

火力発電所用大容量変圧器

坂 本 友 男* 保 坂 久 勝*
Tomoo Sakamoto Hisakatsu Hosaka

Large Power Transformers for Thermal Power Station

Synopsis

Recently, with the continuously increasing demand for electric power energy, the installation of larger thermal power stations has been going on one after another.

At the same time, rating of transformers is also increasing. Appearance of the bulkiest thermal power transformer of unit capacity 600~700 MVA will be expected in the near future.

This article deals with some problems concerning the technical points, especially, in design and manufacturing of larger thermal transformers.

I. ま え が き

昭和 30 年ごろから、電力の主体がそれまでの水主火従から火主水従に移行するにつれて、大容量火力発電所が相ついで建設され、とくに最近の電力需要の著しい伸長と大容量化による発電単価の低減のために、発電機およびこれに直接接続されるいわゆる主変圧器の単器容量は増大の一途をたどり、近い将来には、わが国でも 600~700MVA 級の超大形変圧器が出現するものと考えられている。

このように変圧器単器容量の増大化を促進した要因は、上記理由のほかに、主要主材料の進歩、設計製作技術の向上による機器信頼度の向上などがあげられ、本稿では、火力発電所用変圧器について、とくにその大形化に伴う問題点ならびにそれらに対する種々の技術的配慮、対策などについて述べ、末尾に当社火力発電所用大容量変圧器の製作例について紹介してある。

一般に大容量火力発電所は、輸送面、用地の入手の容易さ、その他の理由で海岸地帯に設置されており、したがってここに設置される主変圧器の輸送にも当然海上輸送が採用できる。とくに当社千葉工場は海岸に隣接した変圧器製作工場であるため、この点非常に有利で、工場所有の埠頭から変圧器を組み立てたまま発電所まで直接船積輸送することが可能である。

一般に海上輸送は鉄道輸送のような外形寸法、重量などに制限を受けることはほとんどないため設計の自由度が大きく、この結果信頼度のきわめて高い変圧器を製作することが可能となる。とくに鉄心には、大容量変電所用変圧器の鉄道輸送に際して採用される 5 脚鉄心構造に比べて、軽量、低損失なる 3 脚鉄心構造を採用し得る利

点を有する。

また巻線についても火力発電所用変圧器のそれはほとんど 2 巻線となり、変電所用変圧器のような 3 巻線構造とならず巻線配置、絶縁構成にしても比較的簡単にすることができる。しかし大容量器のため、とくに低圧巻線では、その端子電圧が普通 10~20 kV の間にある関係上、低電圧大電流巻線となり、導体内のうず電流損失を低減させる意味から導体の細分化を必要とし、各導体が対向巻線と均等な磁気結合をなし、電流の不均衡をなくするような完全転位を必要とする。また高圧巻線にしても電圧によってはかなりの電流値となり、前記うず電流損などに対する配慮はもちろん必要であるが、その他タップ切換器の電流容量なども問題となる。なお超高圧の場合には、高圧巻線には耐雷特性のすぐれた巻線構造、たとえば、無振動形成層巻線、高直列容量巻線などを採用することは一般の変圧器と同様である。

火力発電所用変圧器の電圧調整は発電機の励磁電圧調整により可能となるため、わが国では、変電所用変圧器に一般に用いられる負荷時タップ切換方式ではなく、無電圧切換方式が用いられることが多い。ただし、諸外国の例では発電所用変圧器でも負荷時タップ切換方式のものも見受けられる。

そのほか、火力発電所用変圧器で一般に問題となるものとして立地条件の特殊性から要求される塩害問題などがあり、以下つぎの各項について検討を加えてみる。

- (1) 変圧器容量と重量、寸法、特性との関係
- (2) 漏れ磁束による付加損低減対策
- (3) 電磁機械力
- (4) 冷 却
- (5) 大電流巻線およびブッシング
- (6) 製 作 例

* 千葉工場

II. 変圧器容量と重量, 寸法, 特性との関係

まずはじめに以下の解説の理解を助けるために, 変圧器の容量 (kVA) が大形化するにしたがい, その寸法, 重量, 特性などがどのように変化するか大ざっぱに解説する。

周知のように変圧器設計の基本式としてつぎのものがある。

$$E = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N \cdot \phi_m \dots \dots \dots (1)$$

$$\therefore (kVA) = E \cdot I = \sqrt{2} \pi f \cdot (NI) \cdot \phi_m \\ = \sqrt{2} \pi \cdot (fi B_m) \cdot (NQ) \cdot S \dots \dots (2)$$

ここに (kVA): 容量 f : 周波数
 E : 誘起起電力 I : 電流 ($= Qi$)
 ϕ_m : 鉄心中の磁束 i : 電流密度
 B_m : 最大磁束密度 Q : 導体断面積
 S : 鉄心断面積 (NI): 巻線の全アンペア
 N : 巻回数 A : ターン

一般に (NI) を電気装荷, ϕ_m を磁気装荷といい変圧器の容量はこの両者の積, すなわち

$$(\text{容量}) \propto (\text{電気装荷}) \times (\text{磁気装荷}) \dots \dots \dots (3)$$

により定まる。また $K_e = (fi B_m)$ は容量により多少異なるが, ほとんど一定と見なしてよいから

$$(\text{容量}) \propto (\text{導体断面積}) \times (\text{鉄心断面積}) \dots \dots (4)$$

とも表わすことができる。一方, 変圧器の経済性は磁気装荷と電気装荷との比 $k = \phi_m / (NI)$ で定まり, この最も経済的な点より, k は容量にかかわらずほとんど一定の値となるので

$$(kVA) = \sqrt{2} \pi f \cdot \frac{\phi_m^2}{k} \propto f \cdot S^2 \dots \dots \dots (5)$$

となる。鉄心直径 D は $D \propto \sqrt{4/\pi} \cdot S^{0.5}$ であるから

$$D \propto \left(\frac{kVA}{f} \right)^{0.25} \dots \dots \dots (6)$$

となる。すなわち, 鉄心直径は容量の 0.25 乗に比例するから, 変圧器寸法は $(kVA)^{0.25}$ に比例するといえる。

また, 鉄心窓面積 F_w 中に占める導体総断面積の割合が一定であれば

$$F_w \propto (NQ) \propto \phi_m \propto \left(\frac{kVA}{f} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (7)$$

となり, 鉄心および鋼材重量についてはほぼつぎのようになる。

$$\text{鉄心重量} \propto (\text{鉄心断面積}) \times (\text{鉄心窓面積})^{0.5} \propto (kVA)^{0.75}$$

$$\text{鋼材重量} \propto (\text{導体総断面積}) \times (\text{鉄心直径}) \propto (kVA)^{0.75}$$

したがって, 変圧器の中身重量は $(kVA)^{0.75}$ に比例する。このことは, 各部寸法比が n である相似の 2 個の変

圧器を想定すると, 第 1 表の関係が成り立つことから

$$\text{寸法} \propto (kVA)^{0.25} \quad \text{重量} \propto (kVA)^{0.75} \dots \dots (8)$$

となることが推定できる。ただし, 実際には寸法比が n であるといっても絶縁寸法まで n 倍する必要はなく, とくにタンク, プッシングなどの構造部分の増加は少ないから寸法や重量の増加の割合は前記の関係よりもさらに小さくなり総重量はほぼ $(kVA)^{0.6-0.7}$ に比例する。

第 1 表 相似変圧器の寸法, 重量, 容量の比較

Table 1. Comparison of dimensions, weights and capacities in similar-figure transformers

寸 法	n
導 体 総 断 面 積	n^2
鉄 心 断 面 積	n^2
重 量	n^3
容 量	n^4

つぎに変圧器の発生損失は B_m, i が一定であるならばほぼ重量に比例すると考えてよく

$$\text{損失} \propto \text{重量} \propto (kVA)^{0.75} \dots \dots \dots (9)$$

となる。このため変圧器の規約効率

$$\text{効率} = \frac{\text{容量}}{\text{容量} + \text{損失}} = 1 - \frac{\text{損失}}{\text{容量} + \text{損失}} \\ \approx 1 - (kVA)^{-0.25} \dots \dots \dots (10)$$

すなわち, 当然のことながら大容量器になるほど効率は向上する。しかし実際問題としては, 大容量になるにしたがい, 後ほど述べる付加損の増大があり, かつ, 鉄損もその構造が中容量器と若干異なるため単位重量当たりの損失が増え, 総じて大容量器になると損失は式(9)よりもわずかながら増加の傾向にある。それゆえ, 効率の増加の傾向は式(10)よりも若干すくなくめとなる。

変圧器の価格は重量と大きな関連があり, 仮に中身重量に比例するとして $(kVA)^{0.75}$ に比例し, 単位 (kVA) 当たりの価格, 損失ともに $(kVA)^{-0.25}$ で減少する。これから大容量器ほど当初の建設費も運転経費も節減できるから非常に有利であるといえる。たとえば容量が 10 倍になれば単位 (kVA) 当たりの価格は約 56% に減少し, 損失も 5.6 倍にしかならないから, 効率は格段に上昇し, 大容量化とともに価格, 効率とも非常に有利となる。

以上は相似変圧器として大容量化の寸法, 重量, 特性等について述べたが, 容量の増大とともに, 以下のいろいろな問題点を考慮する必要がある。

III. 漏れ磁束による付加損低減対策

変圧器巻線に負荷電流が流れたとき一次、二次の各アンペアターンは互いに打ち消し合うが一次、二次巻線間に存在する磁束はそのいずれか一方の巻線としか鎖交しないので、これを漏れ磁束と名づけている。変圧器のインピーダンスはこの漏れ磁束の量により定まるのであるが、一方この漏れ磁束は付加損誘引の原因となるものである。

変圧器の負荷損は直流抵抗損とこの付加損とに分離することができる。このうち付加損は巻線中に発生するうず電流損失と巻線の支持締付部（フレーム、プレスリング）やタンクなど構造部分に発生するいわゆる漂遊損失とからなっている。この付加損の全体の負荷損の中に占める割合は容量が大きくなるにしたがい増大し、たとえば 10 MVA 級の中形変圧器で 10% 程度のものが 300 MVA 級の超大形器となると 30% 程度にまで増大する。

1. 漏れ磁束量

変圧器には鉄心中を通る主磁束 ϕ_m のほかに前述のように巻線より発生し構造部分を通り抜ける漏れ磁束がある。この磁束の分布は第 1 図のようになり、簡単のために軸方向漏れ磁束のみについて考えると、その漏れ磁界の強さは主絶縁部で

$$H_{ym} = \frac{NI}{H} \propto (\text{kVA})^{0.25} \dots\dots\dots (11)$$

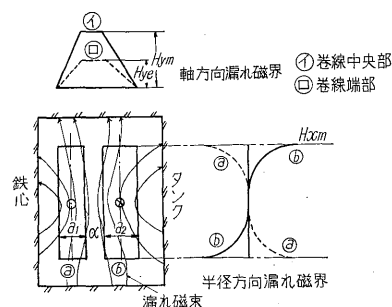
ここに H : 巻線高さ

となる（半径方向漏れ磁界の強さは、計算上、巻線端部で H_{ym} の約 50% 程度である）。

漏れ磁束の総量 ϕ_l は概略つぎの値となる。

$$\phi_l = \mu H_{ym} \cdot \left(\frac{a_1}{2} + \alpha + \frac{a_2}{2} \right) \cdot l_m \propto (\text{kVA})^{0.75} \dots\dots\dots (12)$$

ただし a_1 : 一次巻線幅 α : 主絶縁距離
 a_2 : 二次巻線幅 l_m : 巻線平均長



第 1 図
漏れ磁界の分布
Fig. 1.
Distribution of
leakage field

一方変圧器の%インピーダンス Z と ϕ_l との関係は

$$\begin{aligned} Z &\propto \frac{I}{E} \cdot \frac{N^2(a_1/3 + \alpha + a_2/3)}{H} \cdot l_m \cdot f \\ &\propto \frac{NI}{H} \cdot \frac{(a_1/3 + \alpha + a_2/3)}{\phi_m} \cdot l_m \\ &\propto \frac{\phi_l}{\phi_m} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ただし $(a_1/3 + \alpha + a_2/3) \doteq (a_1/2 + \alpha + a_2/2)$

となり、漏れ磁束量 ϕ_l は式 (13) より

$$\phi_l \propto Z \cdot \phi_m \propto Z \cdot (\text{kVA})^{0.5} \dots\dots\dots (14)$$

すなわち磁気装荷とインピーダンスの積に比例し、容量とともに増加するものである。

この漏れ磁束は後述の付加損ならびに局部加熱の原因となるものであるからできるだけ少ない方が望ましいのであるが、変圧器容量が大形化するとインピーダンスは特別の理由のない限り短絡容量、装荷比 k などにより一般に中容量器の標準インピーダンスよりも高くした方が経済的となる。このことは漏れ磁束の点を考えると相反する結果となり、このようなことから大容量変圧器では漏れ磁束対策に慎重を期す必要がある。

2. 巻線内うず電流損失

前記漏れ磁束が巻線導体を貫通するために、導体内にはこれを打ち消そうという起電力を生じ、これにより導体内にうず電流が流れる。このうず電流が導体内の一般的な負荷電流の分布と重なり合ってその分布が不均一となるために損失が増加し、この増加分をうず電流損といっている。直流抵抗損に対する割合は概略次式によりあらわせる。

$$\begin{aligned} \frac{(\text{うず電流損})}{(\text{直流抵抗損})} &\propto \left\{ \frac{f \cdot (NQ) \cdot b}{H} \right\}^2 \\ &\propto \{ f \cdot (\text{kVA})^{0.25} \cdot b \}^2 \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

ここに b は漏れ磁束に直角な方向の導体寸法である。式 (15) からわかるように、もし導体寸法 b を容量にかかわらず一定に選んだとすると、周波数が一定ならばうず電流損は容量の 0.5 乗に比例して増大する。このため、変圧器容量の増大とともにうず電流損の割合を同じに保つためには、 b 寸法を $(\text{kVA})^{0.25}$ に反比例して小さくしなければならない。それゆえ、大形器ほど導体を細分化して並列本数を増す必要があるが、並列本数が多くなると導体の紙巻絶縁のため占積率の低下を来し、機械的強度の点でも問題となるので無制限に細分化することは不可能となり、大形器ほどうず電流損の割合は増加の傾向にあるといえる。

このため、大容量器ではつぎのような方法でうず電流

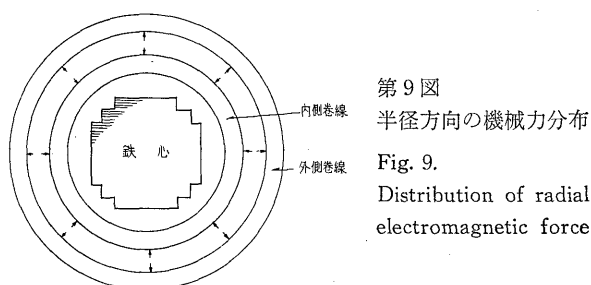
の損失にはほぼ等しく、タンク壁での損失はほとんど零に押えることが可能となり非常に効果のあることが判明した。この結果にもとづき、当社大容量変圧器のシールドはすべてしゃへい鉄心を付けることにしてある。

IV. 電 磁 機 械 力

系統の短絡事故により、変圧器巻線には大きな短絡電流が流れ、高低圧巻線間には強大な電磁機械力が発生する。巻線が同心配置の場合(内鉄形)、この機械力は巻線を圧縮または押し広げようとする半径方向電磁機械力と、巻線を軸方向に動かそうとする軸方向電磁機械力とにわけることができる。

1. 半径方向電磁機械力とその対策

同心配置巻線の場合、半径方向の電磁力は第 9 図の矢印のように、軸方向漏れ磁界と巻線電流とにより、内側巻線を圧縮し、外側巻線を押し広げようとする方向に作用する。



この電磁力の大きさは次式により与えられる。

$$F_r \propto l_m \cdot \frac{(I_s N)^2}{H} \dots\dots\dots (16)$$

ここに I_s は短絡電流で $I_s \propto I/Z$ となるから

$$F_r \propto \frac{l_m}{H} \cdot \left(\frac{IN}{Z} \right)^2 \dots\dots\dots (17)$$

一方、前述の関係から (式 13 参照)

$$\frac{l_m}{H} \cdot \frac{IN}{Z} \propto \frac{\phi_m}{a_1/3 + \alpha + a_2/3}$$

となるから、半径方向力 F_r は

$$F_r \propto \frac{\phi_m}{a_1/3 + \alpha + a_2/3} \cdot \frac{IN}{Z} \propto \frac{(kVA)^n}{Z} \dots\dots\dots (18)$$

ただし $n=0.75 \sim 1$

となる。また、この半径方向力 F_r により巻線導体に生ずる圧縮および引張り応力は

$$\delta_r = \frac{F_r}{2\pi NQ} \propto \frac{\phi_m}{a_1/3 + \alpha + a_2/3} \cdot \frac{i}{Z} \propto \frac{i}{Z} \cdot (kVA)^m \dots\dots\dots (19)$$

ただし $m=0.25 \sim 0.5$

となる。すなわち、半径方向力、応力とも、容量とともに増大するから、構造上強度のすぐれた設計を必要とする。応力の許容限界は巻線導体により必然的に定まるから (たとえば銅の場合約 $1,000 \text{ kg/cm}^2$)、変圧器が大形化すると、式 (19) からわかるようにインピーダンス Z の小さい場合には、ある程度電流密度 i を小さくして応力を許容限界以内に保たせなければならない場合もある。この場合、電流密度 i を小さくすることにより、負荷損や冷却の面で楽な方向に行くことになる。

2. 軸方向電磁機械力とその対策

実際の変圧器で、その耐短絡構造を定める上で最も問題となるものは、半径方向電磁力よりもむしろこの軸方向電磁力である。この電磁力は、半径方向漏れ磁界分布が巻線上下で非対称となることに起因して発生するものである。この半径方向漏れ磁界の現れる原因として

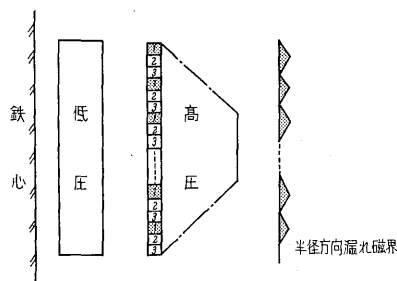
- 1) 巻線上下端での漏れ磁界の曲がりによるもの
- 2) 高低圧巻線間のアンペアターンの不平衡によるもの

がある。1) の漏れ磁界の曲がりによる非対称性は、巻線上下端より鉄心上、下部ヨークまでの距離の差により生ずるものであるが、普通ほとんど差がないものとみなしてよく、この点でとりわけ問題とする必要はない。むしろ追求しなければならないのは 2) の方であり、これのアンペアターンの不平衡となる原因として次のものがある。

- (1) 高圧巻線の端部絶縁強化による磁気中心のずれ
- (2) 高圧巻線のタップ穴の影響によるもの
- (3) 並列回路の転位の不完全さによるもの
- (4) 組立工作の誤差による磁気中心のずれ

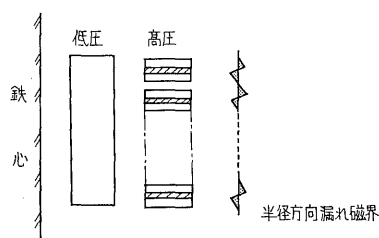
(1) に関して問題となるのは円板巻線の場合であって、無振動形成層巻線のように円筒巻線の場合には、各層について導体絶縁は一様となっているので、これにより半径方向漏れ磁界の非対称は生じない。また 100 号以下の高圧巻線には、普通、円板巻線 (双線輪、単一線輪および高直列容量巻線など) を使用するが、この場合には巻線自体を数ブロックに分け、巻線の直列容量 K を大きくさせインパルス電圧特性を定める $\alpha (= \sqrt{C/K})$ をほとんど 1 に近づけ、巻線全体を均等絶縁にできるように配慮して、この非対称性をなくしている。

(2) のタップ穴の影響に対しては、一般に並列巻き円筒タップ巻線を採用し半径方向の漏れ磁界の強さを第 10 図に示すようにきわめて小さくさせている。たとえば、1 タップ間ターン数が n ターンならば、このタップ穴を巻線中央にまとめて配置した場合に比し電磁力は $1/n^2$



第 10 図 並列巻円筒タップ巻線の半径方向漏れ磁界の分布
(3 タップ方式にて 1 タップのみ通电の場合)

Fig. 10. Distribution of radial direction leakage field in parallel wound cylindrical tap winding



第 11 図 円板巻線のタップ穴配置例

Fig. 11. Example of tap parts arrangement in disc winding

となるため、これによる機械力はほとんど生じないものとみなしてよい。このことは第 11 図のように巻線を数ブロック分割してタップ穴を分散させた場合にも同じことであり無電圧タップ切換方式で円板巻線の場合に相応する。

(3)については転位の箇所ですでに述べたように、対応巻線と各並列回路とが同等な磁気結合をなすように配列し、火力発電所用変圧器の低圧巻線は、とくに並列数が多く普通数十本程度となるから、この点について十分な配慮が必要となる。また低圧の口出しリードの配置も適当に配分し、口出し部を境にしてアンペアターンの不平衡を生じないようにしなければならない。

(1)~(3)は巻線構造の合理化によって十分に小さくできるが、(4)による軸方向力 F_a は磁気中心のずれ ΔH の巻線高さ H に対する割合と半径方向力との積にほぼ比例する。

$$F_a \propto \frac{\Delta H}{H} \cdot \frac{(\text{kVA})^n}{Z} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし $n=0.75 \sim 1$

いまかりに ΔH を大容量器でも中容量器なみに押えることができるとして

$$\frac{\Delta H}{H} \propto (\text{kVA})^{-0.25}$$

$$\therefore F_a \propto (\text{kVA})^{0.5 \sim 0.75} \quad \dots\dots\dots (21)$$

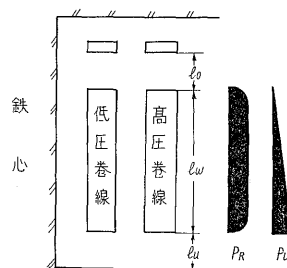
となる。大容量器となるとこの ΔH をできるだけ小さくするため、前締め、乾燥などの前処理を十分に施し細心の注意を払って製作するのはもちろんであるが、必要に応じ磁気中心ずれの測定を行ない、高低圧巻線間のこのずれを最小限にするように留意している。しかし、締付、乾燥処理による寸法の変化量も大きいので設計時にこのことを充分に考慮する必要がある。

3. 巻線の前締めと乾燥処理

前項までは電磁力の発生の諸原因、大きさなどについて述べたが、巻線自体についていえば、磁気中心ずれをきたさないためにも前締め、乾燥などの前処理を充分に行ない、ゆるみのない構造とする必要がある。

1) 前 締 力

短絡時巻線にゆるみの生じない構造にするには巻線にあらかじめ適当な圧縮力を与えておく必要がある。この力を前締力といい、これは各巻線中に占める絶縁物と導体寸法の割合、巻線上下における絶縁距離の大きさ、さらに短絡時に発生すると予想される電磁力の大きさによって異なり、当社ではこれを理論的、実験的に求めている。



第 12 図 軸方向力の分布

Fig. 12. Distribution of axial electromagnetic force

る。いま簡単な構造のものについてこの力を求めてみる。

軸方向力を受けた際、まず変形するのは巻線中および巻線上部、下部の絶縁間隙中の絶縁物である。

巻線の軸方向ずれによる力を P_v 、巻線自身の圧縮力を P_R として、それらが第 12 図のように分布しているとする。また巻線中および巻線上、下部の絶縁物の長さを l_w, l_o, l_u 、軸方向力に対する受圧断面積を S_w, S_o, S_u として、巻線および l_u 部の収縮量はつぎのようになる。

$$\Delta l_w \propto (0.5 P_u + P_R) \left(\frac{l_w}{S_w} \right) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\Delta l_u \propto P_u \cdot \left(\frac{l_u}{S_u} \right) \quad \dots\dots\dots (23)$$

いま、前締力 P_v で締め付けたとすると絶縁物の収縮量は

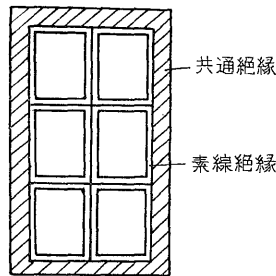
$$\Delta l \propto P_v \left(\frac{l_o}{S_o} + \frac{l_w}{S_w} + \frac{l_u}{S_u} \right) \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる。 $\Delta l = \Delta l_w + \Delta l_u$ となるように締め付けておけば、

損の低減を行なっている。

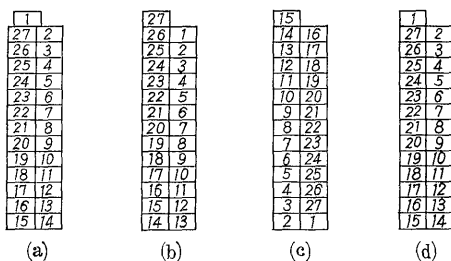
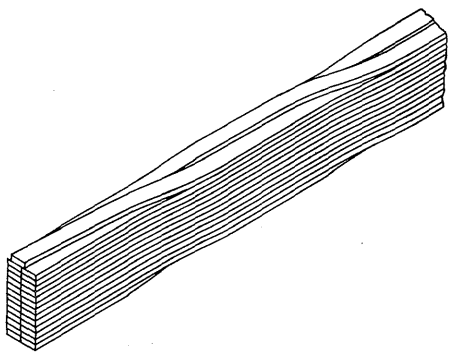
(1) 一般に内鉄形変圧器では、その漏れ磁界の分布は第1図に示すように巻線中央部で軸方向成分が強く、巻線上、下端部で半径方向成分が強くなるので、巻線中央部では導体厚を小さくし、巻線上下端部では導体高さを小さくするように導体寸法を決める。このように漏れ磁界の成分の強弱に応じて導体寸法を定めるのも一方法である。

(2) 大きな断面積を有する導体を細分して多数の並列導体に分割する場合、各並列素線にはわずかの絶縁を施し、それらをまとめて必要なだけ絶縁するいわゆる複合絶縁導体を採用して占積率と冷却性能の向上を図る。第2図にその一例を示す。



第2図 複合絶縁導体
Fig. 2. Common paper insulation conductor

(3) 非常に薄い素線絶縁を施した導体を第3図のように配列し順次転位する。いわゆるトランスポーズド・コンダクタを採用する場合もある。



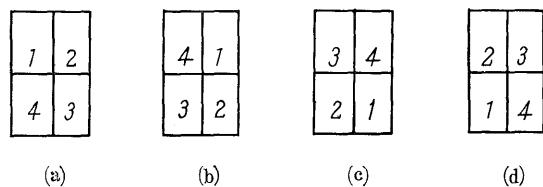
第3図 トランスポーズド・コンダクタ
Fig. 3. Transposed-strip conductor

(4) 並列回路間の転位について

上記のように大容量になるにしたがい、うず電流損低減の意味から導体の細分化が行なわれ、並列回路数がどうしても増加する。普通数本ないし数十本の導体に細分されるが、各導体と漏れ磁束との鎖交数に差が

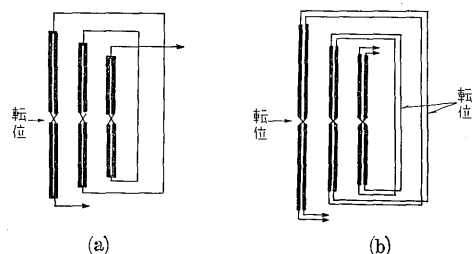
あると、各導体の誘起起電力に差を生じ並列回路内で循環電流が流れる。このためせっかく導体を細分してもこの循環電流のため損失が増加してしまう。それゆえ巻線中で各導体の相互位置を順次入れ換え(これを転位とよぶ)、それぞれの導体の漏れ磁束との鎖交数を同じにして、この誘起起電力の差をなくし、循環電流を阻止している。

大容量器となるとこの転位箇所が必然的に増加し、このために余分の空間を必要とするが、普通巻線の絶縁や冷却に必要な空間を巧みに利用して巻線の絶縁や機械的強度を低下させずに転位を行なっている。たとえば、第4図に田形、4並列導体の転位順序を示し、



第4図 4導体の転位例
Fig. 4. Example of four conductors transposition

図の(a)→(d)で1回の転位を終了する。また第5図は多層円筒巻線の転位の一例(半径方向に2本並列の場合)を示したものであり、巻線中央ではもちろん転位を行なうが、(a)のように巻き始め巻き終りにおいても各並列回路間を結ぶことはせず、(b)のように並列回路を全部分離して直列に接続し層間の渡り部でも転位を行ない、並列回路内での循環電流を消殺する。すなわち、並列回路での漏れ磁束によるループ起電力が零になるように接続し、全循環回路の直列抵抗を高くさせ、導体厚みの薄いことも相まって、この両転位により循環電流を完全になくし、うず電流損失を大幅に低減させることができる。

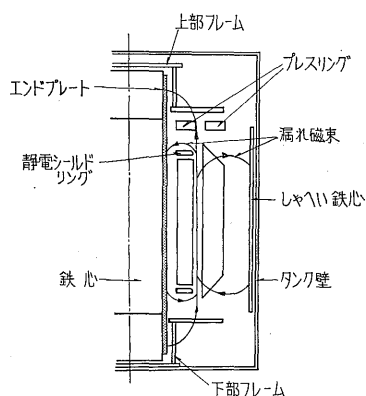


第5図 成層巻線の並列導体の転位例

Fig. 5. Example of parallel conductor transposition in cylindrical layer winding

3. 構造材における漂遊損低下対策

一般に変圧器の構造部分(タンク、フレームなど)は



第6図 漏れ磁束対策
Fig. 6.
Protections against
leakage flux

軟鋼材でできているため巻線から生じた漏れ磁束は第6図に示すように透磁率の高い鉄心、タンクなどの構造部分に集中し、そこを通過して再び巻線に帰ってゆく。この場合、途中で磁性体があると、漏れ磁束はその部分に集中し、金属のような塊状の場合、この漏れ磁束を打ち消そうとするうず電流が流れ、これにより損失が発生し、局部過熱の原因ともなる。このような構造部分で発生する損失には一応の理論式はあるが、実情と合致し難く明確に求めることがむずかしい。しかしこの値は漏れ磁束量に比例すると想定され式(14)からもわかるように大容量器ではとくに大きくなり、かつ容量が大きくなっても巻線とタンクの間など、絶縁上必要な距離は別に大きくする必要はないので、構造部に集中する磁束の程度は大容量器ほど強くなり、漂遊損の増大を一層招くので、容量が大きくなるにしたがい、これを低減させることが一つの重要な課題となってくる。この漂遊損低下対策として次のものがある。

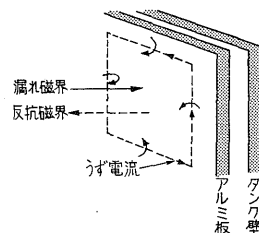
1) 巻線近くには金属材をできるだけ使用せず、なるべく非金属材料または非磁性体を採用し、漏れ磁束に直交する金属部の幅は可能な限り狭くする。たとえば、静電シールドリングは有機樹脂積層材の表面に薄い金属を巻きつけたものを使用する。

やや巻線から離れているが、漏れ磁束の集中する部分、たとえば巻線締付リング、支持部（フレーム）および鉄心エンドプレートなどには非磁性鋼を用いる。

2) 巻線近くの構造材、たとえば、フレームなどにはうず電流の流れる回路をしゃ断する方法により、機械的な強度を低下させずに構造を合理化、軽量化して漂遊損を減らす。

3) 漂遊損の最も大きく発生するのは漏れ磁束の帰路に当たり、かつ重量の最も重いタンク壁である。この部分で発生する損失を減らすには、タンク壁中に漏れ磁束が入り込まないようにすればよい。これには次のような磁気シールドの方法がある。

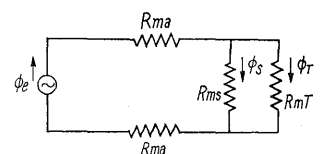
(1) タンク壁内側にアルミ板シールドをはり、漏れ磁束がタンク壁に向かってアルミ板を貫通する際に生ずるうず電流により反抗磁界を作って、もとの漏れ磁界をうち消し、タンク壁の発生損失をアルミ板の発生損失に転換する方法（第7図）。



第7図
アルミシールドの作用

Fig. 7.
Effect of aluminum
shield

(2) 透磁率の高い、かつ発生損失の少ないけい素鋼板より成るしゃへい鉄心をタンク壁の内側にはり、漏れ磁束がこのしゃへい鉄心内を通るようにしてタンク壁に入り込まないようにする。第8図はこの状態の等価回路を示したものである。すなわち、シールド板の透磁率はタンクのそれに比しかなり大となる



R_{mT} : タンクの磁気抵抗
 ϕ_i : 巻線から発生する漏れ磁束
 R_{ma} : 巻線からシールド板までの磁気抵抗
 ϕ_s : シールド板中の漏れ磁束
 R_{ms} : シールド板の磁気抵抗
 ϕ_T : タンク中の漏れ磁束

第8図 けい素鋼板シールドの等価回路

Fig. 8. Equivalent circuit of silicon steel shield

から、シールド板の磁気抵抗(R_{ms})はタンクの磁気抵抗(R_{mT})に比し相当に小さくなる($R_{ms} \ll R_{mT}$)。それゆえ、シールド板中の漏れ磁束(ϕ_s) $\gg$ タンクの漏れ磁束(ϕ_T)となり、 $\phi_i \approx \phi_s$ となるから、漏れ磁束(ϕ_i)のほとんどすべてがこのけい素鋼板のシールド板中を通ることになる。

以上2種類あるが、実際に比較検討したところ第2表のとおり、(1)のアルミシールドの場合には余り効果がなく、うず電流による発生損失が比較的大きくタンク壁中の発生損失の肩がわりができないため効果がないものと思われる。これに比し、(2)のしゃへい鉄心の場合には、その負荷損は変圧器中身をタンクに入れられない状態のとき

第2表 負荷損変化の例

Table 2. Example of variations of load loss

試験器の 状 態	シールド な し	シールドなし タンクなし	アルミ シールド付	けい素鋼板 シールド付
負荷損の 変 化	100	93.5	98.5	92.5

短絡時でも l_0 部にゆりみを生じないはずである。したがって

$$P_v \propto \frac{(0.5P_u + P_R) \left(\frac{l_w}{S_w} \right) + P_u \left(\frac{l_u}{S_u} \right)}{\frac{l_0}{S_0} + \frac{l_w}{S_w} + \frac{l_u}{S_u}} \quad \dots (25)$$

となる。実際には絶縁物の乾燥処理、あるいは運転中の経年変化による収縮なども考慮して、この前締力を決めている。一般に当社の超高压巻線の代表例である無振動形成層巻線などの円筒巻線は軸方向寸法に占める絶縁物の割合はごくわずかであり、乾燥収縮による影響は少なく、巻線自体も強固にでき上るため前締力は比較的少なくてすむ。

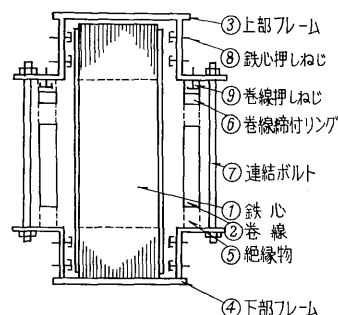
2) 乾燥処理

電磁力の発生源たる巻線が機械的に真に強固であるためには、巻線自体の支持、締付装置が強固で、かつ電磁力の小さいことはもちろん必要であるが、経年使用中の絶縁物の老化収縮などによる巻線自体の変形を完全になくしておくことも大容量器にとっては必須条件といえ、この点の処理を巻線製造過程において充分に行なっておく必要がある。絶縁物の収縮には乾燥、加圧などによる物理的変形と経年使用中の老化変形とがある。このうち、乾燥、収縮などの物理変形は絶縁物に完全な乾燥処理を行ない、かつ、充分に締め付けることにより防止できる。しかし老化収縮は完全乾燥処理を施した絶縁物でもきわめて徐々に進行する。しかし、その程度はきわめてわずかであり、当社での検討によれば、前記前締めを行なうことにより補償できることが判明している。したがって完全乾燥処理を施した絶縁物はある限度内の荷重に対し弾性体的作用を呈し、前記前締力が弾性限界内の荷重であるならば経年使用中の老化収縮を完全に補償し、巻線がゆるんだりする恐れもなくなる。

ここでいう完全乾燥というのは、当社が現用している「100~110℃ で、かつ真空度 0.1 mmHg 以下での真空加熱乾燥」を指している。当社での巻線の乾燥処理は、コイル巻き上げ後、真空乾燥、圧縮、油含浸の前処理を行なってから、更に中身組立状態でもう一度真空乾燥、油含浸を行なっているの、これにより巻線の経年変化がほとんど生じないようになっている。

4. 機械力伝達経路

第 13 図は変圧器中身の構造概念図を示したものである。鉄心①および巻線②は上下フレーム③④に収められ連結ボルト⑦により上下に締め付けられている。鉄心①は上下フレームから押えボルト⑧により水平方向にクラ



第 13 図 変圧器中身の締付

Fig. 13. Compression of core and winding

ンプされているが、上下方向の支持は行なっていないので、この方向には互いにすべることが可能である。巻線②は対地絶縁⑤および巻線締付リングを介して上下フレームの間にそう入され巻線押しねじ⑨によって締め付けられている。

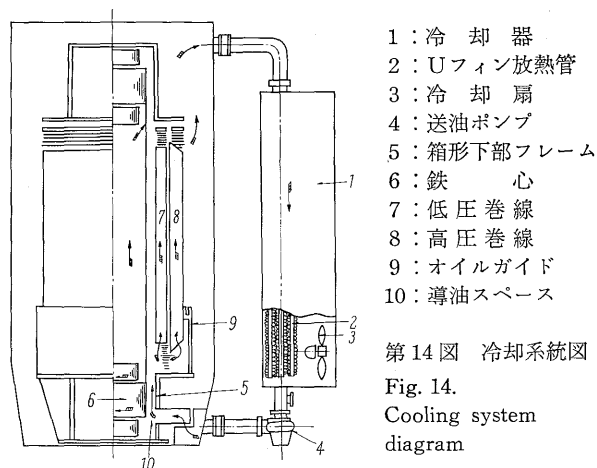
したがって、巻線の締付力、軸方向機械力あるいは上部フレームで中身をつった場合の鉄心、巻線の荷重は連結ボルトのみに伝えられるから、鉄心に外力が加わらずすべて連結ボルトに伝達されるので、鉄心には、歪力が与えられず、その良好な特性が保たれるという特長がある。

V. 冷 却

変圧器の損失は $(\text{kVA})^{0.75}$ で増加するのに対し、放熱面積は $(\text{kVA})^{0.5}$ でしか増加しない。したがって単位面積当たりの放熱量、すなわち、熱流密度は $(\text{kVA})^{0.25}$ で増加することになる。

1. 巻線の冷却

巻線の冷却を合理的に行なうためには油が巻線、鉄心中をどのように流れているかを掌握しておく必要がある。そのため当社では巻線断面の実物大モデルによる三次元の通油実験を行なって適正な冷却構造を決定してい



- 1 : 冷却器
- 2 : Uフィオン放熱管
- 3 : 冷却扇
- 4 : 送油ポンプ
- 5 : 箱形下部フレーム
- 6 : 鉄心
- 7 : 低圧巻線
- 8 : 高圧巻線
- 9 : オイルガイド
- 10 : 導油スペース

第 14 図 冷却系統図

Fig. 14.
Cooling system
diagram

る。

第 14 図は冷却系統の説明図であるが、冷却器で冷された油はタンク下部の横壁を通して鉄心と下部フレーム間の導油スペースで一度すべてまとめられ、そこから高压巻線、低压巻線および鉄心に適正量の油が分配されるような構造をとっており、効果的な冷却が行なわれると同時に局部過熱の生じないように配慮してある。また負荷に応じて冷却器運転台数を制御しても油流が場所的に不均一となることはない。巻線の油に対する温度上昇は

$$\theta_{ow} = w \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{\lambda} \right) \dots\dots\dots (26)$$

w ：巻線表面の損失密度 d ：導体絶縁厚さ

α ：熱放散係数 λ ：絶縁紙の熱伝導率

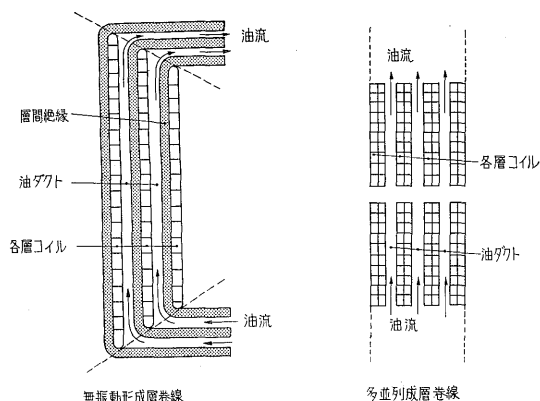
となる。 θ_{ow} を低くするにはまず w および d を小さくする必要がある。前述のような複合絶縁導体を使用することによって、巻線内のうず電流損を小さくし、かつ導体の占積率を高めているのも、一つにはこの理由からである。

θ_{ow} を小さく押えるためには、さらに α を大きくする必要がある。 α は巻線表面の油速の関数でおよそ油速の 0.7 乗に比例して増加するので、油速をむやみに高くすることは送油ポンプの動力を大きくするだけで返って不利となる。当社では、放熱管内の油速と調和をとりながら巻線表面の油速を 25～30 cm/sec に選んで θ_{ow} を 15～20℃ に入るようにしている。

1) 円筒形成層巻線の冷却上の特長

この種の巻線として第 15 図に示すような無振動形成層巻線と多並列成層巻線（ブロック巻線）とがある。その冷却上の特長として次のものがある。

- (1) 軸方向の油ダクトを適正に配置することにより巻線導体の油流に接する面積をかなり大きく取ることができるので、熱流密度 w が小さくなり、 θ_{ow} を小さく



第 15 図 円筒巻線の冷却系統

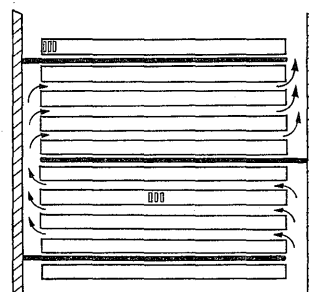
Fig. 15. Cooling system in cylindrical winding

することができる。

- (2) 各層のコイルは平等に油流に接することができるので、コイルに局部過熱の発生する心配がない。
- (3) 円筒形成層巻線の導体絶縁は、円板巻線などのそれに比し、ある程度薄くすることができるので、式(26)の第 2 項を小さくできる。
- (4) 油は層流をなし流れるので必要な流速を得られやすく、 α を大きくすることができる。また巻線各部のヘッドロスも比較的正確につかむことができるので、油流を適正な配分にすることができる。

2) 円板巻線に対す冷却上の配慮

円板巻線に対しては θ_{ow} を小さくするために油ダクトを適当数配置して w を下げているが、油流の流れは円筒巻線のようにはゆかないので、 α は円筒巻線に比し一般に小さくなる。このため大容量では第 16 図のごとく適当な油ガイドを線輪間にそう入して、油流をジグ・ザグ・フローにさせ円筒巻線と同程度の冷却効果を持たせ θ_{ow} が小さくなるように配慮する。



第 16 図
円板巻線における油の
ジグ・ザグ・フロー

Fig. 16.
Zig zag oil flow in disk
winding

2. 油 の 冷 却

大容量変圧器ではほとんどがユニット・クーラを本体タンクの周囲にとり付けた送油風冷式となり、この場合当社では油—空気熱交換器として U フィン放熱器を使用している。U フィン放熱管は放熱面の空気のフィルムをかき乱すことによって熱放散をよくするもので、単に放熱面積の増大を目的とするエロフィン管よりも放散効果がすぐれているばかりでなく、空気抵抗も小さいことが一般に知られている。この空気抵抗の小さいことは送風器の動力が小さくて済むことになる。U フィン管の内部はらせん管をもうけて油のうず流をおこさせ、油からパイプへの熱伝達をよくしている。

またユニット・クーラの個数は $(kVA)^{0.75}$ で増加するのに対し、取付面積は $(kVA)^{0.5}$ でしか増えないから大容量器になるにしたがいクーラの配置が問題となる。冷却風の流れを適正にし、暖められた空気が逆流しないよ

うに適当なしゃへいなどが必要となる場合もある。

VI. 大電流巻線およびブッシング

火力発電所用大容量変圧器の低圧巻線の電流は、通常の変電所用変圧器と異なり、10 kA のオーダーにもなるので並列本数は必然的に増加し、100 本に近い並列回路となる。この場合、前記うず電流損に対する配慮はもちろんのことながら、一番重要なのは多並列回路の転位である。これに対しては前記転位の項でも述べたように、導体 1 本 1 本が対向巻線と均等な磁気結合をなすようにモデルにより実測を行ない、電子計算機により分析して適正な配置による転位を定めている。また巻線より引出すリードもアンペアターンの不平衡を生じないように適当な配置(たとえば巻線円周上数個所に分散させる)とし、並列回路を巻線上、下部にてすぐにまとめず、漏れ磁束量も考え巻線外部の適当なところまで引き出してまとめている。

一般に火力発電所用変圧器の低圧巻線は三角結線であるが、リード、ブッシングなどの電流容量を線路電流の $1/\sqrt{3}$ に低減させるために各相両端を 1 本ずつのブッシングで引き出し、計 6 本のブッシングにより、普通外部で三角結線を行なっている。

このように電流容量を減らしても低圧リードの電流は相当の大きさとなり、断面もかなり大きくなるので、表皮効果を避けるためにパイプ状のものを使用する。

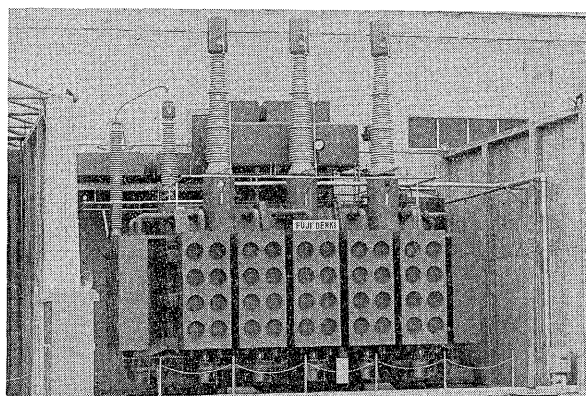
またリード引き回しに対しては、リード自体のアンペアターンがかなり大きく、それによる漏れ磁束が当然問題となるので、できるだけ漏れ磁束量が小さくなるように配置すべきである。たとえば、三相変圧器では各相のリードをなるべく近接させるか、または同相リードで電流が逆むきのものを近接させるかして、合成アンペアターンができるだけ零となるように配置し、近くにある構造物材での標遊損の発生を防いでいる。

アンペアターンの零にするような配置をとれない場合には、巻線の漏れ磁束に対すタンク壁と同じように、リードの通る箇所にはしゃへいけい素鋼板をもうける。またリードがブッシングより引き出されるタンク貫通部では金属構造物が 1 ターンを作るので、ここも非磁性鋼を使用し、標遊損の発生を防いでいる。

その他リード配置上、短絡時の大電流に対する機械力を考慮する必要がある。またブッシングについては低圧側は相分離母線に接続される関係上密閉箱内に収納されるので、塩害は問題とならないが、高圧ブッシングに対しては通常塩害に対する注意が必要となってくる。

VII. 火力発電所用大容量変圧器の製作例

最近製作納入した、火力発電所用大容量変圧器のうち、代表的な東京電力、川崎火力発電所納入 210 MVA 変圧器(第 17 図)および、常磐共同火力・勿来火力発電所納入 210 MVA 変圧器(第 18 図)の概要を紹介する。第 3 表は各変圧器の仕様を示す。



第 17 図 東京電力・川崎火力発電所 11.7/143.5kV
210MVA 変圧器

Fig. 17. 11.7/143.5 kV, 210 MVA transformer
for Kawasaki thermal P. S., Tokyo
Electric Power Co.

第 3 表 変 圧 器 の 仕 様

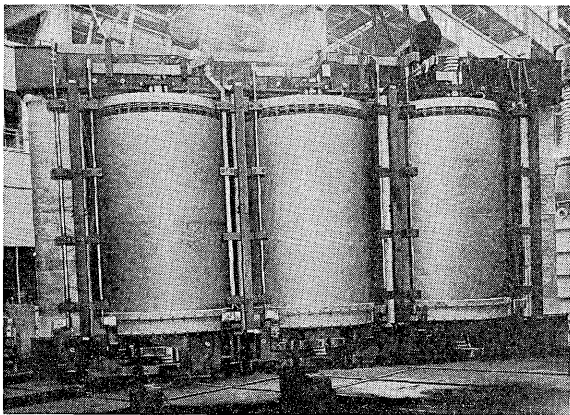
Table 3. Specifications of transformers

納 入 先	東 京 電 力	常 磐 共 同 火 力
形 式	三相送油風冷式 F T 形室素封入方式	三相別置形送油風冷式 ファールバル形 ボンベ式室素封入方式
周波数(%)	50	50
容量(MVA)	210	210
電 圧 (kV)	一次 二次 11.7/150.5-147 -143.5 ^R -140 ^F	一次 二次 11.4/69-67.5 ^R -66 ^F
絶縁階級(号)	一次 二次 20 / 140 (中性点 80)	一次 二次 20 / 70 (中性点 70)
結 線	一次/二次 Δ/Y	一次/二次 Δ/Y
総重量(t)	253	237.7 (別置冷却器 重量を含む)
油 量 (kℓ)	52.7	35.4 (別置冷却器 油量を含む)

東京電力納入 210 MVA 変圧器は、海上輸送のため、鉄心は方向性けい素鋼板を使用した 3 脚鉄心となっている。また、高圧巻線には当社標準の無振動形円筒成層巻線を採用し、低圧巻線には多並列円板巻線を採用している。この変圧器は海岸地帯の屋外に設置されるため 140 号ブッシングは耐塩害設計となっている。

第4表 製作例 (150 MVA 以上)
Table 4. Manufacture list of large thermal power transformer

注 文 主	相	周波数(%)	容量(MVA)	電 圧 (kV)	冷 却 方 式	備 考
四国電力・新徳島火力発電所	3	60	150	一次 二次 14.3/195.5-187 ^R -178.5 ^F	送油風冷式	昭38年納入
電源開発・磯子火力発電所	3	50	280	一次 二次 13.5/150.5-147 ^R -143.5 ^F	送油風冷式	製 作 中
電源開発・竹原火力発電所	3	60	265	一次 二次 12.3/115-110 ^R -105 ^F	送油風冷式	製 作 中



第18図 常磐共同火力・勿来発電所 11.4/67.5kV
210 MVA 変圧器の中身組立

Fig. 18. Assembled core and winding of 11.4/67.5 kV,
210 MVA transformer

一方、常磐共同火力納入 210 MVA 変圧器は、鉄道輸送のためファールバル形とし、鉄心は方向性けい素鋼板を使用した5脚鉄心となっている。また、高低圧両巻線とも多並列円板巻線を採用している。

大容量変圧器で最も重要な問題の一つである標遊負荷損を低減させるため、前述の一連の諸対策をこれらの変

圧器に効果的に採用していることはもちろん、その他、大電流に起因する諸問題に対しても、タンク内大電流リードの形状、配置などに十分な考慮をはらうとともに、それに対する強制冷却も行なって万全を期した。別置冷却器においては、その油流分布を測定し、冷却効果を確認した。

そのほか、火力発電所用変圧器としてすでに納入済みのもの、および製作中のものとして第4表のものがある。

VIII. む す び

以上、火力発電所用大容量変圧器について設計、製作上配慮すべきいくつかの技術上の問題点ならびに諸対策について解説したが、実際の設計時、たとえば、うず電流損失とか電磁機械力などの計算に際しては、電子計算機を充分に利用し、慎重な検討を重ねて大容量変圧器の設計に当たっている。

他に論すべき問題も多々あるが、紙面の都合により割愛する。拙稿であるが読者諸賢の参考になれば幸いである。

技術論文社外公表一覧 (昭和40年10月受付分)

題 目	所 属	執 筆 者	発 表 機 関
発電所群間の燃料サイクル	原子力部	猪 川 浩 次	FAPIG 誌第 38 号
オンオフ調節計の応用	電機技術部	木 口 和 郎	中部オートメーション技術振興会 「オンオフ制御講習会」昭40・10-13
マグノックス形動力炉発電プラントの解析評価	原子力部	穴 原 良 司	原子力10周年記念講演 昭40・10・27
水滴の接触角による潤滑油の劣化の一評価法	中央研究所	小 原 昭 二 出 因 幸	第32回学術講演会 昭40・11・26
食品製造工程の管理と計測装置の役割	計測営業部	黒 岩 峰 雄	食品機械装置誌 昭40・11月号
継電器の配電線保護への適用	電機技術部	四十万 稔	電気計算誌 昭40・11月臨時号
めっき廃水処理法	東京工場	岸 本 行 雄 豊 水 実	第32回学術講演会 昭40・11・26
シアン処理における妨害イオンの影響	東京工場	岸 本 行 雄 豊 水 実	" "
静止継電器の分類、動作原理、適用	電機技術部	四 岡 博 次	電気計算誌 昭40・11月臨時号
タービン発電機のある振動に対する考察	川崎工場	安 井 澄 夫	火力発電誌 昭41・2月号
シャルピー衝撃試験における遷移挙動および破壊靱性の評価について	中央研究所	小 林 俊 郎 高 井 耕 秀	日本金属会誌 昭41・2月号



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。