

525kV 1,000MVA級変圧器の信頼性検証

Confirmation of Reliability for 525kV 1,000MVA Class Transformers

最近、変圧器の単器容量の増大に伴い、その信頼性に対する要求もますます強くなってきた。今回日立製作所では、525kV 1,200MVA変圧器を試作し、超大容量変圧器の設計、製造技術の確立及び信頼性の検証を実施した。

試作に当たっては、従来の設計基準の範囲を越えるものは、要素試作を事前に実施し、その結果をもとに試作器を製作した。特殊試験は、主として実器では行なえない内部関係を対象として実施し、更に、大形化した場合の問題点を明らかにすることに重点をおいた。

この結果、一般特性試験だけでなく、絶縁裕度をはじめとする各種過酷試験を行なった結果、十分信頼性のあることが検証されると同時に、特殊試験によって設計値と測定値とが良い一致を見ることをも確認し、超大容量変圧器に対する製造技術を確立することができた。

栗田健太郎* *Kurita Kentarō*
 秋丸舜二** *Akimaru Shunji*
 奥山賢一*** *Okuyama Ken'ichi*
 平野三百里** *Hirano Mihori*
 鎌田 譲**** *Kamata Yuzuru*
 平石清登** *Hiraishi Kiyoto*

1 緒 言

今や火力発電所及び原子力発電所の単器容量は、1,000MW級の時代を迎え、昇圧用変圧器も525kV 1,000MVA級となった。今後当分の間、単器容量としてはこのクラスが最大になるものと予想され、同時にベース負荷供給用として、高信頼度の要求もますます高まってきている。

日立製作所では、従来より電圧、容量に飛躍のある場合は、関連開発技術の総合的検証を実規模試作変圧器により行なってきており^{1)~4)}、今回も、前記の昇圧用変圧器を対象として、525kV 1,200MVA変圧器を試作し、超々高圧・超大容量化に伴う設計、製作上の技術的問題点を解明するとともに、その信頼性について検証した。

試作器では、その定格状態での諸特性の確認、信頼性の検証はもとより必要であるが、大容量変圧器のように、個々に仕様がほとんど異なる機器を製作する立場では、更に、設計値と測定値とを対比して設計精度を確認することも重要な課題であり、このことは試作器で得られた成果の適用範囲を拡大するものである。

以下、試作器の構造、検証内容及びその結果についての一端を紹介する。

2 構 造

試作器は、火力及び原子力発電所用1,000MVA級昇圧用変圧器の代表として、525kV 1,200MVA変圧器を選んだ。表1に本器の主な仕様を、図1にその外形図を示す。

以下、構造上の主要な点について述べる。

2.1 鉄 心

鉄心の構造は、無負荷損、無負荷電流だけでなく、振動、騒音、更に輸送重量に影響を及ぼすなど、最も重要な要素である。特に、超大容量器になるとその影響もたいへん著しくなるので、今回の試作検討で最も重点をおいたコンポーネントである。

従来、海上輸送される大容量器の鉄心はほとんど3脚構造であったが、今回は次に述べる理由から5脚構造とした。

(1) 巻線高さを一定にした場合、5脚構造のほうが重心位置が下がり、安定性の面で輸送時に有利である。

表1 試作525kV 1,200MVA変圧器仕様 表記の仕様は、火力及び原子力発電所525kV 1,000~1,300MVA級変圧器を代表する例である。

| 項 目 | 仕 様 | |
|-------------------|--------------------------------|------------|
| 形 式 | 屋外用三相2巻線送油風冷式内鉄形 | |
| 容 量(MVA) | 1,200 | |
| 電 圧(kV) | 18.525/F550-F537.5-R525-F512.5 | |
| 絶 縁 階 級 (号) | 高 圧 線 路 | 500L (Low) |
| | 高 圧 中 性 点 | 60 |
| | 低 圧 | 20 |
| インピーダンス (%) | 15/18 (50/60Hz) | |
| 周 波 数 (Hz) | 50/60 | |

(2) 高圧線路誘導試験時に、5脚構造にすることにより中性点に発生する電圧を低減できる。

この理由は、図2に示すように3脚構造の場合、誘導試験時の高圧中性点電位は高圧試験電圧の $\frac{1}{3}$ が加わるのに対し、5脚構造の場合は、一相だけを励磁して他相を短絡しても外脚が磁気回路となるため、図2に示すように誘導倍率が2*の範囲内で中性点電位を突き上げ、変圧器により任意に選ぶことができるので、3脚構造の場合に比べて絶縁距離を縮小することが可能であり、小形・軽量化できる。

鉄心の細部構造の決定に当たっては、既に開発された手法により、鉄心内磁束分布計算⁵⁾、固有振動数計算⁶⁾、及び各部温度上昇計算⁷⁾を行なって異常値のないことを確認すると同時に、軽量化の方策として、上下ヨーク及び外脚の主脚に対する断面積比を最適な値とした。また超大形変圧器での鉄心の剛性についても、従来のものとの比較をしながら検討を行ない十分な強度をもっていることを確認した。主脚及びヨークの断面積比の決定に当たっては各部の断面積と磁路長より、磁気抵抗及び磁束波形を解析して求め磁束分布計算を行なった上、更に図3に示す $\frac{1}{2.5}$ 縮尺モデル鉄心でその解析方法及び磁束分布を確認した結果、数パーセントの重量合理化を実現

* 日立製作所電力事業本部 ** 日立製作所国分工場 *** 日立製作所国分工場 工学博士 **** 日立製作所日立研究所

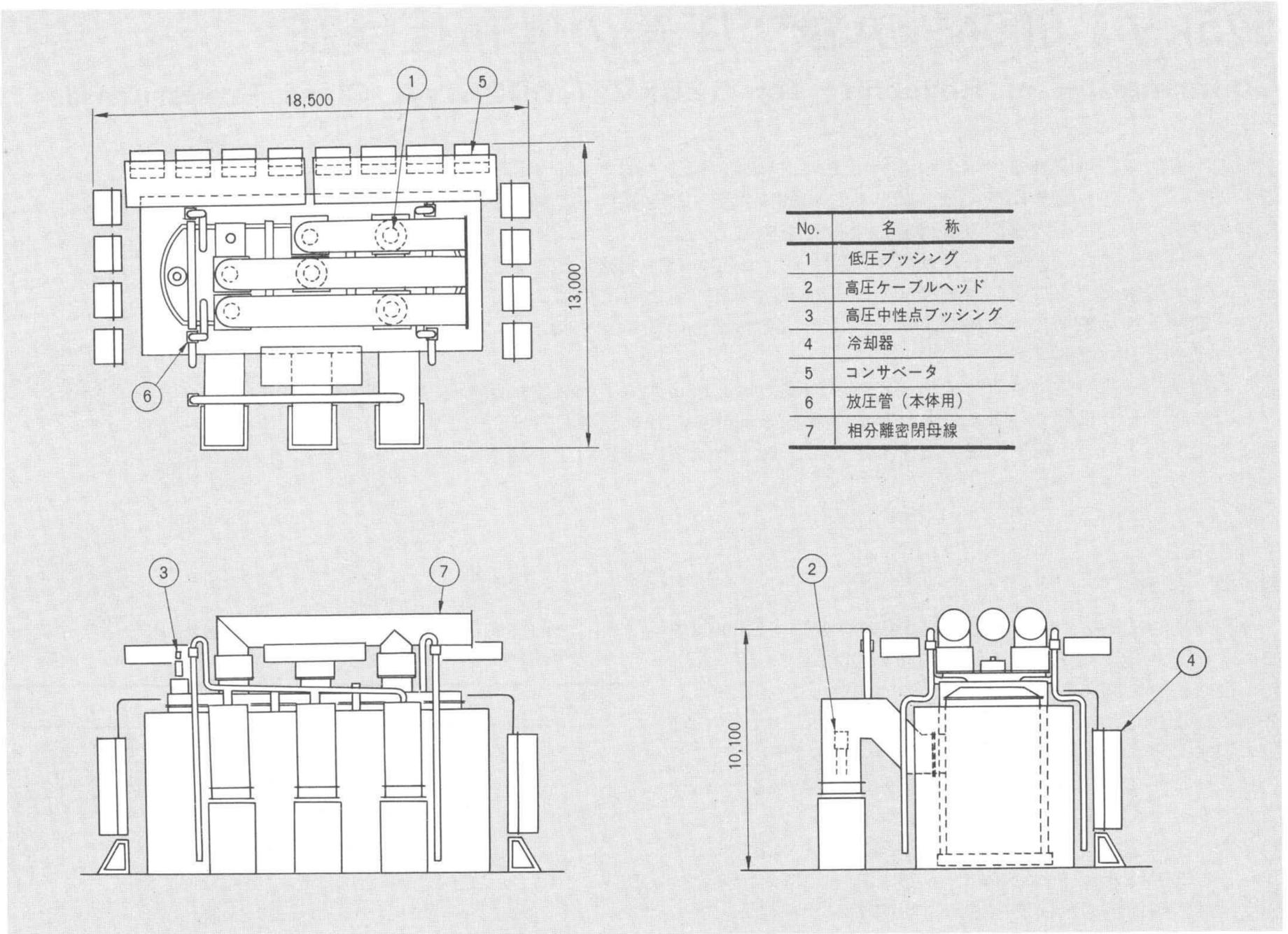


図1 525kV 1,200MVA変圧器外形寸法図 試作器の完成外形を概略示したものである。

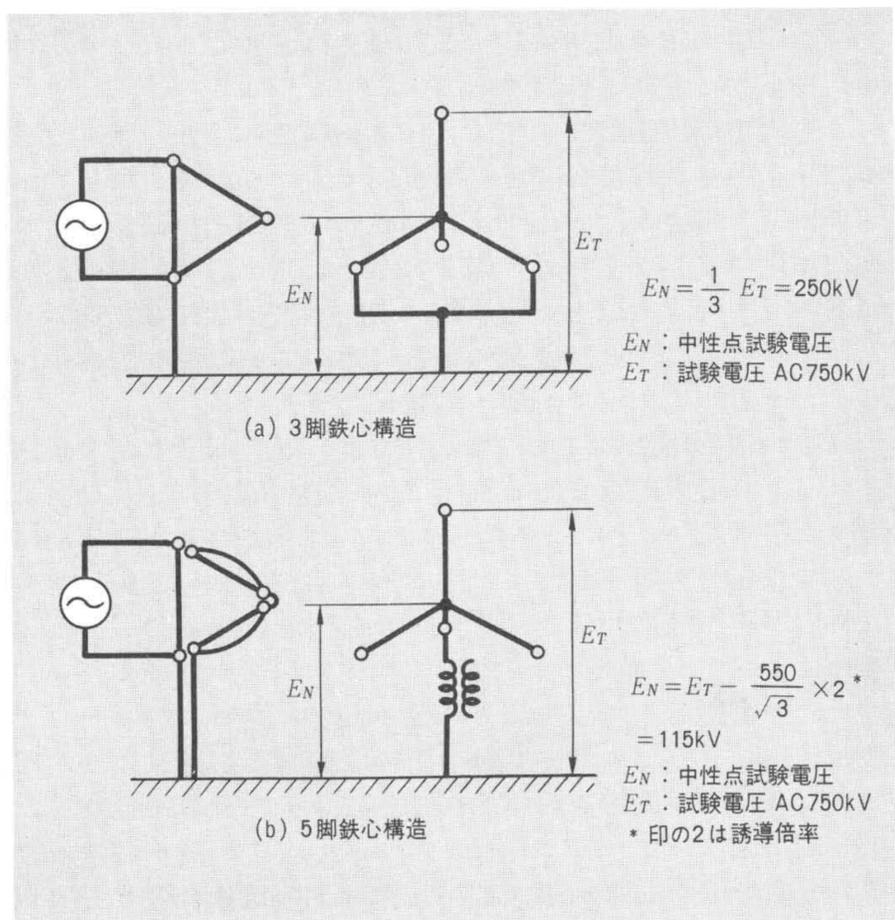


図2 誘導試験結線と発生電圧 5脚鉄心構造の場合は、一相励磁、他相短絡により、中性点電位を3脚鉄心構造の場合よりも低くすることができる。

した。また鉄心の剛性検討のために、9種類の要素モデルを作成して鉄心吊り上げ、輸送及び地震時の強度を検討し、その結果、剛性計算法が十分な精度をもっていることを確認した。

2.2 巻線

先に試作、検証した275kV 680MVA⁴⁾の巻線構造と同様に、高圧巻線2分割構造を採用し、特に巻数の内外分割比につい

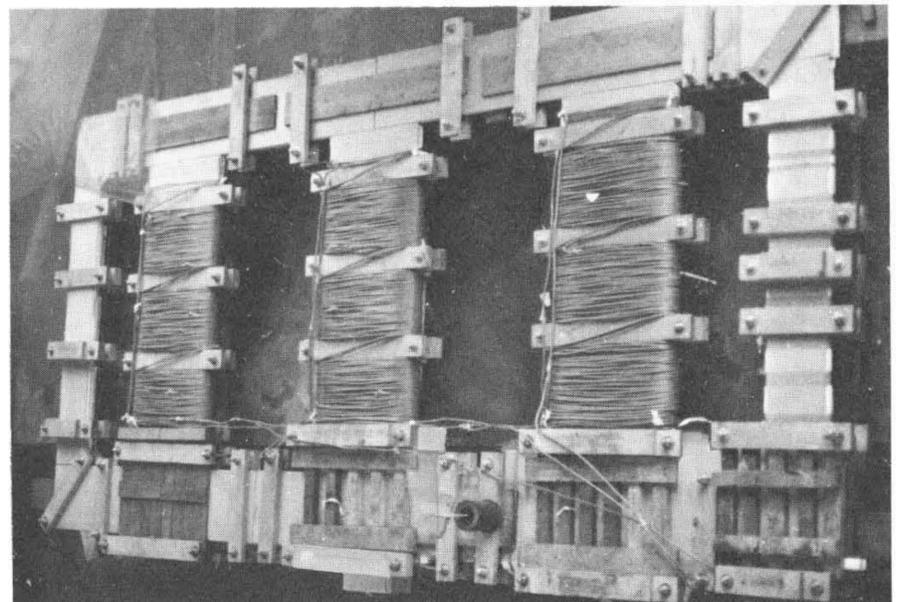


図3 $\frac{1}{2.5}$ 縮尺モデル鉄心 試作変圧器の鉄心設計に先行して、モデル鉄心中の磁束分布を測定し、計算値とよく一致していることを確認した。

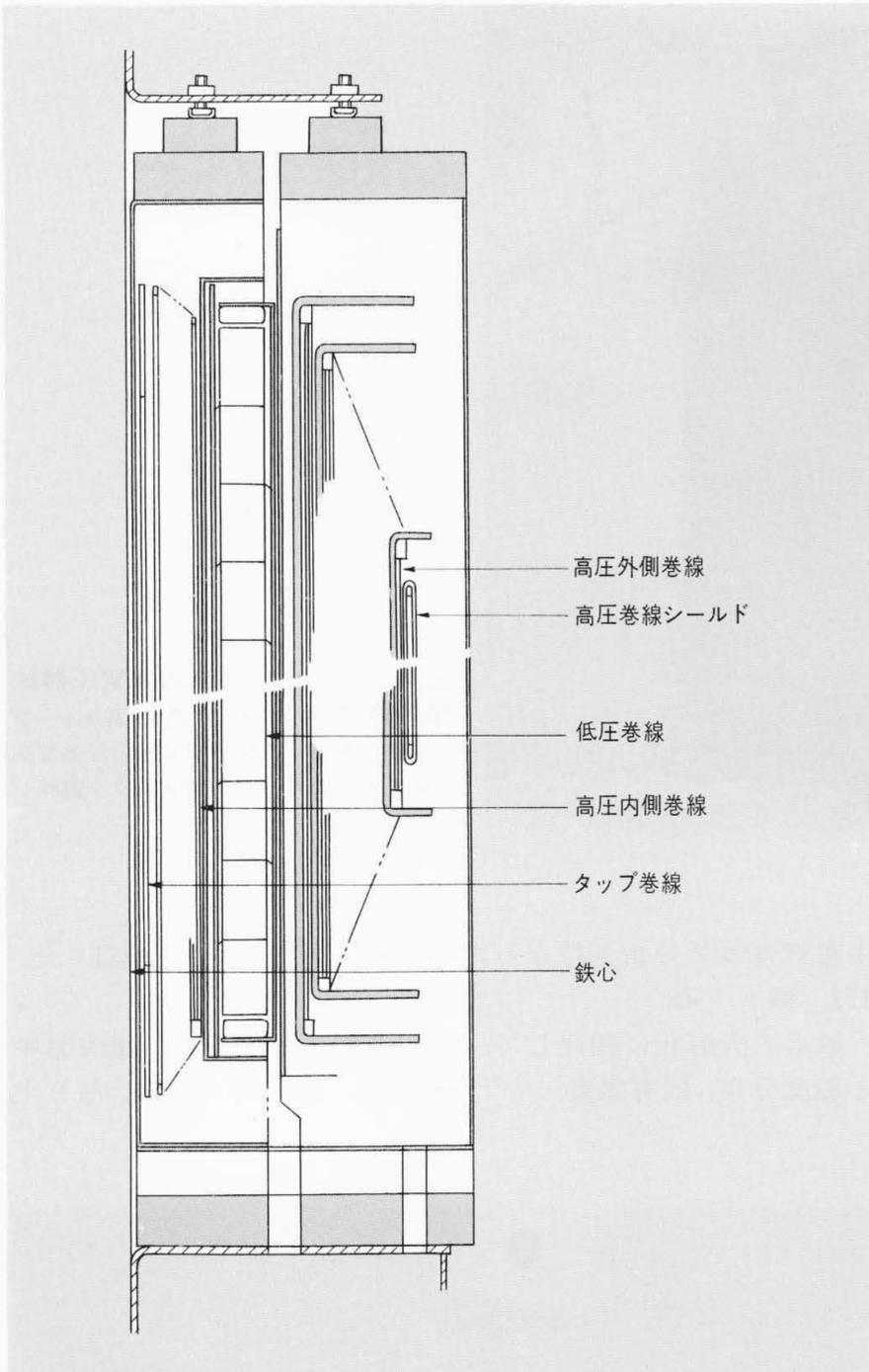


図4 525kV 1,200MVA変圧器巻線配置図 低圧巻線への移行電圧、漏れ磁束密度、輸送重量などを考慮して高圧外内巻線の分割比を決定した。

ては次の検討を加えた。

すなわち、高圧巻線へ雷インパルス印加時に、低圧巻線への移行電圧が過大にならぬよう配慮されねばならない。その値は等価回路による計算⁸⁾又は電磁モデルにより求めることができるが、高圧巻線が500kVになると移行電圧による低圧巻線内の電位振動が、その絶縁レベルをかなり超過することがあり、この絶縁上の問題を解決するために、高圧外側巻線の分割比率を大きくすることが簡単な手段であるが、分割比率増加による%インピーダンス、巻線漏れ磁束密度、鉄心重量、輸送重量、損失などを総合的に検討して、最適な分割比率を決定した。

図4に巻線の配置を示したが、高圧巻線は2分割円筒巻線、低圧巻線は多数の並列導体から成るヘリカル巻線を採用し、いずれも実績のあるものである。絶縁については、高圧線路端から上下ヨークへのクリープ破壊強度、及び線路側巻線層間貫通強度が最も重要な問題となるため、この部分の絶縁耐力を要素試作によりあらかじめ確認の上で試作器の製作を行なった。次に温度上昇については、各部の漂遊損失及び巻線内油流分布も詳細に計算することにより、局部的の温度上昇も求めた。後者については、更に二次元モデルで測定し、計算値との比較を行なってその精度を確認した。その一例を図5に示す。

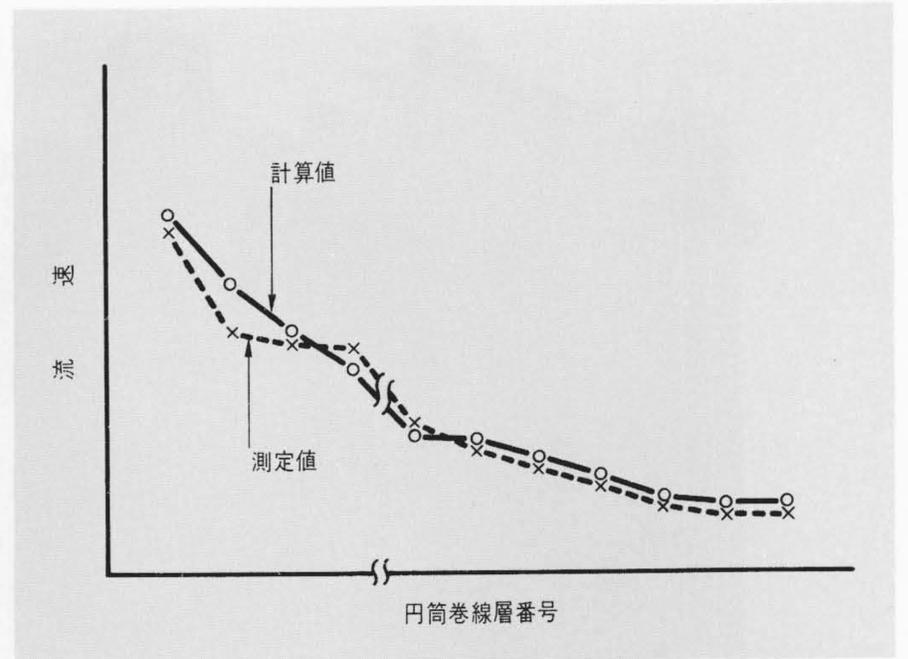


図5 高圧巻線内油流分布 発生損失に比例して、油流配分をするのが合理的であり、二次元モデルで配分法を検討した。

2.3 外箱

耐内圧強度向上、異常振動の排除による騒音低減、輸送重量の低減など、最近の変圧器外箱に要求される項目は少なくない。これらを満足するために、小判形の縦梁補強構造とし、曲面板部には補強材なしという構造を採用して要素試作と計算とで十分確認の上製作を行なった。図6に曲面板部の座屈強度実験に用いたモデルの一つを示す。これらの結果から Strum の式⁹⁾が近似性の良いことを確認し、かつ製品の不真円量にも規定値を設けるなど、品質管理を十分に行なった。図7に外箱を示す。

2.4 低圧大電流ブッシング引出し部

超大容量化に伴い低圧側の電流が増加するため、その外箱よりの引出し部の過熱防止構造が大きな問題点となる。本試作器では図1に示したように、各相ごとに低圧大電流を引き出し、カバー上で相分離密閉母線で三相結線を行なう方式とした。この方式によれば、巻線から直ちにカバーへリード線を引き出せばよく、大電流リード線引回しによるその周辺金

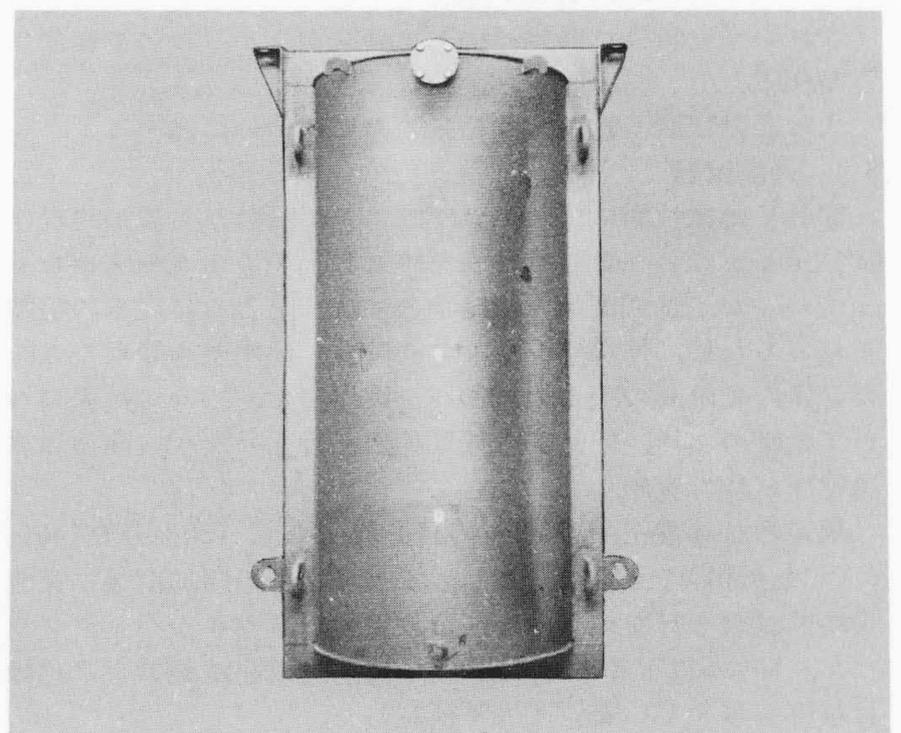


図6 曲面板部の外圧による座屈強度実験モデル モデルを真空に引き、更に外圧を加えて座屈値を求めた。

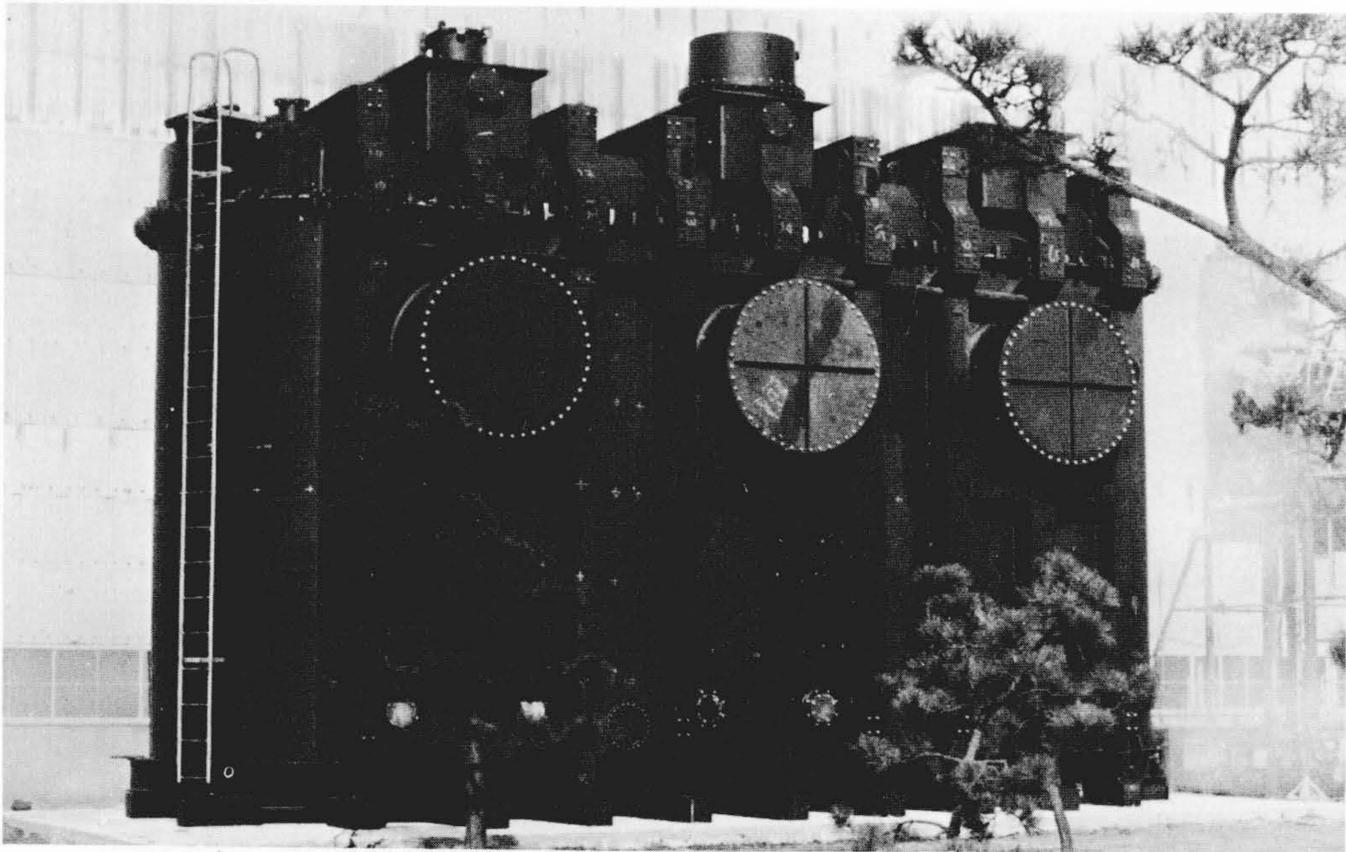


図7 525kV 1,200MVA 変圧器試作外箱 前面円形盲蓋は、高圧ケーブル接続部である。補強梁は耐内圧強度向上のため、カバーと下部タンクを連結している。

属材での漂遊損失や、局部過熱発生のおそれもなく極めて信頼性の高い構造とすることができる。

低圧ブッシング取付座には、低圧リード線電流により誘導されるうず電流が流れるので、相分離密閉母線との接続に関連して局部過熱を発生することがあるので、この座付近の温度分布については特に重点をおいて検討を行なった。

3 試験結果

試験中の試作器を図8に示す。

試作器では、JEC(電気規格調査会)-168に規定された一般特性試験のほかに、絶縁を主とした過酷試験、各種設計値を検証して信頼性を確認するための一連の特殊試験を実施した。

一般特性試験では、500kV側について絶縁仕様がJEC-168に未規定であったため、当時電力会社で標準としていた規定によって下記を実施した。

- (1) 雷インパルス試験：全波1,550kV、さい断波1,780kV
- (2) 開閉インパルス試験：1,175kV
- (3) 交流長時間試験：476kV(60分)-635kV(5分)-476kV(60分)

これら一般特性試験は、すべて異常がなかったため結果は省略する。

次に過酷試験、特殊試験結果の概要について述べる。

3.1 過酷試験

500kV絶縁技術については、既にその設計から現地処理作業に至るまでの一貫した技術を確立し、多くの運転実績をもっているが、試作器は、絶縁物の寸法、量ともに従来の実績を超えるため、乾燥時間、油含浸時間、油中塵埃管理などを要素試作で確認の上この試作器を製作したが、その結果について検証のため、内部部分放電検出を行ないながら商用周波過電圧試験を実施した。

規定の試験電圧AC750kVの110%、120%、130%及び140%(AC1,050kV)を順次印加し、この各電圧の印加前後に交流長時間試験を行ない、内部部分放電検出レベルがバックグラウンドレベル以下であり、140%までの過電圧試験により絶縁に損傷を与えていないことを検証した。

また、内部局部過熱の有無の検出のため、最大電流の110%電流による48時間の長時間温度試験を実施し、その前後で油

中可燃性ガス分析を行ない内部に異常のないことを検証した。

3.2 鉄心

鉄心の大型化に関連して、鉄心各部の磁束分布、損失集中と温度分布、固有振動モードと振動数、励磁時の振幅、吊り上

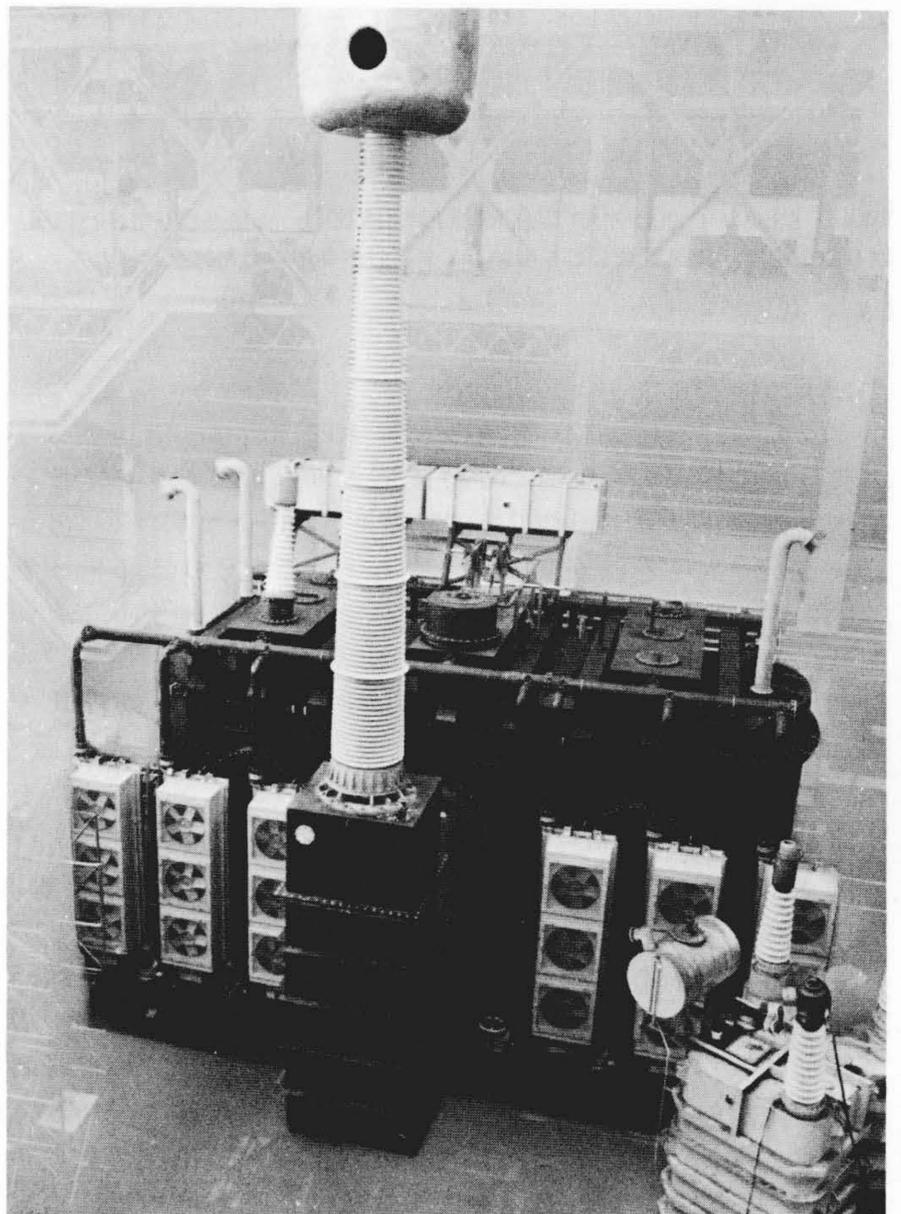


図8 試験中の試作器 高圧側はケーブル直結構造であるが、工場試験時には高圧ブッシングを取り付け、その高圧端子は部分放電防止のため、シールドを付けた。

げ時の鉄心締め金具などの応力、巻線漏れ磁束による鉄心締め金具の温度分布などの基本的特性の検討、及び確認試験を行なった。これらの信頼性確認試験によって得られた測定値は、設計値とよく一致するとともに、前述した長時間温度試験、及び騒音測定の結果からも異常のないことが裏付けされた。

3.3 巻線

高電圧化については絶縁試験で、大容量化については長時間温度試験によりその信頼性に対する検証が行なわれた。

特に、巻線端部及びリード線についてセンサを取り付け、局部温度の測定を行なった結果、巻線平均温度とほぼ同じであることを検証した。

3.4 外箱

大容量器となって外箱も大形化するが、その場合外箱の耐真空強度、耐内圧強度が重要となってくる。これらの条件下での外箱各部の応力及び変形量を実測し、有限要素法を含む各種の計算方法による計算値との比較を行ない、計算方法の妥当性及び外箱が十分な強度をもっていることを確認した。また近年は、発電所用変圧器といえども低騒音化の必要が生じており、超大容量器になるほど、その必要な騒音低減量は

大きくなるため、外箱の振動に関する研究は重要となり、試作器について多くのデータを得た。例えば、放圧管、はしご、送油配管などの配管類についても測定し、計算値との照合を行なった。

また、図9に曲面板の正弦波加振時の振動モード計算の一例を示す。100Hzよりも200Hzのほうが低次のモードになっており、これは平板の場合とは異なる特徴であり、高い周波数の騒音が大きくなる傾向のあることを示唆している。

一般に、配管類、曲面板、平板など、騒音の発生源となる部位が多数の固有振動数をもっているため、加振源との共振を全面的に避けることは困難で、減衰を大きくして共振振幅を下げる方向で検討を行なった。

3.5 低圧大電流引出し部

この部分は、大電流による局部過熱の有無が最大の問題であり、試作器及び実規模要素試作により検討を行なった。

引出し部内面のシールドには、リード線電流を打ち消さず電流が流れるが、その電流分布と温度分布測定の結果は、油温よりの上昇 10°C 以下と良好な値を示し、低圧ブッシング取付座の気中部分最高温度上昇も図10(a)に示すように、わず

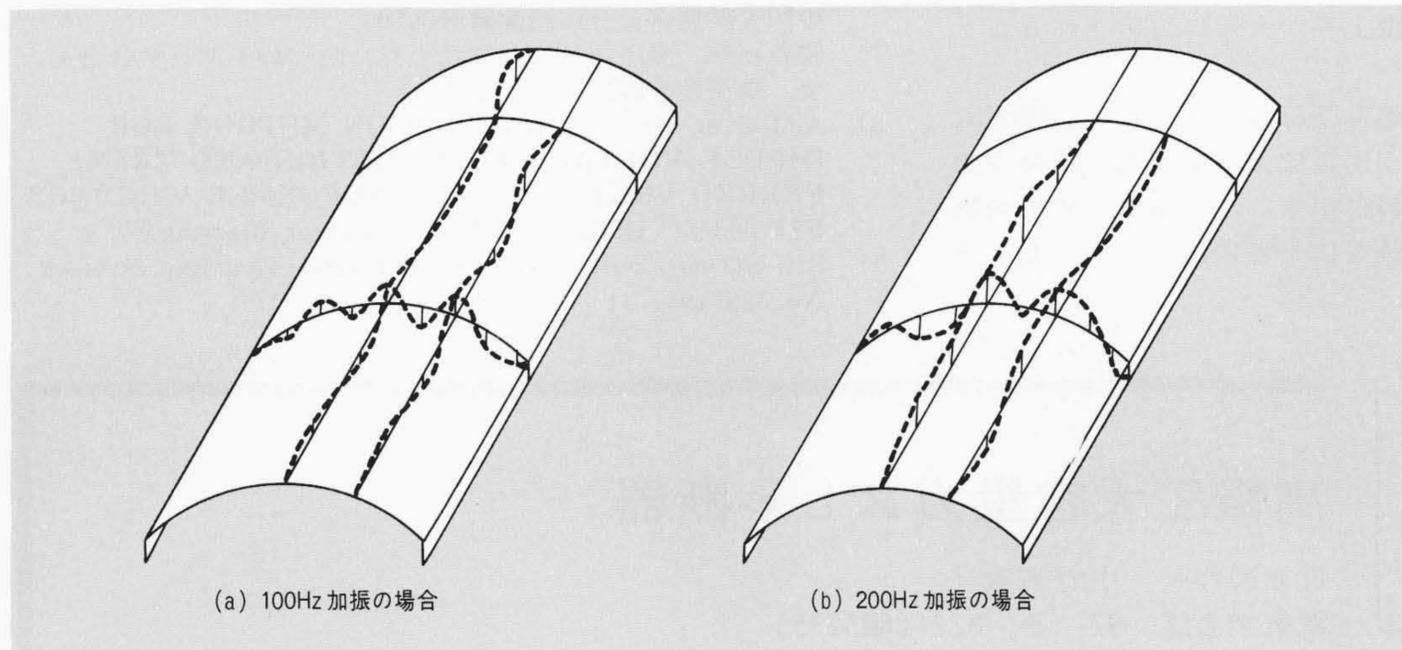


図9 曲面板の振動モード
100Hzよりも200Hzのほうが低次モードを示している。

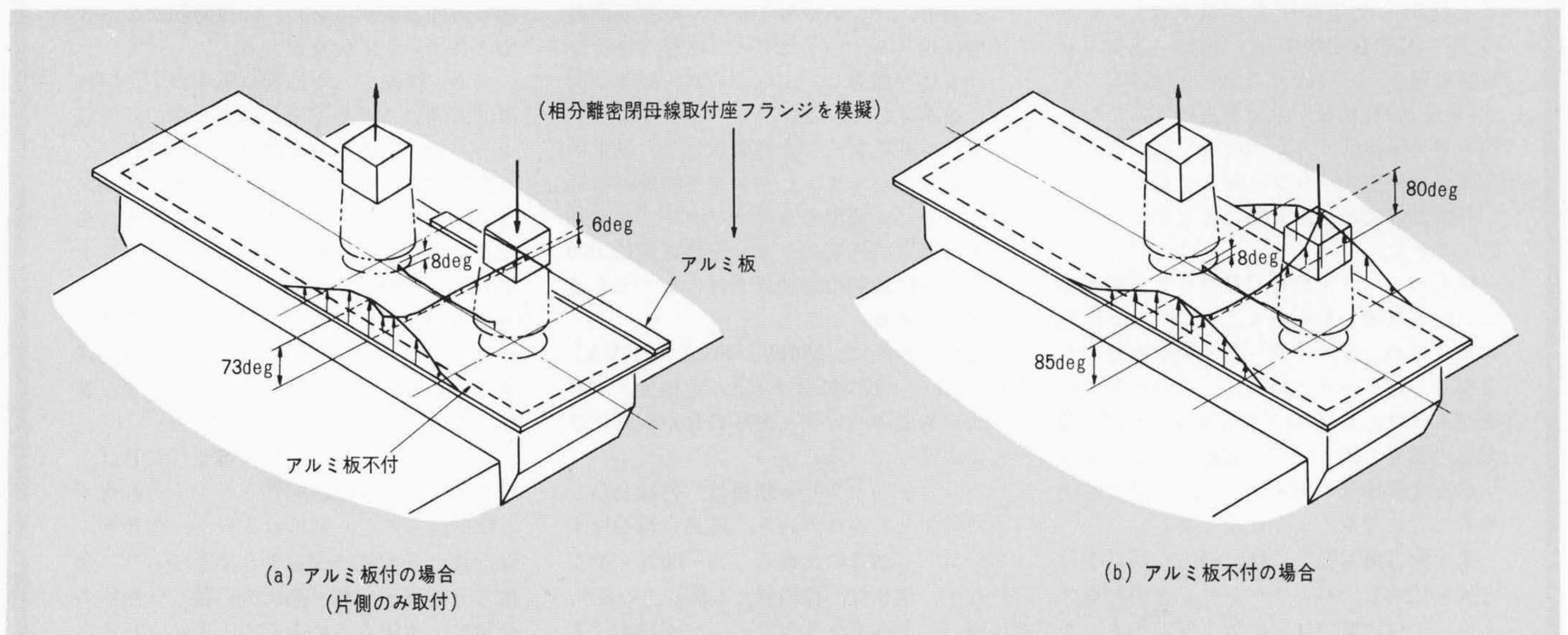


図10 大電流引出し部の温度上昇試験結果 相分離密閉母線取付座を取り付けることで、温度上昇は大幅に低減できる。

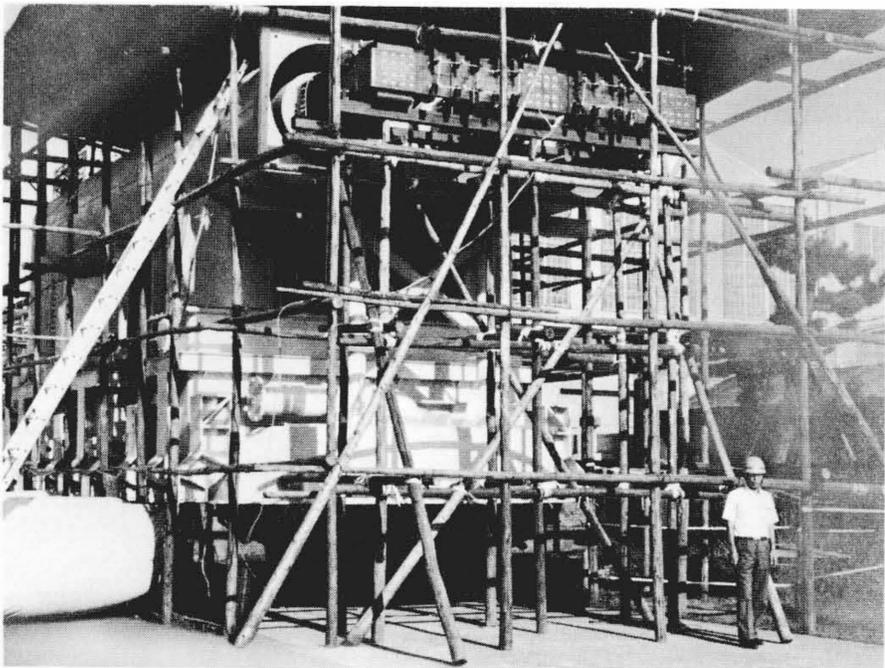


図11 低圧大電流引出し部と相分離密閉母線組合せ試験 実規模試験により定格電流を流し、局部過熱のないことを検証した。

か 8°C と極めて低い値を示している。図10(b)は、相分離密閉母線取付座を模擬したアルミ板を取り付ける以前の測定値で、日立製作所標準方式により温度上昇が大幅に改善されることが検証できた。

低圧大電流引出し部と相分離密閉母線を含めた実規模要素モデルを製作し、温度分布、うず電流分布及び漏れ磁束の測定を行なった。その状況を図11に示す。この結果、局部過熱の全くないことが分かり、今後更に大容量化に際しても十分対処できることが確認された。

4 結 言

525kV 1,200MVA変圧器を試作し、超々高圧・超大容量化に伴う、設計、製作上の問題点を具体的に摘出し、各種要素試験及び特殊試験を実施することによって直接検証を行ない、その信頼性を確認することができた。

ここで得られた成果は、単に525kV 1,200MVA変圧器だけにとどまらず、電力用変圧器全般に適用できることは言うまでもなく、今後の変圧器の製作技術向上に役立つものである。

終わりに、この試作に当たり、絶大な御指導、御援助をいただいた関係各位に対し、深く感謝する。

参考文献

- 1) 栗田ほか：275kV 300MVA変圧器の実用性能試験，日立評論，53，225(昭46-3)
- 2) 秋丸ほか：275kV 660MVA 負荷時タップ切換変圧器，日立評論，54，117(昭47-2)
- 3) 鹿島ほか：500kV 1,000/3 MVA単巻変圧器，日立評論55，219(昭48-3)
- 4) 栗田ほか：275kV 680MVA変圧器の実用性能試験，日立評論，57，671(昭50-8)
- 5) 前島ほか：三相三脚変圧器鉄心内部および外部磁束分布解析，静止器研究会TC-75-9(昭50-12)
- 6) 堀：変圧器鉄心の磁気ひずみ振動，昭和46年度電気四学会，中国支部連合大会，講演番号30509
- 7) 安齊ほか：変圧器鉄心の温度上昇，昭和49年電気学会全国大会，講演番号971
- 8) A.Miki et al. : A CALCULATION METHOD FOR IMPULSE VOLTAGE DISTRIBUTION AND TRANSFERRED VOLTAGE IN TRANSFORMER WINDINGS F77 583-8 (IEEE 1977 PES Summer Meeting)
- 9) R.G.Strum : Bull. Univ. Illinois Engineering, Exp.-station No. 329(1941-11)

論文抄録

高電圧大容量ガスしゃ断器

日立製作所 中野清蔵

電気学会誌 97-5, 372 (昭52-5)

消弧特性及び絶縁特性とも優れた SF_6 ガスを使用した超高圧大容量ガスしゃ断器(以下、GCBと略す)は、当初、空気しゃ断器と同じく、高圧ガスを吹き付ける二圧式(複圧式)GCBが主流を占めていたが、使用ガス圧が低く、かつ構造、動作原理とも簡単な一圧式パフファ形GCBが従来のしゃ断器に代わり、大幅に普及するようになってきた。

従来のパフファ形GCBは、しゃ断容量及び通電電流とも小さく、かつアーク時間が長いので、2サイクルしゃ断が困難であるなど、超高圧しゃ断器としての適用に限界があった。これらの諸問題は、大容量消弧室の開発と相まって、開極時間1サイクル高速度操作器の開発により、一挙に解決することができるようになった。

まず大容量消弧室には、軸方向同期吹付方式を採用し、パフファシリンダの初期ストロークの状態では、圧力上昇が小さいた

めガス吹付けを行わず、しゃ断可能圧力に上昇し、かつ両接触子がしゃ断可能開離距離に達して、はじめてガス吹付けを行なわせるよう配慮し、ふいごの吹付効率が大幅に改善されている。

また、通電電流の大容量化には、通電面積の大きなパフファシリンダを積極的に通電導体として使用するパフファシリンダ外周集電構造の採用により、定格電流12,000Aまで特に強制冷却装置を付けなくとも通電可能である。

これより既に、550kV, 50kA(45GVA) 8,000Aしゃ断時間2サイクル定格で、4しゃ断点構成のパフファ形GCBが製品化されるに至っている。

パフファ形ガスしゃ断器は、絶縁及びしゃ断性能とも優れており、部品点数が従来の空気しゃ断器に比較し、50~60%と少ないなど、信頼性、経済性とも優れているが、反面、一度内部フラッシュオーバーが発生する

と、従来のしゃ断器と異なり SF_6 ガスの処理に時間を要するため、修復時間が2~3倍と長くかかる欠点がある。

一方、従来のしゃ断器故障率の中で、機械的要因による故障率が故障全体の90%以上を占めている。パフファ形GCBは、しゃ断電流50kA領域から80kA定格へと超大容量化の傾向にあり、今後とも超高圧、超超高圧大容量しゃ断器の領域で、パフファ形ガスしゃ断器が主流を占めるものと考えられるが、更に、ガス中部分の信頼性及びパフファシリンダを高速度で駆動する高速度操作系の機械的信頼性の向上が重要な課題となるものと考えられる。

このようにパフファ形大容量GCBは、電界条件、機械的信頼性などを十分配慮すれば、従来のしゃ断器に比較し、信頼性、保守性とも大幅に改善されてきており、今後とも超高圧、超々高圧大容量しゃ断器の領域で、主流を占めるものと考えられる。