大容量変圧器の漏れ磁束

Leakage Flux in Large Power Transformers

平石清登* Kiyoto Hiraishi

In large power transformers leakage flux, stray loss, temperature rise of structure, etc. have become subjects of serious consideration of late. The author, based on the result of his study on these subjects conducted by way of calculation and actual measurements has achieved to improve the accuracy of transformer design in respect to short-circuit impedance, electromagnetic force, stray loss, loacal temperature rise, and the like.

1. 緒

言

19

変圧器の漏れ磁束は, 漂遊損失, 短絡インピーダンス, 短絡時 の電磁力などを支配し, 局部過熱を生ずることもある。そのため 漏れ磁束に関する検討は変圧器の設計製作上重要な項目の一つと いえる。特に超大容量器では漏れ磁束がその構造を決定するとい っても過言ではない。たとえば漂遊損失が増大しないよう漏れ磁 束密度を特定値に押えるために巻線を分割することがある。この



場合,変圧器重量は低減されるが,銅量,損失,冷却器台数あるいは製作工数が増加して原価上必ず有利になるとはかぎらない。 適切な漏れ磁束の制御による漂遊損失の低減が重要となってくる。

また超大容量器では並列導体数は増加するが,循環電流損の低 減を図り,巻線の局部温度上昇を防止するため,並列導体を転位 しなければならない。しかし転位回数を多くすると巻線作業が複 雑になり,巻線の凹凸(おうとつ)による電界集中個所も増加する。 したがって有効な転位法(転位ピッチおよび転位回数の決定)に 関する検討が必要になる。

短絡時の電磁力,特に軸方向圧縮力を有効に低減するには,巻 線構造から決まる動荷重率に対し,漏れ磁束分布から決まる関与 率を調整しなければならない。この考え方による軸方向圧縮力低 減法についてはすでにIEEEなどで報告済みのためここでは割愛 するが,漏れ磁束を正確に評価できることが前提になる⁽¹⁾。

さらに超大容量器ではリード線電流が非常に大きくなってくる ので、より高精度のタンクまたは近接する金属体の局部過熱防止 の検討が必要である。

以上のように、容量の超大化とともに漏れ磁束に関する検討が より重要になる。以下にこれらについて考え方の一部を紹介する。

2.漏れ磁束

漏れ磁束は,変圧器に負荷電流が流れているとき巻線,リード 線,あるいは両方の組合せによって生ずる磁束である。

2.1 巻線による漏れ磁束

導体に磁束が侵入したとき,うず電流による磁束の反作用が生 ずる。しかし反作用を考慮した磁束の一般計算は繰返しになるの で時間を要し必ずしも実用的といえない。一部の構造物を除き反 作用を無視した磁束計算を適用しても精度上問題は少ないという 視して計算するのが最も簡便であるが、タンク面の磁束などを求めるとき必ずしも実際的でなくなる。ここでは巻線の曲率を考慮した円筒座標系による計算法を紹介する。図2に示す円環電流によるベクトルポテンシャル \vec{A} ($Ar, A\phi, Az$)は、

$$Ar = \frac{\mu}{4\pi} \int_{0}^{2\pi} \frac{I\sin(\phi - \phi') ad\phi'}{\sqrt{r^{2} + a^{2} - 2ar\cos(\phi - \phi') + z^{2}}} = 0 \quad \dots \dots (1)$$

$$A\phi = \frac{\mu}{4\pi} \int_{0}^{2\pi} \frac{I\cos(\phi - \phi') ad\phi'}{\sqrt{r^{2} + a^{2} - 2ar\cos(\phi - \phi') + z^{2}}}$$

$$= \frac{\mu I}{\pi k} \sqrt{\frac{a}{r}} \left\{ (1 - \frac{k^{2}}{2}) K(k) - E(k) \right\} \dots \dots \dots (2)$$

$$Az = 0 \quad \dots (3)$$

$$\Box \equiv \mathcal{T},$$

考え方があるが、ここではこの考え方による。例として図1に実 器規模巻線の磁束密度実測値と反作用を無視した計算値を示した が、ほぼ一致していることがわかる。 反作用を無視した磁束密度の計算法としては, 巻線の曲率を無

* 日立製作所国分工場

八加一 和 4 俚 元 王 悄 円 慎 分 一方,磁東密度 \vec{B} に関して \vec{B} =rot \vec{A} より(1)~(3)を考慮して, $Br = -\frac{\partial A\phi}{\partial z}$ (4) $B\phi = 0$ (5)

35

 $A\phi$

図2 円状電流による P 点のベクトルポテンシャル





ルミ板などの非磁性シールドを付けた場合、反作用の影響は無視 できない。たとえば図5に示すシールド板に平行なリード線があ るときの磁束密度計算は下記による必要がある。

マックスウェルの方程式から、電界 \vec{E} 、磁界 \vec{H} 、電流密度 \vec{i} に 関して

境界条件として,

(10)式~(14)式から数値計算によりE2を求める。(8)式から,

ρ

図3 変圧器タンク面の漏れ磁束計算例

巻線全体について(4)~(6)式を集積すれば任意空間の巻線による磁 東密度が求められる。図3はタンク面の漏れ磁束密度By, Bzの計 算例を示したものである。

2.2 リード線による漏れ磁束

リード線は任意の有限長直線電流の組合せと考えられる。微小 線分dlによる磁束密度dBはビオサバールの法則から、

ここで,

36

 $y = -y_s$ $j\omega \langle \partial y \rangle y = -y_s$

リード線が多数ある場合は、それぞれを重ね合わせてシールド面 の漏れ磁束密度を求める。さらに巻線もリード線の組合せと考え れば巻線によるシールド面の磁束計算が可能になる。



I =有限長線電流

任意空間のリード線による漏れ磁束密度を求めるには(7)式を実際 に応じて積分すればよい。図4は計算例として多数本のタンク面 に平行なリード線によるタンク面の漏れ磁束密度 Byを示したもの である。(7)式は反作用を無視したものであるが、Byについてはタ ンクがSS-41製の場合反作用の影響は少ない。しかしタンクにア



大容量変圧器の漏れ磁束 日立評論 VOL. 54 No.10 885

2.3 鉄心からの漏れ磁束

その他,鉄心の主磁束密度が大きくなると,鉄心締め金具,鉄 心当て板などに磁束が漏れて局部過熱することがあるが,ここで は鉄心からの漏れ磁束に関する記述は省略する。

3. 漂 遊 損 失

磁束密度分布,材質,形状,寸法などから定まる電流回路の抵抗をR,リアクタンスをX,鎖交磁束数をØ,角周波数をωとすると,

誘起電圧	$V \propto \omega \phi$	
インピーダンス	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	
電流	$I \propto rac{V}{Z} \propto rac{\omega \phi}{\sqrt{R^2 + X^2}}$	
∴損失 W	$V = I^2 R \propto \frac{R \omega^2 \phi^2}{R^2 + M^2}$	(16)

∴損失 $W = I^2 R \propto \frac{R \omega \varphi}{R^2 + X^2}$ (16) (16)式において、 $R \ll X$ のとき、

 D^{2}

 $W \propto \frac{R\omega^2 \phi^2}{R^2 + X^2} \propto R$

 $R \ll X \mathcal{O} \geq \mathfrak{s},$

$$W \propto rac{R\omega^2 \phi^2}{R^2 + X^2} \propto rac{1}{R}$$

したがって漂遊損失と抵抗の関係は図6のようになる。しかしX の算定は必ずしも容易ではなく、特に磁性体の場合、その透磁率 が磁界の大きさにより変わるため複雑である。ここでは損失の検 討法を磁性体と非磁性体に分ける。

を考慮すると(18), (19)式は解析的に求められる。たとえば単位表面 積当たりの損失は,

$$W(x, y) = \frac{\omega^2}{4\rho} \left\{ \sum_{m=n}^{\infty} \frac{\left(\frac{m\pi}{Y}\right)^2 a_{mn}^2 \sin^2 \frac{n\pi}{X} x \cos^2 \frac{m\pi}{Y} y}{\left\{ \left(\frac{n\pi}{X}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{Y}\right)^2 \right\}^2 Re(\gamma_{mn})} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{n\pi}{X}\right)^2 a_{mn}^2 \cos^2 \frac{n\pi}{X} x \cos^2 \frac{m\pi}{Y} y}{(1-\chi^2)^2} \right\} \cdots (20)$$

3.1 非磁性体

変圧器に使用する非磁性体の主要なものに、巻線導体、鉄心当 て板、巻線締め金具類あるいはタンクシールドなどがある。これ らのうち電線に生ずるうず電流損はその寸法が十分小さいため、 うず電流による磁束の反作用を無視して計算することができる⁽²⁾。 しかしその他の構造物に生ずるうず電流損は寸法が十分小さいと いえないので計算は簡単ではない。たとえば、図7に示す構造物 表面に垂直な磁束による損失の計算は下記のようになる。これは タンクシールド面などに該当する。

表面に垂直な磁束密度 Bzo を下記のように二重フーリエ級数で 表わすことにする。





 $m = 1, 3, 5, \cdots, n = 1, 2, 3, \cdots$

(20)式は境界値(17)式を与えて損失分布を求めることに対応するから 正確な境界値を求める必要がある。しかし構造物面すべての境界 値を求めるのは(15)式によれば可能であるが現状煩雑である。その ため反作用がないときの表面近傍の磁束密度分布を初期値として 繰返し計算により損失を求めるのが実際的な場合がある。あらか じめ考えうる磁束密度分布に対し損失をチャート化しておけば, 設計上も便利で小さい構造物を対象とするときほとんど支障なく 損失が求められる。この方法についてはすでに報告済みのためこ こでは詳細は記述しない(3)。しかし構造物が大きくなると初期値 の与え方に疑問が残るのでこの方法にも限界がある。特にタンク シールドのように寸法が大きい場合損失を過大評価する傾向があ る。たとえば図8は超大容量器のタンクアルミシールドの磁束密 度分布の実測例であるが,この磁束密度分布から推定したシール ドの損失は上述の近似計算値に比べかなり小さい。このように近 似計算法は十分安全側となるので実用上は支障なく、しかも計算 時間を短縮することができる。日立製作所は機会あるごとに実器 で詳細測定を行ない精度の向上を図っている(4),(5)。

(15)式および(17)式から(20)式による損失計算は理論的になるので,

図7 導体表面に垂直な磁束密度分布

本報では省略し別の機会に報告する。 また導体を流れる電流自身による損失増加がある。たとえば構 造上避けられない短絡回路に対して,鎖交磁束数と回路インピー ダンスによる循環電流が流れ,付加損失が生ずる。インピーダン スは導体形状によっても変わるが,形状が簡単な場合(たとえば 円断面,円環断面,長方形断面など),マックスウエルの式から容

37

大容量変圧器の漏れ磁束 日立評論 VOL. 54 No.10 886





ここで, *I*=導体を流れる全電流 インピーダンスズは, $\vec{Z} = \frac{Y}{k \cdot 4 a h^2} \frac{\text{ber} Y \text{bei}' Y - \text{ber}' Y \text{bei} Y + j(\text{ber} Y \text{ber}' Y + \text{bei} Y \text{bei}' Y)}{(\text{ber}' Y)^2 + (\text{bei}' Y)^2} \cdots (22)$ ここで, $Y = \sqrt{\frac{2a^2}{1+a^2}} \,\omega\mu k \,h$ $\omega = 2\pi f$ $\mu = 透磁率$ k = 導電率2h=導体幅 2ah=導体厚

(22)式の実数項が交流抵抗値に相当し、(交流抵抗一直流抵抗)値が 付加損失に比例する。

3.2 磁性体

38

変圧器に使用する磁性体の主要なものに,鉄心,巻線締め金具 類、タンクあるいはタンクシールド板などがある。

材質的には、けい素鋼板および普通鋼板に分類できる。前者の 内部磁束による損失は後者に比べ光以下のためここでは主として 後者について述べる。

板の表面に平行な外部磁束があるとき, 非磁性体では板内部の 磁束密度は指数関数的に減少するが、普通鋼板内の磁束密度は磁 化曲線に従って分布するのでかなり複雑である。表面からの種々 な深さにおける磁束は高周波成分があるため正弦波分布ではない が、ここでは表皮深さ δ内ですべての現象が生ずるものとして一 次元的に処理する。表面の磁束密度をBo, 板内部の磁束をø, 単

図10 循環電流の計算値と実測値

(Aeff)

循環電流

並列接続するが、そのため並列導体間に循環電流が流れ付加損失 を生ずる。転位したときの循環電流の計算法は一部報告済みであ るが、要点は以下のようになる。各導体のベクトルポテンシャル をまず計算し、全導体のベクトルポテンシャル平均値との差(す なわち, 各導体の鎖交磁束数)に定数をかけて循環電流を求める という方法である(6)。ここで定数は各素線のアドミツタンスの関 数になるが、まだ解析的に求められていない。一つの方法として 巻回されたコイルを全部直線状に展開し,任意の導体の転位によ る移動を近似曲線で置換して,電流分布,磁束分布,鎖交磁束数 から各素線のリアクタンスXを求めることが考えられる。この方 法によると素線のリアクタンスは抵抗の数倍から10数倍になる。 図10は循環電流の実測値と計算値の相対比較である。

なお循環電流により巻線のうず電流損あるいは短絡時のコイル 力などが変わるが、パラメータに複素ポインチングベクトルを選

位表面積当たりの損失をWとすると、 $B_0 = f_1(\phi)$ (23) $W = f_2(\phi)$ (24) 図9は実験例として(23)式に相当する曲線を示したものである。 3.3 循環電流損 大容量変圧器では電流が大きく,特に低圧巻線では導体を多数

び上述した近似曲線を仮定すれば、解析的に求められる。 3.4 損失低減法 以上のように, 電流源←→漏れ磁束分布 漏れ磁束分布← 損失 の関係を有機的に求めれば、最小損失設計が可能となる。

大容量変圧器の漏れ磁束 日立評論 VOL. 54 No.10 887

すなわち,

(1) 適切な電流源の配置による漏れ磁束分布の調整および損失の低減

(2) 適切な材質, 寸法, 形状の選択による損失の低減

(3) 効果的なシールド法の採用による損失の低減

(4) 適切な巻線内の転位による損失の低減

などが考えられる。たとえば680MVA2巻線変圧器では漂遊損係 数,(すなわち負荷損と直流抵抗損の比)を1.2以下にできる見通 しを得,さらに小さくする可能性もある。

4.温度上昇

漂遊損失により構造物が局部的に温度上昇することがある。こ こでは主としてタンクの温度上昇について記述する。

タンクの一部に発生した損失は,変圧器油あるいは空気の熱伝達,輻射(ふくしゃ)による熱伝達および板内の熱伝導などにより 移動するが,これらの熱平衡式から温度上昇が求められる⁽⁷⁾。図 11はこの関係を示すものである。

図11から熱平衡式として(25)式が得られる。











(2)熱平衡図11 漂遊損失の移動



の熱特性が温度によって変わることなどを考慮しなければならない。したがって(25)式は収束計算になる。図12は損失分布と(25)式に よる温度分布の比較を示したものであるが、両者は相似でない。 簡易計算では誤差が大きくなる。図13は大容量変圧器タンク(普 通鋼板製)について(4)~(6)式,(23)~(24)式および(25)式から求めた計 算値および実測値の一部を示したもので、同図中①および回はリ ード線と巻線の磁束が重なり合って温度が高くなった個所である。 温度上昇の計算値は実測によりチェックできるので、温度上昇 の測定は漂遊損解析の有効な検証法の一つであると考えられる。

その他,漏れ磁束現象として短絡インピーダンスが含まれるが, これは空間のエネルギーに関係し,エネルギーは(2)式により容易 に求められるのでここでは省略する。

5.結 言

大容量変圧器の漏れ磁束に関して、特に漏れ磁束,損失および 温度上昇の計算法の要点と実測例を記載した。

なお日立製作所では、従来から実器で詳細測定したデータを積 み上げ、680MVA級変圧器の漂遊損係数を1.2以下にできる見通 しを得ているが、よりいっそうの計算精度向上を図るために、実 器規模の漏れ磁束検討用三相試作変圧器を製作し、現在も実験を 継続中である。

参考文献

(1) K. Hiraishi et al : IEEE Paper No. 71 TP8-PWR (1971)

(2) 例えば:電力機器便覧, オーム社(昭35)

(3) K.Okuyama et al: IEEE Paper No.70 CP129-PWR (1970)
(4) 栗田ほか:日立評論 53, 225 (昭46-3)
(5) 秋丸ほか:日立評論 54, 117 (昭47-2)
(6) 奥山ほか:電四連大 No. 572 (昭43)
(7) 川嶋ほか:電気学会関西支部連合会 No. G3-42 (昭46)

39