

超高压負荷時電圧および位相調整器

Load Voltage and Phase Regulator for High Voltage System

桜木 義祐*
Yoshisuke Sakuragi

内 容 梗 概

電力潮流制御のため負荷時電圧位相調整器や負荷時電圧調整器を使用することが経済的である。このたび日立製作所では超高压 275 kV 回路の位相および電圧調整を行う大容量調整器を完成した。位相調整は千鳥形結線方式と一組の負荷時タップ切換装置とにより行うもので電圧調整分も含めて一鉄心の変圧器でその目的を達することのできるものを開発した。タップ巻線は高压回路に直接接続されるので線路よりの侵入波に対する絶縁については慎重に検討を行った。負荷時タップ切換装置は特に大容量器高電圧用として新しい構造が採用され、長寿命試験に耐えることを確認し、さらに負荷時浄油装置を開発して保守が容易で、電力供給に便利なものとした。

1. 緒 言

最近の電力需要の急激な増加に応じて、発電系統の連系、新幹線との並列化、需要地域周辺の電力網の強化などにより、旧設備を利用して経済的な電力の融通を目指す系統構成が計画されている。東北電力株式会社においては水力系 275 kV 送電線と火力系 154 kV 送電線とを仙台変電所において環状回路に接続する計画であり、東京電力株式会社においては 275 kV 東京外輪線に電力を集中させる計画をたてている。

系統を連系させてその目的を達するためには母線電圧を適当に制御して、経済的に最も効率よく有効、無効電力の配分が行われねばならない。一般に放射状回路では送電線の損失、負荷率および負荷条件を考慮して電圧調整器や同期調相機を設置し無効電力の制御と母線電圧の確立がはかられる。さらに系統が環状をなすときはその回路に循環有効分電流の制御を任意に行いうる位相調整器をそう入せねばならない。送電電力が増大するに従い電力送電機器も一段と単巻容量が増大してゆく傾向にあって、電力潮流の制御を行うに最も経済的でその効果の大きい変圧器の変圧比の調整が負荷時タップ切換装置の進歩と相まって超高压系統に適用されるに至った。日立製作所ではこのたび 275 kV 送電回路の変圧器巻線のタップを直接切り換える負荷時タップ切換装置を完成し、これを応用した超高压用負荷時電圧位相調整器および負荷時電圧調整器を完成した。これらは新しい方式や特殊な使用条件が考慮されているもので以下その概要を紹介する。

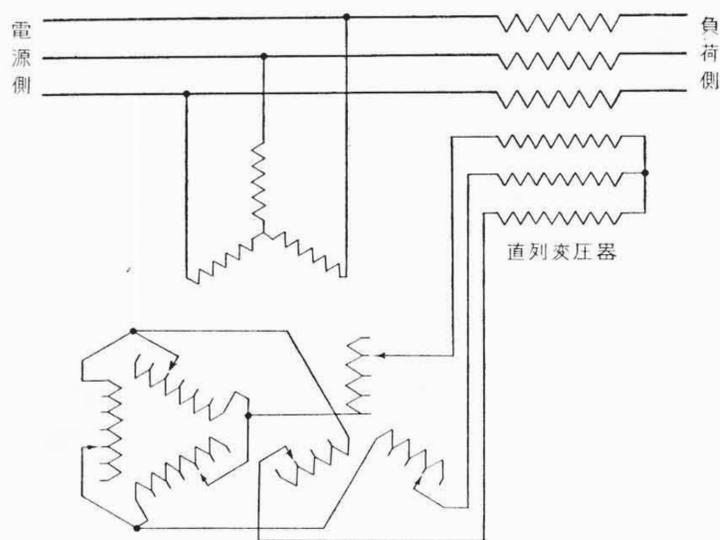
2. 負荷時電圧位相調整器

2.1 電圧位相調整方式

回路電圧に対し同相分電圧調整と直角位相電圧調整を行うのに種々の結線方式が考えられる。たとえば第1図に示す調整器は調整変圧器の二次巻線を二組設け、一組は三角形結線として直角位相分を、ほかは星形結線として同相分電圧をだし両電圧を合成して直列変圧器を介して線路にそう入されるもので、2個の変圧器でその目的を達することができる。この結線方式はすでに古く昭和13年に日立製作所が製作した経験がある⁽¹⁾⁽²⁾。

今回1個の変圧器で同相電圧と、直角位相電圧ともに調整できる方式を考案した⁽³⁾。第2図に示すとおり巻線 $U_1 \cdot U_2 \cdot U_3 \cdot U_4$ は変圧器の一脚に巻回された同方向の電圧位相をもつ、 U_1 は主巻線、 $U_2 \cdot U_3 \cdot U_4$ などはそれぞれ一相分のタップ巻線で $U_2 \cdot U_3$ は位相調整用、 U_4 は同相電圧調整用巻線を示す。 $U_1 \cdot U_2 \cdot U_3 \cdot U_4$ の巻線グループと

* 日立製作所国分工場



調整変圧器
第1図 結線図(2鉄心構造のとき)

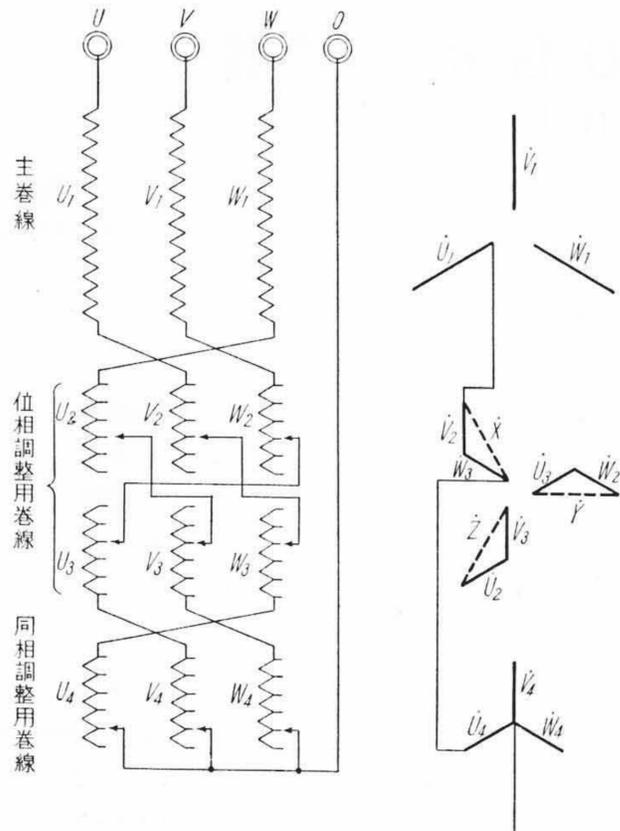
$V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot V_4$ の巻線グループ、 $W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4$ の巻線グループはそれぞれ電氣的に120度ずつの位相差をもつ三相変圧器巻線である。主巻線ベクトル \dot{U}_1 に対して直角ベクトル電圧をうるためには、タップ巻線 V_2 と W_3 を接続するいわゆる千鳥形結線として合成ベクトル \dot{X} によって得られる。さらに同相分ベクトル \dot{U}_4 を加えれば三相変圧器は電圧・直角位相ともに調整できることとなる。

一般に負荷時電圧調整を行う場合は一組のタップ巻線に一組の負荷時タップ切換装置を設けるのが普通であるから第2図の方式は三相1組の負荷時タップ切換装置を3組設けねばならないことになる。直角位相電圧をうるために後述のように千鳥形結線の一次・二次を同時に橋絡する方式とすることにより1組の負荷時タップ切換装置でその目的を達することができる。したがって1個の変圧器と三相分2組の負荷時タップ切換装置とで直角位相電圧・同相電圧の調整が可能となった。

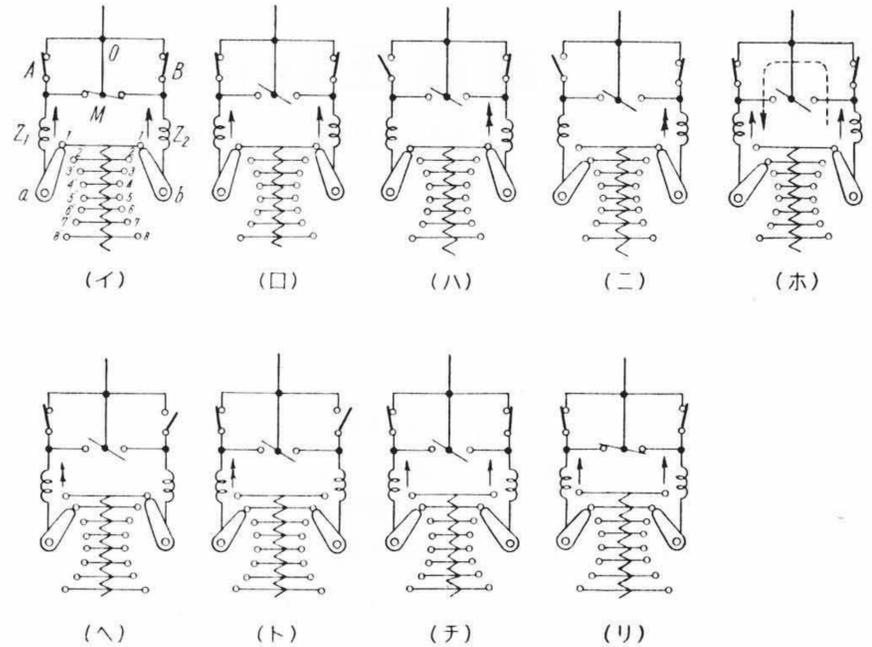
2.2 タップ切換方式

(1) 同相電圧調整 タップ切換回路は第3図に示すとおり各タップからの2本の口出線は2組のタップ選択器 a, b を経て、リアクトルの左右両半部 $Z_1 \cdot Z_2$ に接続され、さらに切換開閉器の電弧接触子 A, B を通して共通接続点 0 に至る。そして主接触子 M は電弧接触子 A, B のリアクトル側を橋絡し電弧接触子 A, B に並列回路となって 0 点に接続されている。(イ) 図で負荷電流はリアクトルにより左右の両回路に等しく分流し各接触子を通過して 0 点に合流する。具体的にタップ1から2へ切換える場合の切換順序は下記のとおりである。

- (イ) タップ1の運転位置
- (ロ) 切換開閉器の主接触子 M を開く



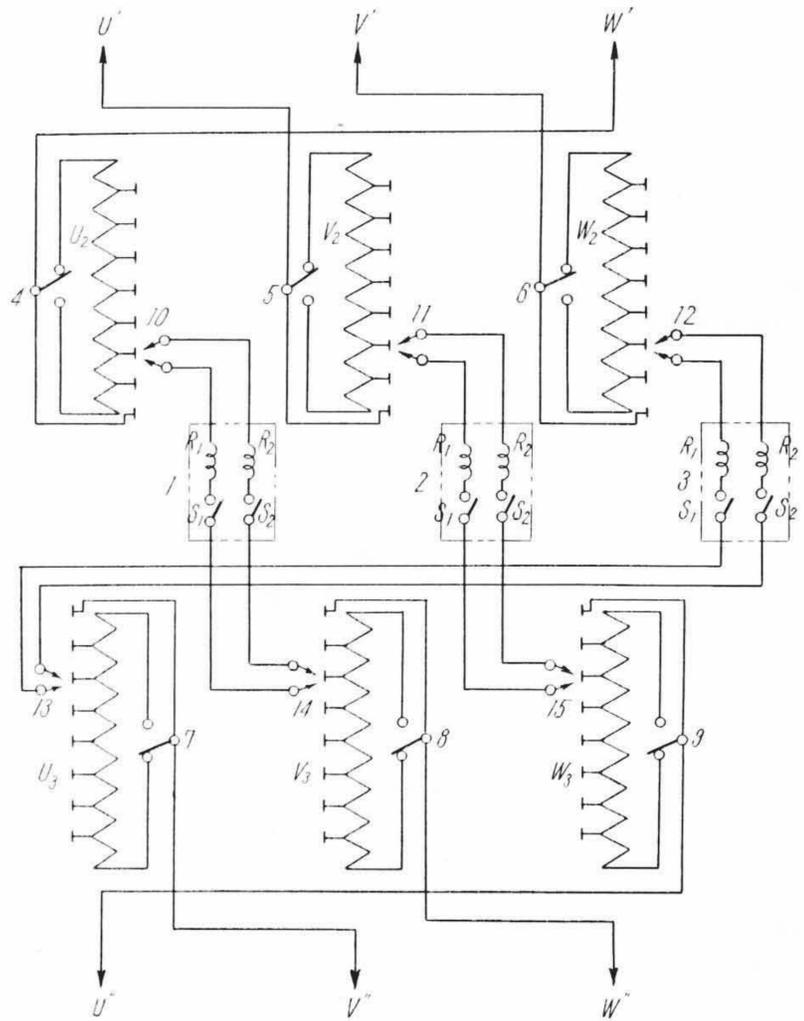
第2図 結線図およびベクトル図



第3図 負荷時タップ切換方式説明図

- (ハ) 切換開閉器の電弧接触子Aを開く
- (ニ) 無電流になったタップ選択器aを1'から2'に移す
- (ホ) 切換開閉器の電弧接触子Aを閉じる (1タップ電圧がリアクトルに制限された循環電流が流れる)
- (へ) 切換開閉器の電弧接触子Bを開く
- (ト) タップ選択器bをタップ1から2に移す
- (チ) 切換開閉器の電弧接触子Bを閉じる。
- (リ) 切換開閉器の主接触子Mを閉じる(タップ2の運転位置)

(2) 直角位相調整 第4図は第2図の直角位相電圧調整部分のみを取り出して示したもので、各相における第1のタップ巻線 $U_2 \cdot V_2 \cdot W_2$ の一端は極性切換器 4・5・6 を介して主巻線へ接続され他端は三相分よりなる一組の負荷時タップ切換装置 1・2・3 を通して第2のタップ巻線 $U_3 \cdot V_3 \cdot W_3$ に接続されている。これら負荷時タップ切換装置は切換開閉器 $S_1 \cdot S_2$ および限流リアクトル $R_1 \cdot R_2$ を備え、第1、第2のタップ巻線のタップをタップ選択器 10, 11, 12, 13, 14, 15 により直角電圧となるよう適当なタップ間を互に連絡している。第2のタップ巻線は極性切換器 7, 8, 9 を介して中性点側に至っている。



第4図 直角位相電圧調整部分接続図

このような構成とした場合、直角位相電圧を調整するには一方の切換開閉器 S_1 を開路して、それに接続された両側のタップ選択器を隣接する任意タップ位置に移行させて負荷開閉器 S_1 を閉じる。次に他方の切換開閉器 S_2 を開いて、その接続されたタップ選択器を前記のタップ位置に並列となるように追従移行させ、 S_2 を閉じてタップ切換操作が完了する。限流リアクトル R_1, R_2 は互に起磁力を打消すように巻いてあるので、切換動作中のタップ橋絡による循環電流を制限するのに有効に約立ち、正規運転状態では調整回路に対してなんらリアクタンスとして作用することはない。

2.3 一般構造

東北電力株式会社仙台変電所に納入された負荷時電圧位相調整器2台は次の仕様のもとに設計製作された。

主変圧器

屋外用送油風冷式三相三巻線内鉄形制振遮蔽付 50~

	一次	二次	三次
容量 (kVA)	120,000	132,000	60,000
電圧 (kV)	273.8	154	33
絶縁階級	線路側 200号	140号	30号
	中性点側 70号	100号	
結線	星形	星形	三角形

負荷時電圧位相調整器

屋外用油入自冷式三相内鉄形負荷時タップ切換装置付 50~

定格容量 22,000 kVA

線路容量 120,000 kVA

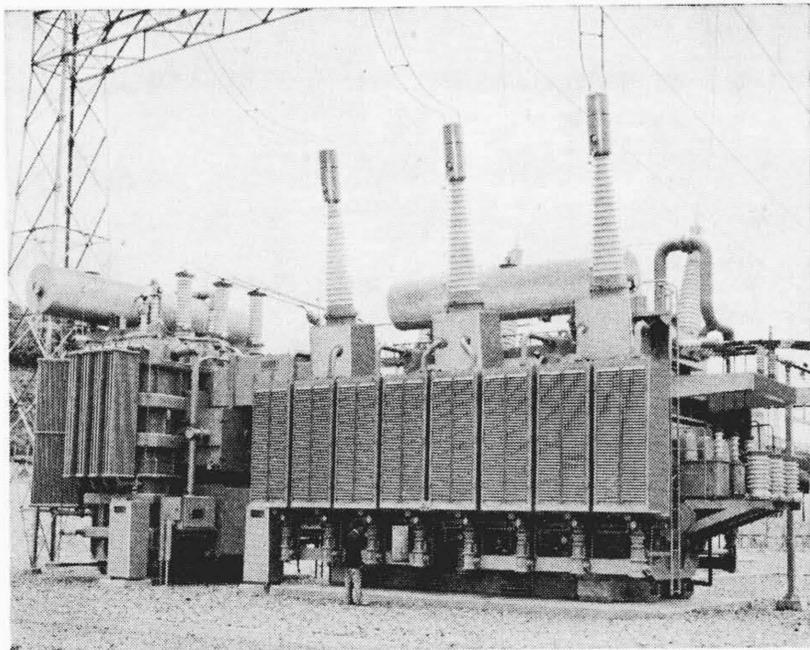
電圧 一次 33kV 二次 (273.8kV) $\pm 5\% \pm j10^\circ$

絶縁階級 一次 30号 二次 線路側 50号

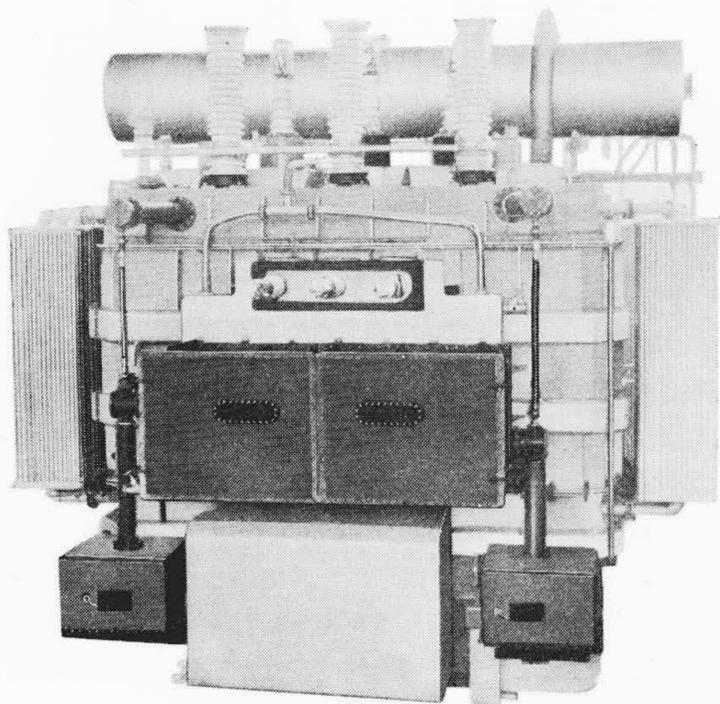
中性点側 30号

結線 一次 三角形 二次 星形および千鳥形

電圧位相調整用タップ巻線を超高圧 275 kV 巻線の中性点側に設



第5図 132,000 kVA 主変圧器および 22,000 kVA 負荷電圧位相調整器現地据付図

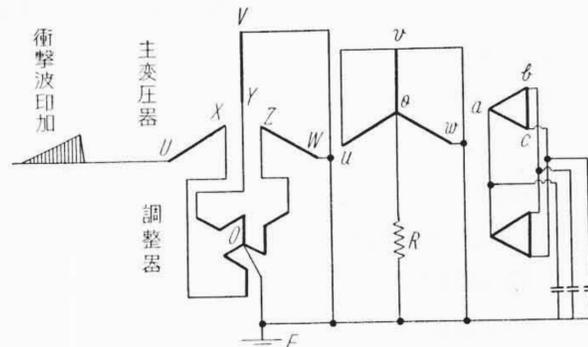


第6図 22,000 kVA 負荷時電圧位相調整器外観図

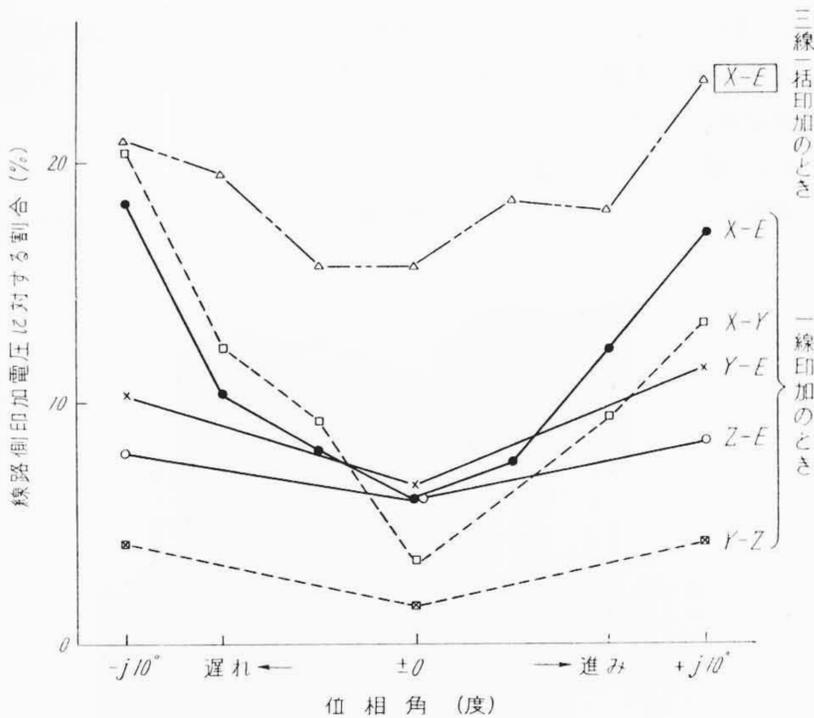
けて相間絶縁を楽にしたこと、同相分・直角分を合わせたタップ巻線のタップ数は一般の負荷時電圧調整器に比べてはるかに多いこと、保守点検の容易なることなどを考慮して調整器は主変圧器とは別置形とした。調整器を主変圧器のすぐ横に設置し、各変圧器のブッシングをそれぞれ対向せしめたのでそれぞれ直接接続導体で連絡し、中間支持物を介さないものとした。主変圧器はタップなしで超高压大容量変圧器の標準構造である制御遮蔽付、巻線強制冷却方式を採用し、五脚鉄心としてつりはり式貨車による組立輸送を行った^{(4)~(8)}。調整器の $\pm j10^\circ$ 調整は直角電圧調整範囲に換算すると定格回路電圧の $\pm 17.6\%$ に等価となるのでその容量は大きく、直角電圧調整用タップ巻線を励磁巻線の両側に分割配置し、最内側に同相分タップ巻線を配置して調整器のインピーダンスを小さくし電圧変動率を小さくした。その現地写真を第5図に示し、第6図に負荷時電圧位相調整器の外観を示す。

2.4 電圧分布特性

変圧器タップ巻線は超高压 275 kV 回路の中性点側に直接接続されている関係上、線路端子より侵入する衝撃波に対し変圧器内部電位振動による異常電圧を考慮せねばならない。22,000 kVA 負荷時電圧位相調整器の製作にさき立ちモデル変圧器によって電位分布の測定を行い、タップを各点に選定した場合の主変圧器と調整器との接続点の対地電位および相間電位、タップ相互間電位、遊びタップ



(U印加, V・W接地のとき)
第7図 衝撃電圧分布測定回路



(同相タップ電圧は最高としたとき)
第8図 電圧分布特性

電位、低圧側の移行電圧の影響などにつき詳細調査した。さらに製品完成時にも電位分布測定を行ってモデルの場合とほぼ一致していることを確認した。その結果は超高压線路端子に 200 号の衝撃波試験電圧 1,050 kV を印加した場合、接続点に現われる電圧は 300 kV よりはるかに小さく絶縁階級50号で十分であることがわかった。また調整器は単独に50号相当の衝撃波試験を行い合格した。なお接続点には50号相当の避雷器をそう入してあり安全を計ってある。第7図に示す超高压側線路端子の一相に衝撃電圧を印加した場合主変圧器との組合わせ試験回路において、最も条件の悪い同相分タップ巻線を全部使用した場合、位相調整巻線を各タップに変化したときの測定値を第8図に示す。主変圧器と調整器の接続点X, Y, Zに現れる対地電位は線路側印加電圧の波高値に対する割合で示されX-E, Y-E, Z-Eの曲線となる。X-Y, Y-Zはそれぞれの端子間電位、X-Eは三線一括印加時のX端子の対地電位を示す。すなわち接続点電位は三相一括印加時と同相、直角相分巻線を全部そう入しているときが一番高く、その値は約23.5%である。

3. 負荷時電圧調整器

3.1 仕様

主変圧器の中性点端子をそれぞれ3本引出しておけば負荷時電圧調整器を簡単にそう入できる利点がある。この計画により納入された東京電力株式会社北東京変電所納負荷時電圧調整器を紹介する。仕様は下記である。

主変圧器

屋外用送油風冷式三相三巻線内鉄形制振遮蔽付	50~		
	一次	二次	三次
容量	200,000 kVA	220,000 kVA	100,000 kVA

電圧	R275—F268.75—F262.5 kV	147 kV	15.75 kV
絶縁階級	線路側 200号	140号	20号
	中性点側 30号(80号)	80号	
絡線	星形	星形	三角形

負荷時電圧調整器

屋外用油入自冷式三相内鉄形負荷時タップ切換装置付

定格容量 15,000 kVA

線路容量 200,000 kVA

電圧 一次 15.75 kV 二次 (275 kV) ±7.5%

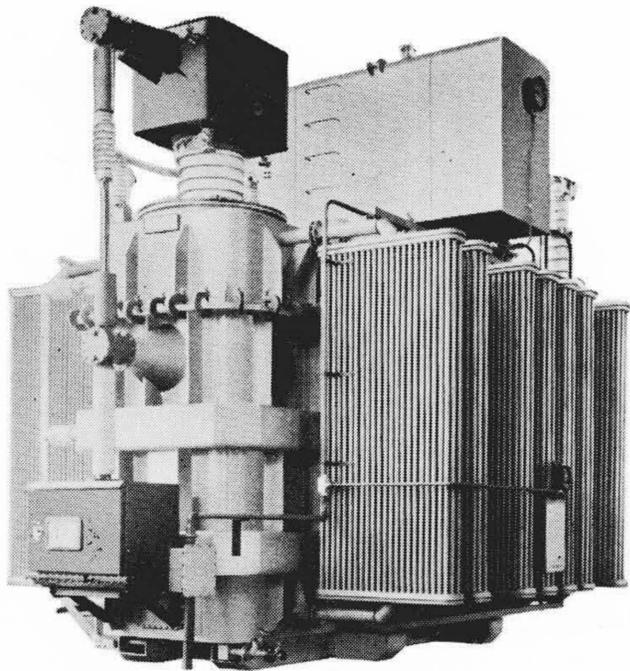
絶縁階級 一次 20号 二次 30号(80号対地)

結線 一次 三角形 二次 星形

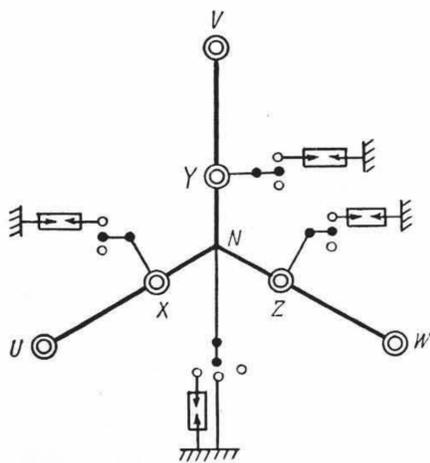
275 kV 回路は中性点直接接地系統であるが将来地絡電流の増大による影響を考慮して、中性点を非接地として使用しうるようがい子を交換して対地のみ80号絶縁とすることができる。

3.2 構造

調整器の励磁は主変圧器の三次回路よりケーブルで直接引込まれ



第9図 15,000 kVA 負荷時電圧調整器外観図



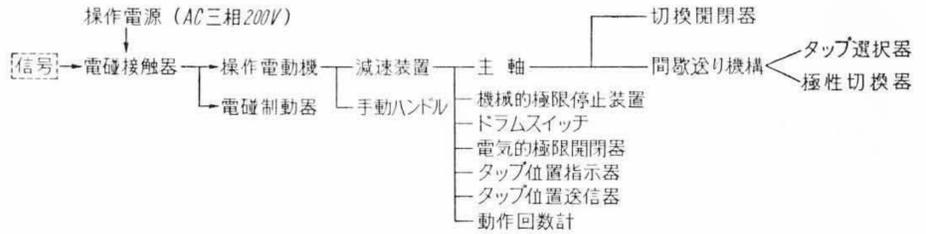
(1) 避雷器を挿入しない場合

印加端子	U・V・W一括印加 100 Full	U・W三相印加 100 Full	U一相印加 100 Full	
接続点Xの電位(%)	{ N 接地 N非接地	3.8 87	3.2 80	2.8 73
タップ巻線 X-N間の電位(%)	{ N 接地 N非接地	3.8 2.2	3.2 1.9	2.8 2.2
タップ巻線 X-Y間の電位(%)	{ N 接地 N非接地	2.3 1.3	2.3 2.4	2.6 2.5

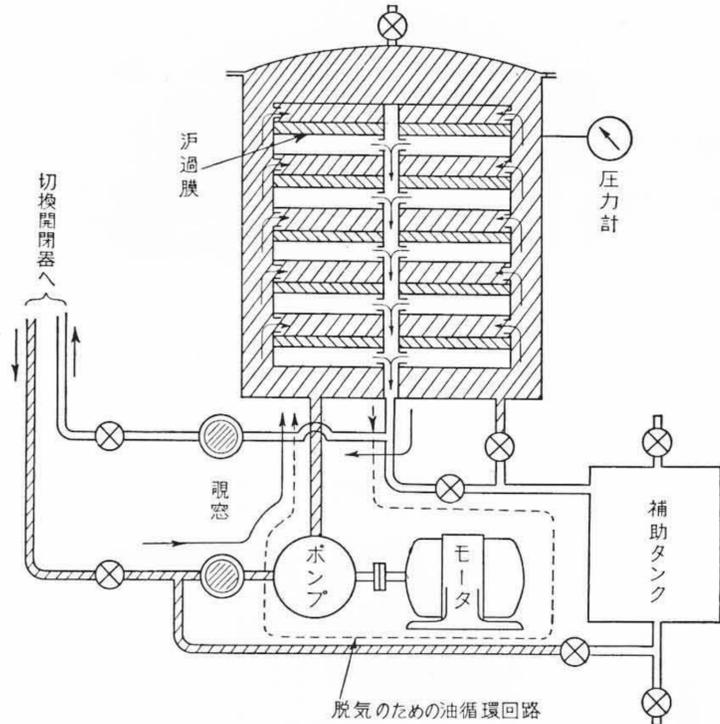
(2) 避雷器を挿入する場合(避雷器は印加電圧の35%で放電開始するもの)

	U (%)	X (%)	N (%)	X-N間(%)
X・Y・Z各端子におのの避雷器を挿入した場合	100 Full	35	35	11
N端子のみに避雷器を挿入した場合	100 Full	35	35	4.8

第10図 電位測定結果



第11図 動力伝達機構



第12図 負荷時浄油装置内部配管系統図

調整器の二次端子は主変圧器の高圧側3本引出し中性点端子と相対向して直接簡単に接続される配置としてある。二次巻線はすべてタップ巻線として構成され起高圧回路に接続されるため、短絡電流に対する機械的強度に耐え、いかなるタップで使用されても一、二次間の磁氣的平衡が保たれる構造になっている。線路よりの衝撃波に対する内部異常振動の抑制などを考慮した同心円筒状に結線される特殊巻線構造を採用した。切換開閉器はがい管上への中性点引出し端子を兼用している。将来80号対地絶縁とする場合は二次端子と中性点ががい管のみを交換すればよいように設計されている。その外観を第9図に示す。

3.3 中性点側そう入調整器の電位分布と保護

調整器を主変圧器の中性点側にそう入し、非接地で運転される場合、避雷器を併用してその絶縁を遙減すれば経済的となる。主変圧器と調整器の二つの変圧器が直列に接続された状態で線路から衝撃波が侵入した場合、その接続点やタップ巻線に現われる電位は絶縁構造上考慮されねばならない。ここに中性点の接地、非接地での電位や避雷器のそう入方法について模型試験を行い、その一例として測定結果を第10図に示す。

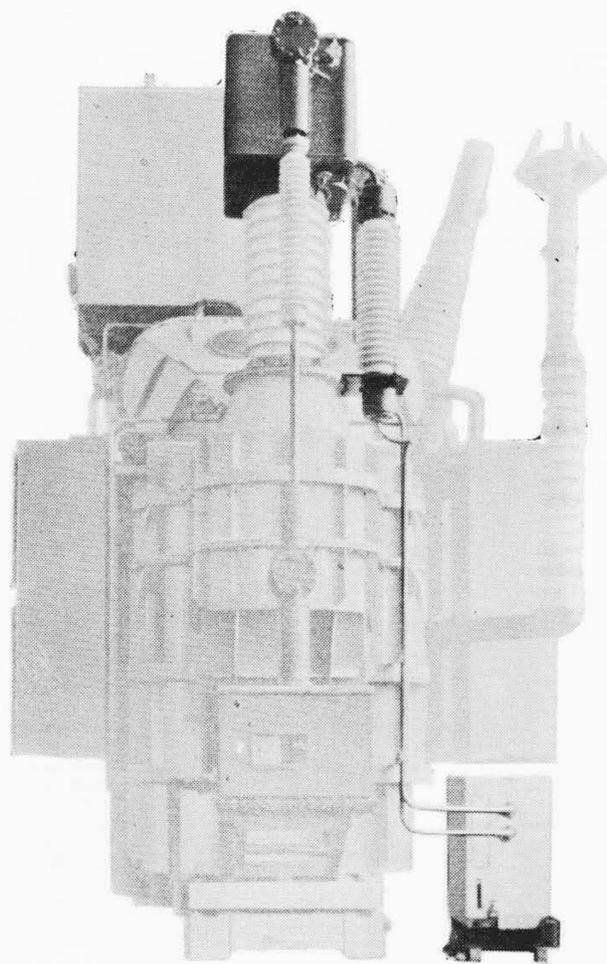
これらの値は調整器の巻線構造、容量、電圧調整範囲により変化するものであるが、調整器の巻線構造によって中性点端子Nのみに避雷器をそう入したほうがX・Y・Z端子におのの避雷器をそう入するより効果が大きい。

4. 負荷時タップ切換装置

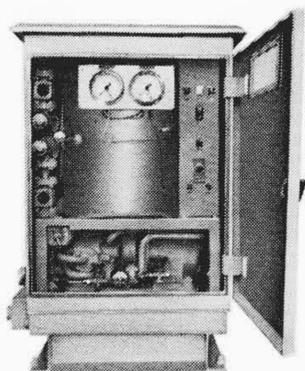
負荷時タップ切換装置は第11図に示す機械的に連結された諸器具よりなり、操作用電動機の正転または逆転によって1タップずつの切換操作が行われる。これらの諸器具のうち一般に間けつ送り機構、タップ選択器および極性切換器などは変圧器油槽の中に、切換開閉器は別槽に収められる。次に考慮した点を述べる。

(1) 電気接触子の改良

タップ選択器および極性切換器の接触子は無電流の状態でタッ



(a)



(b)

第13図 負荷時浄油装置組立図および浄油機正面図

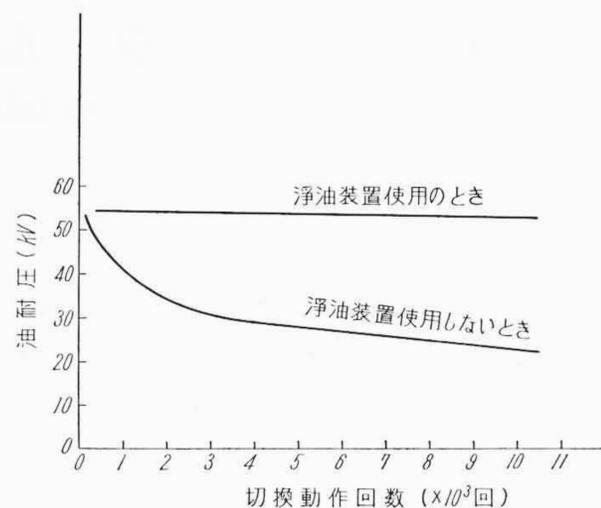
プを切替えるもので、接触部は絶縁ロッドに取付けられた他力クリップ形が採用されている。固定、可動接触子は互にタップ選定のとき摺動するが、高電圧の電位を有し、純度の高い変圧器油中に存置されるため、小形かつ接触子部の摺動による摩耗が少ないことが望ましい。材質は一般に導電率の高い特殊銅合金の組み合わせが用いられている。また接触面の荒さにより、特に初期の摩耗量が異なることはもちろんであり、新しい銅合金接触子の組み合わせによる摩耗量の測定および接触面の荒さによる摩耗量の測定観察を行い高ひん度に耐えうる接触子材質の組み合わせ構造、機械作業方法を確立した。

(2) 切替開閉器

切替開閉器は精密な仕上げを施したカムにより駆動され、タップ選択器の動作と規則正しい関係を保っている。アーク接触子部は2点遮断早切りとして遮断特性を良好ならしめ、投入は適当な速さにできるので消耗が少なくなった。接触子は動作駆動軸に対し対称配置され重量は平衡しているので動作エネルギーは回転モーメントのみでよくなり軽快に動作することができる。アーク接触子と並列に他力クリップ形主接触子を設け電流通過のみに役立たしめている。したがって小形で長寿命に耐える器具とすることができた。

(3) 負荷時浄油装置

油入切替開閉器の場合は遮断に伴う電弧により油が分解し遊離



第14図 油耐圧と切替動作回数の関係

炭素が発生し油を劣化させる。一般に電弧接触子の寿命が永くなったにもかかわらず油交換のために変圧器の運転をしばしば停止せねばならないのは好ましくない。そこで負荷時浄油装置を開発し切替開閉器に付属させその欠点を補った。本装置の特長は次のとおりである。浄油機の内部配管系統図を第12図に示し実施例を第13図に示す。

(i) 変圧器の運転中はもちろん、負荷時タップ切替中でも随時切替開閉器中の油を清浄することができる。

(ii) 操作は配電盤室より制御できる。運転異常時には表示が行われる。

(iii) ろ材の交換は浄油装置自体で行えるので変圧器の運転になんら支障はない。なおろ材交換時に油密閉回路に入りこんだ空気は第12図の点線に示す循環回路を利用して分離し外部に放出できる。

(iv) 油ポンプは気泡を生じない構造となっているため高電位部に気泡が混入されることはない。

本装置を利用した場合の油の特性を第14図に示す。遊離炭素による油耐圧が低下しても浄油により何時も良好な値に引き上げることができる。

(4) 寿命試験

負荷時タップ切替装置の重要性がいよいよ増大し、切替えひん度も高くなるに応じて機構の信頼性が要求される。これに対し1,100,000回を越す機械的寿命試験を行っておりこれは1日のタップ切替回数50回として約60年間の使用に相当するものである。アーク接触子の寿命は220,000回であった。

5. 結 言

負荷時電圧位相調整器および負荷時電圧調整器の完成により今後ますます急激な電力の増大に対して電力の融通、潮流制御を好ましく行うための計画にご参考になれば幸甚である。負荷時浄油装置の完成により負荷時タップ切替装置の保守が容易になり、電力供給の面に便ならしめたことと思うが今後とも研さんを重ねさらに大容量器用の装置の開発に努力するものである。

参 考 文 献

- (1) 谷崎：日立評論 21, 679 (昭13)
- (2) 小泉：日立評論 24, 191 (昭16)
- (3) 特許 245636
- (4) 首藤：日立評論別冊 No.7, 15 (昭29-7)
- (5) 首藤：日立評論別冊 No.5, 5 (昭28-12)
- (6) 小川：日立評論 38, 537 (昭31-4)
- (7) 小川, 栗田：日立評論 40, 796 (昭33-7)
- (8) 木沢, 栗田：日立評論 42, 201 (昭35-2)