

新しい負荷時タップ切換器

New On-load Tap Changer

桜木 義 祐*

日向 成 行*

加 藤 常 雄*

Yoshisuke Sakuragi

Shigeyuki Hiuga

Tsuneo Katô

要 旨

日立製作所では早くから抵抗式負荷時タップ切換器の研究、開発に着手し、昭和38年超高圧大容量変圧器用の機種を完成した。ユーザーの厳重な形式試験立会を受け、昭和39年2月わが国で最初の回転形抵抗式負荷時タップ切換器を内蔵する275 kV 200 MVA 変圧器を納入した。日立抵抗式負荷時タップ切換器シリーズは、基本的には配電用変圧器を対象とするLR-B形、送電用を対象とするLR-N形、LR-K形の3機種から構成され、各形式の定格よりもさらに大きい容量に対しては上記標準機種の駆動機構ケースの一部分を改造するだけで大容量化できる特長を備えている。

1. 緒 言

系統の総合的な経済運用と、需要家への電圧サービス改善を目的に送電用変圧器にも配電用変圧器にも広く負荷時タップ切換器が要求されるにいたった。

日立製作所では過去30余年間にわたり多数の各種容量、電圧の負荷時電圧調整装置を製作してきた。これらの経験により昭和35年わが国で最初の一次側直接切換方式の超高圧負荷時タップ切換器を開発⁽¹⁾して以来、多数の高電圧大容量負荷時タップ切換変圧器を製作した。

負荷時タップ切換変圧器の一般化に伴って負荷時タップ切換器が系統運営、サービス向上に最も重要な機器として認識された結果、その性能向上と標準化のためにユーザーとメーカーから構成される電気協同研究会において購入仕様の統一、保守基準の制定、試験項目の確立がなされた。この機運に先だって日立製作所では早くから負荷時タップ切換変圧器の高電圧、大容量化に備え、小形化、性能向上を目的に独自の構想のもとに抵抗式負荷時タップ切換器の研究、開発に努力を重ねてきた。

日立抵抗式負荷時タップ切換器シリーズに共通な基本的事項を列挙すると。

- (1) 高度の絶縁を必要とする切換開閉器には、ブッシングで支持するいわゆるブッシング支持形と変圧器内部に埋め込む内蔵形とがあり、いずれも実用されてきたが、変圧器カバー上のスペース、変圧器本体とともに輸送できることを考慮すると、内蔵形が信頼度の点からも好ましいのでこれを採用した。
- (2) 駆動機構と遮断部を一体にした構造では駆動機構に要求される操作力に対する設計と、遮断部に要求される絶縁と遮断容量に対する設計を調和させることが比較的面倒であるが、両者を分離しておけばそれぞれに要求される性能を満足することが容易となり、内蔵化に適した小形化も同時に達成することができる。
- (3) 内蔵形では埋込容器は必然的に円筒形となることから回転機構を採用して円筒内面を有効に活用することが好適である。
- (4) 変圧器を一貫して製作する総合メーカーの特長を生かして、変圧器として具備すべき条件を満足するようくふうした。特に切換開閉器室の油密性、電動操作機構の操作性を考慮した方式、構造は変圧器と組み合わせるうえで重要な事項であるので、細部にわたり綿密な配慮を払った結果、わが国の国情に合った切換器とすることができた。
- (5) 変圧器の寿命に相当する高動作回数に耐え、高い信頼度を維持するには構造を単純化することが望ましい。駆動機構、遮断

* 日立製作所国分工場

表1 主要日立抵抗式負荷時タップ切換変圧器製作実績

納 入 先	変 電 所 名	電 圧 (kV)	容量(MVA) ×台数
中部電力株式会社	西 名 古 屋	275	300×2
中部電力株式会社	三 河	275	300
中部電力株式会社	東 名 古 屋	275	300
東北電力株式会社	八 戸 (P S)	154	280
関西電力株式会社	新 加 古 川	275	200×2
関西電力株式会社	南 姫 路	275	200×2
関西電力株式会社	西 神 戸	275	200
中部電力株式会社	名 北	154	150×2
中部電力株式会社	岩 塚	154	150
中部電力株式会社	岩 塚	154	120×2
中部電力株式会社	日 進	154	120
フエロアロイ工業株式会社	酒 田	154	110
東北電力株式会社	山 形	154	100
東北電力株式会社	仙 台	154	100
東北電力株式会社	上 越	154	100
関西電力株式会社	新 八 幡	154	100
北陸電力株式会社	新 小 松	154	100
大同製鋼株式会社	知 多	154	90
九州電力株式会社	長 崎	110	90
九州電力株式会社	都 城	110	60
九州電力株式会社	八 代	110	60
中国電力株式会社	松 江	110	60
関西電力株式会社	牧 野	77	30
関西電力株式会社	西 舞 鶴	77	30
超 高 圧 研 究 所	武 山	500	10
イ ン ド	KSEB	110	50×2
イ ン ド	KSEB	110	30×2
シ ン ガ ポ ー ル		66	31.25×5
イ ン ド	APEB	66	15×7
イ ン ド	KSEB	66	8×6
イ ン ド	KSEB	66	4×4

部はもちろんのこと、電動操作機構も構造の単純化に重点をおいて細部構造を決定した。このことは保守、点検をも容易にした。

(6) 切換開閉器は変圧器の死命をも制すべききわめて重要な装置であるので、万一に備え動作不良に対し電氣的、機械的保護装置を設けて万全を期した。

日立抵抗式負荷時タップ切換器シリーズの納入実績は5,000 MVAに達する。表1は主要負荷時タップ切換変圧器の納入実績を、図1はLR-2 K形負荷時タップ切換器を適用した、中部電力株式会社西名古屋変電所納275 kV 300 MVA 変圧器を示したものである。

2. 抵抗式負荷時タップ切換器シリーズ

負荷時タップ切換の方法には周知のようにリアクトル式と抵抗式とがある。リアクトル式は原理的に運転上の信頼度が高く、また多数のタップ点数が得られることから従来、この方式が広く採用されてきた。しかし負荷時タップ切換変圧器の一般化に伴い設計、製造技術も著しく進歩し、適当な保護方式と組み合わせることにより抵

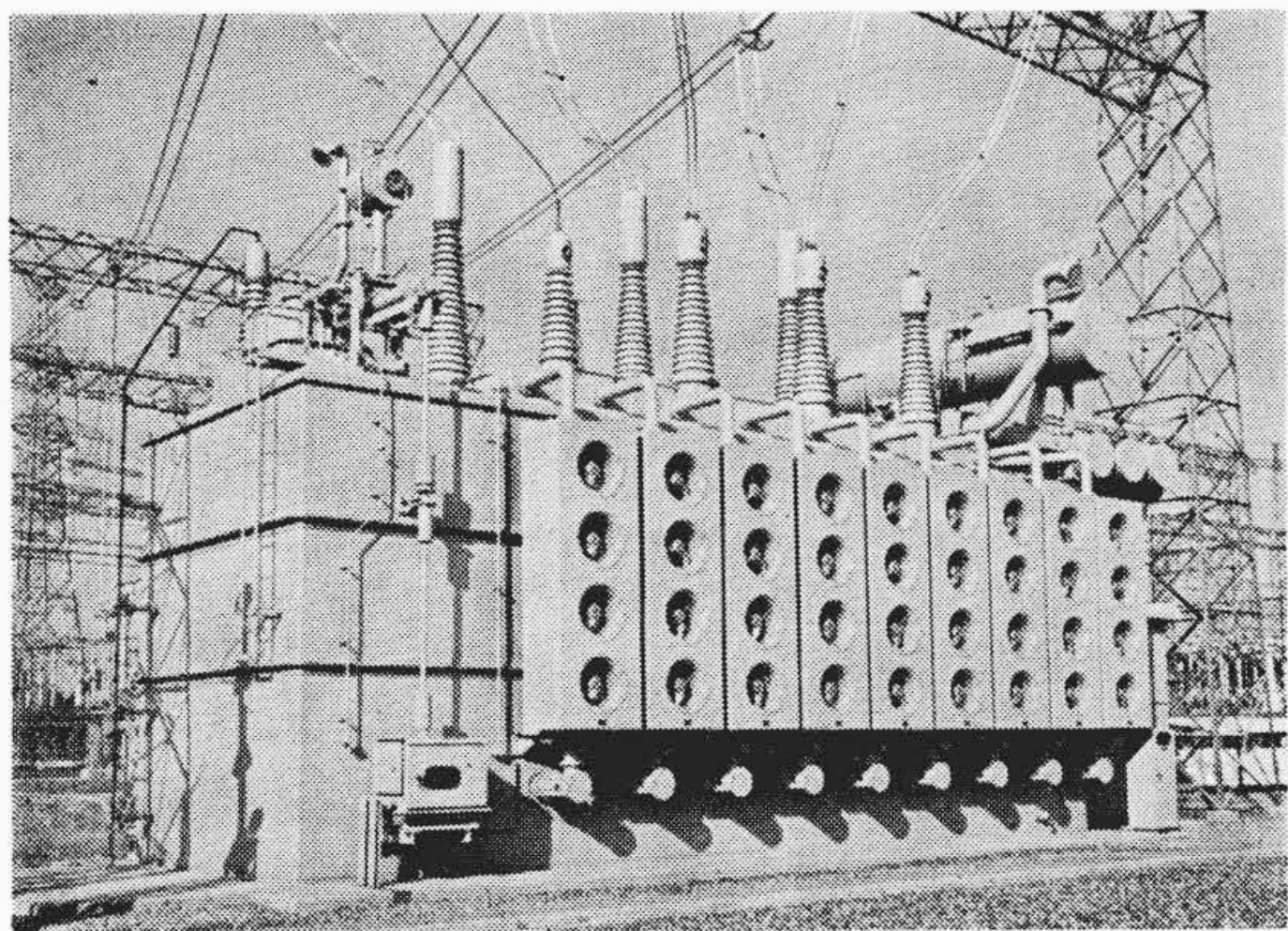


図1 275 kV 300 MVA 負荷時タップ切換変圧器

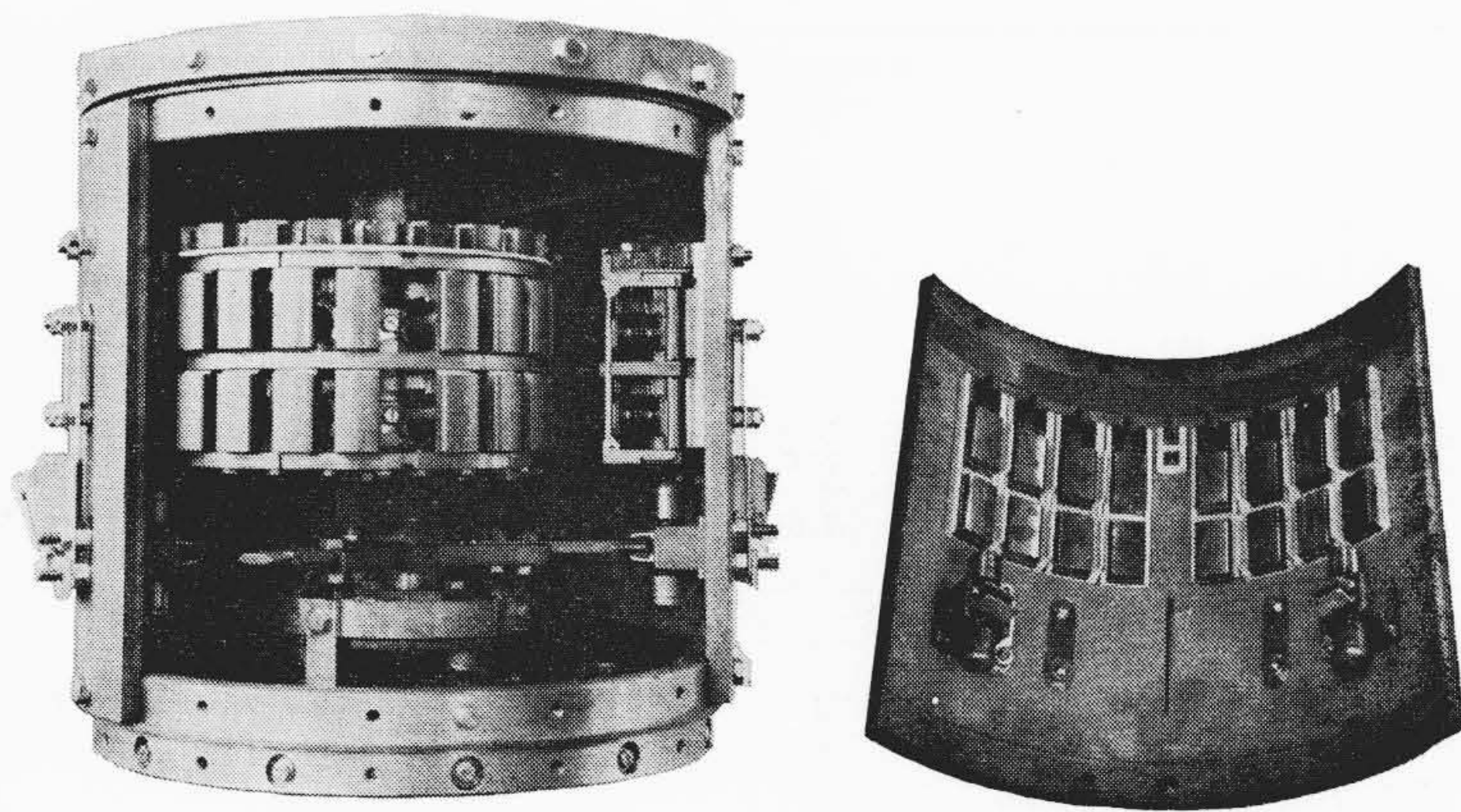


図3 切換開閉器遮断部

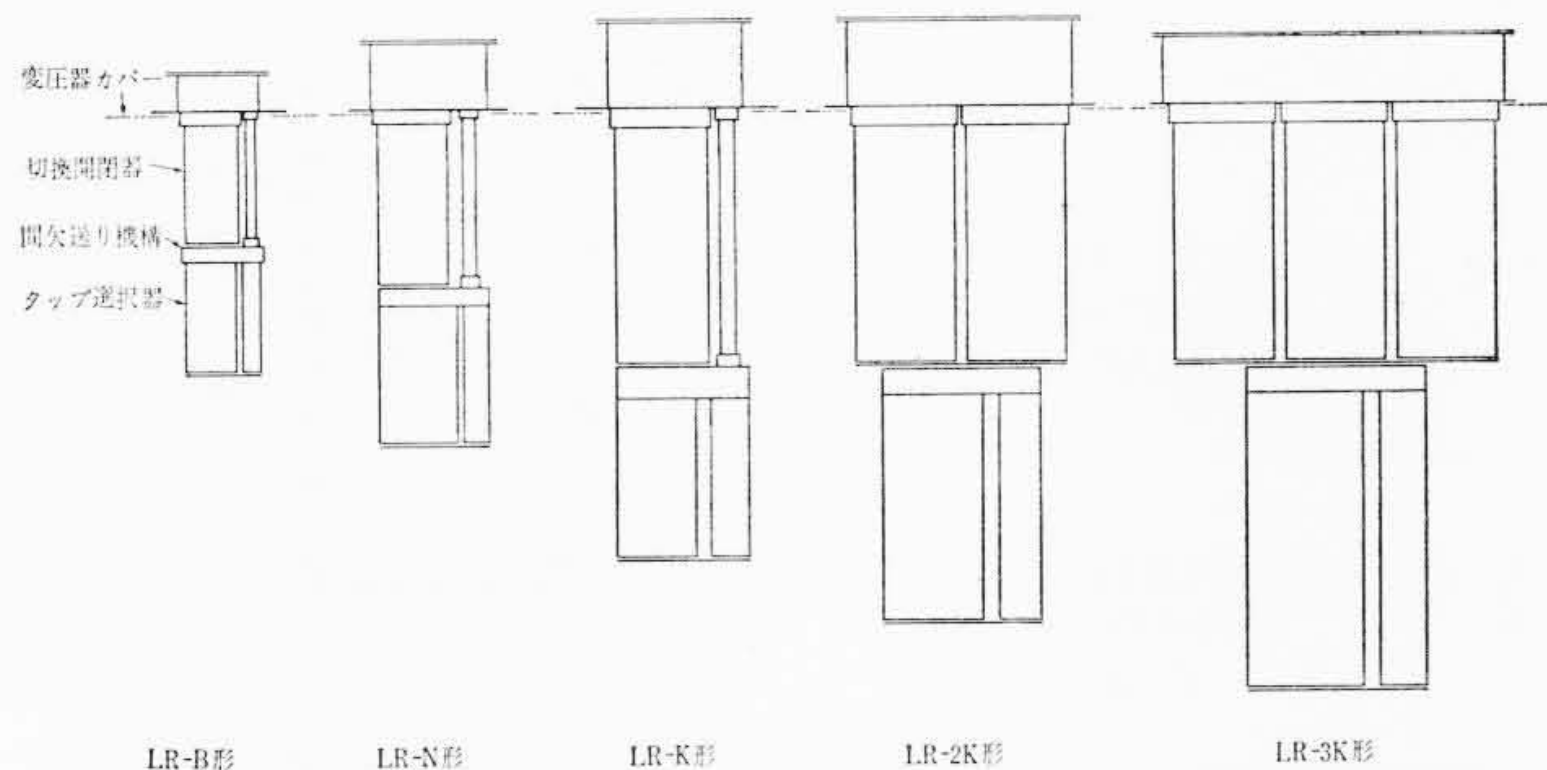


図2 負荷時タップ切換器各形式の外形寸法比較

抗式切換もリアクトル式切換と同等あるいはそれ以上の信頼度が期待されるにいたった。抵抗式切換は切換時の回復電圧と遮断電流とが同位相であるためアーク時間が短く油の汚損、接触子の消耗が少ないので高電圧、大容量切換開閉器を小形、軽量に製作できる長所がある。この点に着目し、リアクトル式の製作と並行して抵抗式の試作研究を重ね次の3機種を完成した。すなわち、送電用大容量器を対象とするLR-K, LR-2K, LR-3K形はそれぞれ275 kV 250 MVA, 400 MVA, 700 MVA級まで、LR-N形は154 kV 60 MVA級まで適用される機種、LR-B形は77 kV 20 MVA級まで配電用として適用される小形、軽量化の機種である。表2は各機種の仕様を、表3は各種変圧器に対する適用区分を、図2は各機種の外形寸法の比較を示したものである。

2.1 特 長

- (1) 変圧器タンク内に埋め込む内蔵形である。
- (2) 油の汚損、接触子の消耗の少ない多抵抗切換方式である。変圧器の電圧、容量によって6抵抗式(LR-K形)、4抵抗式(LR-N形)、2抵抗式(LR-B形)を適用しそれぞれの長所を発揮している。
- (3) 切換開閉器上部ケースのカバーを開くと切換開閉器を抜きとることができるので点検は容易である。一般に回転機構の遮断部は絶縁筒内部に機構が組み込まれているためその点検には特殊な技術を必要とする欠点がある。このため絶縁筒を3分割してそれぞれの内面に固定接触子の一相分を配置した構成にしたので、固定接触子は各相ごとに簡単に取りはずすことができるから点検、保守がきわめて容易である(図3)。特にLR-B形はつり上げ装置を必要とせず1名の点検員で持ちうる重量、寸法としてある。
- (4) 早切り駆動機構はローラとレバーを組み合わせた単純な回転機構であり、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ので単純、堅ろうで取扱い、点検が容易である。

表2 標準形負荷時タップ切換器仕様一覧

形 式	LX-A	LR-B	LR-N	LR-K	LR-2K	LR-3K
切 換 方 式	リアクトル式	2抵抗式	4抵抗式	6抵抗式	6抵抗式	6抵抗式
消 弧 方 法	磁気吹消気中形	油入形	油入形	油入形	油入形	油入形
構 造	ブッシング支持	変圧器埋込内蔵	変圧器埋込内蔵	変圧器埋込内蔵	変圧器埋込内蔵	変圧器埋込内蔵
通過電流 (A)	250	250	400	600	1,200	1,800
最高回路電圧 (kV)	77	77	154	275	275	275
適用変圧器容量 (MVA)	20	20	60	250	400	700

表3 適 用 区 分

公称電圧(kV) 変圧器容量(MVA)	66	77	110	154	187	220	275
10	LR-B	LR-B					
20	LR-B	LR-B					
30	LR-N	LR-N					
45	LR-K	LR-N	LR-N	LR-N			
60	LR-K	LR-K	LR-N	LR-N	LR-N		
100			LR-K	LR-K	LR-K	LR-K	
150			LR-2K	LR-2K	LR-2K	LR-2K	LR-K
200				LR-2K	LR-2K	LR-2K	LR-K
250					LR-2K	LR-2K	LR-2K
300				LR-3K	LR-3K	LR-3K	LR-3K
400					LR-3K	LR-3K	LR-3K
600						LR-3K	LR-3K

後述するように、多抵抗方式では接触子の切換シーケンスは抵抗を接続しない第1接触子のみを注意すればよく、切換能力、寿命などの性能を満足していれば、いたずらにシーケンスを厳密に考えて遮断部を複雑にする必要はない。品質管理、保守いずれの点からも簡単な方が好ましい。

(5) 機構の単純化と関連して、限流抵抗器の抵抗値は切換開閉器に固有であるという考え方にに基づき、負荷時タップ切換器の定格に対して抵抗値を決定し、個々の適用変圧器の仕様に対しては変えない。したがって標準化され量産に好都合である。切換シーケンスに着目し、これに重点をおくと接触子の消耗量を平均化するため必然的に変圧器仕様によって抵抗値を変えねばならない。日立製作所のシリーズは、あらかじめ適用の対象となる変圧器の最大タップ間電圧と最大電流を選定し、電圧、電流ともに最大値で寿命試験を実施してシーケンスが設計仕様を満足することを確認している。

2.2 切 換 方 式

負荷時タップ切換器の性能上、切換開閉器の接触子の寿命と、油

表 4 切 換 方 式 と 遮 断 責 務

			補助接触子 1	補助接触子 2	補助接触子 3	補助接触子 4
2 抵抗式		遮断電流	I (1.0)	$\frac{1+X}{2} I$ (1.0)	—	—
		回復電圧	$\frac{1}{X} e$ (1.0)	$(1 + \frac{1}{X}) e$ (2.0)	—	—
4 抵抗式		遮断電流	I (1.0)	$\frac{1+k_1X}{1+2k_1} I$ (0.71)	$\frac{1+(1+k_1)X}{1+2k_1} I$ (0.76)	—
		回復電圧	$\frac{1}{1+k_1} \cdot \frac{e}{X}$ (0.60)	$\frac{1+k_1X}{2k_1X} e$ (1.25)	$\frac{1+(1+k_1)X}{1+k_1} \cdot \frac{e}{X}$ (1.60)	—
6 抵抗式		遮断電流	I (1.0)	$\frac{1+k_2X}{1+k_1+2k_2} I$ (0.59)	$\frac{\{1+(k_1+k_2)X\}k_1}{2(k_1+k_2)} I$ (0.66)	$\frac{\{1+(1+k_1+k_2)X\}k_2}{1+k_1+2k_2} I$ (0.65)
		回復電圧	$\frac{1}{1+k_1+k_2} \cdot \frac{e}{X}$ (0.41)	$\frac{1+k_2X}{k_1+2k_2} \cdot \frac{e}{X}$ (0.83)	$\frac{1+(k_1+k_2)X}{k_1+2k_2} \cdot \frac{e}{X}$ (1.23)	$\frac{1+(1+k_1+k_2)X}{1+k_1+k_2} \cdot \frac{e}{X}$ (1.41)

() 内の数字は e および I に対する比で表わした試算値

e : 極間電圧, I : 定格電流

$$X = \frac{e}{I} \cdot \frac{1}{R_1}, \quad k_1 = \frac{R_1}{R_2}, \quad k_2 = \frac{R_1}{R_3}$$

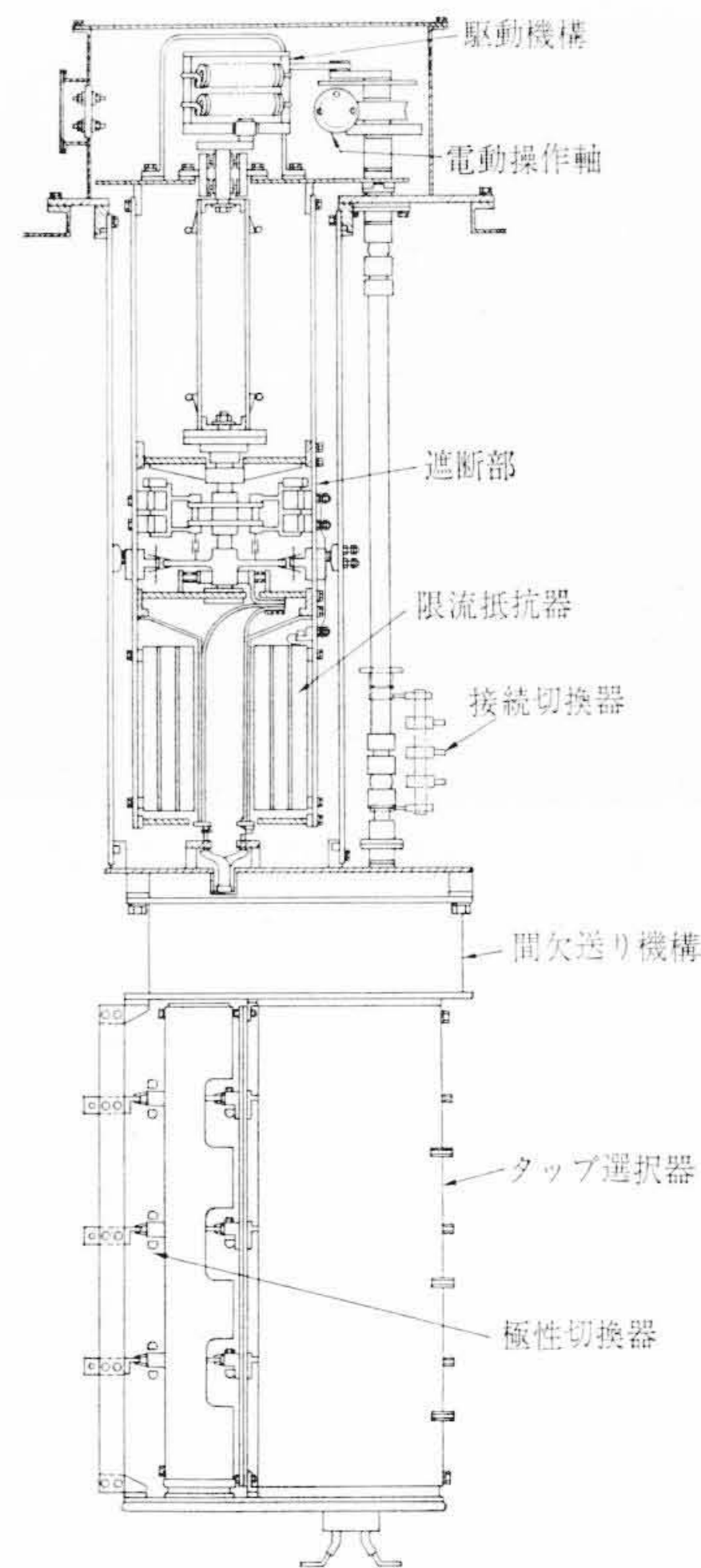


図 5 LR-K 形負荷時
タップ切換器全体構造

表 5 遮断責務変化の計算例

同時接触数		5—4		4—3		3—2	
		横流和	横流差	横流和	横流差	横流和	横流差
補助接触子 1	V_R	0.520	0.144	0.408	0.408	0.531	0.531
	I_R	1.565	0.435	1.000	1.000	1.000	1.000
補助接触子 2	V_R	0.880	0.121	0.831	0.231	0.759	0.759
	I_R	0.696	0.096	0.587	0.163	0.461	0.461
補助接触子 3	V_R	1.142	0.480	1.231	0.169	1.385	0.385
	I_R	0.691	0.290	0.663	0.091	0.627	0.174
補助接触子 4	V_R	1.000	1.000	1.408	0.592	1.759	0.241
	I_R	0.565	0.565	0.646	0.271	0.842	0.096
補助接触子 4'	V_R	—	—	—	—	0.531	0.531
	I_R	—	—	—	—	0.230	0.122

V_R : 回復電圧, 横流和(差) : タップ間橋絡時の横流が負荷電流と同じ(反対の)方向の場合
 I_R : 遮断電流

の汚損劣化は主要な事項である。これらは開閉する電圧、電流とその位相差に影響される。抵抗式切換では位相差が 0 であるからアーク時間が短く原理的に接触子の消耗、油の汚損劣化がリアクトル式と比較して少ない。抵抗式切換には使用する抵抗器の数、切換時の接触子のシーケンスにより種々の方式が考えられるが、代表的な 2 抵抗式、4 抵抗式、6 抵抗式につき、4 抵抗式と 6 抵抗式は抵抗の接続されない補助接触子 1 (表 4 参照)は次のタップに接続されている抵抗接触子が閉合する前に消弧する Flag-Pennant cycle として、回復電圧と遮断電流を計算した。 X, k_i を仮定して力率 1.0 のときの責務をタップ間電圧と通過電流の比として示したのが表 4 である。表で X と k_i は任意に選定できる定数であるから各接触子の責務を決定する自由度は使用抵抗器の数が多いほど大きく、補助接触子 1 の回復電圧を低くするよう決定して切換の信頼度を高めることもできる。計算結果からわかるように、抵抗器の数が増すと 1 タップ切換時のアーク発生回数は増加するが、各接触子の遮断容量は減少し、遮

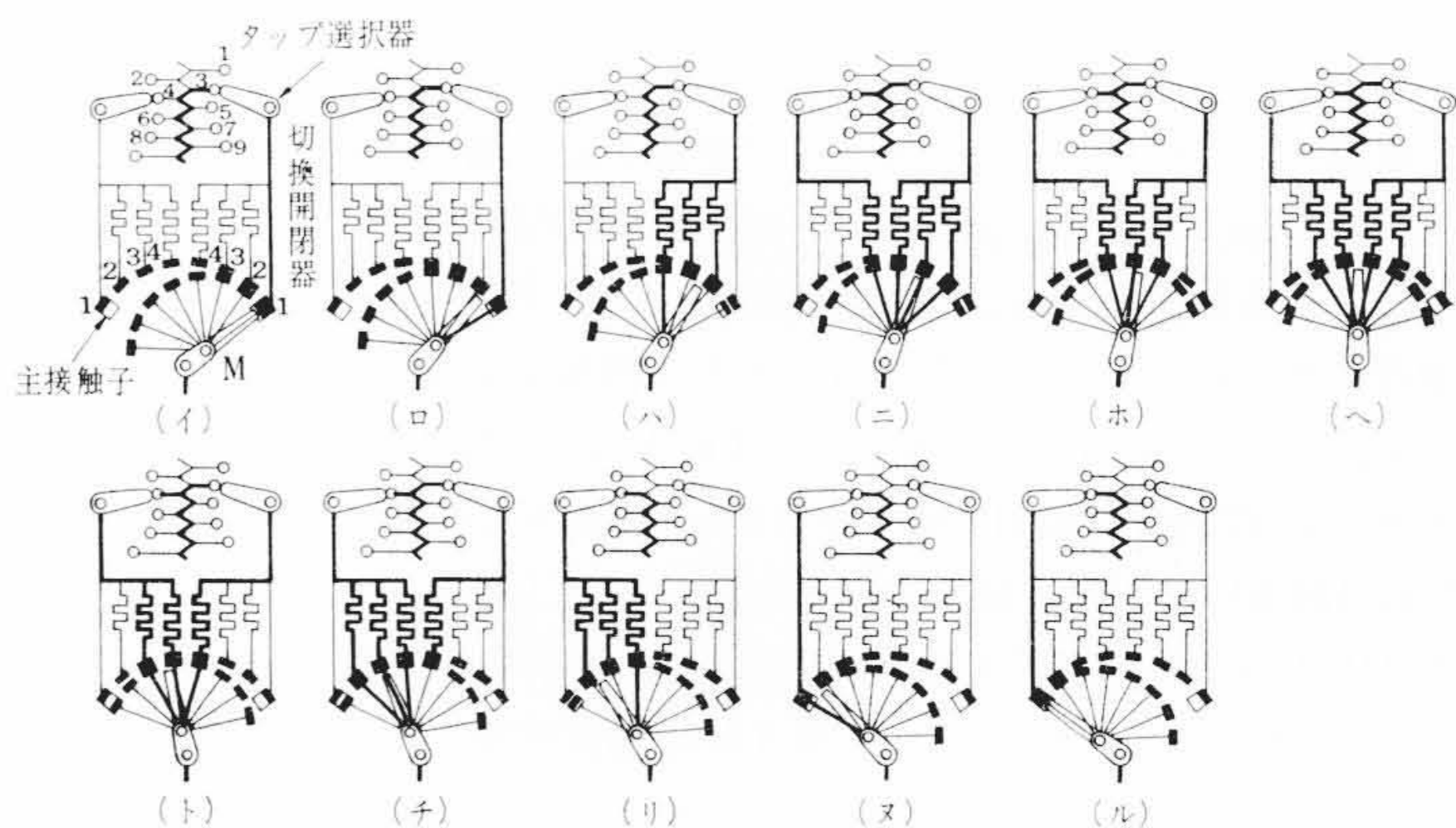


図 4 タ ッ プ 切 換 順 序

断容量の総和も減少する。6 抵抗式は補助接触子が各タップに 4 個ずつ、都合 8 個使用しているので、接触条件としては下記の場合が考えられる。

- (1) 切換途中同時に接点する接触子数が 5 点—4 点となる時
- (2) 切換途中同時に接点する接触子数が 4 点—3 点となる時
- (3) 切換途中同時に接点する接触子数が 3 点—2 点となる時

各場合につき責務を比較したのが表 5 である。補助接触子 1 は 5 点—4 点の場合と 4 点—3 点の場合とでは責務の差が著しいが、補助接触子 2, 3, 4 ではいずれでも大差がない。すなわち表の太線わく内ならば実用上区別して考えなくてもよい。

図 4 に 6 抵抗式 LR-K 形のタップ切換順序を示す。まず通電用主接触子 M が開極し、負荷電流を補助接触子 1 に移し補助接触子 2, 3, 4 が閉じて補助接触子 1 が開極し、次いで図の(ニ)から(ル)までの経過をたどって切換を完了する。これに要する時間は数サイクルである。

LR-N 形は 4 抵抗式、LR-B 形は 2 抵抗式である。

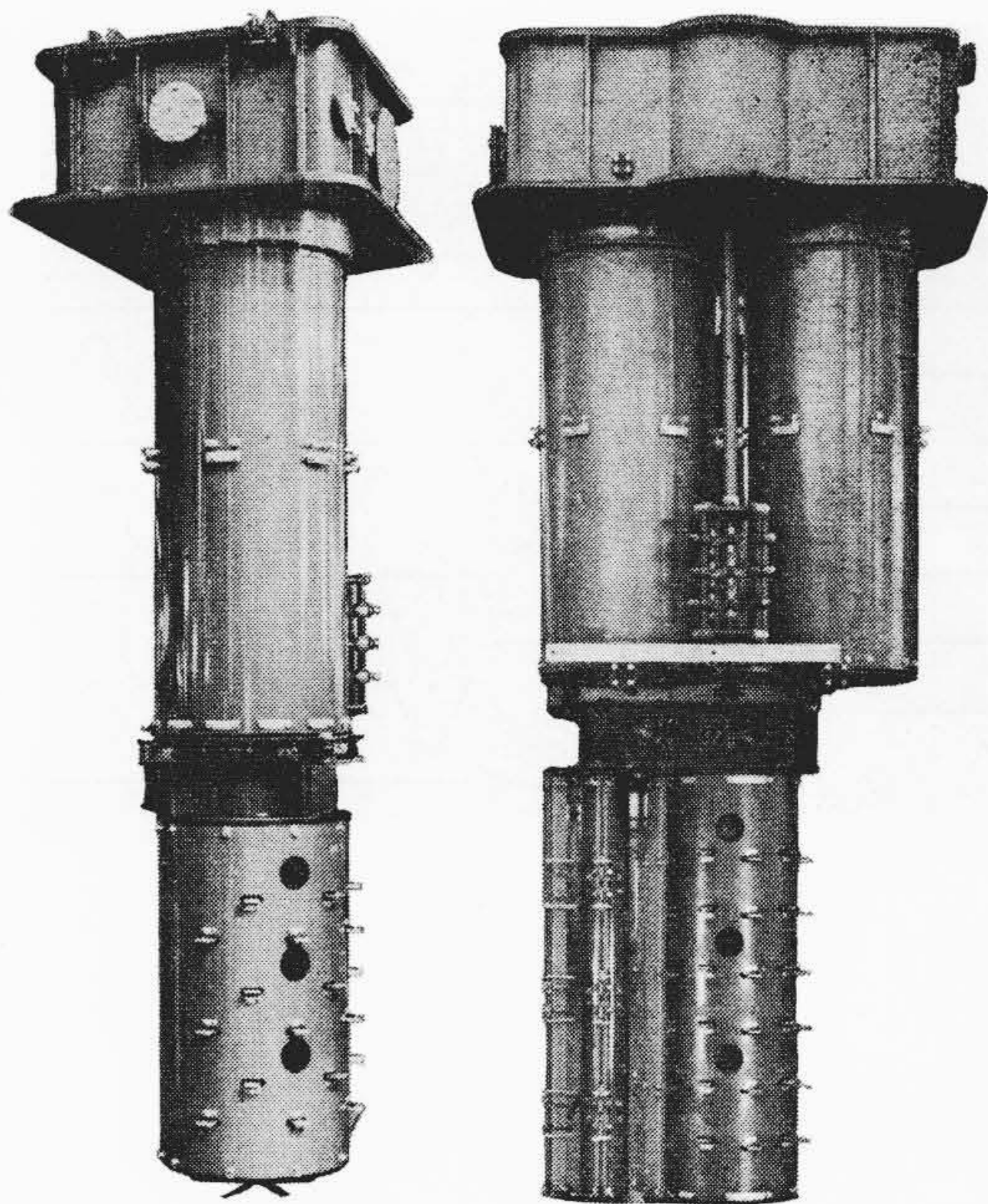


図6 LR-K形負荷時
タップ切換器

図7 LR-2K形負荷時
タップ切換器

2.3 構造

負荷時タップ切換装置は切換開閉器、タップ選択器を一体にして変圧器タンク内に収納する構造である。図5,6に全体構造を示す。切換開閉器部分は絶縁筒に組み、これを変圧器本体側と分離した油密な絶縁筒内に変圧器カバー上から収納する。切換開閉器の遮断部は固定接触子を絶縁筒内面に耐アーク性絶縁材料を介して配置し、可動接触子は一相分の接触子を全数、早切り駆動軸から偏心位置に支持された1個の扇形フレームに取り付ける構造である。遮断部絶縁筒は点検を容易にするため3分割される。遮断部で発生するカーボン、金属粉、スラッジ類は下側に設けたパイプ内にたまる構造で、抵抗器はパイプの外周に配置されている。切換開閉器部分の同心状に配置された2本の絶縁筒の間げきに活線浄油用絶縁管が通してある。

点検などのため切換開閉器を取り去って変圧器を運転する必要がある場合、駆動機構ケース内に設けたハンドルで付属の接続切換器を操作し運転に入れることができる。

LR-2K形、LR-3K形は基本形のLR-K形切換開閉器を2台または3台を駆動機構ケースで一体にした構造であって、筒間の動作にズレを生じない。図7にLR-2K形負荷時タップ切換器を示す。三相器で電流容量の点から1台では不足の場合、単独に使用する方法では3台必要になるが、LR-2K形のような構造では2台分のスペースでよく、さらに一体構成であるからスペースは小さく、LR-2K形、LR-3K形では単独使用と比較して床面積は小さくてよい。

2.4 実用性能

実用性能試験は負荷時タップ切換変圧器の性能と信頼度を決定する重要な試験であり、電気協同研究会「負荷時タップ切換変圧器実用性能専門委員会」の試験基準に準拠し、厳重な形式試験を実施した。とりわけ、基本形のLR-K形は電力会社9社、電源開発株式会社および日本国有鉄道の都合11社立会のもとに実施され、接触子の寿命、汚損油中での絶縁耐力などの仕様を満足する性能であることが確認された。表6は試験要項の概略を示したものである。主要な項目につきLR-K形を例にとり説明する。

表6 形式試験要項

試 験 項 目		負荷切換(万回)				0				2				10				20				試 験 方 法
		機械的切換(万回)				0				2				10				20				
		0	2	10	30	60	62	70	80													
切 換 開 閉 器	駆動バネの特性	×							×									引張試験機による				
	接触子の接触抵抗	×							×									接触抵抗測定器による				
	接 触 子 の 消 耗	×				×		×	×									各接点の重量測定と寸法測定を行なう				
	接 触 子 の 動 作	○				○	×	○	○									オシログラフによる				
	通電部の温度上昇	×																熱電対による				
	油 密	○							○									90℃の油を0.5 kg/cm ² 2時間加圧する				
	絶 縁 油 の 特 性					×	×	×	×									絶縁耐力, 酸価を測定する				
	絶 縁 耐 力	○							×									80万回時は10万回連続開閉した汚損油中で100%印加する				
	負 荷 切 換					○	×	○	○									オシログラフによる				
	過 電 流 切 換								○									150% 負荷切換をオシログラフによる				
	短 絡 電 流 通 電								○									定格電流の10倍を2秒間づつ5回通電する。このうち1回は第1波を25倍にする				
	構 造 点 検	○	×	×	×	○	×	○	○									構造点検表による				
抵 抗 器	抵 抗 値	×							×									ホイートストンブリッジによる				
	絶 縁 耐 力	○							×									AC, インパルスとも所定値を印加する				
	温 度 上 昇	×																熱的に等価な電流を連続通電する				
	構 造 点 検	○	×	×	×	○	×	○	○									構造点検表による				
タ ッ プ 選 択 器 極 性 切 換 器	接点の接触抵抗	×							×									切換開閉器の場合と同じ				
	接 点 の 摩 耗	×							×									切換開閉器の場合と同じ				
	通電部の温度上昇	×							×									切換開閉器の場合と同じ				
	絶 縁 耐 力	○							×									AC, インパルスとも所定値を印加する				
	切 換 動 作	○				○			○									オシログラフによる				
	短 絡 電 流 通 電								○									切換開閉器の場合と同じ				
	構 造 点 検	○	×	×	×	○	×	×	○									構造点検表による				
電 動 操 作 機 構	電 動 機 の 電 流	×			×	×			×									オシログラフによる				
	駆 動 ト ル ク	×			×	×			×									トルクレンチによる				
	総合シーケンス	○				○			○									オシログラフによる				
	絶 縁 耐 力	×																2,000V 1分間				
	構 造 点 検	○	×	×	×	○	×	×	○									構造点検表による				
伝 導 部	構 造 点 検	○	×	×	×	○	×	×	○									構造点検表による				

○：立会試験

×：社内試験としデータ提出

(1) 接触子の寿命

定格の極間電圧2,050V、通過電流600Aに対し、実際の使用状態と同じ責務を各接触子に与え、図8に示す試験回路にて20万回の開閉試験を行なった。図9は切換のオシログラムを、図10は20万回試験後の接触子状態を示したものである。図11は補助接触子1の消耗特性を示し、また図12は絶縁油の劣化特性を示したものである。LR-2K形、LR-3K形についても同様の回路により試験した結果、基本形と全く同じ消耗特性を示し、しかも並列になった接触子間の消耗の差がきわめてわずかであった。特にLR-3K形は2,050V、1,800Aの仕様に対し2,300V 1,800Aの試験責務を課している。

昭和39年営業運転を開始後1個年目切換回数21,000回に達した275 kV 200 MVA 負荷時タップ切換変圧器の現地点検結果を図13に示す。活線浄油機を使用しているので絶縁油の汚損は見られず耐圧は50 kV以上であった。

(2) 過電流切換

寿命試験と同じ回路によって150%電流900Aの切換を実施し、定格電流切換と同じ0.5サイクル以内で消弧することを確認した。さらに日立製作所日立研究所大電力実験室において大電流開閉試験も実施し、短絡電流開閉能力の基礎データをは握した。

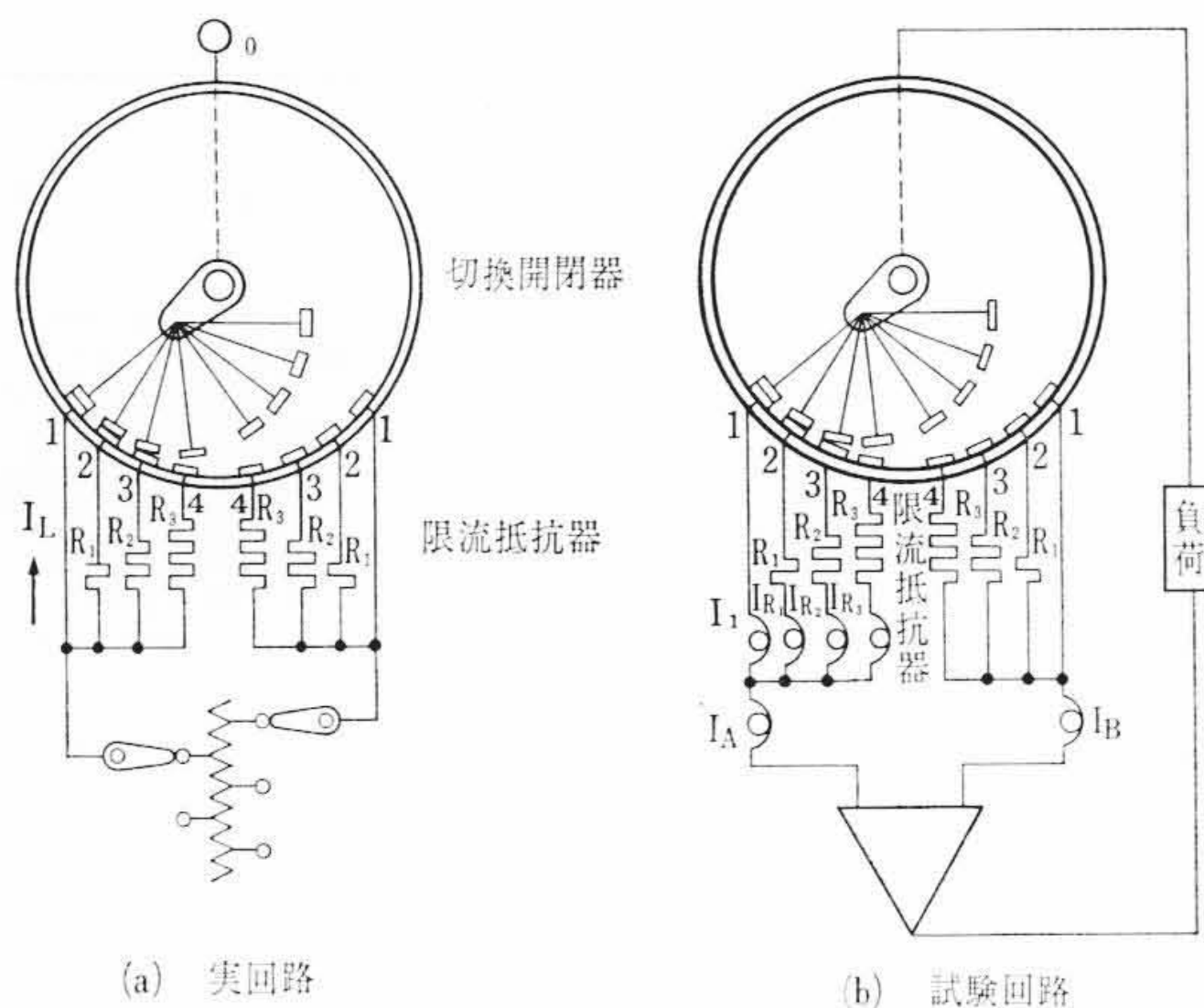


図8 接触子寿命試験回路

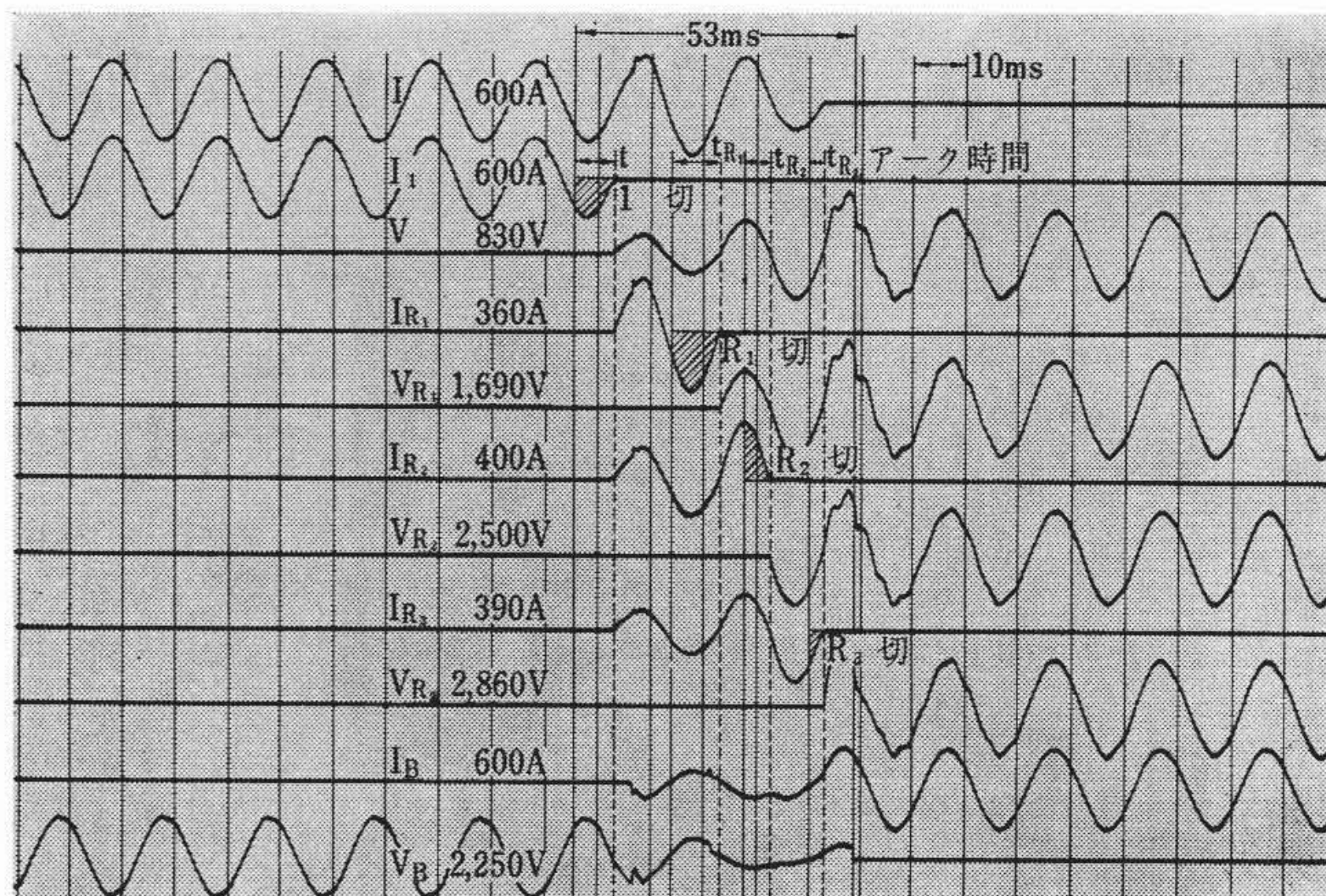


図9 切換のオシログラム

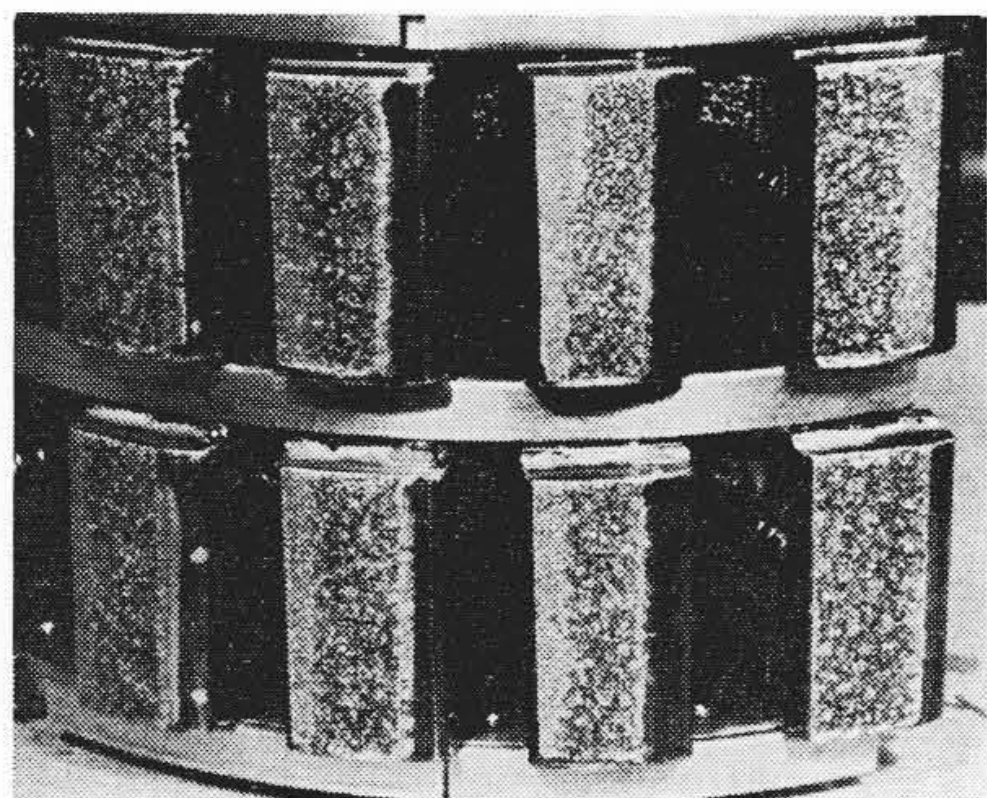
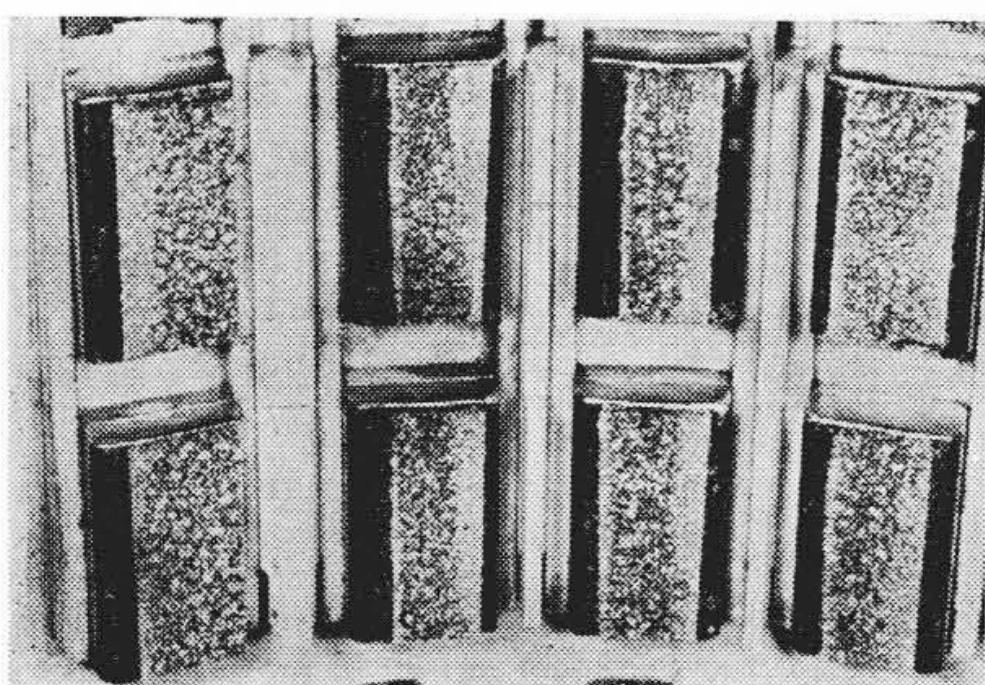


図10 200,000回切換後の補助接触子 (極間電圧 2,050V 通過電流 600A)

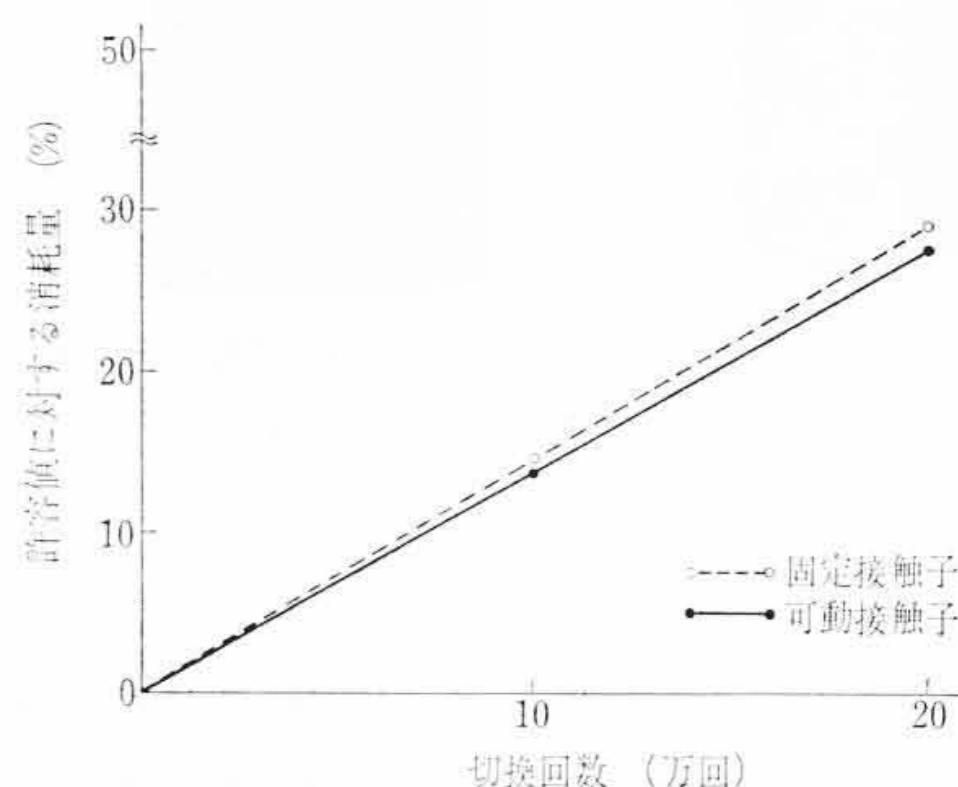


図11 補助接触子1の消耗量

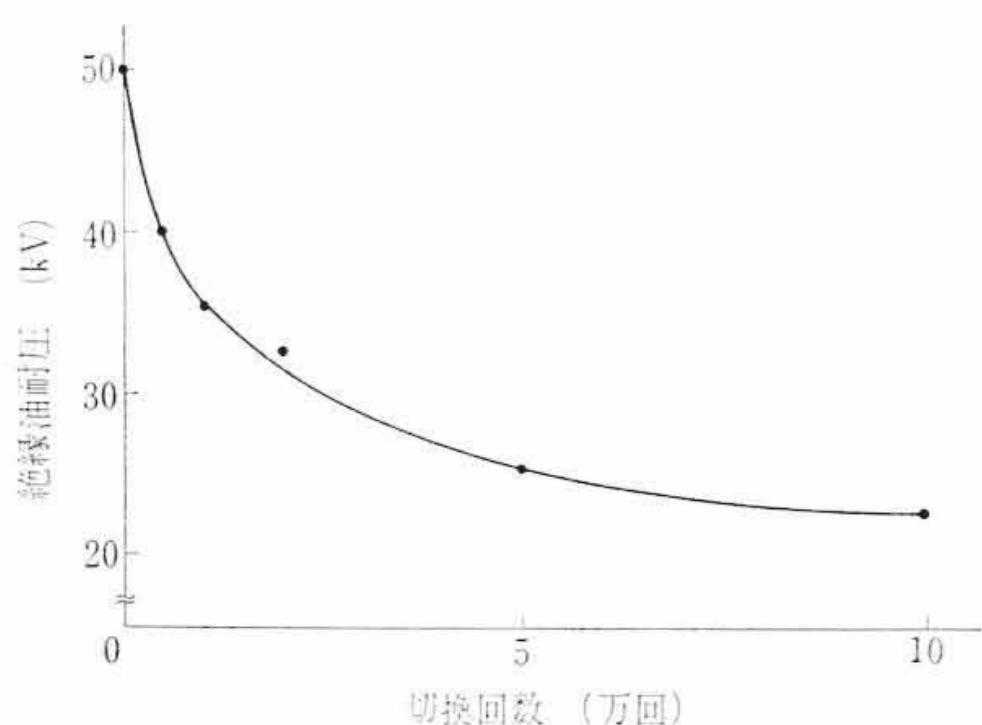


図12 絶縁油劣化特性

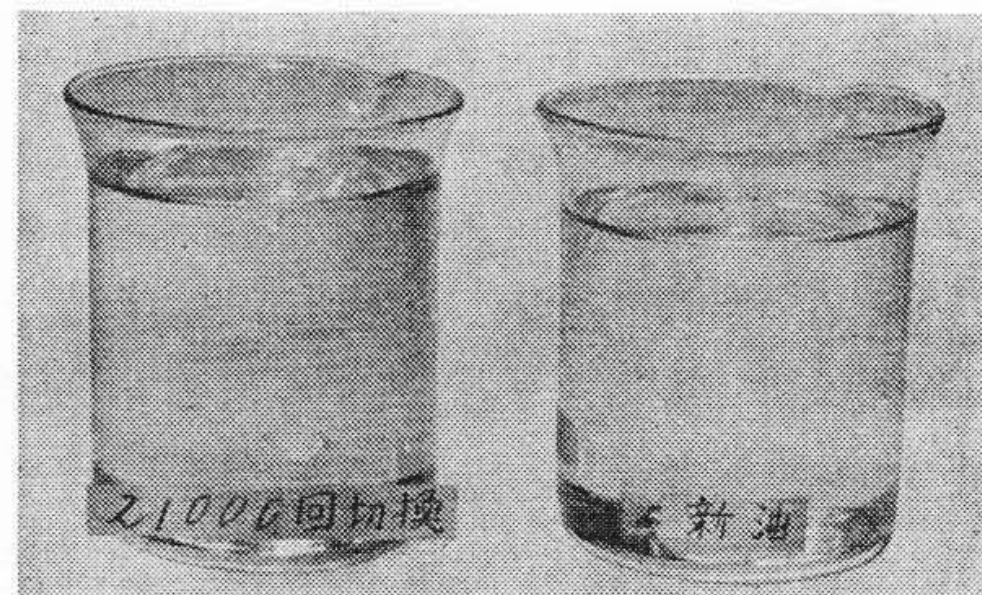
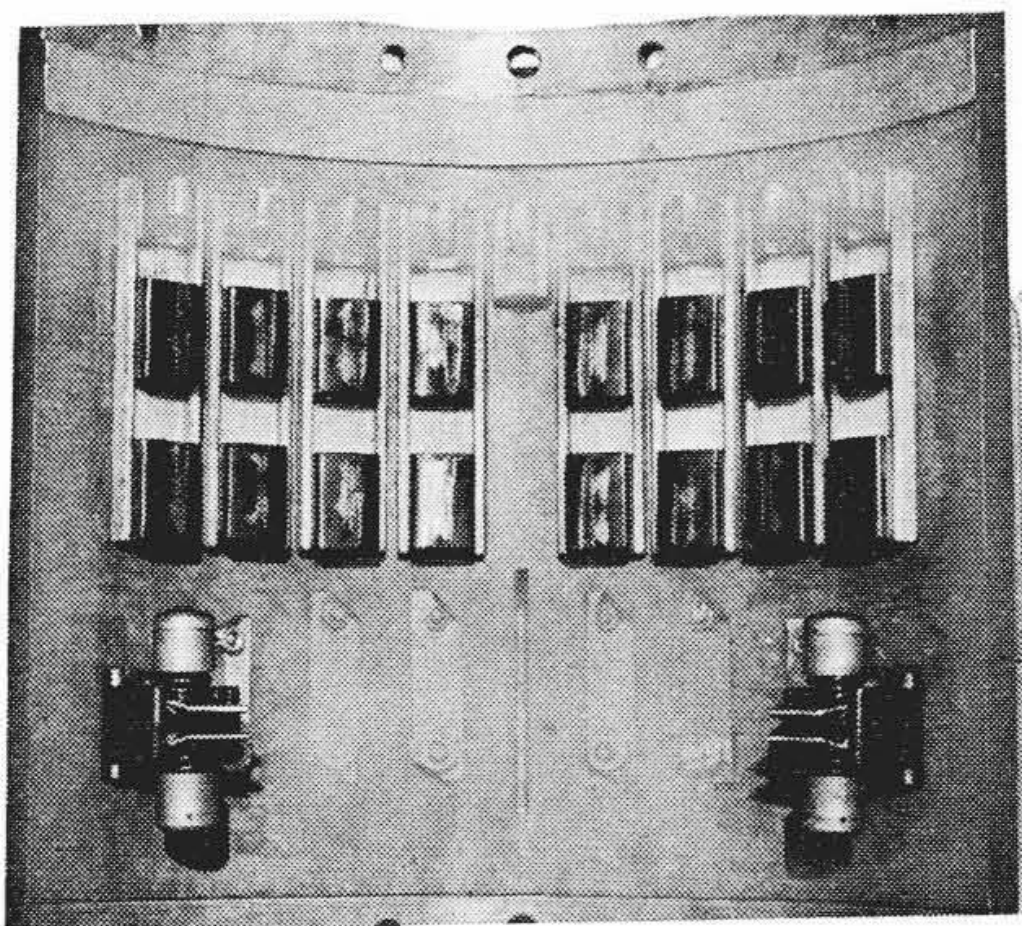


図13 21,000回切換後の現地点検結果 (275 kV 200 MVA 負荷時タップ切換変圧器)

(3) 短絡電流通電

定格電流の10倍の電流を2秒間ずつ1分間隔で5回通電し、このうち1回は定格電流の25倍の初期波高値を含む電流を通電し、熱的、機械的に異常のないことを確認した。

(4) 機械的寿命

規約回数の80万回動作後、摩耗がほとんど認められないので160万回まで実施したが異常は認められなかった。

(5) 絶縁耐力

タップ間、相間および対地絶縁強度につき寿命試験開始前と、終了時に100%商用周波試験電圧およびインパルス電圧を印加した。試験終了時の加圧は10万回負荷開閉試験後の汚損油中で実施した。さらに新油と汚損油にたいして商用周波試験電圧を長時間印加しコロナ特性を測定し、いずれも安定な特性であることを確認した。

(6) 継電器類の接点

パイロットスイッチ、リミットスイッチ、ダイヤルスイッチなど

の接点にはランプ負荷を接続して接点寿命をあわせて確認した。

3. 結 言

性能の向上、標準化および小形軽量化を目的に抵抗式負荷時タップ切換器シリーズを開発し、配電用変圧器から発電所用大容量変圧器までのあらゆる変圧器に適用できるようになり、電気協同研究会の推奨試験基準に基づく厳重な形式試験を実施し性能を確認した。かくして抵抗式負荷時タップ切換変圧器の納入実績は5,000 MVAに達した。

形式試験および採用に当たって有益なご助言、ご指導をいただいた電力会社各位に厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 桜木：日立評論 42, 1267 (昭35-12)
- (2) O. P. McCarty ほか：AIEE (1957) p. 27~33
- (3) 電気協同研究会：電気協同研究 第20巻第5号, 第21巻第5号