dt - Ri_1 = V_{tr} \quad \cdots \cdots (2)$$

直流電流による変圧器の直流偏磁は次のようにして起こる。

(i) 直流電流 i_{dc} が流れ始めた当初は励磁電流 i_0 は小さく無視できるので、(1)式より

$$i_0 \approx i_{dc} \quad \cdots \cdots (3)$$

である。すなわち、交流側にも直流側と同じ準直流電流が流れ、アンペアターンが平衡している。

(ii) i_1 には直流分を含むので、(2)式より主として交流側系統の抵抗分による電圧降下の分だけ変圧器の端子電圧 V_{tr} には直流分を含むことになる。

(iii) 変圧器の鉄心磁束は電圧 V_{tr} の時間積分なので、電圧 V_{tr} に直流分を含む間、一方向に直流偏磁し続ける。励磁電流 i_0 も徐々に増加し、(3)式が成立しなくなる。

図1 2巻線変圧器
Fig. 1. 2 winding power transformer.

(iv) 端子電圧 V_{tr} に直流分を含まなくなったとき、すなわち交流側電流 i_1 に直流分を含まなくなったとき、そのときの偏磁状態で平衡する。

(v) 平衡した偏磁状態のとき、交流側電流 i_1 は励磁電流 i_0 の交流分であり、直流側電流 i_{dc} は i_0 の直流分である。

平衡した偏磁状態のときの鉄心磁束 ϕ 、励磁電流 i_0 、および直流側電流 i_{dc} の関係を図2に示す。交流分磁束 ϕ_{ac} と直流側電流 i_{dc} が与えられたとき、励磁電流 i_0 の直流分が i_{dc} と等しくなる状態を繰返し計算で求めることによって、平衡した偏磁状態における直流分磁束 ϕ_{dc} を求めることができる。

通常の運転状態での変圧器鉄心の透磁率は周囲の空間に比べて4桁ないし5桁くらい大きいので、励磁電流による励磁磁束のほとんどは鉄心内の閉磁路を通る。負荷電流による漏れ磁束は鉄心外の空間を通るが、その大きさは励磁磁束に比べるとはるかに小さい。直流偏磁によって変圧器鉄心が磁気飽和を始めると、鉄心の透磁率が下がるため励磁磁束が鉄心内のみでなく周囲の空間にも流れ始め、鉄心周辺の磁性構造物などを経由するようになる。

〈2・2〉 変圧器における影響 変圧器鉄心が直流偏磁した場合には、通常の動作時には見られない特異な現象を引き起こす。この現象は変圧器の基本構造（内鉄形、外鉄形）の差異によって若干の違いはあるものの、以下のようなものが考えられる。

(1) 鉄心近傍金属構造物の温度上昇 変圧器巻線に直流電流が流入すると、磁束のピーク値付近で変圧器鉄心が磁気飽和し、過大な励磁電流が流れる。その結果、鉄心外を通る漏れ磁束が増大し、この侵入を

図2 平衡した直流偏磁状態
Fig. 2. Stationary state of DC excitation.

図 3 内鉄形変圧器中身構造図

Fig. 3. Internal structure of core form transformer.

図 4 外鉄形変圧器中身構造図

Fig. 4. Internal structure of shell form transformer.

受ける金属構造材では過大の渦電流により、ときとして、温度上昇する可能性がある。この現象は鉄心周辺の金属構造材全般に発生し得るもので、図3の内鉄形変圧器ではA部で示す鉄心主脚部の鉄心当て板が代表例として考えられる。また、外鉄形変圧器では図4

に示す鉄心支えやタンクが代表的な構造材と考えられる。特に、巻線と鉄心間に位置する鉄心当て板や、鉄心支えなどの金属構造材は高磁界中に直接さらされるため、他の部位と比べ、温度上昇が大きくなることが懸念される。また、鉄心外を通る漏れ磁束が増えるようになると、金属構造材で電氣的のループが形成されている箇所の誘導電流が増大し、これによる温度上昇も懸念される。このような現象に該当する部位は、図3中B部に示す内鉄形変圧器の鉄心締付金具と連結金具のループなどが考えられる。

(2) その他の影響 変圧器鉄心が直流偏磁した場合、鉄心近傍金属構造材の温度上昇のほかに、

- (i) アンバランス磁束が鉄心中を流れることによる無負荷損の増加、励磁電流の増大による損失の増加
- (ii) 振動、騒音の増加、高調波電流の増加
- (iii) 図4に示すような多数の巻線が並列接続されている外鉄形変圧器では、直流偏磁により過大な漏れ磁束が発生すると、各巻線の配置構造の差異により巻線の鎖交磁束量が不均一となり、並列巻線電流間にアンバランスが生じる

などの可能性が考えられる。

今回はこれらのなかで、鉄心近傍金属構造材の温度

上昇を中心に検討を行った。

3. 実験内容

〈3・1〉 検証用モデル

(1) 小規模モデル（鉄心構造の影響検証用）

直流電流により誘起される鉄心中の磁束は同相、いわゆる零相磁束となるため、これが変圧器に与える影響の程度は鉄心構造によって異なることが予想される⁽⁴⁾。

そこで、本論文では大容量変圧器で見られる代表的な3種の鉄心構造を取上げ、これらの小規模モデルを用いた実験により、鉄心構造の差異が直流偏磁現象に与える影響を実験により検討することにした。

実験に使用した小規模モデルの概要を図5に示す。

内鉄形大容量変圧器鉄心の代表的構造である単相3脚鉄心、三相3脚鉄心、三相5脚鉄心の3種について、鉄心の断面積と巻線寸法が同じモデルを製作し、各モデル間の磁気特性の差異を検討した。なお、このモデルの製作にあたっては次の点に配慮した。

- (i) 小規模モデルによる磁気特性の低下ができるだけ避けられるよう、高配向性珪素鋼板G6材（板厚0.3mm）を使い、 T 接合部はVカット構造とした。
- (ii) 各鉄心脚を均一に励磁できるように内側に交流、外側に直流励磁用巻線をそれぞれ18ターンずつ

図5 小規模モデル

Fig. 5. Three different small scale core models.

図6 内鉄形モデル外観

Fig. 6. External view of core form model.

鉄心脚全域に配備した。

(iii) 鉄心を支持する当て板や締付金具の材質による影響を調べるため、すべて磁性鋼(#1)および非磁性鋼(#2)からなる2種のモデルを製作した。

(iv) 鉄心および構造物には各部の磁束分布が測定できるように、多数の探りコイルを取付けた。

(2) 内鉄形実規模モデル 試験に用いた内鉄形モデルの外観を図6に示す。非常に強い直流偏磁条件下での励磁電流、漏れ磁束および温度上昇の様相を的確に把握するために、実規模相当のモデルを製作した。このモデルでは漏れ磁束による鉄心周辺構造物の単位長さ当たりの損失と温度上昇がほぼ等しくなるように配慮されている。

変圧器中身には磁束、磁界を測定するために探りコイルを構造物、絶縁物、鉄心に巻き付け、温度を測定するために熱電対を取付けた。また、励磁電流はシャントにより直流分と交流分を測定した。測定位置を図7に示す。

(a) 磁束・磁界測定位置

(b) 温度測定位置

図7 磁界、磁束、温度測定位置
(内鉄形変圧器)

Fig. 7. Points of measurement of magnetic field intensity, flux, and temperature (core form model).

図 8 外鉄形モデル外観
Fig. 8. External view of shell form model.

図 9 磁界、磁束、温度測定位置
(外鉄形変圧器)

Fig. 9. Points of measurement of magnetic field intensity, flux, and temperature (shell form model).

なお、温度上昇の最も大きいと考えられる当て板が、磁性鋼（炭素鋼）のモデル(#1)と、非磁性鋼のモデル(#2)を製作し、影響を検討した。また、鉄心主脚上面構造材による電氣的ループについては、この電氣的ループを導通させたままのモデル(#1)と絶縁したモデル(#2)を製作し、試験結果を比較した。

(3) 外鉄形実規模モデル 試験に用いた外鉄形モデルの大きさは内鉄形と同じ理由で実規模相当とした。モデルの外観を図 8 に示す。図 9 の部位について、内鉄形同様、磁束、磁界は探りコイル、温度は熱電対により測定した。またタンクについては、サーモグラフィで温度の高い部分を把握し熱電対を取付けた。低圧巻線の電流は CT により、また、励磁電流はシャントで測定した。なお、温度上昇の最も大きいと

図 10 直流偏磁試験回路
(小規模三相モデル)

Fig. 10. Test circuit for DC excitation (small scale three phase models).

図 11 直流偏磁試験回路
(実規模単相モデル)

Fig. 11. Test circuit for DC excitation (large scale single phase models).

考えられる鉄心支えについて、磁性鋼と非磁性鋼のモデルを製作し、試験結果を比較した。

〈3・2〉 実験条件

(1) 小規模モデル（鉄心構造の影響検証用）

図 10 に実験回路の一例として三相鉄心の場合を示す。2 台のモデル(#1, #2)の一次側を並列に接続して交流励磁し、二次側は交流起電力を打ち消すよう逆接続とした。そして、変圧器二次側の中性点間に直流電源を挿入し、この出力を変化させながら直流偏磁を模擬した。なお、直流電流はモデル巻線の許容電流を考慮し、中性点で 30 A (相電流で 10 A) まで流した。実験は通常の交流励磁試験を基本にしながら、これに直流を加えた偏磁試験を実施し、電気特性と磁気特性を詳しく調べた。これら一連の実験は主にタンクなしで行っているが、タンクの影響についても別途検討した。

(2) 実規模モデル 内鉄形モデル、外鉄形モデルの直流偏磁試験回路を図 11 に示す。2 台の単相モデル変圧器を用いて、小規模モデル同様、交流励磁巻

線側は並列接続、直流励磁巻線側は逆相直列接続とした。

実験は交流励磁率を一定とし、十分鉄心飽和領域に至ると考えられる偏磁レベルとして、励磁電流によるコイル内磁界の強さが約 8×10^4 A/m の範囲まで直流電流を変化させて測定を行った（空間磁界の強さは、エプスタイン試験枠を用いて測定した鉄心材料の B - H 特性（参考：1.95 T で 8×10^4 A/m 程度）から推定して十分に飽和していると考えられる 8×10^4 A/m にした）。両モデルとも励磁時間は温度上昇が落ち着くまでとし、この間、直流電流は一定とした。

4. 実験結果

〈4・1〉 小規模モデルによる実験結果

(1) 励磁特性 交流励磁した状態で直流電流を増加させて、励磁電流ピーク値の変化を測定した。図 12 に、単相 3 脚鉄心（#1 モデル）に直流電流を 10 A 流した場合の交流巻線側励磁電流波形を示す。プラス側の波形に対してマイナス側の波形が突出した半波飽和の波形となっている。

次に、直流電流の大きさによる励磁電流ピーク値の変化を測定した結果を図 13 に示す。この図に示すよ

図 12 単相 3 脚鉄心での交流電流波形 ($I_{dc} = 10$ A)

Fig. 12. Relation of AC current to 10 A DC injection in single phase three-legged core form transformer.

図 13 直流電流と励磁電流ピーク値との関係
Fig. 13. Relations between DC currents and peak values of exciting currents.

うに、単相 3 脚鉄心と三相 5 脚鉄心においては、直流電流の増加とともに励磁電流ピーク値は急増しており、かつその波形が半波飽和波形となっていることから、鉄心が偏磁を受けていることがわかる。

このとき、単相 3 脚鉄心に比べ三相 5 脚鉄心では、励磁電流ピーク値の増加の仕方は小さく、鉄心脚構成による違いが見られる。一方、三相 3 脚鉄心は直流電流が増加しても励磁電流の交流電流成分の変化がほとんど見られず、直流偏磁を受けにくいことがわかる。

なお、タンクの有無による偏磁現象の違いについて、鉄板製タンクにモデルを入れて試験を行い調査したが、その差はほとんどなく、鉄心脚構成による偏磁現象の違いはタンクなしの場合と同様であった。

(2) 漏れ磁束 探りコイルにより直流偏磁時のモデル各部の漏れ磁束を測定した結果、鉄心当て板部が最も顕著に増大することがわかった。これは、直流偏磁により励磁電流が急増するためである。

図 14 に直流電流と鉄心当て板内平均磁束密度（当て板中央部での軸方向通過磁束）の関係の測定結果を示す（#1 モデル）。ここで、探りコイルの測定値では零点がわからないため、当て板内磁束量は測定波形の最大値と最小値の差で示している。

この結果から、単相 3 脚鉄心、三相 5 脚鉄心においては、当て板内通過磁束は直流電流の増加とともにほぼ直線的に増加していることがわかる。一方、三相 3 脚鉄心では直流電流が増加しても当て板内の通過磁束の変化はほとんどない。これは先ほどの励磁電流ピーク値の変化と同じ傾向である。

また単相 3 脚鉄心の場合の測定結果において、当て板の材質を磁性鋼（#1 モデル）および非磁性鋼（#2 モデル）と変えた場合の当て板内通過磁束の違いを図

図 14 直流電流と鉄心当て板中磁束密度の関係

Fig. 14. Relations between DC currents and flux densities in core plate.

図 15 材質による鉄心当て板中磁束密度の比較

Fig.15. Comparison of flux densities in magnetic and non-magnetic core plates.

図 17 直流電流と鉄心当て板中磁束密度の関係

Fig.17. Relations between DC currents and flux densities in core plate.

図 16 直流電流と励磁電流ピーク値との関係
Fig.16. Relations between DC currents and peak values of exciting currents.

図 18 当て板部の磁界の強さと温度上昇の関係

Fig.18. Relations between magnetic field intensity and temperature rise in core plate.

15に示す。非磁性鋼の場合の通過磁束は磁性鋼の場合のおよそ1/20と非常に小さい。

〈4・2〉 内鉄形実規模モデルによる実験結果

(1) 励磁特性 交流励磁した状態で直流電流を増加させていくと、励磁電流ピーク値の大きさもともに大きく増大する。その増加の仕方は若干の飽和傾向を見せているが、およそ直流電流に対して直線的に増加している。両者の関係を図16に示す。例えば、直流電流なしでは3Aであった励磁電流ピーク値は、当て板部の磁界の強さ H_1 が 8×10^4 A/m の条件（モデルでは直流45A）では、300Aと約100倍にも増加している。

(2) 漏れ磁束 小規模モデル同様、直流偏磁時の漏れ磁束は鉄心主脚当て板部で顕著に増加した。直流電流値に対する当て板内平均磁束密度 ϕ_1 の測定結果を図17に示す。当て板内平均磁束密度 ϕ_1 は当て板

の材質によって大きさが異なり、当て板部の磁界の強さ H_1 が 8×10^4 A/m の場合に、磁性鋼では0.65 T、非磁性鋼では0.13 Tと非磁性鋼は磁性鋼の約1/5の通過磁束であった。なお、探りコイルでの測定値は、今回のように直流分を含む波形の場合には零点がわからないため、交流分の最大値と最小値の差の大きさを示している。

当て板以外の部位での漏れ磁束、例えばタンク側面 ϕ_8 、タンク底板 ϕ_9 は当て板部の磁界の強さ H_1 が 8×10^4 A/m の条件においておよそ0.01 T～0.02 T程度あり、十分小さな値であった。

(3) 温度上昇 直流偏磁時の温度上昇の測定結果から、温度上昇の最も大きな部位は、鉄心当て板で

図 19 直流電流と励磁電流ピーク値との関係
Fig. 19. Relations between DC currents and peak values of exciting currents.

あることがわかった。当て板中央部の温度上昇 T_1 と当て板部の磁界の強さ H_1 の関係を図 18 に示す。直流電流なしの場合には 3°C 以下だった当て板中央部の温度上昇 T_1 は当て板部の磁界の強さ H_1 が 8×10^4 A/m の条件では、当て板が磁性鋼では 107°C 、非磁性鋼では 10°C と、非磁性鋼の場合には磁性鋼の約 1/10 の温度上昇であった。一方、誘導電流による温度上昇を予測した鉄心主脚上面の鋼材の温度上昇は、連結金属 T_3 、およびその取付けボルト T_4 とともに最大 5°C と十分小さく、また、電気的ループの形成される #1 モデルと、電気的ループを絶縁した #2 モデルとで温度上昇の有意差は見られなかった。

〈4・3〉 外鉄形実規模モデルによる実験結果

(1) 励磁特性 交流励磁した状態で直流電流を増加させていくと、図 19 に示すように内鉄形同様、ピーク値は直流電流に対しておよそ直線的に増加している。例えば、直流電流なしでは 7 A であった励磁電流ピーク値は、鉄心支え部の磁界の強さ H_1 が 8×10^4 A/m の条件（モデルでは直流 100 A）では 514 A となり、約 70 倍に増加している。

(2) 漏れ磁束 直流偏磁時の漏れ磁束は、鉄心支え部で顕著に増加することがわかった。鉄心支えの平均磁束密度 ϕ_1 と直流電流値との関係を図 20 に示す。鉄心支え部の磁界の強さ H_1 が 8×10^4 A/m の場合に、磁性鋼（#1 モデル）では 0.36 T、非磁性鋼

図 20 直流電流と鉄心支え部磁束密度の関係
Fig. 20. Relations between DC currents and flux densities in core support.

図 21 鉄心支え部の磁界の強さと温度上昇の関係
Fig. 21. Relations between magnetic field intensity and temperature rise in core support.

(#2 モデル) では 0.11 T となり、非磁性鋼は磁性鋼の約 1/3 の通過磁束であった。

(3) 低圧巻線間の分流 低圧巻線の分流測定の結果、鉄心支え部の磁界の強さ H_1 が 8×10^4 A/m の条件で、端の巻線が中央の巻線に比べて約 2 倍の電流が流れる結果となった。ただし、この電流は負荷電流とは位相が 90° 違うため、合成した電流の大きさは、分流アンバランスがない場合の 1.02 倍程度である。

(4) 温度上昇 直流偏磁時の温度上昇の測定結果から、温度上昇の最も大きな部位は、鉄心支え T_3 であることがわかった。鉄心支えの温度上昇 T_3 と鉄

心支え部の磁界の強さ H_1 との関係を図 21 に示す。直流電流なしの場合には 3°C 以下であった鉄心支えの温度上昇 T_3 は、鉄心支え部の磁界の強さ H_1 が $8 \times 10^4 \text{ A/m}$ の条件では、鉄心支え磁性鋼では 110°C 、非磁性鋼では 9°C と、非磁性鋼の場合には磁性鋼の約 1/10 の温度上昇であった。またタンク側板の温度上昇 T_{10} は、鉄心支え部の磁界の強さ H_1 が $8 \times 10^4 \text{ A/m}$ の条件で約 35°C であり、鉄心支えの材質による有意差はなかった。

5. 考 察

今回の実験結果より、従来検討されていなかった領域の変圧器の直流偏磁現象を解明し、以下のような幾つかの新たな知見を得ることができた。

〈5・1〉 鉄心構造による影響の差異 第 4 章で述べたように今回の試験では、単相 3 脚、三相 5 脚、三相 3 脚鉄心の順に、直流偏磁しやすいという結果になった。三相モデルでは、直流電流は各相に均等に分流し、三相分が平衡している場合には、各相の電流直流分は同じ大きさかつ同方向である。このため三相 3 脚鉄心では、直流電流による起磁力がすべての脚で同方向に加わり、全体で見ると打ち消されるため、鉄心はほとんど直流偏磁しないといえる。三相 5 脚鉄心では側脚があるため、直流電流による起磁力は打ち消されず、単相 3 脚鉄心同様直流偏磁する。三相 5 脚鉄心では脚やヨークなどの部分ごとに偏磁状態が異なるため、直流偏磁のしやすさは側脚やヨークの断面積など設計に依存するものと考えられる。

〈5・2〉 直流偏磁特性

(1) 鉄心飽和時の磁束の流れ 鉄心飽和時の主磁束の流れについて検討した結果、磁界の強さが $8 \times 10^4 \text{ A/m}$ のとき、ヨーク内磁束は主脚内磁束の 93%、主脚上面の接続金具と締付金具の囲む面を通過する磁束は主脚内磁束の 0.5% であった。このように鉄心飽和時においても、主磁束のほとんどは鉄心内に存在することが今回の実験から裏付けられた。これは鉄心が飽和するまでの磁束は鉄心が保持し続け、飽和後に増加した磁束に対してのみ、鉄心が空心として作用するためである。

このように、鉄心飽和時の鉄心外部への漏れ磁束の大きさは小さいといえる。

(2) 巻線内中央部の磁界の強さ 実験結果から、直流偏磁時の巻線内中央部の磁界の強さは、内鉄形、外鉄形ともに以下に示す有限長ソレノイドの中心軸上の計算式により求めたものと、ほぼ一致することがわかった。

図 22 過励磁時および直流偏磁時の温度上昇の比較

Fig. 22. Comparison of temperature rises under overexcitation and DC excitation.

$$H = \frac{i \times N}{2(a_2 - a_1)} \times \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + h^2/4}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + h^2/4}} \dots \dots (4)$$

ここで、 a_1 ：巻線内径、 a_2 ：巻線外径、 h ：巻線高さ、 i ：励磁電流、 N ：巻線巻回数

(4)式は巻線内部を空心と仮定して導出されたものであるが、非常に強い直流偏磁時の磁束のピーク値付近では鉄心が飽和領域に達し、励磁電流が桁違いに大きくなるとともに、上述したように飽和後の磁束に対しては空心として働くため、(4)式により直流偏磁時の磁界の強さが精度良く求まるものと考えられる。なお方形巻線では、断面積が等しくなる円筒状ソレノイド巻線に変換してから算出すれば、実験結果とほぼ一致することがわかった。

〈5・3〉 温度特性 今回の鉄心周辺構造物の温度上昇の大きさを、磁界の強さが同じとなる条件で交流過励磁試験と比較すると、図 22 のようになり、内鉄形、外鉄形ともに、直流偏磁時の温度上昇がおおよそ過励磁時のものの 1/2 程度になるという結果を得た。また、鉄心周辺の構造物を非磁性鋼にした場合には、磁性鋼を用いた場合と比較して、温度上昇は 1/10 程度以下になることがわかった。〈5・1〉節で述べたように漏れ磁束の大きさが小さいため、鉄心当て板、鉄心支えなど鉄心に直接接している構造物を除いて、温度

上昇は小さいという結果になった。

6. む す び

今回、小規模および実規模の変圧器モデルを用いて、直流偏磁現象を定量的に検討した。

その結果、いままでに検討されていなかった領域までの変圧器の直流偏磁状態における励磁電流の増加、漏れ磁束の増大による内部構造物の温度上昇などについて、定量的に明らかにするとともに、幾つかの新たな知見を得ることができた。

これらをまとめると以下ようになる。

(1) 鉄心構造による影響の差異について検討した結果、単相3脚、三相5脚、三相3脚鉄心の順に、直流偏磁しやすいという結果を得た。三相3脚鉄心はほとんど直流偏磁しない。

(2) 鉄心周辺構造物への漏れ磁束は、内鉄形では鉄心当て板、外鉄形では鉄心支え部が最も大きくなったが、鉄心飽和時においても主磁束のほとんどは鉄心内に存在するため、鉄心飽和時の鉄心外部への漏れ磁束の大きさは小さい。

(3) 直流偏磁時の巻線内中央部の磁界の強さは、内鉄形、外鉄形ともに有限長ソレノイドの中心軸上の計算式により精度良く求めることができる。

(4) 直流偏磁時には鉄心周辺構造物が最も温度が高くなり、その温度上昇の大きさは、磁界の強さが同じとなる条件では、内鉄形、外鉄形ともに、交流過励磁時のものの1/2程度になる。

(5) 鉄心周辺の構造物を非磁性鋼にした場合の温度上昇は、磁性鋼を用いた場合の1/10程度以下になる。

また、磁界の強さが 8×10^4 A/mというかなり大きな直流偏磁領域においても、温度上昇が内鉄形、外鉄形ともに110°C程度であることから、地磁気誘導電流による変圧器の温度上昇は短時間的に考えても問題ないレベルであり、更に発生頻度が少ないこと、ピーク継続時間が数分から数十分と短いことから⁽⁶⁾、寿命損失の観点から考えても無視できるものと考えられる。

今後は今回の実験結果を更に理論的に検討し、設計や構造の異なる変圧器の直流偏磁現象について、解析的に究明していく所存である。

(平成4年5月29日受付)

文 献

- (1) V. D. Albertson, et al.: "Load-Flow Studies in the Presence of Geomagnetically-Induced Currents", IEEE PES Summer Meeting No. F79, 702-2 (1979)
- (2) A. J. Pesonen, et al.: "Effects of Solar-Induced Currents

on Power Systems", The Joint Meeting of CIGRE SC 36 & SC 23 in Madrid (1979)

- (3) Philip R. Gattens, et al.: "Investigation of Transformer Overheating due to Solar Magnetic Disturbances", IEEE PES Summer Meeting Special Panel Session Report 90TH0291-5-PWR, p. 29 (1989)
- (4) William J. McNutt, et al.: "The Effect of GIC on Power Transformers", IEEE PES Summer Meeting Special Panel Session Report 90TH0357-4-PWR, p. 32 (1990)
- (5) V. D. Albertson, et al.: "Geomagnetic Disturbance causes and Power System Effects", IEEE PES Summer Meeting Special Session Report, p. 3 (1989)

高 須 伸 夫 (正員)

昭和33年8月11日生。58年3月千葉大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。62~63年MIT工科大学客員研究員。現在、技術研究所電力研究室主任研究員。主として、絶縁協調の研究および変電機器の信頼度向上に関する研究に従事。

宮 脇 文 彦 (正員)

昭和37年1月31日生。61年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月(株)東芝入社。主として、電力用変圧器の設計に従事。

斎 藤 達 (正員)

昭和20年9月3日生。44年3月山形大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。現在、日立研究所第2部主任研究員。主として、同所にて変圧器の損失に関する研究に従事。IEEE会員。

藤 原 康 夫 (正員)

昭和26年2月18日生。44年3月大阪市立都島工業高校卒業。同年4月三菱電機(株)入社。以来、電力用変圧器の開発に従事。