#### U.D.C. 621. 314. 212. 042. 52. 017. 1/. 3

# 大容量変圧器における漂遊損失 Stray Losses in Large Capacity Transformers

1,000MVA級超大容量変圧器の製作に当たっては,信頼性の向上が強く要求され る。そのため,いままで以上の漂遊損失の低減と局部過熱防止の技術が必要である。 我々は昭和46年以来150MVA相当の研究専用大形変圧器を製作し,これを用いて磁 界,漂遊損失,局部過熱について詳細な測定を行ない,現在の計算式の適用範囲, 精度を明確にするとともに,更に計算式を改善しつつある。本稿は上述の研究用変 圧器の概要並びにそれを用いての実験項目と,それらの実験結果のうち巻線及びタ ンク非磁性シールドでの磁界,漂遊損について述べたものである。

乾 芳彰*	Yoshiaki Inui
斉藤 達**	Sadamu Saitô
佐藤 忠**	Tadashi Satô
坂元 健**	Takeshi Sakamoto
奥山賢一***	Kenichi Okuyama
平石清登****	Kiyoto Hiraishi

# □ 緒 言

1,000MVA 級の超大容量変圧器の製作に当たっては信頼性 の向上が強く要求され、その対策として巻線、タンク、構造 材などに発生する漂遊損失の低減と、局部過熱の防止が重要 な課題となっている。そのためには、巻線や大電流リードか らの漏れ磁束により生ずるこれら諸現象を、従来より一段と 詳細に把握するとともに、実測値に裏付けられた更に精度の 高い計算式の開発が必要となる。漂遊損失、局部過熱につい ては、これまでにも数多くの文献が発表され種々の計算式が 提案されているが<sup>(1)</sup>、これらの計算式がどの程度実際の変圧 器での現象を正確に評価できるかについての検討は必ずしも 十分ではない。そこで我々は研究専用の大形変圧器を製作し 磁界、漂遊損失、局部過熱について詳細な系統立った測定を 行なった。次に、現在の計算式を整理するとともに実測結果 との照合を行ない、計算式の適用範囲、計算精度を明確にし、 更により精度の高い計算式を開発しようと試みた。 をもった実験データを得ることは容易でない。一方, 縮尺モ デル変圧器では大容量器との等価性を保つことが難しい。例 えば, モデルを実器の1/nの寸法で作り実験をする場合, モ デルは次の(1)式又は(2)式を満足するものでなければならない。 (1) モデルを実器と同一周波数下で実験する場合

#### 2 漂遊損失,局部過熱の発生個所と原因

大容量変圧器では小・中容量変圧器に比べ,漏れ磁束量が 大となるため漂遊損失自体が大きいことに加えて,容量が増 加してもそれに比例した寸法増加とならぬため局部的な漂遊 損失密度が高くなる。漂遊損失値そのものが大きいことは, 冷却機器の増加などをもたらし,大容量器の製作上好ましく ないしまた漂遊損失密度が高いことは局部過熱が発生しやす いことを意味している。表1は大容量変圧器における漂遊損 失,局部過熱の発生,あるいはその可能性のある個所をまと めたものである<sup>(2)(3)</sup>。巻線,鉄心,鉄心締め金具,タンクと いった変圧器を構成するほとんどの金属材料がその対象とな っている。特に鉄心,鉄心締め金具などの内部構造材での局 部過熱は,発生個所によっては近接する絶縁物の熱劣化を引 き起こし絶縁破壊を誘発することになるので,変圧器の信頼 性を損なう。

#### 3 研究用変圧器の概要

表1に示す変圧器各部での漂遊損失,局部過熱の種々の問

(2) モデルを実器と同一材質で作り実験する場合

 $fm = n^2 f$  .....(2)

表 | 大容量変圧器における漂遊損失と局部過熱の発生個所と原因 大容量変圧器における漂遊損失と局部過熱の発生,あるいはその可能性 のある個所をまとめたものである。

現象	発 生 個 所	発 生 原 因	結果
	巻 線	素線内のうず電流 素線間の循環電流	漂遊損の増大 巻線の局部温度上昇 平均温度上昇の増加
漂 遊 損	タンク タンクシールド	うず電流	漂遊損の増大 局部温度上昇
	鉄 心 シールドリング 鉄心締め金具	"	"
	巻線	循環電流損 うず電流損	素線間絶縁及びコイ ル間絶縁の劣化
	タンク タンクシールド	うず電流損	局部温度上昇による 塗料の変色,油漏れ 絶縁油の劣化
局或過数	鉄 心 シールドリング 鉄心締め金具	"	絶縁物の焼損 絶縁油の劣化
	配管	低圧ブッシング付 近の漏れ磁束によ る循環電流損	塗料の変色 油漏れ
	ブッシング座 カバーポケット	低圧ブッシング付 近の漏れ磁束によ る循環電流損	"
	連結ロッド	他の構造材との循 環電流損とロッド 内のうず電流損	ロッドの溶損 絶縁物の焼損

37

題を総合的に検討するには、部分モデルによる基礎実験で(	よ
限界があり,変圧器としての形を備えたものが必要である。	
実器では変圧器内部に多数の測定素子を取り付けることは国	木
難であり、しかも種々のタイプにも適用できるような一般性	生

#### \*日立製作所研究開発推進センタ \*\*日立製作所日立研究所 \*\*\*日立製作所国分工場 工学博士 \*\*\*\*日立製作所国分工場

846 日立評論 VOL. 57 No. 10(1975-10)

ここに,

38

 $\rho m$ : モデルでの固有抵抗( $\Omega \cdot m$ )

fm:モデルでの周波数(Hz)

ρ :実器での固有抵抗(Ω・m)

f : 実器での周波数(Hz)

例えば、モデルを実器の3で作り実器と同一周波数下で実験する場合、モデルで使用する材質は(1)式から実器の固有抵抗の36のが必要となる。また(2)式によるとすれば、9倍の周波数をもつ大容量電源が必要となる。更に磁性金属体においては磁気飽和特性まで考慮しなければならないため、縮尺モデルでの等価性はいっそう難しくなる。

以上のような理由から、実器に近い、かなり大規模な漂遊 損失研究専用の変圧器が必要であるとの結論に達した。実器 との等価性を重視しつつ変圧器各部の寸法を決め、更に実験 のやりやすさ、製作実験費用を考え合わせ図1、2に示すよ うな三相三脚内鉄形変圧器を製作した。約150MVAの容量を もち大容量器に生ずる漂遊損失,局部過熱の現象はほとんど 再現可能である。巻線には図2(c)のような種々の配置がとれ るようにタップを設けて,大容量器にみられる各種漏れ磁界 分布が作れるようにしている。またこの変圧器各部には,合 計 4,000個余りの各種測定素子を取り付けてあり,構造や材 質を変えた場合での実験もできるように配慮した。

#### 4 測定項目

表2はこの変圧器での測定項目と測定部分を示したもので あるが、タンクや各種構造材などとともに高電圧となる巻線 内部も測定対象となっており、測定範囲は変圧器のほぼ全域 に及んでいる。実験に際しては、巻線をタンクに入れない場 合から測定を始めた。そしてシールドのないタンクに入れた 場合、銅、アルミニウム、あるいはけい素鋼板シールドを取 り付けたタンクに入れた場合などへと測定内容を広げて行き タンクやタンクシールド板が磁束分布に及ぼす影響について



表 2 測定項目 本変圧器での測定項目と測定部分を示したもので、タンクや各種構造材とともに、巻線内部もその対象となっている。

	測 定 部 分	測定条件	測定装置
磁速密度	<ol> <li>1.巻線</li> <li>2.タンク、 タンクシールド</li> <li>3.シールドリング</li> <li>4.鉄心</li> <li>5.鉄心締め金具</li> <li>6.連結ロッド</li> </ol>	<ol> <li>タンクなし</li> <li>各種タンク シールド付き</li> <li>単相,三相時</li> <li>各種巻線配置</li> </ol>	サーチコイル (約2,500点)
発生損失	<ol> <li>1.巻線</li> <li>2.タンク、 タンクシールド</li> <li>3.各種構造物</li> </ol>	"	1. 電力計 2. ブリッジ 3. うず電流素子 (約500点)
温度上昇	"	"	熱電対 (約1,000点)
冷 却 効 果	巻 線	強制送油風冷	1. 流量計 2. 流速計



図 | 実験用変圧器 変圧器の漂遊損失,局部過熱の現象を詳細に,且 つ総合的に解析できる実験専用変圧器(容量約150MVA)を示す。





図2 巻線配置 (a), (b)は図1の変圧器の中身概略構造を示し, (c)は巻線配置を変えて行なった各種測 定ケースを示す。

#### 大容量変圧器における漂遊損失 847



図3 磁束測定用サーチコイル 巻線中や構造材表面での局部的な磁 束測定用として使用した。

定量的に詳しく調べた。更に単相磁界と三相磁界の相違や図 2(c)に示す各種の巻線配置での検討も行なった。測定点数が 4,000点にもなるので、測定に当たっては自動測定装置を用い、 データ処理のスピードアップと省力化を図った。巻線中や構 造材表面での局部的磁束測定用としては図3のような直径約 5mmのサーチコイルを、アルミシールド板などの各種金属体 に流れるうず電流の測定には図4のように2点間の電位差を 測定し求める素子を考案し高精度な測定を可能とした。また 巻線中の局部的な油の流れを測定するために、日立製作所と 日本科学工業株式会社と共同で開発した油流速計を使用した。



図 4 うず電流測定素子 アルミシールド板などに流れるうず電流を測 定するために開発した素子の取付状態を示している。

ンクでの磁界分布は三次元分布となる。従来の二次元直交座 標系,あるいは軸対称円筒座標系などによる計算では,例え ば図5中のPoの位置のみしか計算できない。

大容量器では漂遊損失低減とタンクの局部過熱防止上から, 一般にタンク内面にアルミ板やけい素鋼板がシールドとして 取り付けられる場合が多い。我々はこれらのシールド板がタ

#### 5 解析手法

4. で述べた実験と並行し,我々はこれまでに提案されている種々の漏れ磁界,漂遊損失,局部過熱に関する計算式を整理し,更に不十分なものについては改良,あるいは新たに計算式を開発した。その中の幾つかについて述べる。

#### 5.1 磁界計算

変圧器の漂遊損失,局部過熱は各部における磁界分布が明 らかとなり初めて正確に計算できるものであるため,漏れ磁 界計算は最も基本的なものとなる。電子計算機の利用により 磁界計算技術は格段に進歩し,これまでにも多くの計算法が 提案され,我々も簡略計算法としてBiot-Savart法を用いる 計算式について提案してきた<sup>(4)</sup>。今回,タンクや各種構造物の 影響を更に正確に考慮すべくマクスウェルの電磁方程式を(3) 式で示すような軸対称円筒座標系で,あるいは二次元直交座 標系で数値解法で求める計算法を開発し,うず電流や透磁率 の非直線特性まで考慮できるようにした<sup>(5)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu r} \left( \frac{\partial r \dot{A} \theta}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{1}{\mu r} \left( \frac{\partial (r \dot{A} \theta)}{\partial Z} \right) \right) = -i\theta$$
  
+  $\kappa \frac{\partial \dot{A} \theta}{\partial t}$  .....(3)  
ここに、  $\mu$  : 透磁率(H/m)  
 $A\theta$ : ベクトルポテンシャル(Wb/m)

ンクに取り付けられた場合について従来の計算法を拡張し, 変圧器のあらゆる個所での三次元的磁界分布を計算できるようにした<sup>(6)</sup>。すなわち,マクスウェルの電磁方程式を軸対称 円筒座標系のもとで解く場合,上記シールド板の影響を**図5** のような円形影像巻線として考えた。

#### 5.3 タンクシールドのうず電流損の計算

アルミニウム板などタンクの非磁性金属板シールドに発生す るうず電流は、従来二次元系(二次元直交座標系、あるいは軸 対称円筒座標系)で計算されていたが、5.2でのような理由と、 次章6.の図9に示すような実測結果から従来の計算法に代わ るものが必要となった。我々はアルミシールド板表面の三次 元的な磁束密度分布が5.2の方法によって計算できるように なったことから、(4)式に示すようなアンペアの周回積分法則 から導出した計算式を用いて、アルミ板中の各部分のうず電 流を計算する方法を導出した(図6参照)。

$$Ix = \int H dl = \frac{1}{\mu_0} (B_{y1} \cdot d + B_{z2} \cdot l - B_{y2} \cdot d - B_{z1} \cdot l) \cdots (4)$$

ここに、Ix:シールド板中のうず電流のx方向成分(A)

By1, By2, Bz1, Bz2: シールド板表面の磁束密度

の y 方向及び z 向方成分(Wb/m<sup>2</sup>)

μ0:真空透磁率(H/m)

d: シールド板厚(m)

*l*:単位長さ(m)

なお、うず電流の z 方向成分Lも(4)式と同様に求められる。 また、シールド板各部分に発生する単位表面積当たりのうず 電流損 $W(W/m^2)$ は(5)式により計算できる。

39

iθ:電流密度(A/m<sup>2</sup>)
 x:導電率(1/Ω·m)
 t:時間(s)
 ·は複素数であることを示す
 5.2 タンク、タンクシールド表面の磁界計算
 図 2 のように一般に内鉄形変圧器では巻線は円筒形状であるのに対し、タンクは平板であることが多く、そのため、タ
 x・d
 x・d
 x・d
 x・d
 けい素鋼板のような高透磁率のシールド板の場合は、まず
 5.2における計算法を用いてシールド板表面のベクトルポテンシャル値の三次元的分布を求める。次に各点のベクトルポテンジャル値よりシールド板中の磁束量を計算し、この値と基
 磁データであるけい素鋼板の鉄損曲線より各部に発生するう
 ず電流損を求める方法をとった。

848 日立評論 VOL. 57 No. 10(1975-10)



図 5 タンクシールド板の影響を考慮した磁界計算法 タンクの磁気シールド板がけい素鋼板及び アルミ板である場合,影像巻線を仮定し磁界計算を行なう。



図6 アルミシールド板のうず電流の計算法 アンペアの周回積分 法則から,アルミ板に流れるうず電流は計算できる。

### 6 実験結果と検討

表2の各測定項目について、実測と計算とを対比させなが ら検討を進めたが、そのうちの幾つかについて述べる。

#### 6.1 磁束分布

40

マクスウェルの電磁式を(3)式に示す軸対称円筒座標系で, うず電流,磁性体の非直線性を考慮に入れて有限要素法を用 いて求めた漏れ磁束分布の一例を図7に示す。本例はタンク にアルミシールド板を取り付けた場合であり,タンクへの磁 束の侵入はアルミシールド板によりほとんど阻止されている 様子もよく分かる。



図8は巻線中の磁束密度分布がタンクやタンクシールドに よりどのように影響を受けるかを示したものである。タンクや タンクシールドの影響が強く作用するタンクに最も近接する 位置(図8中A点)での測定値であるが,巻線半径方向成分,

N		名	称	No.	名称
(	巻	將	Į.	(4)	アルミシールド板
(2	鉄	心	•	(5)	鉄心 押え金具(鋼材)
3	) 9	ンク		6	巻線 押え金具(鋼材)

磁束分布を電子計算機で計算した。



シールドを付けると増し、アルミシールド板を付けると減少する。

軸方向成分ともけい素鋼板シールド付きタンクに入れると一 般に大きくなる。反対にアルミシールド付きタンクでは小さ くなる。単相時と三相時の磁束密度分布についても比較した が、両者にほとんど差がみられず他相の影響は小さいことも 確認できた。また、この実験結果から巻線中の磁束密度分布 は、5.1及び5.2の計算法により十分な精度で計算できること を確認した<sup>7</sup>。

6.2 非磁性シールド板のうず電流分布

タンクに取り付けられた,アルミシールド板に流れるうず 電流分布の測定結果の一例を図9に示す。測定は図4に示す うず電流測定素子により行なった。アルミシールド板のうず 電流は,アルミシールド板に垂直に侵入しようとする磁束を 包み込むように流れており,上下に大きなループを形成して いる。その電流密度は,巻線の高さ方向の中央部で最も大き く,巻線とアルミシールド板の距離が離れるに従い小さくな っている。

図10は従来の二次元座標系を用いて求めたうず電流の計算 値を測定値と比較したものであるが、二次元系計算法では十 分な精度でないことが分かる。図11は、5.2 で述べた計算法 により求めた計算値を測定値と比較したものである。従来の 二次元系では計算できなかった相中心部から離れたタンク長 手方向の位置(図中×印)においても、またうず電流の×方向 成分においても計算が可能となったばかりでなく、高精度で 計算できることが分かる。

#### 6.3 アルミシールド板の損失と変圧器の負荷損

6.2 で述べたうず電流分布測定値を用いてアルミシールド



図9 アルミシールド板に流れるうず電流分布の測定例(V相のみ 通電時→測定値) アルミシールド板のうず電流は、アルミシールド板 に垂直に侵入しようとする磁束を包み込むように流れている。

いことが分かった。アルミシールド付きタンクに入れると2. で述べたように巻線中の磁束密度分布が変化するので、タ ンクシールドの損失を(アルミシールド付きタンクに入れた

41

板全体のうず電流損を計算し,負荷電流との関係をみたのが	ンクシールドの損失を(アルミシールド付きタンクに入れた
図12(a)であるが、アルミシールド板のうず電流損は負荷電	ときの負荷損)-(タンクに入れないときの負荷損)から求め
流の2.0 乗に比例している。このことは背後のタンク鋼板の	ると、かなり大きな誤差を伴うおそれがあると言えよう。
影響がほとんどないことを示していると言えよう。直流損,	なお上記のアルミシールド板以外の場合や,表2に示す変
漂遊損を含めた変圧器の負荷損と負荷電流の関係を調べてみ	圧器各種構造物についても漏れ磁界, 漂遊損, 局部過熱につ
ると、図12(b)に示すように電流の2.0乗に比例した。従っ	いて同様な検討を行なっているが、これらについては改めて
て、低減電流による測定値を2.0乗で定格値に換算してもよ	報告したいと考えている。

850 日立評論 VOL. 57 No. 10(1975-10)



図10 アルミシールド板に流れるうず電流の測定と計算 V相のみ通電したときのアルミシールド板に流れるうず電流を,従 来の二次元座標系による計算法で求めた。

図|| アルミシールド板に流れるうず電流の測定と計算(V相のみ通電時) 相中心部から離れたタンク長手方向の位置においても、アルミシールド板に流れるうず電流 は正確に計算できるようになった。

# 

# 7 結 言

大容量変圧器に生ずる漂遊損失,局部過熱の種々の問題を 総合的に系統立って解析できる研究専用の大形変圧器を製作 し,詳細な検討を行なっているが,今回はその一端を紹介し た。これら一連の研究を通じ,大容量変圧器における漂遊損 失,局部過熱の各種現象が定量的に明らかとなり,その解析 手法もほぼ確立できた。

## 参考文献

- (1) M.Kozlowski, J.Turowski: "Stray losses and local overheating hazard in transformers" CIGRE Report No.12-10 (1972)
- (2) 池田「大容量変圧器の漂遊負荷損」昭和48年電気四学連合大会 No.69(昭48-10)
- (3) 乾ほか「大容量変圧器における漂遊損と局部過熱の解析」 電気学会静止器研究会資料TC-71-2(昭47-10)
- (4) 奥山ほか「変圧器漏れ磁界と損失」日立評論 50,553
   (昭43-2)
- (5) 佐藤ほか「磁性体の非線形特性と渦電流の影響を考慮した有限要素法による磁界の解析」昭和49年電気学会全国大会No.641(昭49-4)
  (6) 乾ほか「大容量変圧器の漂遊損失とタンクシールドの効果」昭和48年電気四学連合大会No.72(昭48-10)

10 20 40 60 100	10 20 40 60 100
負荷電流(相対値) ·	負荷電流 (相対値)
(a) アルミシールド板の損失	(b) 負荷損 (V相のみ通電時)
図12 損失と負荷電流の関係(50Hz) 変圧器の負荷損は,負荷電流と2.0乗の比例関	アルミシールド板の損失及び 引係にある。

42

(7) Y.Inui, S.Saito, K.Okuyama, K.Hiraishi: "Effects of tank and tank shields on magnetic fields and stray losses in transformer windings" IEEE C73 401-7 (1973)