U.D.C. 621. 314. 222. 62. 027. 827. 5. 026. 649. 001. 41

275kV 680MVA 変圧器の実用性能試験 Practical Performance Test on 275kV 680MVA Transformer

実規模変圧器による信頼性確認の一環として,275kV 680MVA 変圧器を試作した。特性試験,過電圧試験のほかに巻線,鉄心などの磁束密度,温度上昇,応力などを多数のセンサを使用して詳細測定した結果,上記変圧器が十分な信頼を有すること及び計算値と実測値との対比によって大容量変圧器における設計精度などが分かった。

果田健太郎*	Kentarô Kurita
森山昌和**	Masakazu Moriyama
平野三百里**	Mihori Hirano
平石清登**	Kiyoto Hiraishi
上出泰生**	Taisei Uede
大谷弘容**	Hiroyasu Ôtani

1 緒 言

変圧器の単器容量増大化,超々高圧化とともに変圧器の信 頼性への認識とその検証がより重要になってきた。

日立製作所では,防塵空調室・巻線機・鉄心起立装置などの製造設備の拡充及び試験設備の整備,近代化並びに品質管理体制の強化を図るとともに,実用規模の変圧器を製作し, 厳重な諸試験を実施して信頼性を確認してきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

今回,その一環として275kV 680MVA変圧器を試作した (以下,試作器と略す)。従来,例えば変圧器各部の温度上昇 分布などを納入製品を使用して測定するには困難な部位があ 大容量変圧器における設計精度を確認することを主眼とした。

そのほか,諸元の大形化に伴い,絶縁処理が重要となるので,各種のモニタで絶縁特性を確認しながら作業を行なった が紙面の都合上詳細は割愛する。

以下,主に計算と測定を対比しながら試作器の構造,試験 などの一端を紹介する。

2 構 造

試作器は、火力及び原子力発電所用275kV 600~900MVA

り,間接的に傍証を求めるのが一般的であった。そこで,試 作器では特に一般の特性試験のほかに多数のセンサを使用し て各種の特殊試験を行ない,上記変圧器が十分な信頼度を有 することを確認するとともに,計算値と測定値を対比して,



級変圧器の代表として,275kV 680MVA 仕様とした。表1に その主な仕様を,また図1に外形図を示す。以下,構造を代 表する要素として,巻線,鉄心及びタンクにつき要点を述べ る。

表 | 275kV 680MVA 変圧器仕様 表記仕様は,火力及び原子力発電 所275kV600~900MVA 級変圧器を代表する例である。

形 式 容量(MVA)		屋外用三相2卷線送油風冷式内鉄形
		680
電儿	₹ (kV)	17.55/F287.5-R281.25-F275
絶縁	高圧線路	200
階 級	高圧中性点	80
(号)	低圧	20
インピ-	-ダンス (%)	20
周	皮数(Hz)	50

(a) 平 面 図







*日立製作所電力事業本部 **日立製作所国分工場

35

672 日立評論 VOL. 57 No. 8 (1975-8)

2.1 巻 線

導体は、うず電流損及び循環電流損の低減を図るために、 すべて転位電線とした⁽¹⁾。

高圧巻線は、非分割構造が経済的に有利であるが、インピ ーダンスが20%と比較的高くなるので、2分割円筒巻線構造 とした。また、低圧巻線は、多数の並列導体からなるヘリカ ル巻線構造とした。いずれも多くの実績のある標準構造であ るが、試作器では特に構造細部に及ぶ詳細な特性の解析を試 みた。解析例として、後述する巻線各部の温度上昇分布があ る。温度上昇分布を詳細に計算するには、各部の漏れ磁束、 うず電流損、循環電流損及び油流の正確な算出が必要である。 今回、マクスウェルの電磁方程式⁽⁵⁾により徹底して漏れ磁束な どを計算した。図2に電子計算機による漏れ磁束の分布例を 示す。また油流は各部で不均一になるので、その解析は必ず しも簡単ではない。今回は、実物大油流モデル実験を併用し て局部過熱の防止を図った。

そのほか,電子計算機による詳細な電界解析及び衝撃電圧特性計算などを実施して各部の電界緩和を図った。 図3に巻線の配置を示す。





図 3 275kV 680MVA変圧器絶縁構造(巻線の縦断面図) 変圧器仕 様のうち、インピーダンスが20%と比較的高いので、高圧巻線は2分割構造と した。





図2 巻線の漏れ磁束分布 マクスウェルの電磁方程式による,等ベ クトルポテンシャル線の分布例を示す。

36

図4 鉄心内磁束分布 定格励磁したときの鉄心内部の等ベクトル ポテ ンシャル線のうち,鉄心の上半分について示す。いずれも計算値である。

275kV 680MVA変圧器の実用性能試験 673



図5 鉄心の固有振動モード例 三脚鉄心の固有振動モードのうち, 支配的なモード例を示す。いずれも一次モードであるが、それぞれのモードに 対応した高次モードもある。

275kV 680MVA変圧器鉄心 磁束, 損失分布, 励磁特性, 温度

义 6 上昇,漏れ磁束,固有振動数などを考慮して,鉄心の諸元及び構造を決定した。

2.2 鉄 心

鉄心構造の決定要因として,磁束及び損失分布,励磁特性, 温度上昇,漏れ磁束,固有振動数などがあるが,これらにつ いては前もって電子計算機により計算した。図4に電子計算 機による鉄心内磁束分布図を示す。この計算法は、マクスウ ェルの電磁方程式を直接計算するもので,鉄心の磁束~起磁 力の非直線性を考慮してある。図5は鉄心の固有振動モード 例であるが, 試作器のいずれの固有振動数も電源周波数に対 して共振しない。

以上の検討のほかに、作業性も考慮して鉄心の諸元及び構 造を決定した。図6に鉄心構造を示す。三脚鉄心で、主脚は ガラスバインド テープにより、また円形断面のヨークは油溝 に通した偏平ボルトにより締め付ける構造である。

2.3 タンク

輸送重量を低減することも,試作目標の一つとした。その ため、有限要素法を含む各種の解析法により、変形、応力、 固有振動数などを計算して、タンク部材の合理化, 軽量化を 図るとともに、縮尺鋼板モデル、プラスチック モデルなどに よる計算の裏付け測定を行なった。図7にタンクの振動モー ド例を示す。

3 試験結果

試作器では、特性試験、耐電圧試験のほかに、商用周波過 電圧試験,現地作業模擬処理試験,過電流試験及び各種計算 値を検証して信頼度を確認するために一連の特殊試験を実施 した。

特性試験及び耐電圧試験では,設計値に比べて異状はない ので結果の詳細を割愛した。



275kV 680MVA 変圧器タンクの振動モード例 図 7 100Hz励磁時 の振動モードを示す。図示はタンクの四半分である。

商用周波過電圧試験では、規定の耐電圧値460kVの110%、 120%, 130%, 140%及び145%をそれぞれ印加した。図8に 145%印加時のコロナレベルを示すがRadio Interference $Voltage(RIV) レベルが35\mu V と低い。これにより電界解析手$ 法及び絶縁処理法の合理性を検証できた。 試作器を流用して,現地処理作業法が工場試験時の品質を

保持するのに十分であるかどうかを確認するため、現地作業 模擬処理試験を行なった。模擬試験の工程は,発送準備から 現地での熱油循環完了までを想定し、合計45日とした。処理 後,再び145%の過電圧を印加して,更に解体点検をしたが 全く異状はなかった。 特殊試験としては、多数のセンサを使用して漏れ磁束密度,

37

674 日立評論 VOL. 57 No. 8 (1975-8)



kVまで過電圧試験を実施したが特に異状はなかった。

図9 低圧巻線素線電流 低圧巻線は多数の転位電線で構成したが、 環電流は平均素線電流に対し、たかだか5~6%で特に異状はない。

温度上昇,油流,うず電流,循環電流,応力及び固有振動数 などの測定を行なった。巻線内部における漏れ磁束密度,温 度上昇,油流の測定は非常に困難であり,また報告例も少な いが,今回特に解体点検後約2,000個のセンサを取り付けて行



なったものである。特に温度上昇測定は、そのセンサを精度 を考慮して直接導体にはさみつけたので測定時に電圧が加わ り、必ずしも安全とはいいにくいので対策にくふうを要した。 以下、各種構造物について、特殊試験結果の要約を述べる。

3.1 巻 線

38

低圧巻線表面の漏れ磁束密度,低圧巻線の素線電流,油流 速,温度上昇及び高・低圧巻線の端部リード温度上昇などを 測定した。

漏れ磁束密度計算値と測定値の照合は良く,漏れ磁束研究 用150MVA変圧器⁽⁶⁾により進めてきた研究内容,特にマクスウ ェルの電磁方程式の解を実器規模で検証することができた。 正確な巻線各部の漏れ磁束分布が分かれば,素線電流の計算 も可能になる。図9に低圧巻線の素線電流の計算値と測定値 を示す。低圧巻線は多数の転位電線から構成されるが,循環 電流は平均素線電流に対し最大でも5~6%と小さく,図9 から分かるように計算値と測定値は一致し,特に異状はない。

巻線内の漏れ磁束密度が分かれば、磁束密度分布の適正な 制御も可能になる。例えば、短絡時の電磁力を小さくするた めの対策、あるいは漂遊損(=うず電流損+循環電流損)を低 減する対策などが可能になる。前者については、既にInstitute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE) で報告した⁽⁷⁾。後者については、試作器でも繰返し計算により 漂遊損を最小にする巻線配置を検討した。ちなみに試作器の 負荷損係数(=AC損/DC損)は1.15と従来器に比べ十分小さ くすることができた。

図10に低圧巻線内の油流速測定例を示す。低圧巻線は、軸 方向に数ブロックに分割し、各ブロックをジグザグに送油して 冷却する構造で、多数の実績を有するものである。しかし、 今回、実用規模変圧器として初めて油流速を測定し、油流要 素モデル実験結果と比較した結果、油流が不均一となり現状 の構造が最も巻線冷却上有効と言えないことが分かった。油 流の詳細な解析は今後の検討課題である。なお参考のため、 図10に計算値を併記したが、計算値は測定値と比べ大差はな い。 図10 低圧巻線油流速分布 計算値と測定値の照合は比較的良いが, 細部には油流の不均一がある。

巻線及びリードの温度上昇測定は、センサを直接導体には さみ込んで行なった。図11に低圧巻線の軸方向に分割したブ ロック内のそれぞれのコイルの導体温度上昇測定値を、図12 に高圧巻線の端部リード温度上昇測定値を示す。前者の温度 上昇は、コイル最外側の導体を測定したものであるが、ほか のセンサ合計 200 個により導体の半径方向及び円周方向の温 度こう配も測定した。図11に示す軸方向の温度上昇分布では、 計算値に比べ測定値はやや変化幅が大きい。これは、前記油流の 不均一を計算時考慮しなかったためである。 センサにより本試作器に規格値を超える温度上昇のないことが 分かったが、計算値と測定値に大差のないことから漏れ磁束 解析の傍証及び今後の変圧器設計法に極めて貴重な情報を得 ることができた。更に、60Hz900 MVA変圧器を対象として過 電流温度上昇試験も実施したが、特に計算値と実測値との間

275kV 680MVA変圧器の実用性能試験 675



図11 低圧巻線温度上昇分布 計算値に比べ測定値はややシャープに分布しているが、細部の油流の不均一を計算時考慮しなかったため計算に誤差が生じたと考えられる。



図12 高圧巻線端部リード線温度上昇分布 端部リードに絶縁補強するため、温度上昇は①に比べ②~ ④は若干高い。

に大きな差はなかった。なお,抵抗法による平均巻線温度上 昇値は,センサによる測定値の平均値に比べ1~2deg高いが, 前者の精度から判断してほぼ一致すると言ってもよい。

3.2 鉄 心

鉄心各部の温度上昇,インパルス応答法による固有振動モ 振動数はほぼ計算できるように ードと振動数,定格励磁時の最大振幅,つり上げ時の鉄心締 値の照合から,境界条件を確認 め金具の曲げ応力,巻線からの漏れ磁束による鉄心締め金具 圧器設計への貴重な資料が得られ の温度上昇などを測定した。いずれの場合も,計算上最も過 3.3 タンク

測定値,巻線一相分つり上げ時の鉄心締め金具の曲げ応力な どの測定値も計算値と一致した。これらの計算値はすべて有 限要素法[®]によったものである。最近の構造力学における有限 要素法の進歩により,境界条件の明確な構造物の応力,固有 振動数はほぼ計算できるようになった。上記の測定値と計算 値の照合から,境界条件を確認できたことになり,今後の変 圧器設計への貴重な資料が得られた。

酷になる部位及びその近傍を測定した。
図13に温度上昇測定例を示す。これは、特に上部ヨークの
鉄心積層方向にもセンサを挿入して測定したものである。な
お鉄心締め付ボルトの温度は、定格励磁時にはほとんど油温
と同等であった。
鉄心の上下対称、左右非対称モードに対する固有振動数の

真空時の各部の応力,変形量,ジャッキアップ時の側板の 応力,100Hz加振時の振動モードと固有振動数などを測定し たが,いずれも異状はなかった。

上記のほか,タンクシールド表面の漏れ磁束密度,シールドのうず電流,温度上昇などを測定した。測定値はマクスウェルの電磁方程式による計算値とほぼ一致した。

39



4 結 T

275kV 680MVA 変圧器を試作し、特性試験、耐電圧試験、 商用周波過電圧試験のほかに現地作業模擬処理試験及び各種 計算値を検証して, 信頼性を確認するために一連の特殊試験 を実施した。

これらの試験結果により, 上記変圧器が十分な信頼性を有 することを確認し, 数年来積み重ねてきた各種解析の実用器 規模での直接検証を行ない, 1,000MVA級変圧器製作の貴重 な資料を得ることができた。

終わりに、この試作変圧器の設計、製作及び試験に当たっ て御指導をいただいた関係各位に対し、深く感謝する。

参考文献

- (1) 森山「大容量変圧器における最近の諸問題」日立評論 50, 143 (昭43-2)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 鹿島ほか「500kV 1,000/3MVA単巻変圧器」日立評論 55, 219 (昭48-3)
- (5) 例えば、竹山「電磁気学現象理論」329、(昭45、丸善)
- (6) Y.Inui et al : "EFFECTS OF TANK AND TANK SHI-ELDS ON MAGNETIC FIELDS AND STRAY LOSSES IN TRANSFORMER WINDINGS", C73 401-7 (IEEE)

図13 鉄心積層方向温度上昇分布 鉄心の最高温度上昇部位は鉄心の 表面ではなく,積層方向に温度こう配がある。

- (7) K.Hiraishi: "MECHANICAL STRENGTH OF TRANS-FORMER WINDINGS UNDER SHORT-CIRCUIT CONDITIONS", 71TP 8-PWR (IEEE)
- (8) 例えば、O.C.Zienkiewicz: THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING SCIENCE" McGraw-Hill (1971)



1 搬送波周波数分割多重単管カラーカメラの 信号解析 日立製作所 江藤良純・長原脩策

産業用カラーカメラの分野においては. 単一撮像管を用いたカメラの研究,開発が 盛んである。現状の単管カラーカメラの方 式には,周波数分割多重化方式に属するも のが多い。これまでの周波数分割多重化方 式には、ストライプ色フィルタで2種の異 なる周波数の搬送波を発生させる2搬送波 方式が用いられてきたが,最近この周波数 を一致させる1搬送波方式が着目されてい る。この論文は1搬送波方式における信号 の発生機構を理論的に明らかにしたもので ある。

1 搬送波方式に用いる2種の搬送波の走 査線間の位相変化を θ_R , θ_B とし, 得られた 信号とこれを一水平走査周期,及び(H)R, (H)Bだけ遅らせた信号との和より赤,青の色

40

$\theta_B + \hat{H}_R = (2 i + 1) \pi$	$\cdots \cdots \cdots \cdots (1)$
$\theta_R + \hat{H}_B = (2 j + 1) \pi$	(2)
$\theta_R + \widehat{H}_R = 2 \ k \pi \cdots$	(3)
$\theta_B + \widehat{H}_B = 2 \ l \pi \cdots$	

テレビジョン 28-6,464 (昭49-6)

を満たすことである。従来知られている数 値例は上式の特殊解であるが、より一般的 な条件がここに示されている。

周波数分割多重化方式においては、スト ライプ色フィルタの分光特性が不適当であ ると輝度信号にビート成分が発生する。1 搬送波方式におけるビート成分の空間周波 数µ, vは, 走査線の空間周波数を

	$\mu = 0$	 	• • • • • • • • •	•••••	·····(5)
	$v = \omega_h$	 			(6)
とす	ると				

$\mu = 0$	••••••••••••••••••••••••••••••••••	$\cdots \cdots (7)$
$v = \omega$	$\{2(k-i)-1\}/2\cdots$	(8)

必要があるが,実際のカメラにおいては, ストライプ色フィルタと走査線の交差角, 垂直偏向系の偏向サイズ,同期系の水平周 波数,復調に用いる遅延線の遅延時間など にばらつきがあると、誤差成分 $\Delta \theta_R$, $\Delta \theta_B$, $\Delta(\widehat{H})_{R}, \Delta(\widehat{H})_{B}$ を含む。この場合には分離され た赤, 青成分が互いにクロストーク成分. 及び混変調成分をもつ。更に

 $\Delta \theta_R - \Delta \theta_B = 0 \cdots (9)$ 又は.

 $\Delta \theta_B + \Delta \widehat{H}_R = 0$ (10) が満たされないと、 混変調成分の極性が一 走査線ごとに反転することが示される。こ れは色信号が一走査線ごとのビート成分を もつことを意味している。

信号を分離する復調過程を考えると,分離 された赤,青の色信号間にクロストークの ない条件は,任意の整数 <i>i</i> , <i>j</i> , <i>k</i> , <i>l</i> に 対して,	$ u = \omega_h \{2(k-i)-1\}/2 \dots (8) $ で示される。すなわち、輝度ビートは走査線と平行な構造となるのが特徴である。 $\theta_R, \ \theta_B, \ \hat{H}_R, \ \hat{H}_B \downarrow (1)$ 式 $\sim (4)$ 式を満たす	以上のような解析を行なうことにより、 1搬送波方式における信号の分離の条件、 輝度ビート、及び色ビートの発生機構、並 びにその対策について示した。