

# 500 kV 変圧器の絶縁と試験

## Some New Aspects on 500 kV Power Transformer

平野 三百里\* 栗山 卓\* 中川 清\*  
Mihori Hirano Takashi Kuriyama Kiyoshi Nakagawa

### 要 旨

わが国における 500 kV 系の運用開始は昭和 47 年からと予定され、各電力会社の計画は一段と活発さを増し、これに備えて超高压電力研究所では武山研究所に 500 kV 級送電線実証試験設備を建設することになり、日立製作所はその長期課電用電源としてまた将来の実規模変圧器のプロトタイプともなる 500 kV 変圧器を納入した。

この変圧器は  $69/\frac{500 \pm 27.5}{\sqrt{3}}$  kV 10 MVA の単相器で、試験電圧は交流 680 kV、インパルス 1,550 kV である。主絶縁には早くから研究を重ねてきてその成果を試作 520 kV 変圧器<sup>(1)(2)</sup> で実証した油げき付固体絶縁方式を採用し、高圧巻線には製作経験の多い制振しゃへい付円板巻線構造を使用している。

変圧器の形式および受入試験は試験規格にそって行なわれ所期の成績を取めた。本稿ではこのなかのインパルス試験、開閉サージ試験、誘導絶縁試験、コロナ試験について述べている。

### 1. 緒 言

400 kV 級送電線の建設は海外各国で行なわれており、昭和 40 年秋にはカナダの Hydro-Quebec で 735 kV 系統の運用が開始された。わが国においては昭和 26 年以来 275 kV 送電線が電力系統の基幹となってきたが、最近数年間は電力需要が急増し、火力発電所単位容量の増大、大都市への需要集中、送電線用地の取得難、送電容量の飛躍的増大などの問題があるため、数年前から 400~500 kV 級送電線の具体的計画が進められ、昭和 47 年を目標に 500 kV 送電線の運用開始が予定されている。

これに対処するため日立製作所では昭和 32 年ごろより超々高压変圧器の開発に着手し、現在まで表 1<sup>(1)~(4)</sup> に示す変圧器を製作してきた。試作 520/275 kV 単巻変圧器は、試作着手当時わが国の試験電圧が決まっていなかったため、電気協同研究会の 400 kV 級送電に関する報告書<sup>(5)</sup> から系統電圧 500 kV (C 案) の最初の系統に対する試験電圧推奨案の高いほうを目標とし、単相 200 MVA の 1 脚 100 MVA を想定してモデルを製作し試験を行ってきた。

昭和 40 年になって将来想定される 500 kV 変圧器の仕様がまとまり、そのプロトタイプとしてまた 500 kV 級送電実証試験設備電源用として単相 10 MVA 変圧器 3 台が設置されることになった。日立製作所ではそのうち 1 台を製作納入したのでここにその一端を紹介し参考に供したい。

### 2. 仕 様

500 kV 級送電線実証試験設備電源として用いるとともに、その構造を将来の 500 kV 実規模変圧器にできるだけ模したプロトタイプとして、その製作ならびに運転実績が実規模変圧器の設計上有力な資料を提供することが望まれ、次のような仕様がきまった。

形 式 屋外用送油自冷式、単相、内鉄形、負荷時タップ  
切換器付、制振しゃへい、ダイヤフラム形コンサ  
ペータ付

容 量 高圧 10,000 kVA  
低圧 10,000 kVA

電 圧 高圧  $R500 \pm 27.5/\sqrt{3}$  kV  
低圧  $F75/F72/R69/F66/F63$  kV

試験電圧 高圧端子 BIL 1,550 kV 交流 680 kV  
中性点端子 BIL 450 kV 交流 185 kV

\* 日立製作所国分工場

表 1 超々高压変圧器の製作例

納 入 先	仕 様	試験電圧 (kV)		製造年	台数
		BIL	AC		
日立製作所 日立研究所	200 MVA 単相 50 c/s 350/220/13.2 kV 単巻	1,450	630	昭 35	1
オーストラリア ニューサウスウェルズ	160 MVA 三相 50 c/s 330/132/33 kV 単巻	1,300	550	昭 37	4
超高压電力研究所	50 MVA 単相 50 c/s 330-220-160-100/15 kV	1,550	680	昭 37	1
試 作	$\frac{520}{\sqrt{3}}/\frac{275}{\sqrt{3}}/22$ kV 単相 50 c/s 単巻	1,925	860	昭 41	1

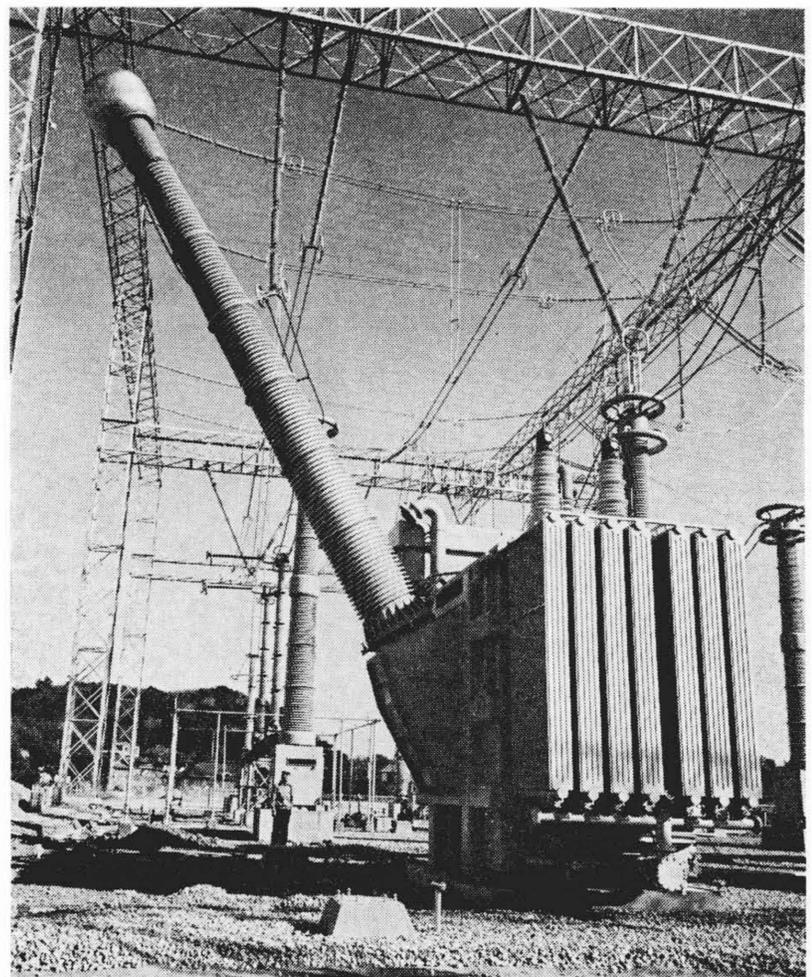


図 1 超高压電力研究所納 10 MVA 500 kV 変圧器

低圧 BIL 350 kV 交流 140 kV  
周波数 50サイクル  
開閉サージ試験電圧 BIL×0.85

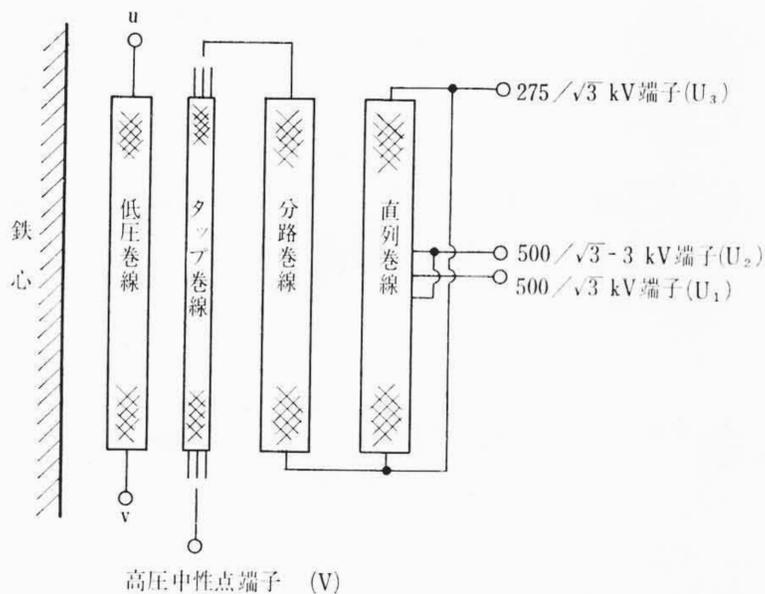


図2 巻線配置

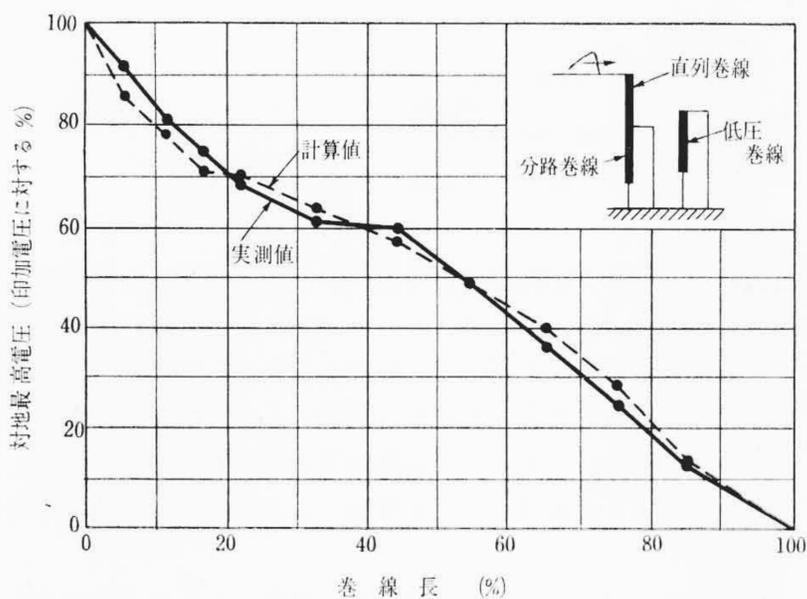


図3 衝撃電位分布

特殊仕様として塩分付着量  $0.03 \text{ mg/cm}^2$  にて活線洗浄可能なブッシングが要求され、このため  $500 \text{ kV}$  ブッシングのがい管は  $8 \text{ m}$  におよぶ長大なものが使用された。高圧巻線は  $500/275 \text{ kV}$  単巻変圧器としての特性試験を行なうため、工場組立時は  $275 \text{ kV}$  側もブッシングで引き出したが、現地では  $275 \text{ kV}$  端子を出さず  $69/500 \text{ kV}$  の二巻線変圧器として使用される。この  $275 \text{ kV}$  端子には工場においてインパルス  $1,050 \text{ kV}$ 、交流  $460 \text{ kV}$  の試験電圧を印加した。

### 3. 巻線構造

前述の理由から本変圧器は単巻構造となっており、巻線は図2に示すように外側から直列・分路・タップ・低圧の4巻線を同心配置し、直列・分路・低圧の各巻線には機械力に強く製作経験も豊富な円板コイルを採用している。タップ巻線にはいかなるタップ位置においても磁気平衡を乱さない特殊ヘリカルコイルを採用した。直列巻線は上下並列にして中央から  $500 \text{ kV}$  端子を引き出す構造としてある。

巻線の耐雷設計としては昭和27年以来  $20,000 \text{ MVA}$  以上の変圧器に適用してそのすぐれた特性が実証されている制振しゃへい<sup>(6)(7)</sup>を使用し、設計時点で電子計算機により巻線各部の対地電位およびコイル間に発生する電圧<sup>(8)</sup>を求め、万違算なきを期している。図3は本変圧器の衝撃電位分布について求めた計算値と実測値を示したものである。このしゃへい方式は図4に示すようにしゃへい板をコイル導体の間に巻き込み、しゃへい板に他のコイルの電位を与えることにより巻線の直列容量を増大して巻線の電位振動を抑制してい

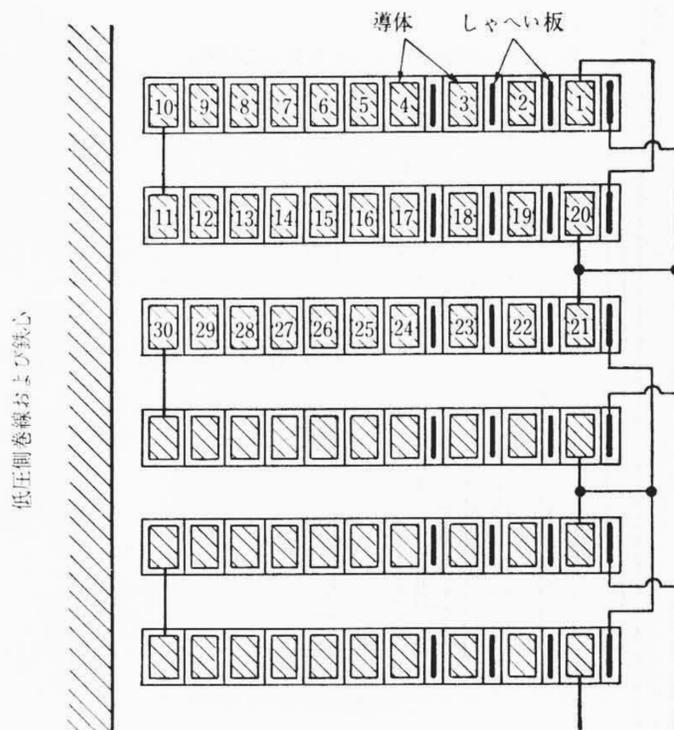


図4 制振しゃへい構造

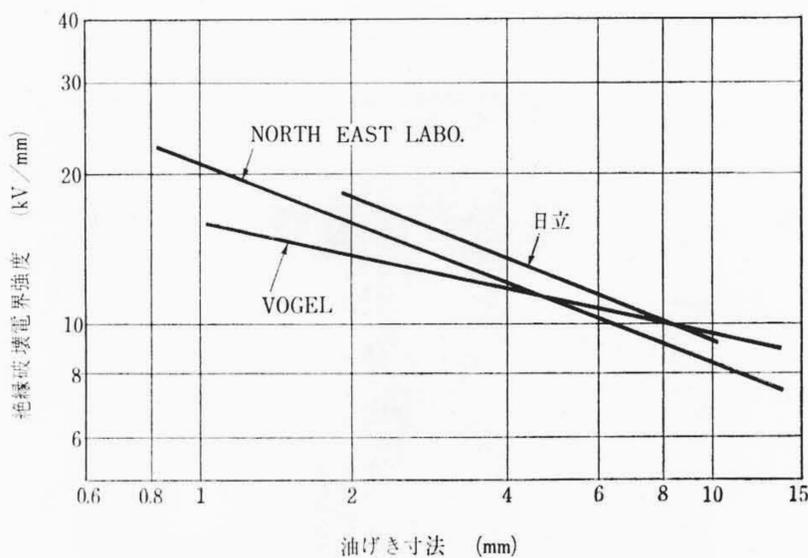


図5 油げき寸法と絶縁破壊電界強度との関係

る。

### 4. 絶縁構造

超高压変圧器の主絶縁は油浸紙を充てんする固体絶縁方式が広く採用されており、固体絶縁方式には油浸紙で完全充てんするものと油浸紙のほかに油げきをある程度設けるものと二つの構造がある。どちらの構造も一長一短あって一概に良否を判定できないが、完全充てん方式は絶縁に最も重要な乾燥、油含浸処理に問題があり、また組立作業がシリースになるので工程が長びくなどの点を考え、この変圧器については油げき付固体絶縁方式を採用した。このとき油げき寸法と絶縁破壊電界強度の関係が必要となるので  $2 \sim 10 \text{ mm}$  の範囲で絶縁油の交流絶縁破壊特性を求めてこれを使用した。図5はこの結果とあわせてすでに文献<sup>(9)(10)</sup>で発表されているデータを示してある。図から明らかなように油げき寸法が増すにつれて油げきの絶縁破壊電界強度が低下しており、主絶縁に設ける油げきはできるだけ狭いほうがよい。このほか主絶縁に占める油げきの割合、油げきの位置などによってコロナ開始電界強度がどのように変化するかを実験によって求め、これらのことを総合的に検討して主絶縁構造を決定した。この構造は前記したように乾燥、油含浸が容易でコロナ発生電圧、絶縁破壊電界強度が高いから今後の超々高压変圧器の標準構造となるものである。

本変圧器の鉄心はセンターコア構造であるため直列巻線とサイドヨーク間も検討すべきものの一つであるが、鉄心角部の電界集中は

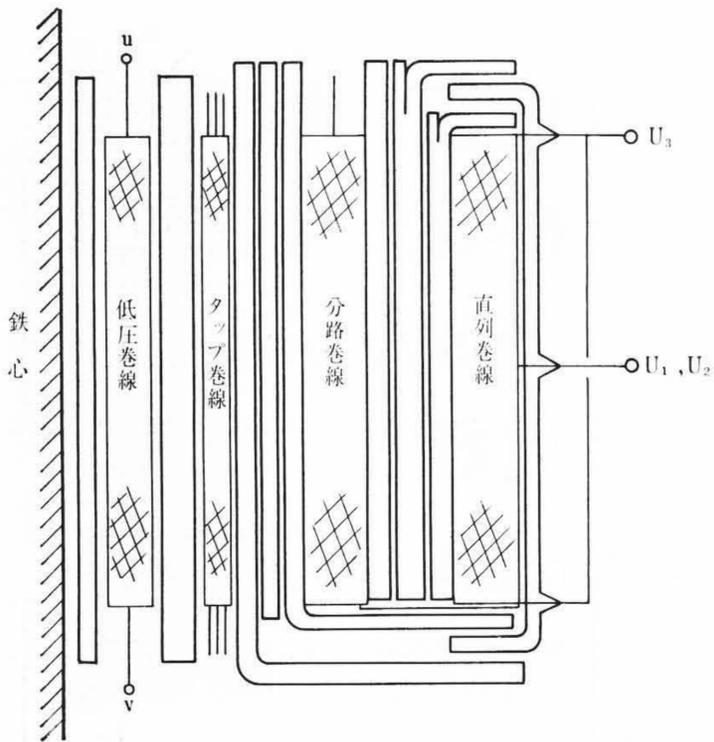


図6 絶縁構造

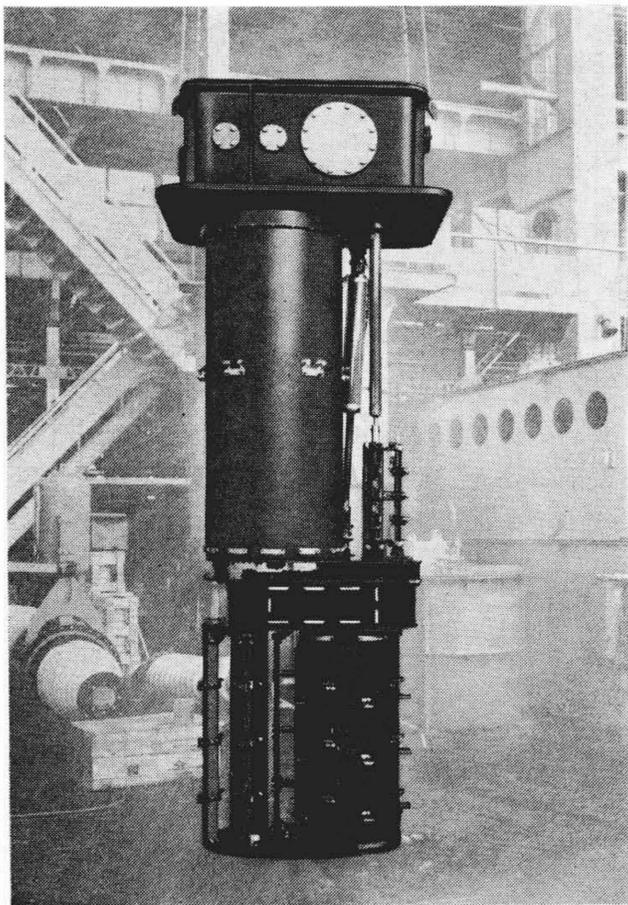


図7 LR-K形負荷時タップ切換器

モデルによる電界解析の結果、適当なシールドを施して電界緩和を図るとともに、ここにも細分した油げきをもつ固体絶縁の思想を採用入れた。また上下ヨークに対する絶縁は、直列巻線が上下並列接続であるから200号(交流460kV, インパルス1,050kV)でよいので、この部分は巻線端部電界を緩和するとともにL形バリヤーを組み合わせた構造とした。

このような構造の採用と、巻線の制振しゃへいにより試作520kV変圧器では交流1,000kV, インパルス1,925kVでいずれも絶縁破壊を起こしていない。このことは同一構造を採用した超高压電力研究所納変圧器においても絶縁の信頼度が高いことを裏付けている。

### 5. 負荷時タップ切換器<sup>(1)</sup>

本変圧器は高压中性点側で $\pm 27.5/\sqrt{3}$  kV, 23点の負荷時タップ切換えを行なうためLR-K形負荷時タップ切換器を使用した。この

試験端子	印加結線図	衝撃電圧試験値	
		全波電圧 (kV)	さい断波電圧 (kV)
$U_1, U_2 \sim U_3, V$ 間		1,550	1,780
$U_1, U_2 - V$ 間 $U_3$ 開放		1,550	—
$U_3 - U_1, U_2, V$ 間		1,050	1,210

$R \approx 250 \Omega$  (接地抵抗器)  
 $r \approx 数 \Omega$  (シャント抵抗器)  
 $B_{r0}$ : 接地電流波形観測用オシロスコープ

図8 衝撃電圧試験での印加結線と電圧

抵抗式負荷時タップ切換器は、性能の向上、標準化、小形軽量化を目標として開発されたもので、この形式品は使用者側の厳重な共同立会試験に合格しており次に示す特長を備えている。

(1) 6組からなる限流抵抗器を使用する多抵抗切換方式で、電流は各並列抵抗に分流するため接触子の開閉責務が低い。したがって高電圧、大容量変圧器でも接触子の寿命が長く、油の汚損劣化も少ない。

(2) 遮断部は早切り駆動軸の周囲に配置した各相に対応する3個の扇形可動子が固定接触子群の上を転動する往復偏心回転機構であるから切換えが円滑軽快である。

LR-K形負荷時タップ切換器の定格は、定格極間電圧2,050V, 定格通過電流600Aで負荷接点の寿命20万回であるから、本変圧器に対して十分な余裕がある。

### 6. 試験結果

変圧器の形式および受入試験は試験規格にそって行なわれ、いずれも所期の成績を収めた。そのなかのインパルス試験・開閉サージ試験・誘導絶縁試験・コロナ試験などについて下記する。

(1) インパルス試験は図8に示す結線により高压巻線について行なわれた。一例として $U_1, U_2$ 印加 $U_3, V$ 接地における全波印加電圧およびさい断波印加電圧の波形とそれぞれに対応する巻線の接地電流波形は図9に示すとおりである。

(2) 開閉サージ試験では図10に示すように、インパルス発生器の出力電圧を波形調整回路を通して低压側に加え、開放された高压線路端子に所要の電圧1,320kV ( $BIL \times 0.85$ )を誘導した。このときの低压、高压端子の電圧を分圧用コンデンサの測定端で観測し、その波形を示したのが図11である。

開閉サージ電圧波形の波頭長は図10の $R_{s2}$ および $C_2$ の定数を変えることによって比較的簡単に調整することができる。しかし高電圧の加圧につれて変圧器鉄心が飽和するため波尾長は短縮する。これを試験電圧において規定値にすることはむずかしいが、あらかじめ直流でバイアス励磁することにより、鉄心飽和による波尾長の短縮を調整することができる。図10では、このバイアス励磁回路として供試変圧器の低压巻線に直流リアクトルをふくむ

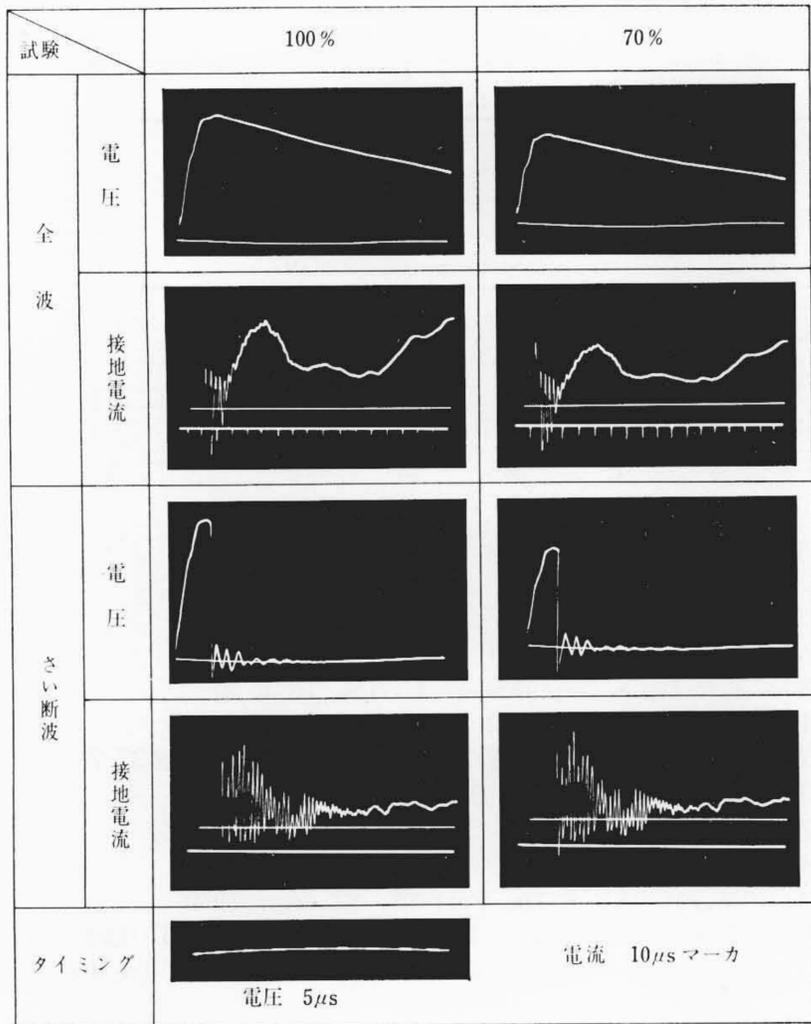


図9 衝撃電圧試験の電圧、接地電流波形

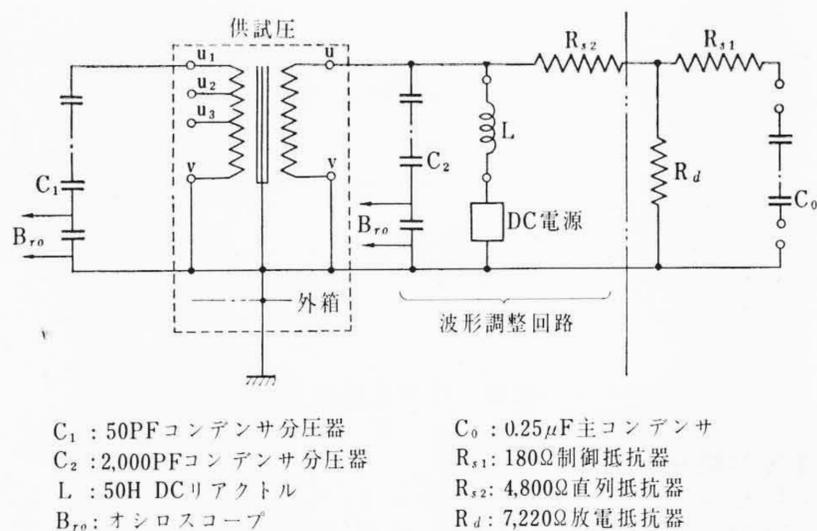


図10 開閉サージ試験の結線図

直流電源を並列に接続し、直流に対しては低抵抗となる回路を構成させている。供試変圧器をあらかじめ印加電圧と逆極性にバイアス励磁することによって波尾長をのぼし、加極性によって波尾長を短縮することができる。図12はその一例であって同一電圧に対しバイアス励磁を行なう直流電流値を変えた場合の電圧波形を示したものである。

このような方法によって本変圧器では波尾長 1,000 μs、波頭長 350 μs、80%以上の電圧保持時間 600 μs の電圧を 1,320 kV まで同一の波形で加えることができた。

(3) コロナ試験は図13に示す結線で低圧側に 167 c/s の高周波電圧を加えて高圧端子に過電圧を誘起させ、このとき高圧ブッシングのポテンシャルタップおよび変圧器タンクと大地との間にそう入したシャントインピーダンスに生ずるコロナパルス電圧を検出できるようにしてある。検出器としては NEMA 規格に準拠したラジオ障害電界強度測定器と広帯域のコロナパルス解析器を併用した。変圧器のタンク側にそう入した検出回路は線路端に結

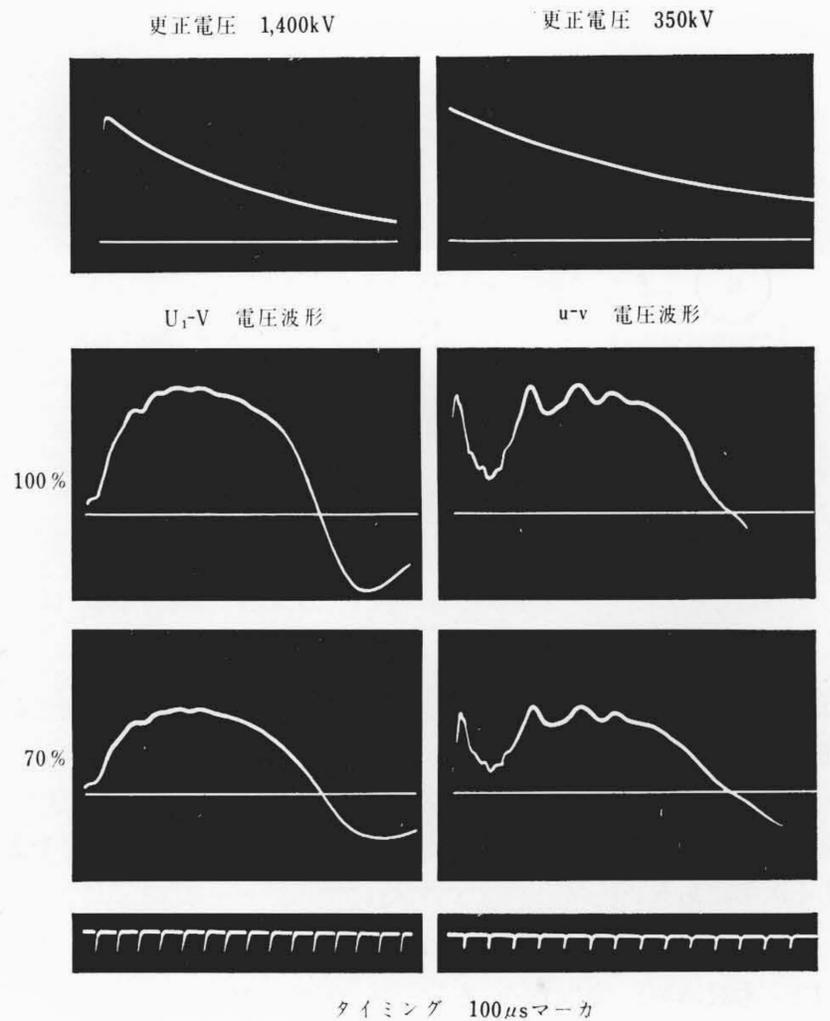


図11 開閉サージ試験波形

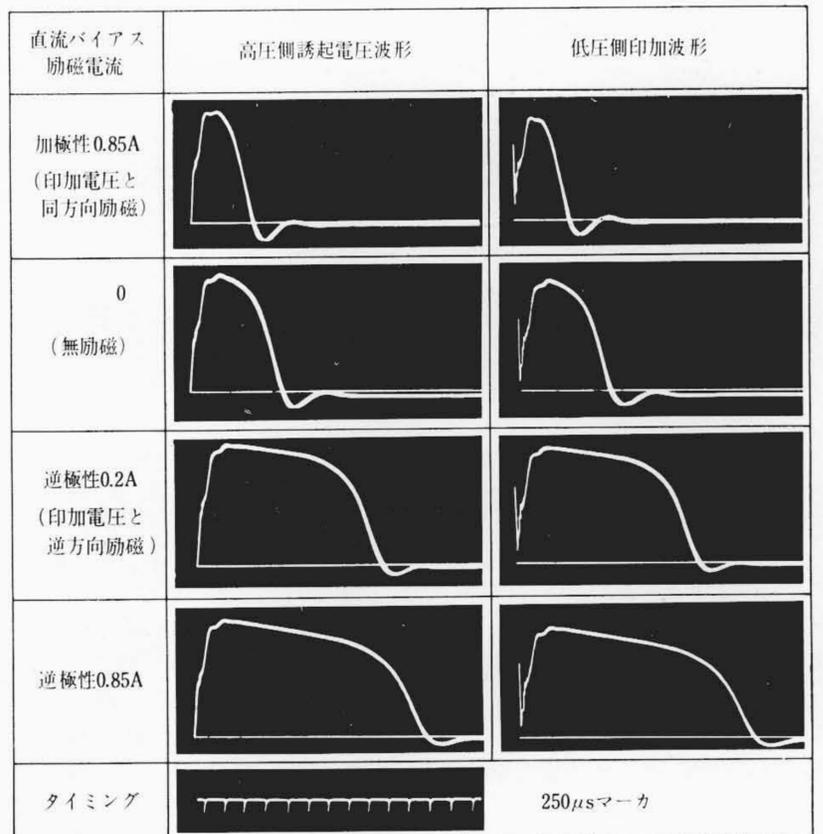


図12 開閉サージ試験における直流バイアス励磁の効果

合された検出回路に比べて、巻線の途中に発生するコロナに対する検出感度が高いという特長がある。このほか、音響的方法として超音波コロナ検出器も併用して試験を行ない保守用として納入した。このような試験で常規対地電圧の 1.3 倍まで過電圧を誘起させ、コロナの発生しないことを確かめ、絶縁の設計、製作の確実さを立証した。

### 7. 結 言

わが国で使用される 500 kV 変圧器のプロトタイプとなる 10 MVA 変圧器の構造と試験の概要とを紹介した。

今回の製作経験により多くの資料が得られ、500 kV 変圧器の設

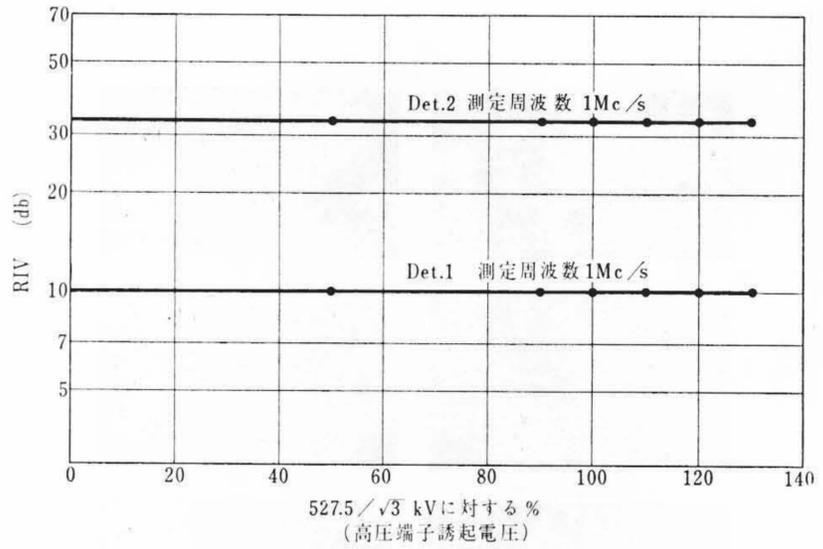
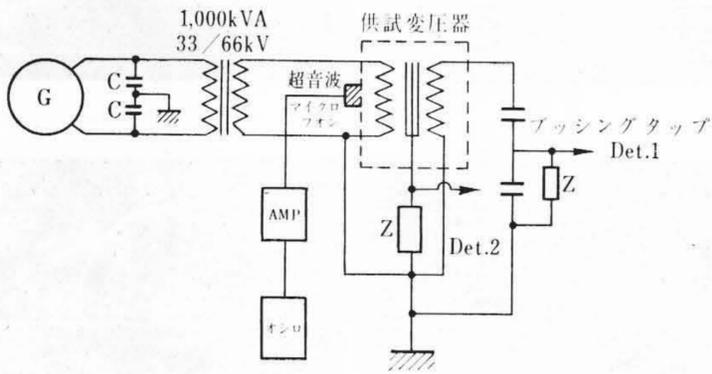


図13 コロナ試験結線図および試験結果

計・製作・試験の技術が確立された。今後は積極的に技術革新を推進し、なおいっそう技術の充実をはかりたいと念願している。

おわりに臨み、本変圧器の完成について種々ご支援をいただいた超高压電力研究所および各電力会社の関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 木沢ほか：電気学会 連合大会 昭40 789
- (2) 木沢ほか：電気学会 連合大会 昭41 438
- (3) 木沢ほか：日立評論 別冊 36-4 (昭35-5)
- (4) 小川ほか：日立評論 44, 1149 (昭37-8)
- (5) 電気協同研究会：電気協同研究 18巻2号 (昭37-7)
- (6) 首藤：日立評論 別冊 7-15 (昭29-7)
- (7) 特許第208018号
- (8) 奥山：電学誌 87-1 181 (昭42-1)
- (9) Vogel: AIEE 78, Part III, 23 (Apr. 1959)
- (10) North East Labo: PIEE 110, No. 10, 1791 (Oct. 1963)
- (11) 木沢ほか：Hitachi Review S. I. No. 12, 12 (昭40)

Vol. 49

日立評論

No. 9

目次

■論文

- ・実験用PCM交換機
- ・薄膜回路とその応用
- ・材料試験炉用炉心要素の流動伝熱実験
- ・多点プログラム制御装置
- ・交流エレベータの速度制御と振動系の解析
- ・電子計算機によるディーゼル機関の特性計算
- ・秋田県統合無線設備
- ・HITAC 8000 シリーズ電子計算機用カード読取機の性能および機能

- ・ルームクーラの使用状態と冷房性能の関係の理論検討
- ・滴下含浸法およびそのワニス

■工作機械特集

- ・数値制御型加工システムとそのプログラム
- ・NCD-16形プリント基板用数値制御ボール盤
- ・電解加工の理論と応用
- ・トランスファマシンの進歩
- ・円筒フライス切削における切削抵抗

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京71824番

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

振替口座 東京20018番