

第七章 變壓器及變流機器

第一節 變 壓 器

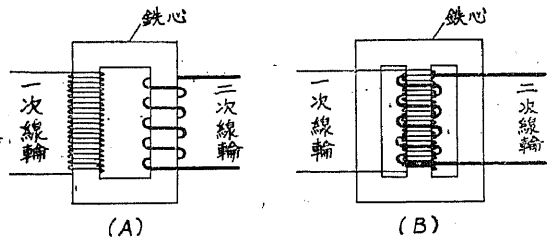
§ 82 變壓器の概念

變壓器(Transformer)とは相互誘導 (§ 18) の理を應用して任意の電壓の交流を同一周波數の任意の他の電壓に變ずる装置であつて、二個の互に絶縁された線輪及兩線輪を磁氣的に結ぶ爲の鐵心にて構成される。線輪の中で、電力を他から受入れる方を一次線輪 (Primary Coil) 電力を出す方を二次線輪 (Secondary Coil) といふ。第 115 圖はその略圖を示すものであつて、同圖 (A) の如く線輪が鐵心の外にある場合を内鐵型(Core Type) (B) 圖の如く線輪が鐵心で圍まれてゐるものを外鐵型(Shell Type) といひ、電壓の高い變壓器には絶縁が容易な爲めに内鐵型が多く用ひられる。

變壓器は電壓を變更することが主なる目的であるから一次線輪の電壓即ち一次電壓と、二次線輪の電壓即ち二次電壓とは一般に等くない。二次電壓が一次電壓より高い場合を遞昇變壓器 (Step-Up Transformer) といひ、其の逆を遞降變壓器 (Step-Down Transformer) といふ。一次電壓と二次電壓との割合は大略一次線輪捲回數 N_1 と二次線輪捲回數 N_2 との比に等しく、 N_1/N_2 を捲數比 (Ratio of Turns) 或は單に比(Ratio) といひ、通常之を a にて表はす。 a は自由に選び得るものであつて、 $a < 1$ の場

合は遞昇變壓器、 $a > 1$ の場合は遞降變壓器となる。

以上の説明にて判る様に變壓器は可動部分を持たず構造も簡單であるから價格



及維持費は共に低く、能率は後に述べる如く頗る高く、しかも電壓を必要に應じて自由に變じ得るから頗る便利な器具であつて、交流回路には廣く使用せられ、重要なものである。

§ 83 變壓器の理論

イ 變壓器の無負荷電流

變壓器の二次回路を開きたる儘にて一次側に或る正弦波電壓を加へれば一次線輪に交番電流 I_0 が流れ、これに依つて鐵心内に交番磁束 Φ を生ずる。一次線輪の抵抗を無視し、鐵心内にも損失がないものと假定すれば I_0 及 Φ は一次端子電壓 E_1 より 90° おくれて生ずる。 Φ を基準ベクトルにとり、之を

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t \dots\dots\dots(1)$$

にて表はすことにすれば、これに依つて

$$e_b = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \times 10^{-8} = \omega N_1 \Phi_m \times 10^{-8} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \dots\dots(2)$$

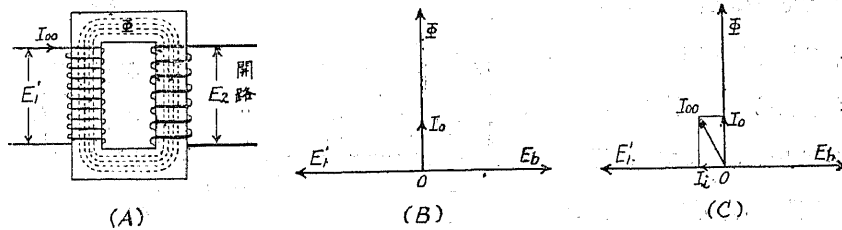
なる逆起電力を一次線輪に誘導するからこれと平衡を保つ爲に

$$e_1 = \omega N_1 \Phi_m \times 10^{-8} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \dots\dots\dots(3)$$

なる電圧が一次端子に加へられねばならない。 e_1 , e_b の實効値を夫々 E_1' , E_b とすれば

$$E_1' = E_b = \frac{\omega N_1 \Phi_m \times 10^{-8}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_m \times 10^{-8} \\ = 4.44 f N_1 \Phi_m \times 10^{-8} \text{ ヴォルト} \dots\dots\dots(4)$$

第 116 圖 (B) は以上の関係をベクトル圖に示したものである。



第 116 圖

實際には § 36 に述べた如くヒステリシス及渦流に依つて鐵心 1 cm^3 毎に $W_h + W_e$ ワットの損失を生ずるから

$$I_0 = \frac{W_h + W_e}{E_1'} \times (\text{鐵心容積})$$

なる電流を要し、これは E_1' と同相にあるから實際の無負荷ベクトル圖は第 116 圖 (C) の如く I_0 になる。 I_0 は比較的小であるから之に對する一次線輪の抵抗及リアクタンス電壓降下は略してある。 I_0 を變壓器の勵磁電流 (Exciting Current) といふ。 I_0 の分力たる I_0 及 I_0' は (4) 式の逆起電力を生ずるに必要な磁束に依つて定るものであつて、周波數、一次捲回数を一一定とすれば一次に加はる電圧が高いほどこれ等の値は大となる。磁氣回路の磁氣抵抗を R 、磁束の實効値を Φ とすれば § 15 に述べた通り

$$R = \frac{l}{S\mu}$$

であるから磁束數と I_0 との関係は次式にて表はされる。

$$\Phi = \frac{1.27 N_1 I_0}{l} = \frac{1.27 S N_1 \mu I_0}{l}$$

$$\therefore I_0 = \frac{\Phi l}{1.27 S N_1 \mu} \dots\dots\dots(6)$$

(6) 式より判る通り或る電壓に對する I_0 は鐵心の寸法及鐵の導磁率 μ に依つて定り、寸法を一一定とすれば導磁率が高いほど I_0 は小となる。

□ 二次電壓及二次電流

一次に (4) 式の電圧が加はればこれに依つて (1) 式の交番磁束が鐵心に生じ、これに依つて二次線輪に誘導起電力 e_2 を生ずる。

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} = \omega N_2 \Phi_m \times 10^{-8} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

故に E_2' を e_2 の實効値とすれば

$$E_2' = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} \times 10^{-8} = 4.44 f N_2 \Phi_m \times 10^{-8} \text{ ヴォルト} \dots\dots\dots(7)$$

(4) 式と (7) 式との比をとれば

$$\frac{E'_1}{E'_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m \times 10^{-8}}{4.44fN_2\Phi_m \times 10^{-8}} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots(8)$$

故に一次誘導起電力と二次誘導起電力との比は兩者の捲回數の比に等しい。

二次側に抵抗 r 、リアクタンス x なる負荷をかければ二次負荷電流 I_2 を生ずる。

$$I_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{r^2+x^2}} \dots\dots\dots(9)$$

I_2 と E'_2 との位相角 θ_2 は次の通りである。

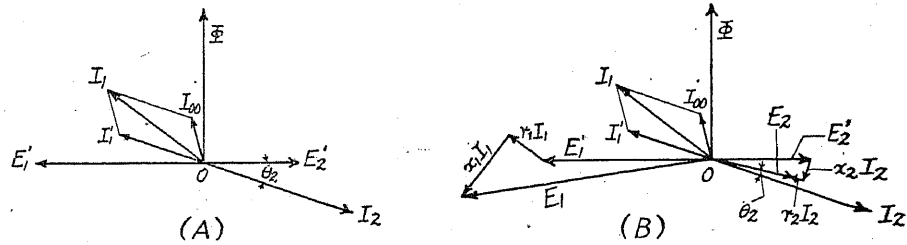
$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{x}{r} \dots\dots\dots(10)$$

斯様な電流が流れると、二次負荷電流に依つて逆起磁力を生じ Φ の値が變つて來るがそれでは一次供給電壓 E_1 と平衡を保つことが出來ないから I_2N_2 なる起磁力を打ち消す爲に一次に之と大きき等しくて方向相反する I'_1N_1 を生ずる様な負荷電流 I'_1 が流れる。

$$I'_1N_1 = I_2N_2$$

$$\text{即ち } \frac{I'_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots(11)$$

(11) 式は一次負荷分力と二次負荷電流との比が捲回數の逆比になることを示す。以上の關係をベクトル圖にて示せば第 117 圖(A) の如くになり、二次電流 I_2 が流れる場合の一次電流は I_0 と I'_1 とのベクトル和なる I_1 となる。



第 117 圖

實際は一次線輪にも二次線輪にも抵抗及リアクタンスが存在するから、これ等を r_1, x_1, r_2, x_2 とすれば (9) 及 (10) 式は次の如くになり、従つてベクトル

ル圖も第 117 圖 (B) の如くなる。

$$I_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{(r_2+r)^2+(x_2+x)^2}} \dots\dots\dots(12)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{x_2+x}{r_2+r} \dots\dots\dots(13)$$

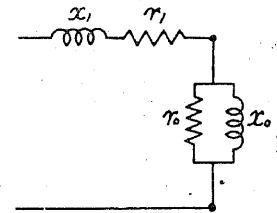
而して E_1 は第 117 圖(B) に示す様に E'_1 から I_1r_1 及び I_1x_1 をベクトルの差引いたものとなる。

ハ 變壓器の等價回路

無負荷に於ける變壓器は磁束を作る爲の電流 I_0 を取る様なリアクタンス x_0 と、鐵損に相當する抵抗 r_0 とを並列に結んだものを電源に接続したと考へることが出来る。但し x_0 及 r_0 は次式にて與へられる。

$$x_0 = \frac{E_1}{I_0}, \quad r_0 = \frac{E_1}{I_1} \dots\dots\dots(14)$$

變壓器一次の抵抗及リアクタンスは x_0 及 r_0 と直列に入つて居るものと考へてよいかから無負荷の時の變壓器回路は第 118 圖にて代表することが出来る。斯様な回路を等價回路(Equivalent Network)といふ。二次側に負荷のある場合には (8) 及 (11) 式に依つてその電壓及電流は一次側に換算すれば次の如くなる。



第 118 圖

$$E'_1 = aE'_2$$

$$I'_1 = \frac{1}{a} I_2$$

即ち電壓は a 倍、電流は $\frac{1}{a}$ となるから換算前と同一の抵抗及リアクタンス電壓降下を生ずる爲には二次の抵抗及リアクタンスを夫々 a^2 倍して一次に移したと考へればよい。この場合の電力及無効電力は夫々

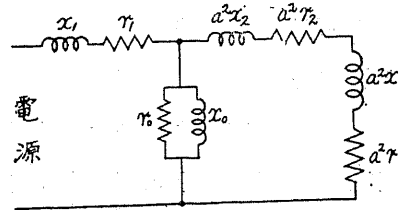
$$\left(\frac{1}{a} I_2\right)^2 \times a^2 r_2 = I_2^2 r_2$$

* 電流を同一と假定すれば換算によつて電壓が a 倍となるから同一割合の電壓降下を生ずる爲には r_2 及 x_2 を a 倍すればよい。然るに電流は $\frac{1}{a}$ となるから ar_2 及 ax_2 の a 倍即ち $a^2 r_2$ 及 $a^2 x_2$ とすればよい。

$$\left(\frac{1}{\alpha} I_2\right)^2 \times \alpha^2 x_2 = I_2^2 x_2$$

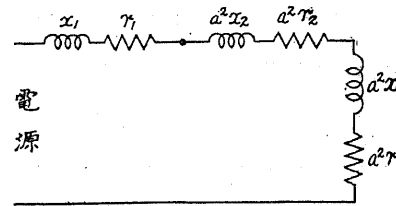
となつて換算前の二次電流、二次抵抗及二次リアクタンスに對する電力及無効電力と同一であることが判る。

二次側負荷 r 及 x に對しても之と全く同一である。故に二次側のすべての抵抗及リアクタンスを α^2 倍として一次側に移しても變壓器の電壓、電流の關係には少しも影響がない。故に第 119 圖の如き単一回路に依つて變壓器の一次、及二次を代表させることが出来る。これが



第 119 圖

負荷時の變壓器等價回路であつて、これに依つて一次二次の區別をつけずに變壓器のすべての性質を計算することが出来る。通常の變壓器にては I_0 は負荷電流の 5%~15% 位にすぎないからこれを無視しても實用上支障のない場合が多い。斯様な場合には等價回路は更に簡單となり、第 120 圖にて表はされる。



第 120 圖

前記等價回路より得る電壓、電流はすべて一次に換算した値であるから、これより二次電壓電流等を得んとする場合は前と反對に電壓は $\frac{1}{\alpha}$ 倍、電流は α 倍、抵抗及リアクタンスは $\frac{1}{\alpha^2}$ 倍とすればよいのである。

二 變壓器の容量

前項に述べた通り、二次側に接続される負荷の力率に依つて變壓器二次負荷電流の力率は變り、従つて一次負荷分力の力率も變つて来る。故に變壓器の容量を kVA にて表示することは無意味であるが、電流容量は捲線の電流容量に依つて定り、電壓も亦鐵心の磁束密度から定つて来るから電壓と電流との積には一定の基準を定め得る。故に變壓器の容量を表はすには一次電壓が規定値である場合の二

次側規定電流及電壓の積を用ひ、これをキロヴォルトアムペア (kVA) 又はヴォルトアムペア (VA) にて表はす。

ホ 損失及能率

變壓器に生ずる損失は一次及二次捲線に生ずる銅損及鐵心に生ずる鐵損より成る。前者は勵磁電流を看過すれば第 120 圖の等價回路より

$$W_r = I_1^2 \{r_1 + \alpha^2 r_2\} = I_2^2 \left\{ \frac{r_1}{\alpha^2} + r_2 \right\} \dots \dots (15)$$

にて與へられ、負荷の二乗に比例する。

鐵損はヒステリシス及渦流損より成り、§ 36 に述べた如く單位體積 (cm^3) 當り夫々

$$\left. \begin{aligned} W_h &= \eta f B_{max}^{1.6} \times 10^{-7} \text{ ワット} \\ W_e &= \frac{(\pi t f B_{max})^2}{6 \rho 10^{16}} \text{ ワット} \end{aligned} \right\} \dots \dots (16)$$

の損失がある。變壓器磁路の斷面積を $A (cm^2)$ とすれば

$$B_{max} = \frac{\Phi_m}{A}$$

なる關係があり、又 (4) 式の示す如く Φ_m は E_1' に比例するから鐵損は電壓の 1.6 乗以上 2.0 乗以下に比例することが判る。變壓器は通常定電壓にて使用されるから B_{max} は不變であつて、鐵損はヒステリシス係數 η 及び鐵板の厚さ t が小さいほど、又鐵板の固有抵抗 ρ が大なるほど少くなる。

變壓器の能率は以上の諸損失及出力 $E_2 I_2 \cos \theta_2$ から次式に依つて算出される。但し V は鐵心の體積 (cm^3) である。

$$\text{能率} = \frac{\text{出力}}{\text{出力} + \text{全損失}} \times 100 = \frac{E_2 I_2 \cos \theta_2 \times 100}{E_2 I_2 \cos \theta_2 + I_2^2 \left\{ \frac{r_1}{\alpha^2} + r_2 \right\} + V \{W_h + W_e\}} \dots \dots (17)$$

變壓器の能率も他の電機と同様に輕負荷にて最も悪く、3/4 乃至全負荷にて最も高く、容量の異なる變壓器に就ては容量の大なるほど能率は高くなる。第 121 圖は一次電壓 3300 ヴォルト、二次電壓 210/105 ヴォルト、50~60 サイクル用變

壓器の全負荷能率と容量の關係を示す圖面であつて、他の電機に比して頗る能率の良いことが判る。第122圖は同一變壓器に對する無負荷電流 I_0 を示すものである。

へ 全日能率(All-Day Efficiency)

發電所や變電所の如く看視人が詰めて居る所では電力の需要に應じて機械の運轉臺數を加減し、常に高能率にて運轉することが出来るが、配電線用變壓器(Distributing Transformer)の如く負荷のかかる時間は短くて、而も終日終夜加壓して置かなければならぬものに於ては假令全負荷能率は高くとも無負荷又は輕負荷の損失が大であつては一日平均として高能率を發揮することは出来ない。斯様な變壓器の能率を判定する爲に

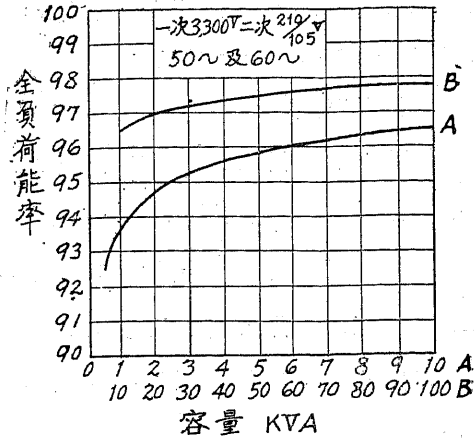
$$\text{全日能率} = \frac{\text{一日中に變壓器二次より出す電力量}}{\text{一日中に變壓器一次に供給される電力量}} \times 100 \dots (18)$$

を用ることがある。

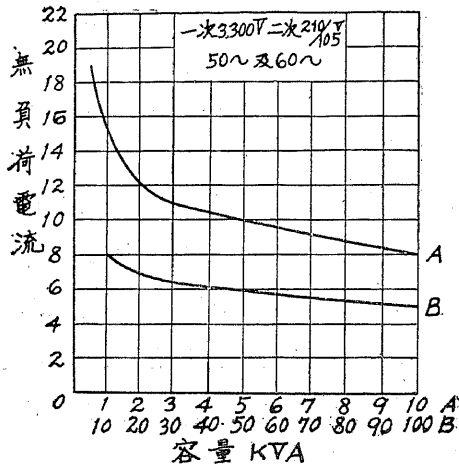
ト 電壓變動率

電壓變動率は一次電壓を規定値に保つた場合に次式にて表はされる。

$$\text{電壓變動率} = \frac{\text{無負荷二次電壓 } E_2' - \text{全負荷二次電壓 } E_2}{\text{全負荷二次電壓 } E_2} \times 100 \dots (19)$$



第 121 圖

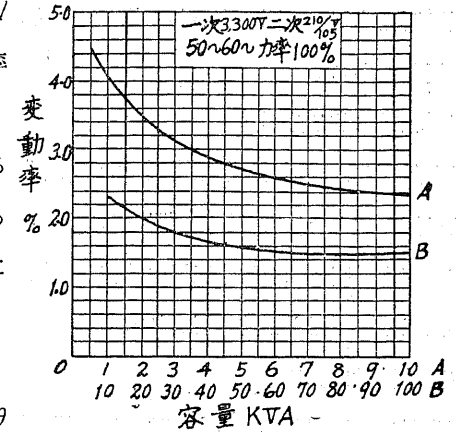


第 122 圖

第123圖は一次3300、二次210/105 ヴォルト變壓器の電壓變動率概數を示すものである。

實負荷にて電壓變動率を求める場合には上記に依つて之を求めることが出来るが、實際には計算に依つて求める場合が多い。 $\cos \theta$ を負荷の力率とすれば

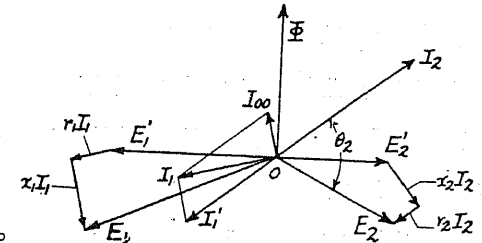
$$\text{電壓變動率}(\%) = A \cos \theta + B \sin \theta \dots (20)$$



第 123 圖

上式中、 A は變壓器の抵抗に依る電壓降下を標準一次電壓の百分率にて表した*もの、 B は同じくリアクタンス電壓降下の百分率を示すものである**。

(20) 式の示す如く、電壓變動率は力率に依つて異り、通常 B は A よりも大であるから θ が大となるほど電壓變動率は小となる。又負荷が進力率を有する場合には電壓變動率は負數となり、負荷が増すに従つて二次端子電壓が上がることもある。これは第124圖のベクトル圖よりも明かである。



第 124 圖

§ 84 變壓器の種類

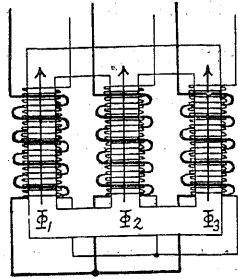
* 一次及二次の和であつて、通常二次側を電流計を通じて短絡し、これに規定電流が流れる様な低い電壓を一次に加へた時のワット數を規定電流及規定電壓の積で割つたものの百分率で表はす。

** 抵抗電壓降下と同様一次及二次の和であつて、イムピーダンス試験から計算に依つて求める。

變壓器は應用の範圍が廣いから其の種類も頗る多いが、主なるものを挙げれば次の通りである。

イ 相數に依る分類

以上説明した變壓器は單相變壓器である。§ 86 ハに述べる如く單相變壓器二個又は三個を組合せれば三相變壓器として用ゐ得るからこの方法が廣く行はれてゐるが、第 125 圖に示す如く三組の捲線を一個の鐵心に捲いた三相變壓器も相當使用されてゐる。

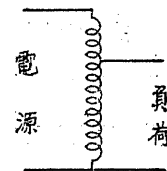


ロ 捲線數に依る分類

通常單相變壓器と稱するものは互に絶縁された二個の捲線を有するが、第 126 圖に示す様に捲線一個のみを有し、その途中に口出線を設けた單捲變壓器 (Auto-Transformer) も屢々用ゐられる。(§ 88 イ参照)

第 125 圖

近來は捲線三個を有する三捲線變壓器 (Three-Winding Transformer) が送電關係に用ゐられて居る。これは互に電壓の異なる三つの回路を結合して電力の受渡を爲す場合、又は送電線を受電端にある遮降變壓器の三次捲線より進相機を運轉する場合などに用ゐられて居る。



第 126 圖

ハ 冷却法に依る分類

(1) 油入自冷型

變壓器鐵心及捲線を絶縁油を入れた鐵製タンクに納め、タンクの表面から熱を自然に放散する型であつて、最も廣く使用されて居る。

(2) 油入水冷型

油入變壓器タンク内に蛇管を設け、これに冷水を循環させて冷却する方法で、容量大にて、冷却水の得易き處に使用される。

(3) 送風型

火災に於ける危険を避くる爲に絶縁油を使用せず、電動送風機にて冷却する型であるが餘り使用されない。

ニ 設置場所に依る分類

屋内用と屋外用との區別がある。近來は屋外用が次第に多くなりつつある。

ホ 用途に依る分類

發電所、變電所等に設置して電力輸送に使用するものを電力用變壓器 (Power Transformer) といひ、3300 ヴオルトの高壓配電々壓を 210 乃至 105 ヴオルトに下げて需要家に配電する爲の變壓器を配電用變壓器 (Distributing Transformer)* といふ。此の兩者間には鐵損と銅損との割合に相當の差異がある。

耐壓試験等の爲に電流は少くとも高い電壓を要する場合には 100 乃至 200 ヴオルトの低壓を數十萬ヴオルトに上げ得る試験用變壓器 (Testing Transformer) が用ゐられる。試験用變壓器では電壓を加減する必要があるから、通常誘導調整器 (§ 88 ロ) を附屬して居る。

交流の高電壓又は大電流を測定するのに直接計器に引込んで危険又は不經濟であるから、特殊の變壓器を使用して電壓又は電流を標準型計器に適當な値に下げる。而して電壓を下げるものを計器用變壓器 (Potential Transformer) 電流を下げるものを變流器 (Current Transformer) といふ。前者は捲數比の大なる單相變壓器であつて、二次電壓は 100 ヴオルトに作られ、後者は捲數比の小なる單相變壓器にて、二次規定電流を 5 アムペアに設計される。是等の變壓器は電壓比又は電流比を不變とする爲に勵磁電流が成るべく少くなる様に作られる。

§ 85 變壓器の構造

變壓器は其の原理から明かな様に鐵心及捲線を主要部分とし、捲線を絶縁する爲の絶縁物、損失熱の放散及絶縁物防濕の兩作用を爲す絶縁油、以上を收容する

* 配電用變壓器は多くの場合電柱杭木上に設置されるから柱上變壓器 (Pole Transformer) とも云ふ。

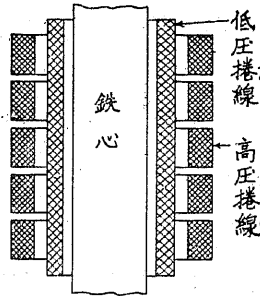
鐵製容器及導線を器外に導き出す爲の套管等より構成されて居る。

イ 鐵 心

變壓器鐵心は交番磁化を受けるから、ヒステリシス損失を出来る限り減少する。必要から軟鋼又は硅素鋼を用ゐ、渦流損失を少くする爲に 0.3 乃至 0.6 耗程度の薄板を重ねた成層鐵心とする。

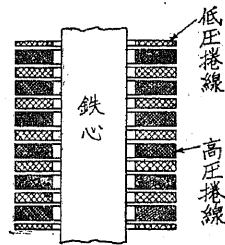
ロ 捲 線

捲線には板狀、矩形又は圓形軟鋼を使用し、その形状は第 127 圖の如き圓筒狀又は第 128 圖の如き板狀線輪とする。圓筒狀線輪は電壓の特に高いものに用ゐ、絶縁の関係から低壓線輪を鐵心に近く配置する。導體の絶縁は導體一本一本は二重又は三重綿捲とし、更に線輪一個一個を絶縁布にて絶縁し、電壓の高いものでは高壓捲線と低壓捲線との間にプレスバーン又はプレスボード等にて隔壁を設ける。尙線輪と鐵心間及線輪相互間には空隙を残して油を流通させ、冷却をよくする。



第 127 圖

通常の變壓器は多くは捲線的一端から全電壓の 5% 乃至 10% の位置に口出線 (Tap) を設け、電圧を加減し得るやうになつて居る。



第 128 圖

ハ 絶 縁 油

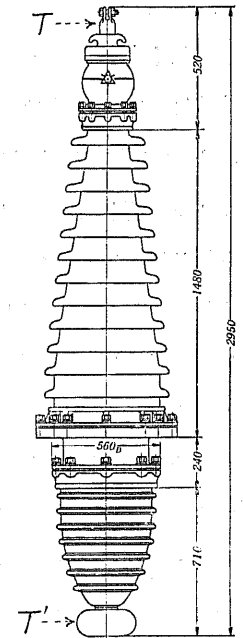
變壓器は通常高い電壓に使用されるからその絶縁に特に留意する必要がある。電機器の絶縁に多く使用される纖維質材料は乾燥状態に於ては高い絶縁抵抗を有するが、空氣中に放置すれば濕氣を吸収して絶縁抵抗は次第に下る。然るにこれを油に浸す時は濕氣を防ぎ得るのみならず油の浸潤に依つて絶縁は一層よくなり、尙油は空氣より比熱が大であるから冷却もよくなる。斯様な理由に因り普通の變壓器は全部油入となつて居る。これに使用する所謂變

壓器油 (Transformer Oil) は比重 0.93 以下、引火點 130°C 以上の礦油であつて一定の規格に適するものでなければならない。

ニ 容 器 及 套 管

容器は大型のものに於ては軟鋼板にて作られ、水冷型以外のものは放熱面を大とする爲に放熱器 (Radiator) を附してある。容器は濕氣の浸入を防ぐ爲に密閉し、密閉が完全に行はれない場合には變壓器負荷増減による器内空氣の出入は吸濕装置を通じて行ふ様にしたものもある。

端子套管 (Terminal Bushing) は捲線端子を器外に導き出すに必要なものである。電壓の低い場合には磁器套管 (Porcelain Bushing) で充分であるが、數萬乃至十數萬ヴォルトになると磁器製套管の内部に絶縁油を充した油入套管 (Oil-Filled Bushing) を用ゐる。第 129 圖の寫眞は 154,000 ヴォルト用油入端子套管を示し、變壓器捲線端は T' に結ばれ T より外線に接続される。

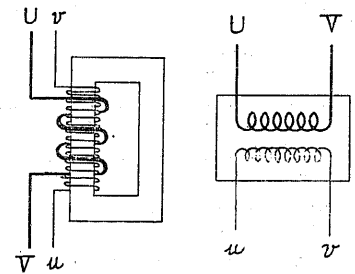


第 129 圖

§ 86 變壓器の結線

イ 變壓器極性

二個以上の單相變壓器を直列又は並列に接続するには、極性を知らなければならない。これを示す爲に端子には同一瞬間に於て高壓側の U、V と同一極性を有する低壓側端子を第 130 圖(A)に示す如く u、v にて示してある。而してこれを同圖(B)の如き記號にて表示する。



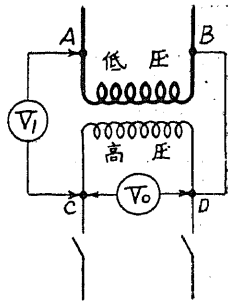
(A) 第 130 圖 (B)

萬一極性不明の場合には第 131 圖に示す

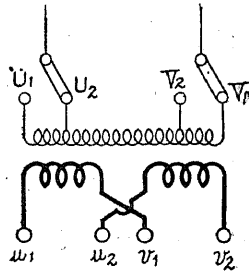
如き結線にて適當なる電壓の交流を加へれば $V_1 > V_0$ なる時は A と D 、 B と C は同一極性であつて、 $V_1 < V_0$ ならば A と C 、 B と D が同一極性である。

□ 單相變壓器の結線

配電線に多數使用される柱上變壓器には第 132 圖に示す如く高壓側は一組、低壓側は全く相等しき二組の捲線より成り、後者は v_1 と u_2 を結べば直列、 u_1 と u_2 、 v_1 と v_2 を結べば並列となり、例へば一次電壓 3300 ヴオルトに對し二次電壓は 210 又は 105 ヴオルトを得られる様になつたものが多い。尙又受電々壓の多少の高低を調節して二次側に成るべく一定の電壓を得る爲に一次捲線には全捲數の 5% 宛を減少し得る如くタップが設けてある。



第 131 圖



第 132 圖

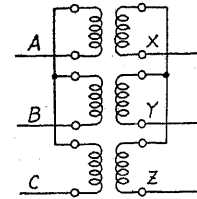
以上は同一變壓器に就てであるが別個の變壓器に於ても一次電壓及び變壓比相等しく、且つ抵抗及リアクタンス電壓降下の百分率が相等しき變壓器は、一次及二次側にて夫々同極を結んで並列に使用することが出来る。一次電壓及變壓比は等しくとも抵抗及びリアクタンスの百分率が異なる變壓器を一次及二次にて並列に使用することは兩變壓器間の負荷の不平衡、循環電流等を生じ、不經濟であるのみならず荷の重い方の變壓器を焼くおそれがある。

ハ 三相回路用變壓器の結線法

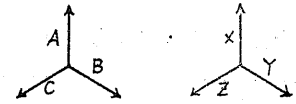
三相回路用變壓器には單相變壓器三個又は二個を組合せて使用する場合と三相變壓器を使用する場合とがある。前者には第 133 圖乃至第 137 圖に示す様に五種の結線法が使用されて居る。

YY 接続は中性點を接地し得ること、及び變壓器電壓が線間電壓より低いといふ利益はあるが、變壓器の一個が破損すると送電が出来なくなる。

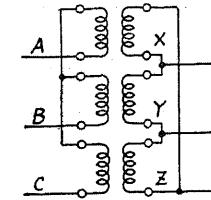
YΔ は一次側が電壓高き時、又 ΔY は二次側が電壓高き時或は三相四線式配電を行ふ場合に用ゐられる。



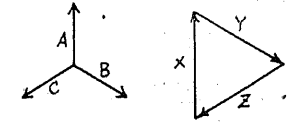
第 133 圖



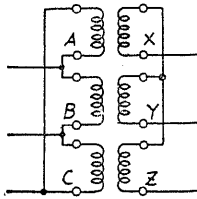
ΔΔ は變壓器一個が破損しても次に述べる V 接続にて三相送電を續け得る利益がある。



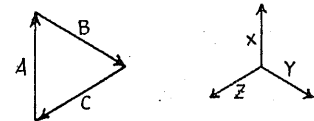
第 134 圖



V 接続とはその形から出來た名前であつて、Δ 結線の一邊が缺除せるものである。§ 29 に述べた通り Δ 結線における線電流と相電流との間には



第 135 圖

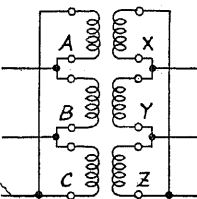


線電流

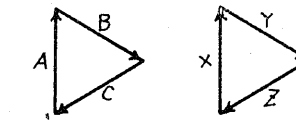
= $\sqrt{3}$ 相電流

なる關係がある。

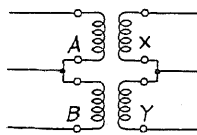
故に V 接続にて Δ



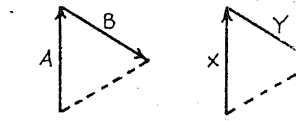
第 136 圖



接続の場合と等しい



第 137 圖



負荷に供給するものとすれば相電流は線電流と等しく即ち Δ 結線の場合の $\sqrt{3}$

倍となる。故に各變壓器負荷を全負荷に保つ爲めには $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍即ち原容量の 58% に減じなければならない。V 接続は大容量のものには故障時以外餘り用ゐないが三相小型電動機に電力を供給する爲には屢々用ゐられる。

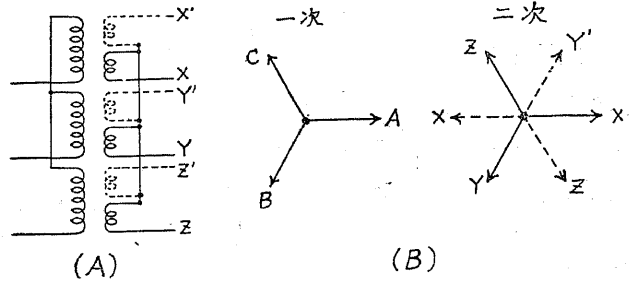
三相變壓器の結線は第 133 圖乃至第 136 圖と同様である。

三相變壓器一臺と單相變壓器三臺一組のものとを比較すると、前者は重量、價格及占有床面が小であるが一相に故障が起つた場合に修理が済むまで全部を休止しなければならないが、單相變壓器では故障のある一相のみを切替へることも出来るし、 $\Delta\Delta$ を用ゐれば V 接続として送電を繼續し得る利益もある。

§ 87 三相一六相結線

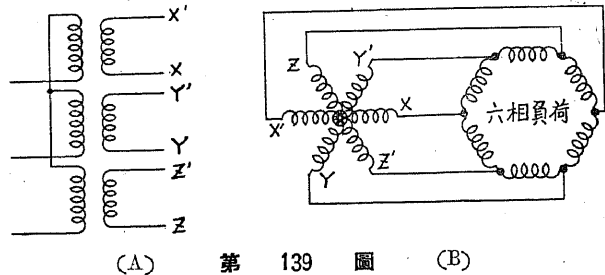
第 138 圖(A) に示す如く YY 接続の二次側に今一組の二次捲線を附加し(破線にて示す) それ

らをはじめの二次線(實線にて示す)と反對極性に接続すれば同圖(B)に示す如く二次に星形六相電壓が得られる。



第 138 圖

實線の星形と破線の星形との中性点を別々にしたものを二重星形(Double Star) といひ



第 139 圖

第 139 圖(A) の三相二次線を同圖(B) の如く六相負荷に接続すれば丁度六相星形の中性点接続を除きたるものと等しく、矢張り六相電壓が得られ、これをダイヤ

メトリカル結線法(Diametrical Connection)といふ。

又、XYZ, X'Y'Z' を各々三角結線とすれば二重三角結線(Double Delta Connection) が得られる。ダイヤメトリカル及二重三角結線は廻轉變流機用變壓器に、二重星形結線は水銀整流器用變壓器に多く使用されてゐる。

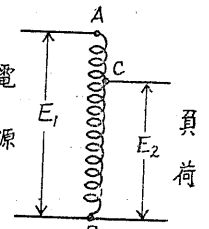
§ 88 特殊變壓器

イ 單捲變壓器

通常の變壓器は一次及二次線輪を有するが、一次線輪に生ずる逆起電力及二次誘導起電力は一捲回當り夫々次の如くであつてその方向は兩者同一である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_1}{N_1} &= 4.44 f \Phi_m \times 10^{-8} \text{ ヴォルト} \\ \frac{E_2'}{N_2} &= 4.44 f \Phi_m \times 10^{-8} \text{ ヴォルト} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

即ち一次逆起電力と二次誘導起電力とは一捲回當り同一起電力を同一方向に發生してゐる。故に捲回数 N_2 なる二次捲線を備へる代りに第 140 圖の一次捲線の任意の部分、例へば BC 間に N_2 捲回を選び、これに口出線 BC を設ければ N_2 捲回の二次線輪と同一起電力が得られ、これに負荷を接続すれば負荷電流 I_2 による $I_2 N_2$ なる逆起磁力を打消す爲にこれと大き等しくして方向相反する $I_1' N_1$ なる起磁力を生ずる様に一次負荷分力 I_1' が流れることも二捲線變壓器の場合と同様である。斯様に捲線



第 140 圖

の一部を一次及二次に共用する變壓器を單捲變壓器(Auto-Transformer) といふ。

以上の説明にて明かな様に一次と二次との電圧比は

$$\frac{E_1'}{E_2'} \doteq \frac{N_1'}{N_2'} = a \dots\dots\dots(2)$$

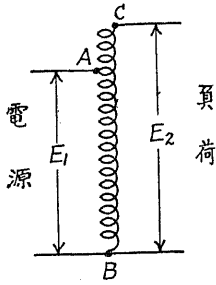
電流比は

$$\frac{I_1'}{I_2} \doteq \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots(3)$$

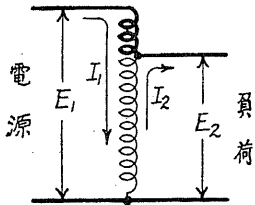
であつて、二捲線變壓器の場合と同様となる。

第140圖は $\frac{N_1}{N_2} > 1$ の場合を示してあるが $\frac{N_1}{N_2} < 1$ の場合には第141圖に示す如く捲線 AB の延長上に C 点を取り $\frac{AB}{BC} = \frac{N_1}{N_2}$ となる様に C 点を定めれば $E_2 > E_1$ とすることも出来る。

單捲變壓器にては捲線の一部を共用して節約し得るのみならず共通部分の電流が方向相反するから兩者の差が流れるのみであつて、特に捲数比 a が 1 に近い場合には I_1 と I_2 は大きき接近し、共通部分の電流は著しく小となるから第142圖に示す如く其の部分の導體は一次、二次のどれよりも細くすることが出来、重量及價格は小となつて頗る經濟的である。捲数比 a が 1 を離れるに従つてこの利益は減じ、その反對に高電壓回路が低電壓回路と直接々續されてゐることから起る危険が増して来るから單捲變壓器の利益はなくなる。



第 141 圖



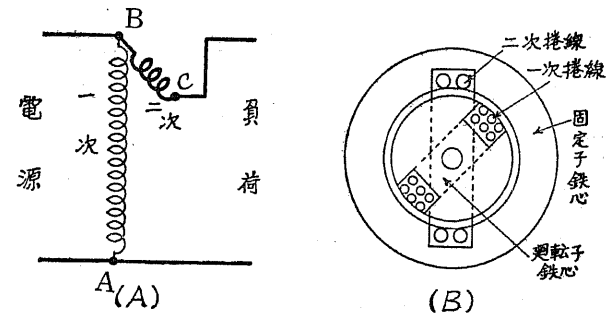
第 142 圖

單捲變壓器の主なる用途は電動機起動時に線電壓を下げる爲に用ゐる起動補償器(Starting Compensator)、或は 66,000 と 77,000、22,000 と 11,000 の如くに電壓差の比較的小なる二つの送電系統を結ぶ場合などである。單相單捲變壓器を三相に接続して使用するには § 86 に準じた接続を行へばよい。

□ 誘導調整器 (Induction Regulator)

交流電壓の調整は變壓器タップの變更に依つても出来るがこの方法は變壓器を無電壓とする必要があり、又電壓の變化も階段的で細かな調整が出来ない。然るに第143圖(A)の如き接続にて並列線輪 AB 及直列線輪 BC を設け、兩者の關係位置を變化して AB 線輪に依つて生ずる磁束が BC 線輪と交はる數を任意に加減し得る様にすれば、 BC に誘起する電壓は電源電壓に加はる方向となつたり、差引く方向となつたりし、且つ BC の誘導電壓の大きさも一定の範圍内にて

任意に變へ得るから、負荷に加はる電壓は任意に且つ細かに加減することが出来る。



第 143 圖

これが誘導調整器の原理であつて、實際の構造は第143圖(B)に示す如く固定子及廻轉子に捲線を設け、軸を廻して兩線輪の關係位置を變化する様になつてゐる。

第二節 變流機器

§ 89 電動發電機

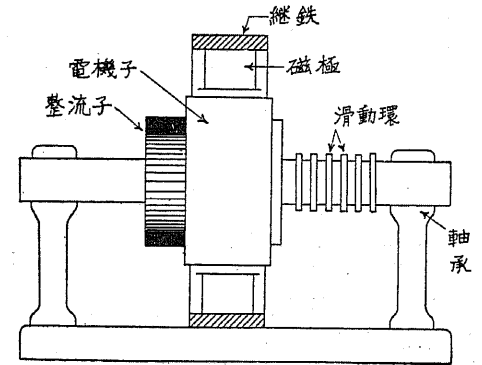
交流電動機と直流發電機とを機械的に結合すれば交流電力に依つて直流電力が得られる。これを電動發電機 (Motor-Generator) といふ。電動發電機に使用する交流電動機は小容量のものは多く籠型三相誘導電動機であつて、大容量のものになると同期電動機を使用する。直流發電機は通常分捲又は和働複捲である。

§ 90 迴轉變流機

イ 迴轉變流機概要

迴轉變流機 (Rotary Converter)

といふのは第144圖に示す如く迴轉變電子型同期電動機の滑動環と反對側に整流子を設け、電機子捲線を之に接続したものであつて、滑動環側から見れば同期電動機、

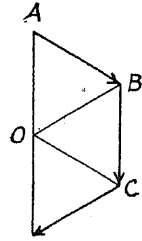


第 144 圖

整流子側から見れば直流發電機となるものである。廻轉變流機に滑動環より交流を送つて同期速度にて運轉し、整流子中性點に刷子を置けば直流が得られる。これが廻轉變流機の原理である。

□ 廻轉變流機之特性

廻轉變流機は如上の構造を有するから其性質も同期電動機と直流發電機との性質を兼ね備え、電機子が交流直流に共通であるから兩者の電壓比は交流側の相數を N とすれば第 145 圖のベクトルより次の如くにして求められる。



第 145 圖

$$\text{電壓比} = \frac{\text{交流線間電壓}}{\text{直流電壓}} = \frac{\frac{AB}{\sqrt{2}}}{2 \times AO} = \frac{\frac{AB}{2}}{\sqrt{2} \times AO} = \frac{\sin \frac{\pi}{N}}{\sqrt{2}} \dots (1)$$

故に交流側電壓が與へられれば直流側電壓は大略定つてしまふ。

次に廻轉變流機内の損失を無視し、交流線電流 I_a と星狀電壓即ち $\frac{\text{直流電壓}}{2\sqrt{2}}$ との積の N 倍が直流側出力に等しいといふ關係から交直流の電流比が求められる。

$$\text{電流比} = \frac{\text{交流線電流}}{\text{直流電流}} = \frac{2\sqrt{2}}{N} \dots (2)$$

第 12 表 電壓比及電流比

	直 流 側	交 流 側				
		單 相	三 相	六 相	十二相	N 相
電 壓	1	0.707	0.612	0.354	0.183	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{N}$
電 流	1	1.414	0.943	0.472	0.236	$\frac{2\sqrt{2}}{N}$

廻轉變流機は相數が大となるほど性質がよくなるが、餘り多くなつても複雑となるから六相が多く使用されて居る。

廻轉變流機は同期電動機と同様な位相特性を有し、又直流發電機として考へれば分捲、複捲の兩者があり、其の特性も直流發電機の場合と同一傾向がある。

而して其の構造が同期電動發電機の直流發電機を省略したやうなものであるから能率は一層よく、第 13 表の如き値を有する。

第 13 表 回轉變流機能率表*

定 格 負 荷	300 kW		500 kW		750 kW		1000 kW	
	600 V	750 V	600 V	750 V	600 V	750 V	600 V	750 V
1/4	86.2	86.0	89.2	87.5	88.0	89.0	91.9	89.3
1/2	91.8	91.5	93.5	93.0	93.2	94.1	95.3	95.4
3/4	93.7	93.3	94.7	94.0	94.6	95.5	95.9	96.0
1	94.0	94.8	95.0	94.9	95.2	95.9	96.0	96.3
1 1/2	94.0	95.0	94.6	95.0	95.5	95.7	95.8	96.4
2	93.0	94.6	94.2	94.6	95.0	95.2	95.5	96.0

ハ 廻轉變流機の電壓調整法

變流機の電壓比は前述の如く大略一定であるから直流電壓を變化せんとすれば交流側の電壓を變化しなければならない。之を最も簡単に行はむとすれば界磁電流を加減すればよい。界磁電流を加減すれば同期電動機の特性に依つて電流が進み或は遅れる。勵磁を増せば電流の位相が進み、その結果線路のリアクタンスに依つて受電々壓が上るから直流電壓は増し、その反對に勵磁電流を減すれば電流の位相がおくれ、受電々壓が下つて直流電壓を下げる。斯様な方法に依る電壓の變化範圍は狭いから電壓の調整を要する場合には昇降壓機 (Booster) の如き特殊の機械を附加しなければならない。

ニ 廻轉變流機の起動及運轉

廻轉變流機を起動するには § 68 に述べた如く籠型誘導電動機として規定電壓

* 本表の能率は變壓器損失を含まず

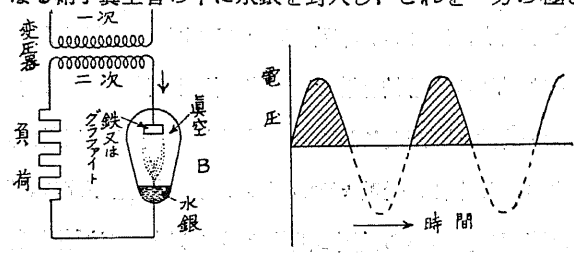
の約 40% の電壓を加へて起動する方法は操作が最も簡単であるから多く用ゐられて居る。然し軸直結の起動用電動機を附屬せしめる方法も用ゐられ、又直流側より起動し、同期化した後交流に接続することも出来る。

廻轉變流機は同期電動機と同じく負荷の激變又は電源電壓の變動に依つて亂調を起す傾向があり、其の結果は中性點にて整流を受けつつある短絡線輪に電壓を誘起して刷子に火花を生じ、甚しき場合には正負刷子を電弧にて橋絡することもある。これを廻轉變流機の閃絡といふ。故に變流機に激變負荷をかける場合には特に此の點に留意する必要がある。近來は廻轉變流機自體の改良と高速度遮斷器 (§ 95) の採用とに依つてこの煩が著しく輕減された。^{*}

§ 91 水銀弧光整流器

イ 整流作用の原理

水銀整流器 (Mercury Arc Rectifier) とは真空中にて水銀より發生する弧光放電が所謂瓣作用を有し、一方向のみに導電作用を有する事實を利用したものである。第 146 圖に於て B なる硝子真空管の中に水銀を封入し、これを一方の極とし、他の極に鐵又はグラフアイトを用ゐて何等かの方法に依り水銀面を高温度に熱すると兩極間に弧光を發生する。今是に交流電壓を



第 146 圖

147/2 第 147 圖

加えると水銀面が負電位にある時のみに電流が流れ、次の半周波には水銀面が正電位となるから電流は流れない。依つて此の回路に流れる電流従つて直流側電

* 廻轉變流機に類似せるものに電動變流機 (Motor Converter) と稱するものがある。これは捲線型誘導電動機の廻轉子に直列に之と同一軸に直結された廻轉變流機を接続したものであるが、一般には餘り用ゐられて居ないから省略する。

壓は第 147 圖の如くなる。

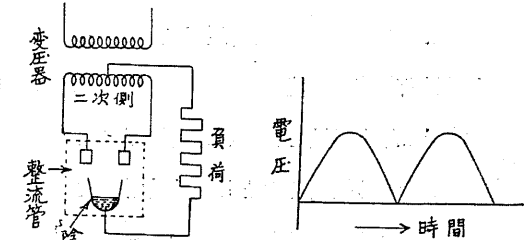
□ 多相整流

第 146 圖の如き接続では連続した直流が得られないが、相數を増し、陽極の數を多くすると直流側の脈動が少くなる。第 148 圖乃至第 150 圖は直流電壓波と相數との關係を示すものである。

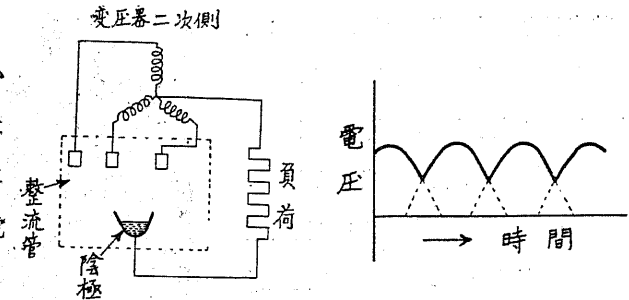
ハ 水銀弧光整流器の構造

實用的水銀整流器には、第 151 圖に示す様な硝子製のものと第 152 圖の如き鐵製のものとがある。

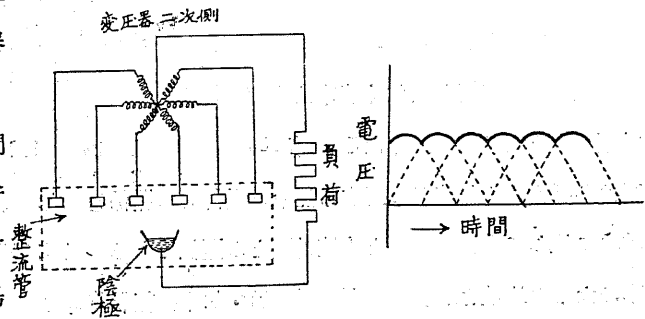
前者は其の構造上から大容量には適しないが古くから實用に供され、現今も蓄電池充電用等に用ゐられて居る。此の整流器を起動するには器を傾けて陰極 K と點弧陽極 S との間に水銀を流し、兩者が離れる際に發生する弧光に依つて主陽極 A, B, C 等が點



第 148 圖



第 149 圖



第 150 圖

弧する。

第 152 圖に示す鐵製水銀整流器も原理に於ては前者と全く同じであつて、真空ポンプ、冷却水用ポンプ等を附屬して居る事が異なるのみである。鐵製水銀整流器では相數は多くは 6 であつて、稀には 12 相を使用する事もある。

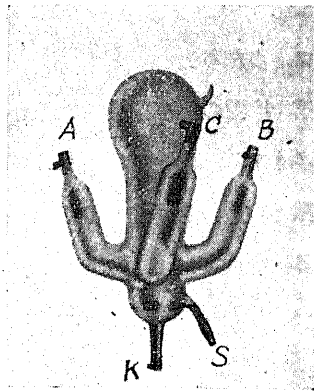
ニ 水銀弧光整流器の能率

水銀整流器は靜止器械であるから其の損失は弧光電壓降下に依る損失を主とし、其他附屬裝置に要する僅小なる損失があるのみである。

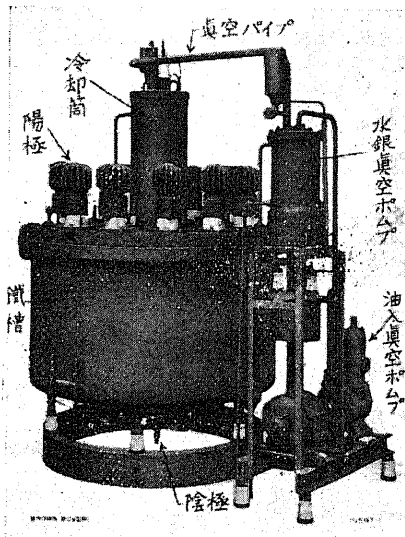
整流器内の電壓降下は器の大きに依つて定り、通常 15 乃至 20 ヴォルト位であつて負荷電流には関係なく、殆んど一定である。従つて能率は次式に依つて計算される。式中 18 は器内電壓降下の概數であつて、V は直流電壓を表はす。

$$\text{能率}(\%) = \frac{V}{V+18} \times 100$$

上式に依つて明かな如く能率は直流電壓が大となるほど良くなる。第 153



第 151 圖

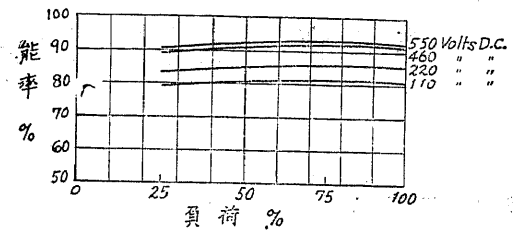


第 152 圖

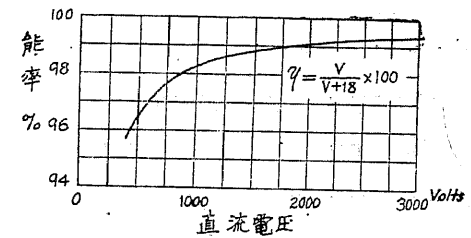
圖は各種電壓の整流器に對する能率と負荷との關係を示し、第 154 圖は前式より計算に依つて求めた能率と直流電壓との關係である。又第 155 圖は各種變流機能率の大略の比較を示す。第 153 圖の示す如く、輕負荷時に於て能率が高いといふ事は水銀整流器の一大特色である。

ホ 水銀整流器の特徴

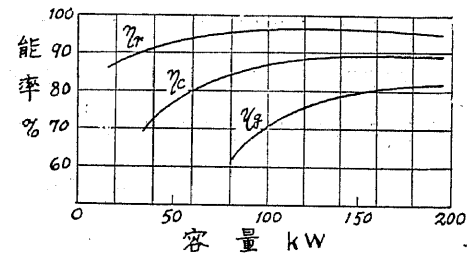
- (1) 能率、特に輕負荷時の能率が良好である。
- (2) 廻轉部分がないから騒音を出さない。
- (3) 瞬間的過負荷及短絡に對する耐力がある。
- (4) 始動其他の取扱が簡単で、磨耗部分もないから保守が容易で、自動制御も簡単に出来る。
- (5) 重量が軽く、且つ動かないから基礎や据付工事が簡単である。
- (6) 電源周波數が異つても整流器には何等支障がない。



第 153 圖



第 154 圖



η_r=水銀整流器, η_i=逆變流機, η_g=電動發電機

第 155 圖