
大容量変圧器特集

大容量変圧器における最近の諸問題.....	45
変圧器巻線の半径方向座屈強度に関する考察.....	50
変圧器巻線の軸方向振動解析.....	55
変圧器漏れ磁界と損失.....	61
変圧器絶縁の開閉サージ耐力とコロナ劣化.....	66
新しい負荷時タップ切換器.....	72

大容量変圧器における最近の諸問題

Recent Progress in Large Transformer Manufacturing Technique

森 山 昌 和*
Masakazu Moriyama

要 旨

近年変圧器容量の増大は著しいものがあるが、これが高い信頼度を前提としていることは論をまたない。われわれは大容量化に伴う技術的な問題について種々試作研究を続けてきたが、本稿においては新しい鉄心、巻線構造あるいは新鋭製造設備、品質管理などの点について、主として信頼度向上の面からとりあげて報告する。

1. 緒 言

近年、火力発電用機器のユニット容量あるいは送変電系統容量などはますます増大する傾向にあり、これに伴って変圧器も大容量化の一途をたどっている。単器容量の増大は換言すれば各機器の全系統容量に占める容量比が大きくなることを意味しており、この点からも広域にわたり安定した良質の電力供給を確保するためには、機器信頼度の向上が大容量化の大前提といえよう。また具体的な製作技術上の問題についても、単に既存のデータを外そうするのみでははなはだ危険であり、一般に新たに検討を要する多くの問題を伴うものである。日立製作所においては、このような問題を解決し、信頼性の高い大容量変圧器製作態勢を整えるため、早くから日立製作所日立研究所などと協力して技術的検討を進めるとともに、新鋭製造設備の拡充整備を図ってきたので、以下そのおもな事項について主として信頼度向上の面から述べてみたい。

2. 鉄 心

2.1 大形化としめつけ構造

貨車輸送の場合は輸送高さ、したがって鉄心高さについて制限されるので、大容量器になると内鉄形三相器では五脚鉄心、単相器では四脚、五脚鉄心が採用されるが、いずれにしてもおのずから限界があり、さほど高さを増すことはできない。これに対し火力発電所では一般に直接構内に揚陸可能なため船舶輸送することが多く、高さに関する輸送限界はほとんど考慮しないので、経済的な三脚鉄心が用いられる。したがって大容量器になると鉄心高さも著しく高くなり構造上その強度が問題になる。

一方大容量器においては当然電気装荷したがって漏れ磁束量が増加するので、これに伴ってタンクのみならず鉄心を支持する金具類に生ずる漂遊損も増大する傾向にある。このため鉄心しめつけ構造としては、十分な強度を有するとともに極力小形軽量化を図り、これらの損失あるいは局部過熱をさけるよう検討せねばならない。日立製作所の標準的な鉄心しめつけ構造としては図1に示すように、鉄心冷却用オイルダクトを利用し、平ボルトを使用してしめつけるので鉄心有効断面積をほとんどへらさずしかも方向性の磁気特性を十分活用することができる。また主脚とヨークとの接合部は額縁ラップジョイントとして磁気特性の向上を図っている。

われわれは、変圧器大容量化への第一の関門は漏れ磁束に関連する問題であると考え、早くから日立製作所日立研究所内にこれに関する専門の研究室を設け大電流変圧器などを設備して、理論的な解析のみならず各種の実物大モデルによる研究を続けてきたが、ようやくその成果を実物変圧器に適用しうる段階に達し、すでに420 MVA変圧器をはじめ数台の大容量器において相当大幅な損失低減

* 日立製作所国分工場

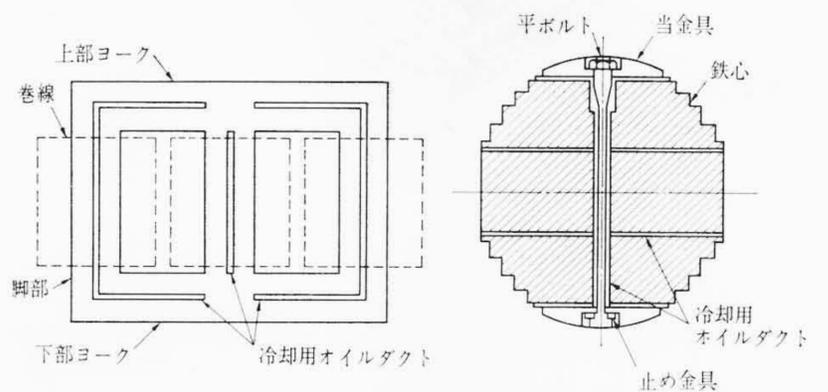


図1 鉄心しめつけ構造

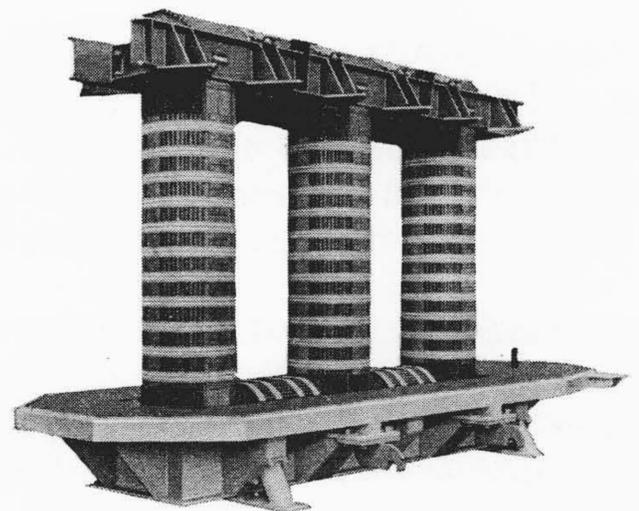


図2 バインド鉄心構造

効果を実現することができた。鉄心の大きさ、したがって必要なしめつけ強度と負荷電流による漏れ磁束の量に応じ、図1に示す当金具の材質、形状を選定し、あるいは必要に応じて当金具に適当なスリットを設け漂遊損の低減を図るなどはその一例である。

従来ボルトをいっさい使用せず適当なバンドで鉄心をしめつける構造が、比較的容量の小さいものに採用されていたが、さきに述べた理由から非金属バンドを利用しうれば大容量器における性能上の効果も大きいので、日立製作所においてはガラスバインドテープによるバインド鉄心方式を開発し、すでに100 MVA級にまで実用化しており、引き続きさらに大容量器への適用を検討している。

なお、大形鉄心においては冷却も検討を要する点である。大容量器では通常油ポンプにより巻線内に油を強制的に流し込んで冷却しているため、その一部を鉄心内の冷却ダクトに導き大きな冷却効果をあげることができた。この場合数組の巻線と鉄心とにそれぞれ必要な油流を合理的に配分する必要があるが、われわれは二次元ないし三次元のモデルを作製し各部の油流配分や温度上昇について多くの実験を行ない必要とする資料をえており、どのような大容量器についても適用しうる技術を確立している。

2.2 鉄心組立作業の改善

鉄心はまず水平に寝かせた状態で組み立てられ、積み上がった後

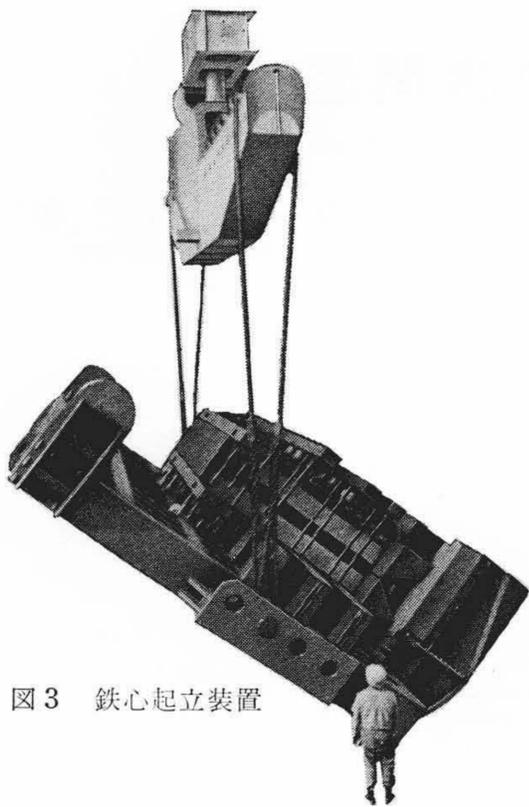


図3 鉄心起立装置

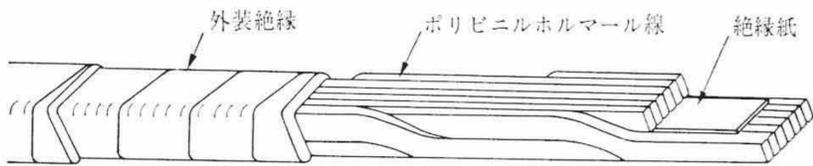


図4 転位電線の構造

直立させて巻線などを組み込むのであるが、大形特に高さの高い鉄心では起立させる過程で自重による曲げモーメントが加わるので、これが有害な応力を鉄心に与えぬよう考慮せねばならない。このため変圧器自身のしめつけ金具の強度を増すことは、一般に漂遊損の増大をまねき好ましくないので特殊なしめつけ起立装置を採用している。

すなわち、起立装置を備えた定盤の上で水平状態で鉄心を積み上げ、専用工具とジャッキによって正確に所定のしめつけ圧力を加え前述の貫通ボルトでしめつけた後、クレーンにより定盤とともに起立させるので、起立作業中に鉄心には全く曲げ応力が加わらず磁気特性に悪影響がないのみならず、鉄板のすべりも皆無になるのでボルト穴のない構造とあいまって製作上の信頼度も非常に高くなる。

3. 巻線

3.1 転位電線

3.1.1 転位電線の特長

大容量器では巻線電流が大きく導体断面積も大きくなる一方漏れ磁束も大きいので、これと直角方向の導体厚みが厚いと渦電流損も増大するため、導体厚みをうすくし多数本を並列に使用することになる。この場合並列導体相互は適当に転位して鎖交する漏れ磁束や抵抗値を均一化してやらないと、循環電流による損失を生ずるので注意を要する。また高圧巻線では素線絶縁の厚みが厚いので導体を並列に分割したおのおのを絶縁すると合計絶縁厚みが著しく増大する。これらを解決するため従来われわれは薄く紙絶縁した並列導体の外周に所定の絶縁を施した多導体を用い、円板コイル相互の接続部で転位する方式を採用していたが、以下に述べる転位電線を用いると、

- (a) より徹底した転位ができ、素線寸法の縮小とあいまって漂遊損が低減できる。
- (b) 巻線作業時の転位、接続作業がへるので、作業時間の短縮と信頼度の向上が可能となる。

などの利点があるので、日立電線株式会社に転位電線製造設備を

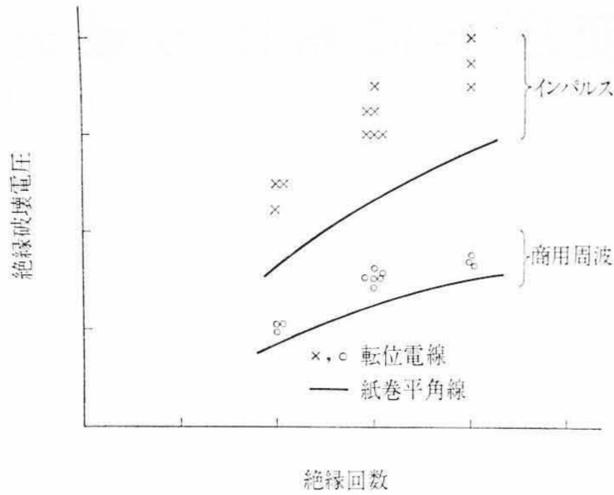


図5 転位電線の絶縁耐力

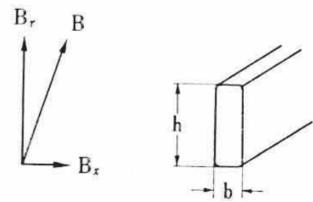


図6 電線形状と漏れ磁束

設置し、高圧大容量器に全面的に採用することにした。

3.1.2 転位電線の構造と絶縁構造

図4に示すように、断面の小さい奇数本のポリビニルホルマール線を2段に重ね、上下段で順次線を入れ換えて転位しその外周をクラフト紙で一括外装絶縁したもので、上下段間には絶縁紙を入れて仕切っている。

ポリビニルホルマール被覆は日立電線株式会社の特許によるもので、すでに小形変圧器、計器用変成器などで変圧器油中使用にすぐれた特長をもっていることが実証されているが、大容量器への採用にあたってはあらためて耐油性、絶縁特性など基礎的な点から十分検討したが満足すべき結果をえている。たとえば気中における素線間耐圧はほぼ5,000Vで、BSなどにおける1,200Vに比べ、はるかにすぐれた絶縁耐力を示している。また転位電線として完成されたものを半径15~30mmという極端に小さい曲げ半径で曲げ素線間耐圧を試験したが、ほぼ4,000Vとこれまたきわめてよい結果をえた。

なお転位電線相互間の耐圧について商用周波ならびに衝撃電圧それぞれに対して試験した結果を、一般の紙巻平角線と比較したのが図5で、若干すぐれた値を示しており高圧巻線用として十分な絶縁特性を有している。

3.1.3 渦電流損の低減効果

巻線の渦電流損算出にはまず漏れ磁束を求めることが必要であるが、この計算はHITAC 5020により容易に行なうことができる。

一般に図6に示す平角線を磁界中におくと発生する渦電流損は(1)式で表わされる。

$$W_s = \sum R(b^2By^2 + h^2Bx^2) f^2 M \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、 R: 材質などによる定数
- f: 周波数
- M: 導体体積
- Bx: 半径方向の磁束密度
- By: 軸径方向の磁束密度
- b: 平角線の幅
- h: 平角線の高さ

いま導体材質、周波数、巻線形状、巻線などをすべて同一とし、素線構成だけを変えて比較してみる。すなわち

$$\text{多導体寸法} = \text{幅} \times \text{高さ} = b_1 \times h_1 \quad (\text{素線一本当たり})$$

$$\text{転位電線寸法} = \text{幅} \times \text{高さ} = b_2 \times h_2 \quad (\text{素線一本当たり})$$

とすると両者の損失比 K_s は(1)式から

$$K_s = \frac{b_2^2 By^2 + h_2^2 Bx^2}{b_1^2 By^2 + h_1^2 Bx^2} \dots\dots\dots (2)$$

巻線形状が定まれば $Bx = kBy (0 \leq k < 1)$ となるので

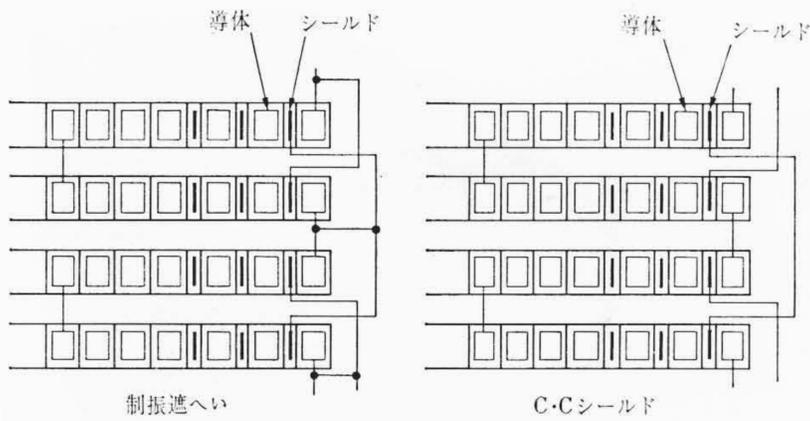


図7 遮へい方式構造

$$K_s = \frac{b_2^2 + k^2 h_2^2}{b_1^2 + k^2 h_1^2} \dots \dots \dots (3)$$

となり、たとえば幅、厚みとも半分にすれば $K_s=1/4$ となる。転位電線では素線を上下2段に配置するので h_2 を小さくすることは容易であり、素線絶縁がうすく転位が電線製造機により自動的に細かくできるので分割数を増して b_2 を小さくすることも簡単のため、大幅な渦電流損の低減が可能となる。

このように転位電線は絶縁、渦電流損いずれの面にもすぐれた特性を有しているが、さらに素線断面積が小さいことから単位長さ当たりの素線一本当たり重量が少なく長尺物がえられるので、大容量器でも継ぎ目の少ない連続円板巻線の製作が可能となり、後述するたて形巻線機とあいまって作業性がよく信頼性の高い巻線を製作することができる。すでに東京電力株式会社五井火力発電所納420 MVA 変圧器をはじめ多くの変圧器にこの電線を使用納入しているが、今後大容量高圧巻線にはこれを標準として採用してゆく考えである。

3.2 コンデンサ・カップリング・シールド

円板巻線の衝撃電圧に対する特性を改善する方法として、従来制振遮へいを標準方式として採用してきたが、この間さらに信頼度向上の立場から研究を続け巻線導体に接続しないよい新しい遮へい方式を実用化することができた。これをコンデンサ・カップリング・シールド (以下C・Cシールドと呼ぶ) と呼んでいる。この遮へい方式を転位電線を用いた連続円板巻線と組み合わせることにより、巻線作業中接続、絶縁などの作業がほとんどなくなり、絶縁的にも機械的にも非常に信頼度の高い巻線を製造することができる。

3.2.1 C・Cシールドの構造特性

円板巻線のコイル間直列静電容量を K 、コイルの対地静電容量を C 、巻線全長 l 、印加電圧を V_0 とすると、入口端より x の点の電位 V はよく知られているように(4)式で表わされる。

$$V = V_0 \frac{\sinh \alpha \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\sinh \alpha}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{C}{K}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで巻線の衝撃電圧特性の改善すなわち V の分布を直線に近づけるには、できるだけ α を小さくすなわち K を大きくしてやればよい。図7に示すように制振遮へい、C・Cシールドともコイルの中に巻線導体と並行に遮へい導体を巻きこみ、近接した導体間の大きな静電容量によって K を大きくしようとする点に変わりはないが、C・Cシールドの場合は遮へい導体を巻線導体に全く接続しないところが異なっており、このため多くの利点がえられる。

C・Cシールドは巻線導体高さとはほぼ同じ高さのうすい遮へい導体をコイル中に巻きこんであるので、巻線導体とは大きな対向面積をもっている反面、コイル外部には相互の接続部がわずかに出ているにすぎない。したがってコイル・シールド間の静電容量は露出部分の漂遊静電容量 C_s に比べ数千倍以上もの大きくなる。このため図8(a)に示すようにシールドは二つの等しい大き

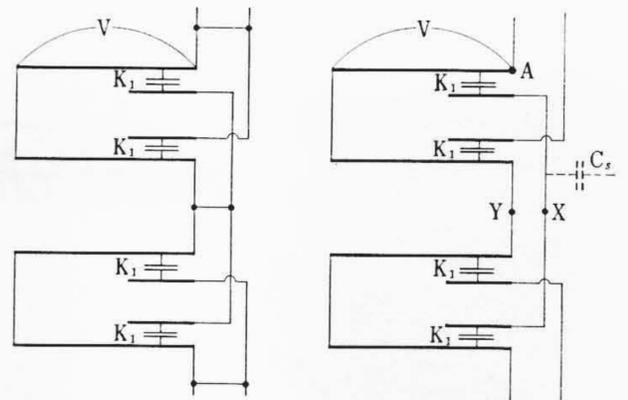


図8 遮へい構造の等価回路

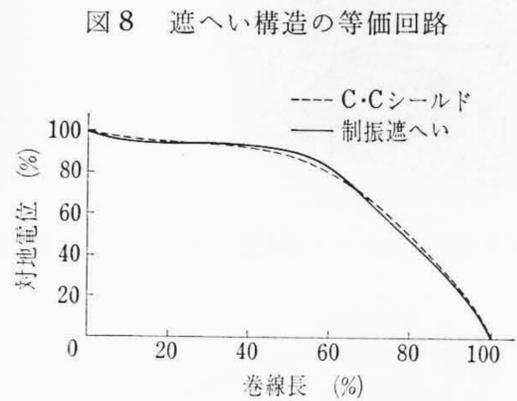


図9 C・Cシールドと制振遮へいの特性比較

さの静電容量 K_1 によって、コイルの電位と静電的に完全に結合されその電位は一義的に定まると考えてよい。これはコンデンサ・ブッシング・コイル中の導電ハクの電位が静電的に定まると同様である。ここで図8(b)におけるX点の電位について考えてみる。シールドとコイルは並行して巻線されるのでこの間の電位差は一定であり、コイル1個の電圧を V とすると二つの等しい静電容量に現われる電位差が等しいことから $V_{A-X} = 4V/2$ となる。これは巻線中央Y点の電位であり、図8(a)で示した制振遮へいではX点とY点を接続しているが、この接続の有無にかかわらず2点は同じ電位を示すことになる。言い換えればC・Cシールドが制振遮へいと同じ遮へい効果を有することを意味している。

3.2.2 C・Cシールドの効果

C・Cシールドが従来の制振遮へいと同等の効果があることを確認するため、単相154 kV、20 MVAの試作変圧器の高圧巻線を転位電線を用いた連続円板巻線として製作し、遮へい接続を加えてC・Cシールドと制振遮へいとの比較を行なった。図9は実測結果の一例であるが対地電位の分布は両者ほとんど等しく、原理的にもまた実際にも制振遮へいと同一の効果があることが実証された。なお、420 MVA、275 kV 変圧器を対象にC・Cシールドを使用した実物大試作巻線を製作し衝撃電圧破壊試験を行なった結果、全波150%まで異常なく、截断波130%でわずかに波形のひずみが見られ、ほぼ所期の絶縁強度を有することを確認することができた。

3.2.3 C・Cシールドの特長

- 以上述べたようにC・Cシールドは制振遮へいの特長をいかし、さらに改良したもので、
- (a) 衝撃電圧に対し制振遮へいと全く同様のすぐれた特性を有する。
 - (b) シールドとコイルとは接続しないので、絶縁構造が簡単になる。
 - (c) 転位電線を使用した連続円板巻線にこの遮へい方式を採用すれば、接続、絶縁作業がほとんどない信頼度の高い巻線がえられる。
- など特に高電圧、大容量器に最も適した遮へい方式といえよう。

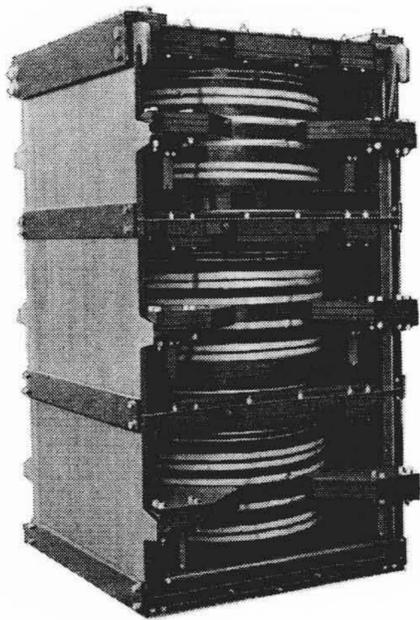


図10 900 kVA 限流リアクトル(変圧器内蔵)

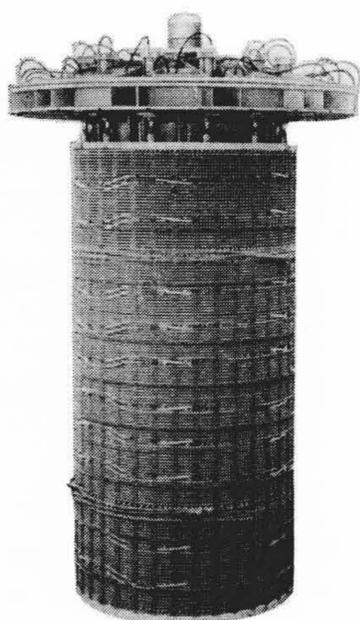


図12 たて形巻線装置

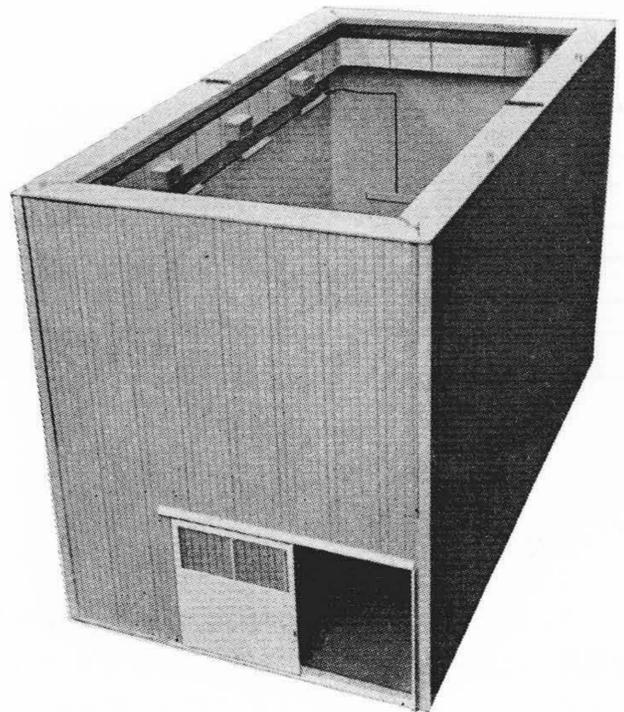


図13 中身組立用空調室

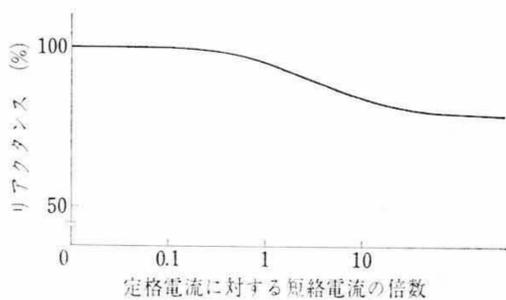


図11 限流リアクトルの電流—インピーダンス特性

3.3 三次巻線の短絡容量

巻線の機械的強度については本特集別稿に詳細報告されるので省略するが、三次巻線は一般に巻線容量、インピーダンスともに小さいので特に短絡時の機械的強度について注意する必要がある。外部回路短絡時の巻線の発生機械力および三次側遮断器の遮断容量軽減の面からはインピーダンスを大きくするのが効果的であり、従来変圧器で高インピーダンスを得よう検討されることが多かったが、これには構造上ある程度の限界があることはさげられない。これに対し本体とは別個に限流リアクトルを三次巻線と直列に設置すれば簡単に短絡容量を低減でき、強度の面からも十分な安全率を確保できる。欧米でも限流リアクトルの採用はかなり一般化しており、たとえばASA⁽¹⁾によれば変圧器三次巻線はそれ自身25倍までの短絡電流に耐える構造であればよく、短絡容量がこれを上回る場合は使用者側で限流リアクトルを設置するよう規定しており、その実施例も多い。

このリアクトルは短絡時の電流倍数が大きいので、鉄心の飽和によるインピーダンス変化をさげるため通常空心形とするが、漏れ磁束の処理など大容量化するにつれ検討を要する問題が少なくない。われわれはこの種リアクトルの必要性が今後ますます増大するものと考え、実物サイズのモデルにより実際に短絡電流を通電する試験など徹底的な研究試作を行ない、大容量限流リアクトルの製作技術を確立することができた。リアクトルの容量あるいは組み合わせる変圧器容量などにより、変圧器本体タンクに内蔵する場合と別置される場合とがある。一例として図10に250 MVA変圧器に内蔵した限流リアクトルを示したが、空心形とし外部漏れ磁束を防ぐためけい素鋼板の磁気遮へいを施してある。このリアクトルの電流—インピーダンス特性は図11のとおりで十分な限流効果が期待され、この種リアクトルの設置は大容量三次巻線の安全性確保に非常に有効な手段として、今後広くその採用が推進されるべきものと考えている。

4. 製造設備と管理の改善

4.1 たて形巻線機

大容量器では巻線自体も当然大形かつ重量も増大するので、巻線作業にも種々新たなくふうが必要になる。特に前節に述べた巻線方式の特長を十分に発揮させるためには、信頼度の面から大形巻線を連続的に、しかも最終組立状態に近い形で巻線作業することが望ましい。この目的のため、新たに大形のたて形巻線機を新設した。

この設備はたて軸の巻胴を回転しながら連続筒巻き作業を行なうもので、巻胴全体が油圧によって昇降できるようになっているので、巻線作業が進みコイルが積み上がるにつれて巻胴を地下ピット内に降下させ、巻線作業は常に床面の作業に最も適した管理しやすい位置で行なうことができる。また巻線作業時の電線張力管理はもちろん、巻線軸方向にも油圧によって所定のしめつけ圧力を加えることができ、巻線の機械的強度についていっそう安定した性能がえられるほか、さきに述べたように初工程である巻線作業から最終組立まで一貫して直立状態で作業できるなど、高圧大容量巻線製造設備として最も適しており信頼度向上への効果は著しいものがある。

4.2 空調防塵(じん)

高電圧大容量器の信頼度向上に作業環境の整備が重要であることは今さら論ずるまでもないが、今回われわれは巻線作業の当初から中身組立が完了するまで一貫して防塵、防湿した空調管理のもとに作業すると言う徹底した作業管理を行なうため大規模な設備を設けた。まず、巻線作業については、前記たて形巻線機と大形コイル組立室およびその乾燥タンクまでを一体の空調防塵室とし、温度15~28℃、相対湿度50%以下に管理している。防塵対策としては空気取入口にフィルタを設けクレーンのトロリからの摩耗粉は受け皿に、クレーン、レールの摩耗鉄粉は電気掃除機で自動的に吸い取るなど徹底した処置をした。巻線作業に必要な絶縁物も空調室内に専用保管だなを設けて調質管理するほか、完成した巻線もすべてこの室内で防湿保管し、絶縁物の吸湿、乾燥による収縮をおさえるので、巻線の各部にゆるみを生ずることがなく機械的強度が安定し、信頼度を向上することができた。

巻線単体は寸法重量とも比較的小さいので、このように固定した空調室内で作業、移動が可能であるが、中身組立の段階になると著しく大形になるので、作業法を変える必要がある。このため断熱材で側壁、天井を張り、変圧器の大きさに応じて任意の大きさに組み立てられる可搬式の防塵組立室を製作した。この中に調湿機を設置

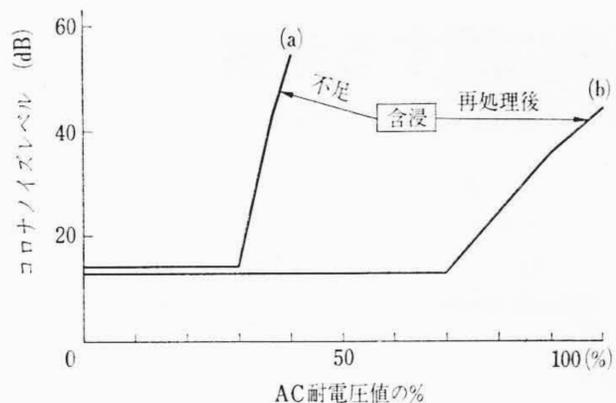


図14 油含浸とコロナ特性

し湿度40%以下に管理するので、変圧器組立の最終段階まで完全な調湿防塵が可能となり、品質向上に寄与するところが大きい。なおこの組立室は全体が可搬式であるほか、側壁、天井とも適当に閉鎖できるので重量物の搬入、搬出も容易である。

4.3 絶縁処理

絶縁処理には乾燥と油の含浸処理とがあるが、いずれも変圧器製造技術の優劣を決定する最大の要因であり、日立製作所では最重点項目として不断の研究を続けている。

4.3.1 乾燥

変圧器にはクラフト紙、プレスボードなど繊維質の絶縁材料を大量に使用するが、これらは吸湿しやすく常温、常湿で10~15%程度の水分を含有している。これらの水分は絶縁物の破壊電圧や誘電体損などに悪影響を及ぼすので、変圧器に注油する前に十分乾燥しておかねばならない。油浸紙の破壊電圧は0.8%程度の水分まではその影響は少ないが、誘電体損は0.4%程度の水分にも影響され、一方経年劣化は水分量にほぼ比例して促進されるので、少なくとも残留水分を0.4%以下に減らすことが必要である。

なお、高電圧の場合絶縁物に完全に油を含浸させ、ボイドを残さないようにするためには、いったん注油したのちは気中露出しないようにすることが望ましい。このため高電圧大容量器では変圧器タンクに中身を組み込んでタンク自身を利用して乾燥するいわゆる自己タンク乾燥法を採用し、乾燥前に必要な絶縁作業を施しておき、乾燥注油したのちは中身を気中にさらさないようにしている。

具体的な乾燥法として、乾燥初期に行なう熱風乾燥により絶縁物が酸化劣化するのを防ぐため窒素ガスを用いるほか、今回新たに大容量の可搬式高真空排気セットを設置した。この装置は変圧器カバーに直接大口径の配管を取り付けて排気できるよう一体化

されたもので、水蒸気圧 10^{-8} Torr、空気分圧 10^{-4} Torr、というようにすぐれた性能を有しているので、乾燥速度を上げるとともに残留水分、残留ガスをほぼ完全に除去することができた。

4.3.2 油含浸処理

高圧大容量器では絶縁物の層が厚く寸法も大きいので、その内部まで完全に油を含浸させることがむずかしくなるが、わずかな残留ボイドも絶縁に好ましくないので、われわれは日立製作所日立研究所の協力をえて基礎的な油含浸機構の究明から出発し、合理的な含浸処理法あるいは含浸しやすい材料の開発、さらに含浸状況の非破壊的判定など総合的な研究を続けてきた結果、注油前真空度の向上と管理限界の設定、前記排気装置の改善、絶縁筒などの材質構造の改良、熱油循環による含浸の促進など一連の高度な含浸処理基準を確立して大きな効果を得た。さらに高電圧の場合絶縁処理の管理手段として、変圧器の商用試験に先立ちコロナ開始電圧測定を行なうことにより、絶縁的に悪影響を与えることなく処理状況をチェックできることになり、品質安定の面で非常に有利となった。図14⁽²⁾はその一例で含浸不十分な場合同図(a)のようなコロナ特性を示したが、正規の処理を完了し十分油が含浸したものでは(b)のようにコロナ開始電圧、コロナレベルとも著しく改善されている。仮に(a)の状態では正規の試験電圧印加を強行すれば、場合によっては絶縁物に有害な損傷を与えることも考えられ、この方法は管理手段としてきわめて有効であるといえよう。

5. 結 言

以上変圧器の高圧大容量化に伴う設計、製作上の諸問題について、主として信頼度向上の面から二、三とりあげてみたが、冒頭にも述べたように大容量化は信頼度の格段の向上なくしては考えられないことである。われわれは設計業務特に基本的性能を左右する特性計算の完全な計算機化をすでに完成し、どのような大容量器の製作にあたって本質的な欠陥を絶滅する体勢にあるほか、本文に述べた各種製造設備の改善に引き続き、さらに鉄心処理、巻線機などの機械化、自動化につとめることにより、高信頼度合理化をより徹底し、今後ますます増大を予想される大容量器の需要に自信をもって対処する所存である。関係各位の忌憚のないご批判とご指導をお願いする次第である。

参 考 文 献

- (1) ASA: C 57-1,200-1965
- (2) 平野、永瀬: 昭和42年電気関係学会関西支部連合大会予稿 2b-1