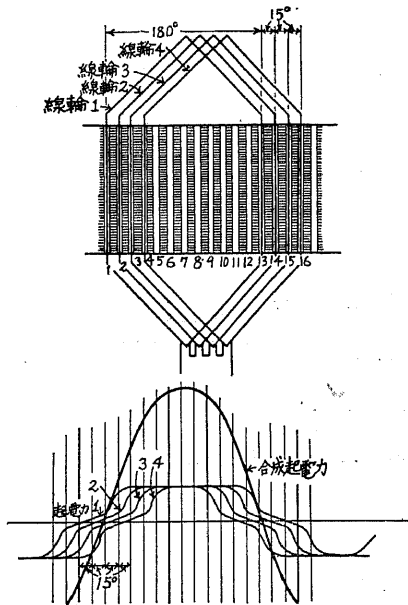


第六章 交流發電機及交流電動機

第一節 交流發電機

§ 62 交流發電機の原理と種類

§ 51 に述べた直流發電機に於て發電子に誘起される電壓を整流子を経ないで直接外部に傳へる方法をとれば、或る導體が N 極の下を通過する場合と S 極の下を通る場合で電壓の方向が異り、交流が得られる。これが交流發電機の原理であつて、整流子のない事が直流發電機と著しく異なる點である。^{*} 實際の交流發電機では電壓が成るべく正弦波に近いことが必要であるから捲線の配置、磁極空隙に於ける磁束分布等に色々の工夫を施してある。第 73 圖はその一例であつて第 45 圖の如き梯形電壓波を誘導する幾つかの捲線素子を一定角度を離して並べ、其等を直列に結べば大略正弦波に近き電壓波を得られることが判るであらう。



第 73 圖

電磁的に起電力を發生するには發電子導體を動かし界磁を固定しても、界磁を動かし發電子導體を固定しても結果は同じであるから、交流發電機には廻

* 整流子は直流機械中の最も製作の困難な部分であつて、これを持たない交流發電機の價格はこれと同容量の直流發電機に比して餘程低廉となる。又大容量機の製作も交流の方が遙かに容易である。

轉發電子型 (Revolving Armature Type) と廻轉界磁型 (Revolving Field Type) との二種^{*}あるが、交流發電機は大容量、高電壓の者が多く、従つて絶縁其他構造上の關係から發電子を固定させる方が有利であるから大部分は廻轉界磁型である。それ故本書に於ては此の型のみ^{**}に就て述べることにする。

通常用ひらるる發電機の相数は送電方式及び一般動力用電動機として三相式が優れて居る事などの理由から殆んど全部三相である。

周波数は電燈の明暗が眼に感ずる局限が約 40 サイクルであるから 50 又は 60 サイクルが標準となつて居る。

廻轉數より分ければ次表の如く三種類に分れて居る。

種 別	毎分廻轉數	極 數		原 動 機
		50サイクル	60サイクル	
低 速 度	80--200	74--30	90--36	熱 機 關
中 速 度	200--800	30--8	36--10	高 速 機 關 及 水 車
高 速 機	1000--3600	6--2	6--2	蒸 汽 タ ー ビ ン

§ 63 構造の概要

廻轉界磁型交流機に於て、固定せる部分 (發電子) を固定子 (Stator)、廻轉部分 (界磁) を廻轉子 (Rotor) といふ。廻轉子の磁極數 P は直流機の場合と異り、原動機の毎分廻轉數 n 及周波數 f と一定の關係を有して居る。即ち

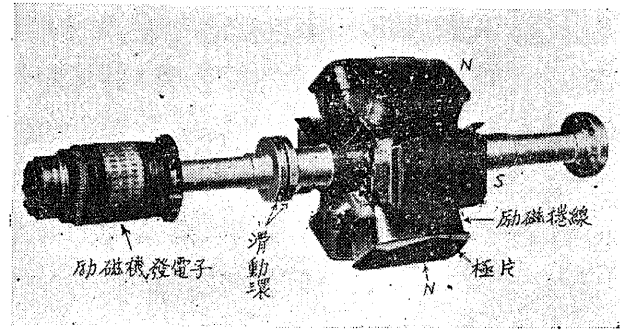
$$f = \frac{Pn}{2 \times 60}$$

廻轉子の構造は第 74 圖に示す如くであつて、勵磁用直流は軸から絶縁された二個の滑動環 (Slip Ring) を經て刷子から勵磁捲線に供給される。此の勵磁電流

* この二種の外に誘導型 (Inductor Type) として發電子、界磁を共に固定し置き、兩者の間の磁氣抵抗を變化する方式があるが特殊のものであるから省略する。

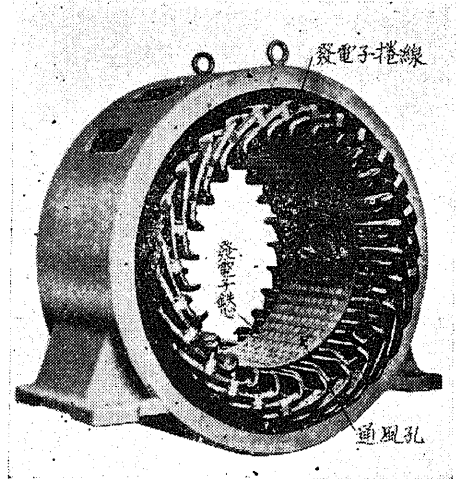
** 瑞西に於ては國有鐵道運轉用動力として單相發電機を使用して居る。

を供給する爲の直流發電機を勵磁機 (Exciter) と云ひ、分捲又は復捲發電機を用ひ同圖に示す様に廻轉子軸に直結されることがある。



第 74 圖

發電子は第 75 圖に示す如く枠組に取付けられた成層鐵心に捲線を施したものであつて、直流機と同様に通風孔が設けてある。捲線は電壓の高い關係から凡て型捲線輪を用ひ、三相捲線は星形又は三角形に接続される。



第 75 圖

§ 64 交流發電機の性質

イ 無負荷誘導起電力

無負荷に於ける交流發電機の電壓は發電子導體數 Z 及其の配置、

周波數 f 、每極有效磁束數 Φ に依つて定り、次式にて表はされる。

$$E' = MfZ\Phi \quad \text{ヴォルト}$$

但し M は定數であつて捲線方法に依つて異なる。而して出来上つた發電機に對しては M 、 f 、 Z は一定であるから E' は Φ に比例する。

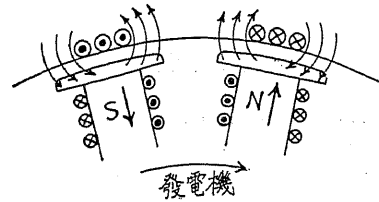
ロ 發電子抵抗及リアクタンスによる電壓降下

發電機に負荷をかければ直流發電機の場合と同じく發電子抵抗に依る電壓降下

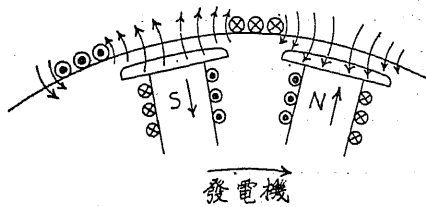
が生ずるから、端子電圧はそれだけ低くなる。尙又交流發電機に於ては發電子捲線の自己誘導に依るリアクタンス $2\pi fL$ があるから、端子電圧はこれに依つても影響を受ける。交流機に於ては抵抗よりもリアクタンスの方が値が大で兩者による電壓降下の間には 90° の位相の差がある。

ハ 發電子反作用

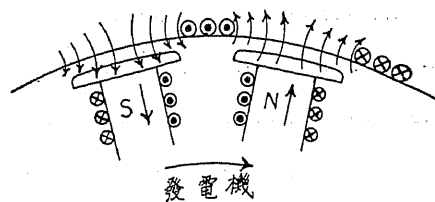
交流發電機に負荷をかけると負荷電流の起磁力に依つて發電子反作用が生ずることは直流發電機の場合と同様であるが、交流の場合は負荷の力率に依つて反作用が異なる。第76圖は負荷の力率が1の場合の發電子及界磁による磁束の分布を示し、發電子電流は起電力と位相が等しいから、反作用は主磁極の前端（廻轉方向に對し）を弱め、後端を強めて界磁による磁束分布を歪める。次に電流が電壓より 90° 遅れた場合には第77圖の如くになり、その發電子反作用は主磁束を打ち消す様に働き、電流が電壓より 90° 進んで居る場合には反作用は第78圖に示す如く主極の勵磁を助ける様に働く。而して通常の負荷は大抵遅電流であるから抵抗及リアクタンス以外に負荷電流の減磁作用に依つても電壓降下を一層助長するのである。



第 76 圖



第 77 圖



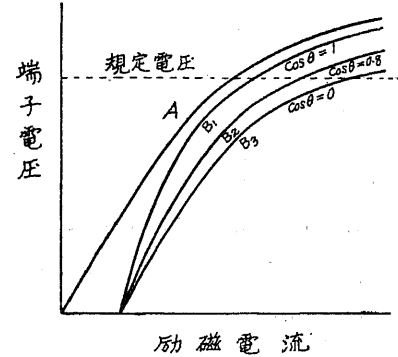
第 78 圖

* 極間隔は電氣的には π 即ち 180° であるから 90° 遅れる場合は極間隔の $1/2$ だけ左方に移る。

ニ 發電機特性曲線

發電機が無負荷で規定速度の運轉をして居る場合に、勵磁電流の變化に對する端子電壓の變化を示せば第79圖Aの様になる。これを無負荷特性曲線と云ふ。

次に發電機に或る力率の負荷を加へ規定速度にて運轉した場合、勵磁電流の變化に對する端子電壓の變化を示したものを負荷特性曲線と云ひ、第79圖 B_1, B_2, B_3 等は夫々力率 100%, 80% 及零の全負荷特性曲線を示す。



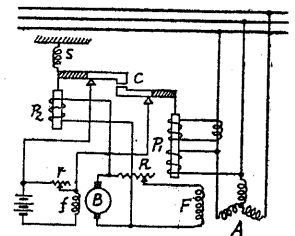
勵磁電流
第 79 圖

ホ 電壓變動率

交流發電機の場合の電壓變動率とは規定周波數、規定力率、規定電壓の下に全負荷電流を出して居る時の勵磁電流を其の儘とし無負荷とした時の電壓の變化を規定電壓の百分率にて表したものである。

ヘ 交流發電機の電壓調整

前述の如く、交流發電機は一定の勵磁電流に於ては發電機の出力及力率に依つて端子電壓が變化するから電壓を一定に保つためには勵磁電流を加減しなければならぬ。この目的に最も廣く使用されるのはチリル調整器(Tirril Regulator)であつて、是は發電機端子電壓が變化した場合自動的に勵磁機の勵磁電流従つて勵磁機電壓を加減し、發電機電壓を規定値に保つもので、尙送電線の受電端電壓を一定に保つ爲に負荷に應じて線路電壓降下だけ發電機電壓を高める様にも出来る。第80圖はチリル調整器の原理を示す接續圖である。



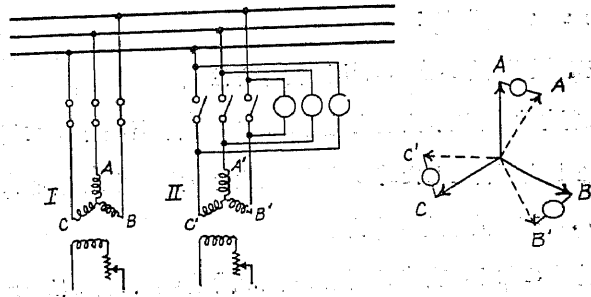
第 80 圖

* 此の場合の全負荷とは電流が規定値になつて居る意味であつて、力率零の場合には出力は勿論零である。

ト 交流發電機の並列運転

電力の需要に適應して同一回路に二臺以上の發電機を並列に結んで運転することを並列運転(Parallel Running)といふ。直流發電機の場合には負荷特性及電壓が等しければ並列運転が出来るが、交流發電機に於ては負荷特性及電壓を等しくした上に更に周波數及位相を完全に合はさなければならぬ。斯様な操作を同期化(Synchronize)するといひ、同期化するには先づ並列に運転すべき兩發電機回路の相廻轉方向を一致させ、次に原動機を速度を加減して兩發電機の周波數を等しくし、最後に電壓及位相を合せて兩發電機を並列に結ぶのである。同期化を検知する装置を同期檢定器(Synchronism Indicator)といひ、最も簡單なものは第81

圖の如く相當せる各線間に白熱電球を結ぶ方法であつて、周波數及位相が一致すれば電燈は消え、位相の差が大となるほど電球は光を増す。この方法では正



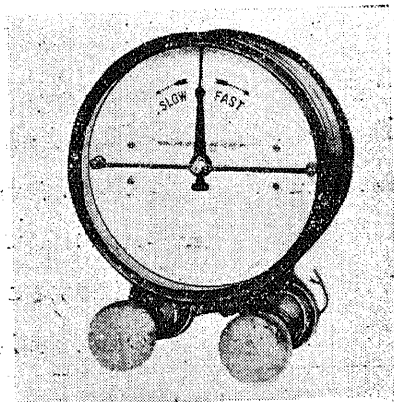
第 81 圖

確に同期化を知る事は困難であるから、第82圖の如き指針を有する同期檢定器を使用する。

§ 65 交流發電機の能率及重量

水車直結交流發電機の能率及重量の概數は第7表及第8表に示す通りである。

(60 サイクル機の實例)



第 82 圖

第 7 表 豎型交流發電機

容量 kVA	毎分 廻轉數	極 數	能 率 (%)		重 量 (kg)	
			100%負荷	50%負荷	廻轉子及軸	總 重 量
1,000	360	20	95.2	93.7	3,300	8,200
2,500	277	26	95.7	93.3	10,000	25,200
5,000	300	24	96.5	94.9	22,000	49,000
10,000	171	42	97.0	95.3	34,000	82,000
15,000	120	60	96.9	95.2	72,000	159,500
22,500	100	72	97.0	95.6	105,000	211,500
40,000	138	52	97.4	95.7	185,000	327,500

第 8 表 横型交流發電機

容量 kVA	毎分 廻轉數	極 數	能 率 (%)		重 量 (kg)	
			100%負荷	50%負荷	廻轉子及軸	總 重 量
1,000	360	20	94.4	92.1	3,400	8,200
2,000	200	36	94.8	92.4	7,900	19,000
5,000	150	48	95.7	93.4	20,500	43,300
10,000	150	48	96.0	93.8	31,500	86,300
20,000	360	20	96.6	94.4	40,000	114,000

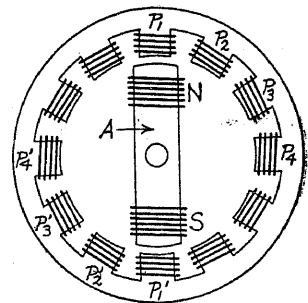
第二節 同期電動機

§ 66 同期電動機の原理

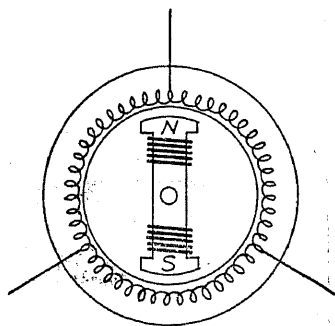
二臺の交流發電機が並列に運転中、一方の發電機を其の原動機から離しても、言ひ換へればその原動機の出力を零としても廻轉を続け、發電機が電動機に變化したことを示す。而して其の廻轉力發生の原理は次の様である。

第38圖(A)に於て P_1P_1' 、 P_2P_2' 、 P_3P_3' 等は固定鐵心に捲かれた線輪で、 P_1P_1' 、 P_2P_2' の順に一つづつ勵磁されるものとし、 A は直流にて勵磁され紙面に垂直

な軸のまわりに廻轉し得る電磁石とする。今圖の位置に於て P_1P_1' を A と反對の極性をもつ様に勵磁すれば、 A の兩極と P_1 及 P_1' との間に吸引力がはたらくが、上下兩方の力が平衡するから別に運動は起らない。次に P_1P_1' の勵磁を止めて P_2P_2' を同様に勵磁すれば P_2 及 P_2' と N 及び S との間の吸引力により A は時計方向に廻轉し P_2P_2' の下に來ると廻轉運動は止る。同様にして P_3P_3' 、 P_4P_4' 等を一つ宛順次に勵磁して行けば A はそれに従つて廻轉する。固定子の線輪を切り換へる代りに第83圖(B)の如く三相捲線を施し三相交流を送れば電流及之に依つて生ずる磁場は相廻轉の方向に廻るから、 A はこれに引づられて相廻轉の方向に同一速度で廻轉する。こ

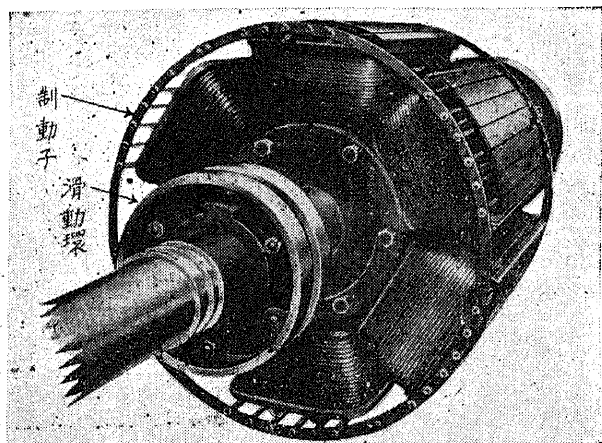


(A)



第 83 圖 (B)

れが同期電動機の原因であつて、相廻轉の速度を同期速度 (Synchronous Speed) といふ。電動機軸に機械的負荷がない場合には廻轉子 A の中心線は固定子廻轉磁場の中心線と一致して同期速度にて廻



第 84 圖

り、荷が増すに従つて廻轉子磁極中心は固定子磁極中心より遅れた位置にて矢張同期速度にて廻轉する。

同期電動機の構造は交流發電機と殆んど同一であつて、固定子には普通三相捲線を施し、廻轉子には直流勵磁機にて勵磁される磁極がある。唯一の相異は廻轉子表面に第84圖に示す様な制動子 (Damper) と稱する籠形捲線^{*}を施してあることで、これは起動の際に誘導電動機として起動せしめて同期速度近くまで廻轉子を加速せしむる爲め、及び同期速度運轉中は負荷急變の際に生ずる亂調といふ廻轉の不整を防止する爲めである。

§ 67 同期電動機の特性

イ 速度

電動機の極数を P 、周波数を f 、毎分廻轉数を n とすれば同期電動機には次の關係がある。

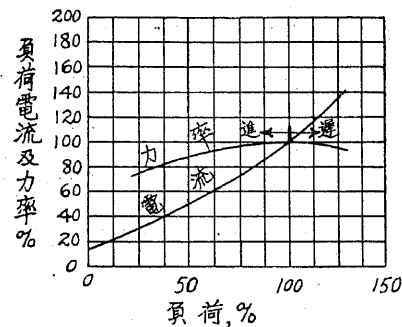
$$n = \frac{2f \times 60}{P} \dots\dots\dots(1)$$

ロ 無負荷特性曲線

同期電動機を交流發電機と同様に定格速度にて他から廻轉し、勵磁電流と無負荷端子電壓との關係を求めたものである。

ハ 負荷特性曲線

同期電動機の勵磁電流を一定に保ち、出力が變化した場合の入電流及力率の變化を示す曲線で、第85圖は全負荷に於て力率が1となる様に勵磁電流を定めた場合の負荷特性曲線の一例である。



第 85 圖

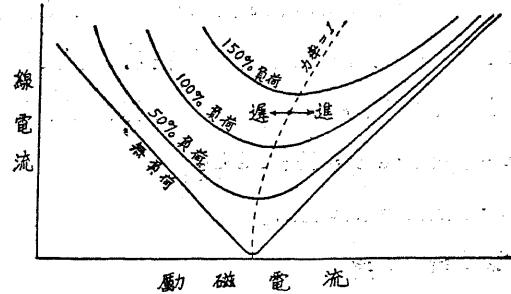
ニ 位相特性曲線又は V 曲線

同期電動機の出力は軸に加はる機械的

* § 70 参照。

負荷に依つて定り、勵磁電流には無關係である。今電動機に任意の負荷をかけた儘にて勵磁電流を變化すれば、或る勵磁電流にて入電流は最小となつて力率は1となり、それより其の値を變へるに従ひ入電流は増加し力率は悪くなる。而して勵磁電流を下げた場合には遅電流、上げた場合には進電流となる。第86圖は種々の負荷に對する上述の

變化を示したものであつてこれを位相特性曲線(Phase Characteristic Curve)又はV曲線(V Curve)といひ、此の性質は同期電動機の著しき特徴である。



第 85 圖

ホ 起動廻轉力

同期電動機は原理の説明から判る通り一度同期化した後は廻轉磁場と界磁との吸引力にて全負荷より大なる廻轉力を出し得るが、起動廻轉力は比較的弱く特にこれが大きくなる様に設計されたものでも全負荷廻轉力の 30 ~ 40 % 以下でないと自ら起動する事は出来ない。

§ 68 同期電動機の起動法

一般に使用される同期電動機の起動方法には次に述べる様な種類がある。

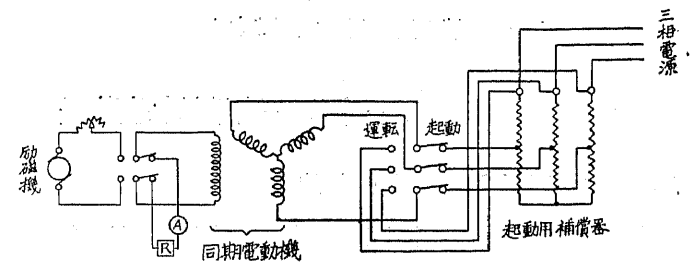
イ 制動子に依り誘導電動機として起動する方法

§ 70 に述べる籠型誘導電動機の原理を利用して起動する方法で電機子に流れる起動電流の過大となる事を防ぐ爲に起動補償器(Starting Compensator)を用ひて端子電壓を 50 % 以下に下げて起動せしめ、廻轉子が相當加速した後勵磁電流を流して廻轉子を同期速度にし次いで端子電壓を全電壓に切り替へるのである。

一般に起動の際に廻轉磁界に因つて界磁捲線に高電壓を誘發するから界磁捲線を幾つかに分割するか又は第 87 圖に示す如く抵抗を通じて短絡し、勵磁捲線の

絶縁破壊を豫防する。

ロ 起動用電動機を使用する方法



第 87 圖

起動廻轉力の

十分なる小電動機を直結し、これに依つて同期速度まで加速せしめて、交流發電機の並列運轉と同一方法にて同期化せしめる。直流電源のある場合には勵磁機を起動用電動機として使用することもあるが普通は捲線型三相誘導電動機を使用する。

ハ 輕負荷にて起動する方法

電動機を輕負荷にて起動せしめ、同期化した後に負荷を増す方法である。

§ 69 同期電動機の利害及應用

同期電動機の利點は絶對的に不變速度なること、力率を任意に制御し得ること及び能率が高いこと等であるが、一方起動廻轉力の小なること、亂調を起し易きこと、勵磁機を要すること及び取扱が幾分か複雑なること等の缺點もあるから電動機としては用途が比較的狭いが、電動發電機等の如く起動廻轉力を要すること少く、運轉能率高く、力率の良きことを欲する場合には常用されてゐる。特に負荷回路の力率改善^{*}、送電電壓の制御等^{**}を目的として使用される同期電動機は同期進相機(Synchronous Condenser)と稱し無負荷に於ける V 曲線を利用する

* 負荷には誘導電動機多く、これは通常力率が低いから回路全體として力率を低下せしめる。然るに同期進相機の界磁を過勵磁せしむれば進電流を取らるから力率改善の目的を達し得る。

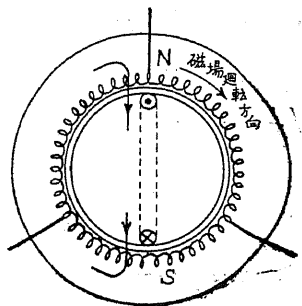
** 送電線にはリアクタンスがある。これを通して進電流を同期進相機に取れば電壓を上げ、遅電流を取れば電壓を下げる。故に此の兩者を適當に行へば受電端の電壓を負荷に拘らず一定に保つことが出来る。

ものであつて、受電端の變電所に設置される。

第三節 三相誘導電動機

§ 70 三相誘導電動機の原理及構造

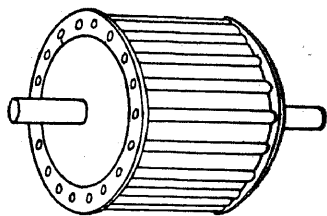
第 88 圖 (B) に示した様な三相捲線を有する固定子内に一捲回の短絡線輪を捲きたる圓筒形鐵心を第 88 圖の如く配置し、三相電流を捲線に流せば相廻轉方向に廻轉磁場を生ずる。今其の廻轉方向を右廻りとすれば、磁場の方向が矢に示す如き瞬間にはフレミングの右手の法則に従つて圖に示す様な方向の電壓従つて電流を短絡線輪内に發生する。この電流と廻轉磁場との電磁力に依つてフレミングの左手の法則に従ひ短絡線輪は時計方向の廻轉力を受けて廻り出すのである。これが誘導電動機の原理



第 88 圖

であつて、固定子捲線の端子三本の中任意の二本をつなぎ變へ相廻轉方向を逆にすれば、磁場従つて廻轉子の廻轉は反對になる。而して廻轉力を大とする爲には廻轉磁場を強くする事及短絡線輪の電流を成るべく大とすることが必要である。

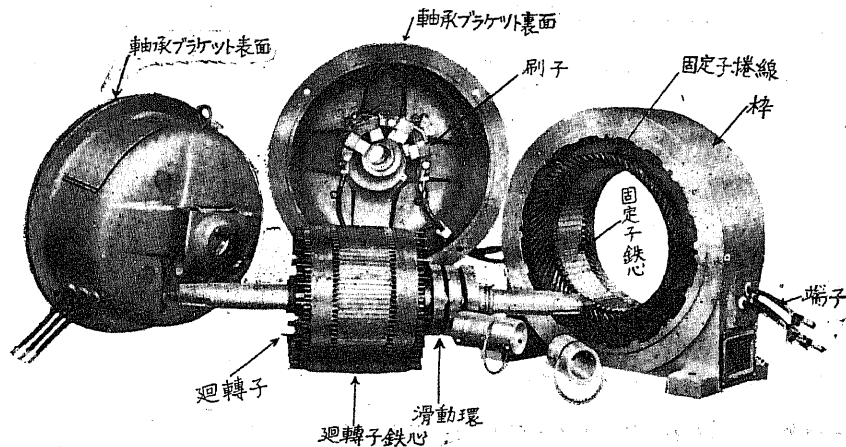
誘導電動機固定子の構造は三相交流發電機の發電子と同様に三相捲線を成層鐵心上に施したもので、極數は二極、四極、六極等偶數とする。廻轉子は成層鐵板を重ね合せ、周邊に溝を有し、導體の配置に依つて籠型及捲線型に區別される。前者は溝に納めた導體を第 89 圖に示す様に兩端にて端絡環に依つて短絡し、籠型と爲したものであつて、後者は通常星形に結びたる捲線を施し、各相の端子を三個の滑動環を経て外部に導くものである。固定子



第 89 圖

と廻轉子間の空隙は特に小にし通常 30 馬力以下では 0.5 耗程度となつて居る。

第 90 圖は芝浦製作所製捲線型誘導電動機 (全閉型) の分解したものを示す。



第 90 圖

§ 71 三相誘導電動機特性

イ 廻轉數及滑

固定子捲線の磁極數を P 、電源周波數を f 、毎分の同期廻轉數を n_0 とすれば同期電動機の場合と等しく

$$n_0 = \frac{2f \times 60}{P} \dots \dots \dots (1)$$

である 然るに誘導電動機に於ては廻轉子導體に電流を生ずる爲には廻轉子は同期速度より低い速度にて廻らなければならない。この速度を毎分 n 廻轉とすれば

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \dots \dots \dots (2)$$

或は

$$n = n_0 (1 - s) \dots \dots \dots (3)$$

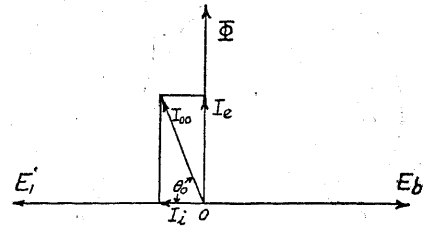
s を誘導電動機の滑 (Slip) といひ通常百分率で表す。

(2) の式にて $n = n_0$ の場合は $s = 0$ で、 $n = 0$ の場合には $s = 1$ である。即ち廻轉子の速度が同期速度の場合には滑は零であつて、靜止して居る時には滑は 1 である。全負荷の場合の滑は電動機の容量に依つて異り、通常

2~5%の間にある。

□ 無負荷勵磁電流及力率

誘導電動機固定子各極にΦなる磁束を生ずる爲には第91圖に示す如くこれと同相の勵磁電流I_eを要する。然るに固定子線輪では抵抗は非常に小でインダクタンスに比し殆ど無視出来るからI_e及ΦはI_eを生ずる爲の電圧E'_iより90°遅れてゐる。Φに依つて固定子捲線に逆起電力E_bを誘發し、これはE'_iと大き等しく、位相が相反してゐる。尙鐵心に交番磁束を生ずる爲には鐵損があるから電圧と同相の電流I_iを要し、無負荷に於てはI_eとI_iの合成なるI₀₀を供給しなければならぬ。而してその時の力率は固定子捲線の抵抗及リアクタンスを無視すればcosθ₀となり、固定子廻轉子間の空際を通じて必要なる磁束を生ずる爲めI_eが相當大であるから力率は著しく低い。勿論負荷が増すに従つて有効電流が増すから力率は次第に良くなるが、勵磁電流が相當大であるから力率は概して低い。これは誘導電動機の大なる缺點である。



第 91 圖

を誘發し、これはE'_iと大き等しく、位相が相反してゐる。尙鐵心に交番磁束を生ずる爲には鐵損があるから電圧と同相の電流I_iを要し、無負荷に於てはI_eとI_iの合成なるI₀₀を供給しなければならぬ。而してその時の力率は固定子捲線の抵抗及リアクタンスを無視すればcosθ₀となり、固定子廻轉子間の空際を通じて必要なる磁束を生ずる爲めI_eが相當大であるから力率は著しく低い。

勿論負荷が増すに従つて有効電流が増すから力率は次第に良くなるが、勵磁電流が相當大であるから力率は概して低い。これは誘導電動機の大なる缺點である。

ハ、廻轉子誘導起電力及電流

廻轉子がsなる滑にて廻轉して居る場合には廻轉磁界に對する廻轉子の相對的速度n₀-nはsに比例し、廻轉子に誘發される起電力の周波數f'は

f' = sf(4)

である。今静止の際廻轉子捲線に誘起される起電力をE₂とすれば速度nの時の誘發起電力E'₂は

E'₂ = Mf'Φ
= MsfΦ

= sE₂(5)

となり、これに依つて廻轉子捲線に電流I₂が流れる。但し上式中Mは定數である。廻轉子捲線(星形結線)一相の抵抗及リアクタンスを夫々r₂及x'₂とすれば

I₂ = sE₂ / sqrt(r₂² + x'₂²)

である。廻轉子一相のインダクタンスをL、静止の時のリアクタンスをx₂とすれば

x'₂ = 2πf'L = 2πfL × s = sx₂

であるから前式は

I₂ = sE₂ / sqrt(r₂² + (sx₂)²)(6)

で表はされ、廻轉子力率は

cosθ₂ = r₂ / sqrt(r₂² + (sx₂)²)(7)

で表はされる。

ニ 固定子負荷分力及ベクトル線圖

I₂の起磁力を打ち消して平衡状態を保つ爲に固定子捲線に電源からI'₁が流れ込む。I'₁を一次(固定子)の負荷分力(Load Component)といひ、固定子捲回數と廻轉子捲回數とを夫々N₁及N₂とすれば兩者の起磁力が相等しいから

I'₁N₁ = I₂N₂

或は I'₁/I₂ = N₂/N₁ = 1/α(8)

である。

而して(5)式のE'₂は、

E'₂ = K₂sfN₂Φ

* αは固定子捲回數と廻轉子捲回數とに依つて定る定數である。

§ 83 参照。

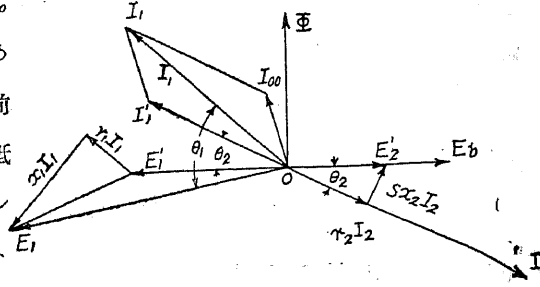
にて示され、同様に固定子に誘發される一次起電力 E'_1 は、

$$E'_1 = K_1 f N_1 \Phi$$

であつて E'_2 とは 其の方向相反する。而して K_1 は略 K_2 に等しいから

$$\frac{E'_1}{E'_2} = \frac{N_1}{sN_2} \text{ 或は } E'_1 = \frac{a}{s} E'_2 \dots\dots\dots(9)$$

是等の關係から誘導電動機のベクトル線圖を畫けば第 92 圖の如くなる。電動機固定子電流は前記 I'_1 と I_{00} とのベクトル和なる I_1 であつて、固定子端子電壓 E_1 は前記 E'_1 と I_1 に対する固定子抵抗電壓降下 $r_1 I_1$ 及リアクタンス電壓降下 $x_1 I_1$ とのベクトル和である。従つて電動機力率は



第 92 圖

は $\cos \theta_1$ 、一相の入力は $E_1 I_1 \cos \theta_1$ であるから三相誘導電動機の入力は

$$W_1 = 3 E_1 I_1 \cos \theta_1 \text{ ワット} \dots\dots\dots(10)$$

である。

ホ 廻轉子の電氣的能率

第 92 圖のベクトル線圖より判る様に固定子一相の出力即廻轉子一相の入力は、

$$W'_r = E'_1 I'_1 \cos \theta_2$$

然るに

$$I'_1 = \frac{1}{a} I_2, \quad E'_1 = a E_2$$

であるから

$$W'_r = E_2 I_2 \cos \theta_2$$

である。廻轉子の周波数は $s f$ で運轉状態では s は小であるから廻轉子鐵損を無視し得るものとすれば、廻轉子一相の出力は W'_r から抵抗損を差引いたもので次の如くなる。

即ち
$$W_2 = W'_r - I_2^2 r_2$$

然るに

$$I_2 r_2 = s E_2 \cos \theta_2$$

故に

$$W_2 = E_2 I_2 \cos \theta_2 - s E_2 I_2 \cos \theta_2$$

故に

$$\frac{W_2}{W'_r} = 1 - s \dots\dots\dots(11)$$

實際の能率はこれから廻轉子鐵損及機械的損失を差引かなければならないが、大體はこれによつて知ることが出来る。この式に依つて能率は滑が大なる程悪くなる事が判る。

へ 廻轉力

三相誘導電動機の廻轉力は其の出力と廻轉子速度とから求めることが出来る。

即ち

$$\begin{aligned} W_2 &= 3(1-s) E_2 I_2 \cos \theta_2 \\ &= 3(1-s) E_2 \times \frac{s E_2}{\sqrt{r_2^2 + (s x_2)^2}} \times \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (s x_2)^2}} \\ &= \frac{3(1-s) E_2^2 \frac{r_2}{s}}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2} \end{aligned}$$

$$n = (1-s) n_0$$

であるから
$$T = K' \frac{W_2}{n} = \frac{3K'}{n_0} \frac{E_2^2 \frac{r_2}{s}}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2} = K E_2^2 \frac{\frac{r_2}{s}}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}$$

E_2 は略 E_1 に比例するから

$$T = K E_1^2 \frac{\frac{r_2}{s}}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2} \dots\dots\dots(12)$$

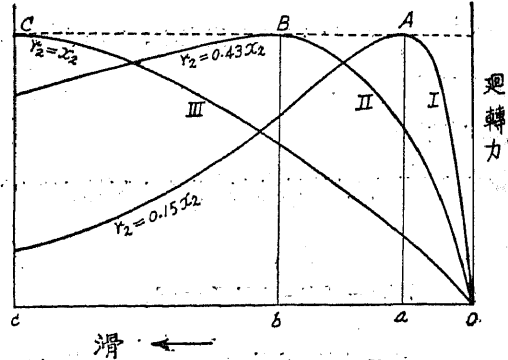
にてあたへられる。但し K は定數である。

(12) 式にて $s = 1$ とおけば静止状態の廻轉力即ち起動廻轉力を表はす式が得られる。

$$T = K E_1^2 \frac{r_2}{r_2^2 + x_2^2} \dots\dots\dots(13)$$

上式中 $\frac{r_2^2}{r_2^2 + x_2^2}$ は $r_2 = x_2$ の時が最大となる。通常運転中の能率をよくする爲に r_2 は出来るだけ小としてあるが起動廻轉力を最大とする爲には特に抵抗を挿入して $r_2 = x_2$ なる関係とする。第93圖は誘導電動機の廻轉力と滑との関係の一例を示したものであ

つて、起動廻轉力を最大とするにはⅢ曲線即ち $r_2 = x_2$ とした場合が最もよいことが判る。但し速度が上るに従つてこの曲線の廻轉力は次第に下つて行くから順次に r_2 を減じて行かなければならぬ。



第 93 圖

(12) 式の最大廻轉力は

$$\frac{r_2}{s} = x_2 \text{ 即 } r_2 = sx_2 \dots\dots\dots(14)$$

の時に起り、その時の廻轉力は

$$T_m = \frac{KE_1^2}{2x_2} \dots\dots\dots(15)$$

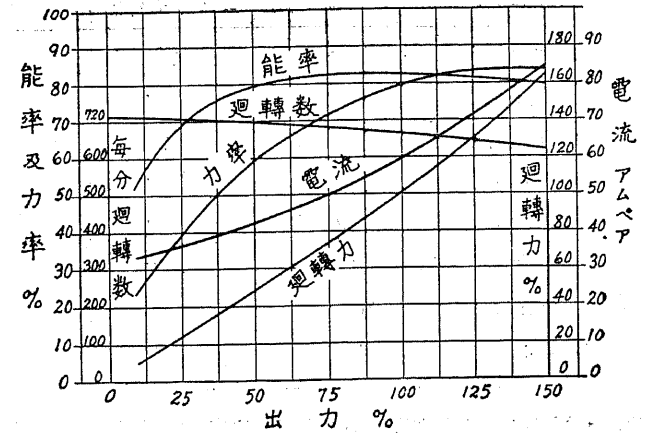
である。運転状態にては r_2 が最小即ち第93圖の I 曲線にて運転して居るから電動機にこれ以上の荷をかけると速度は下り、速度が下れば益々廻轉力は減るから遂に停止してしまふ。故に T_m を 停動廻轉力(Stalling Torque) といふ。停動廻轉力は通常全負荷廻轉力の約二倍位である。廻轉力-滑曲線の中で停動廻轉力の點より左側に於ては動作が不安定であるから右側即ち OA 間にて負荷に應じた滑にて運転する。

端子電壓 E_1 は通常一定であるから廻轉力は一定であるが、起動時などの如く特に電壓を下げる場合には廻轉力は一次電壓の自乗に比例して變る。

ト 負荷特性曲線

實際に誘導電動機を取扱ふ場合には、電動機出力を横軸にとり縦軸に固定子電流、力率、廻轉力、能率及滑又は廻轉數等の變化を示す曲線を使用し、これを負荷特性曲線とい

ふ。第94圖は50 サイクル、200 ヴォルト用捲線型 20 馬力電動機の特性曲線を示したものである。此の電動機的全負荷廻轉力は 21.6 転米となつてゐる。



第 94 圖

第9表及第10表は我國に於ける三相誘導電動機の標準型及それ等の特性の大體を示したものである。

第 9 表 小型三相誘導電動機 (電壓 200 ヴォルト)

定格出力 kW	極數	同期廻轉數 毎分		廻轉子	起動裝置	全負荷特性			無負荷電流 全負荷の百分率	最大起動電流 全負荷の百分率
		50 サイクル	60 サイクル			滑%	能率%	力率%		
0.5	4	1500	1800	籠型	ナ シ	8	75.0	79.5	1.2	600
1.0	"	"	"	"	"	7	79.0	82.5	2.0	"
2.0	"	"	"	"	"	6	82.0	84.5	3.4	"
3.0	"	"	"	"	"	5.5	83.5	85.5	5.0	"
5.0	"	"	"	"	星形-三角轉換器	5	84.5	86.5	7.7	300
7.5	"	"	"	"	"	"	85.0	87.0	10.5	"
10	"	"	"	"	"	"	85.5	87.0	13.5	"
15	6	1000	1200	捲線型	起動抵抗器	"	85.0	86.0	14.0	150
20	"	"	"	"	"	"	86.0	87.0	20.0	"
25	"	"	"	"	"	"	86.5	87.0	27.0	"
30	"	"	"	"	"	"	87.0	87.5	32.0	"
30	8	750	900	"	"	"	87.0	87.0	39.0	"
40	"	"	"	"	"	"	87.5	87.5	51.0	125
50	"	"	"	"	"	"	87.5	87.5	64.0	"

第 10 表 低速度小型三相誘導電動機

定 格 出 力 kW	極 數	同 期 廻 轉 數 (毎分)	
		50 サイクル	60 サイクル
5	6	1000	1200
7.5	"	"	"
10.0	8	750	900
15.0	"	"	"
20.0	"	"	"
25.0	"	"	"
30.0	10	600	720
40.0	"	"	"

其他、大型三相誘導電動機、短時間定格三相誘導電動機等の標準に關しては巻末の諸表を参照されたい。

§ 72 三相誘導電動機の起動法

三相誘導電動機の起動廻轉力は § 71 へ に述べた如く

$$T_{st} = KE_1^2 \frac{r_2}{r_2^2 + x_2^2} \dots\dots\dots(1)$$

で、固定子供給電壓の二乗に比例し、供給電壓を一定とし廻轉子抵抗を變化し得るものとすれば廻轉子一相の抵抗がそのリアクタンスに等しい場合に最大となる。

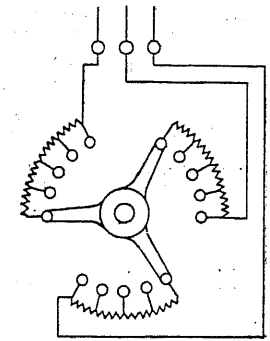
起動電流は § 71 の (6) 式に於て $s = 1$ としたる

$$I_{2st} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} \dots\dots\dots(2)$$

に從つて變り、全電壓を加へた場合には全負荷電流の數倍に上る。小容量の電動機では機械の設計にも幾分か餘裕があり、又斯様な起動電流が配電線路に及ぼす影響も輕いからよいが、容量の大なる電動機では起動電流を制限する爲に適當な方法を講じなければならない。

イ 捲線型電動機の起動法

捲線型電動機に於ては廻轉子捲線に直列に抵抗を挿入すれば (2) 式に示す如く廻轉子起動電流を減少し、從つて一次の負荷分力 I_1' を減ずるから電動機起動電流の減ずることは明かである。尙 (1) 式の示す通り起動廻轉力を増すと云ふ二重の利益があるから、捲線型電動機では常に第 95 圖の如き三相式起動用抵抗器を用る、起動の際は全抵抗を入れ速度が上るに從つて抵抗を順次に減少し最後に抵抗を全部短絡する。通常電動機廻轉子には滑動環を短絡する横桿が附屬してゐて、之によつて抵抗を完全に短絡する。



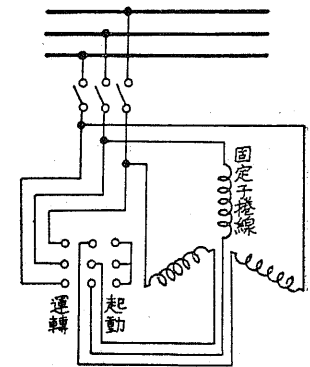
第 95 圖

ロ 籠型電動機の起動

籠型電動機に於ては廻轉子抵抗を變化することは出来ないから廻轉力—滑曲線は第 93 圖 I 以外に變化することが出来ず、從つて起動廻轉力は全電壓を加へた場合でも全負荷廻轉力以下である。且つ全電壓にて起動しては起動電流が過大となるから、起動電流を制限する爲には次の様な方法を講ずるのであつて、その爲に起動廻轉力は尙一層減少することになる。故に籠型電動機の起動は無負荷又は輕負荷でこれを行ふのである。

(1) 星形—三角起動法

固定子捲線を星形結線、三角結線の兩者に切り替へ得る如くし、起動の際は星形とし速度が上つてから三角結線に切り替へる方法であつて、比較的小容量の電動機に使用される。運轉状態の際一相に加はる電壓を 1 とすれば起動の際は $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 即 0.58 となる。第 96 圖は本起動法の接續圖を示す。



第 96 圖

(2) 起動補償器

§ 68 (イ) に於て述べた様に起動補償器に依つて電壓を下げて起動する方法であつて、容量の大なる電動機に使用される。

§ 73 三相誘導電動機^{*}の速度制御

三相誘導電動機は直流分捲電動機に類似し、不變速度電動機に屬すべきものであつて、無負荷より全負荷までの速度變化は數 % に過ぎない。而して速度を變へるには次の如き方法がある。

イ 廻轉子に抵抗を挿入する方法

第 93 圖より明かな如く、廻轉子抵抗を増加すれば同一廻轉力に對する滑が増すから捲線型廻轉子を用ゐ、その抵抗を加減して速度を調整することが出来る。併し滑を増すことは § 71 (11) 式の示す如く廻轉子の電氣的能率を低下することであるから絶えず速度を調節する必要のある場合には適當でない。抵抗器の接続は第 95 圖の起動用抵抗器と同一であるが、速度制御にも用ゐる場合には長時間使用に耐へ得る様に太い抵抗線を用ふる。起重機用電動機には此の方法が廣く用ゐられて居る。

ロ 極數を變化する方法^{*}

三相誘導電動機の同期速度は § 71 (1) 式に示す如く周波數に比例し、極數に逆比例する。故に捲線の接続を適當に変更して極數を變へれば能率を下げないで速度を變化することが出来る。併し極數の變化は通常二段乃至三段に限られるから細かな速度調節には矢張イの方法を併用せねばならない。

ハ 縦續法 (Cascade Connection or Concatenation)

第 97 圖に示す如く二個の捲線型三相誘導電動機 A 及 B の廻轉子軸を共通とし、A の固定子捲線を電源に接続し、その廻轉子捲線を滑動環を経て B の固定子捲線に接続し、B 機の廻轉子捲線を起動抵抗器 R に結べば電動機は宛も一個

* ロ又はハの速度制御法を用ゐた電動機を多速度電動機 (Multi-Speed Motor) と云ふ。

の誘導電動機と同様に運轉を爲すことが出来る。斯様な接続を誘導電動機の縦續結合法と云ふ。而して斯様な電動機の同期速度は A 機の極數を P_A 、B 機の極數を P_B とすれば

$$n_s = \frac{2f \times 60}{P_A + P_B}$$

であつて、A、B 孰れの機械の同期速度よりも低くなる。特別の場合として $P_A = P_B$ とすれば

$$n_s = \frac{2f \times 60}{2P_A} = \frac{2f \times 60}{2P_B}$$

となつて、A 機又は B 機の同期速度の半分となる。縦續法も亦經濟的な速度御法であるが細かな調節には矢張イの方法を併用しなければならない。

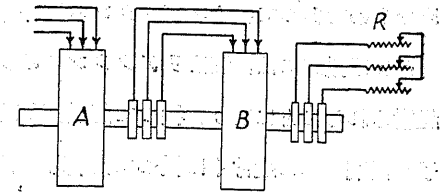
以上の外電源周波數を變へて速度を變ふることも出来るが、この方法は電源が專用の場合でなければ應用し得ない。

§ 74 三相誘導電動機の改良型

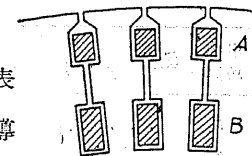
三相誘導電動機、特に籠型三相誘導電動機は構造が簡單で價格も廉く、取扱も容易であるから廣く普及して居るが、§ 72 に述べた如く力率の悪いこと、起動電流の大なる割合に起動廻轉力が小であること、速度制御が困難であること等の缺點がある。斯様な缺點を補ふ爲に色々な方法が考案されて居るが、紙面が許さないから茲には起動廻轉力特性の改良方法たる二重籠型誘導電動機 (Double Squirrel-Cage Induction Motor) 及誘導電動機の力率を改良したる誘導同期電動機 (Synchronous Induction Motor) の二種のみに就て説明することにする。

イ 二重籠型誘導電動機

此の電動機の廻轉子は第 98 圖に示す如く廻轉子表面及内部の二段に溝を有し、外周の溝には高抵抗の導體を入れ、内部の溝には普通の如く低抵抗の導體を納



第 97 圖



第 98 圖

めたものであつて、インダクタンスは外部の導體が内部の導體より小である。

故に起動時には電流はリアクタンスの少い表面導體に多く流れ、それに依つて起動されることになり、従つて起動廻轉力は大で、起動電流は割合に少い。廻轉子が同期速度に近づくに従つて廻轉子の周波数は著しく小となり、リアクタンスが小さくなるから電流は主として抗抵の少い内部導體に流れ、それに依つて運轉され普通の籠型誘導電動機と同様に能率が良い。結局起動時には捲線型の長所をとり運轉中は籠型の利点を發揮する電動機であつて、第99圖は50馬力二重籠型電動機の特性曲線を示したもので

ある。

□ 誘導同期電動機

誘導同期電動機とは捲線型誘導電動機が同期近くに廻轉して居る時に廻轉子捲線に直流を送つて同期化させ、誘導電動機を同期電動機とするものであつて、誘導電動機として起動が容易なこと及運轉

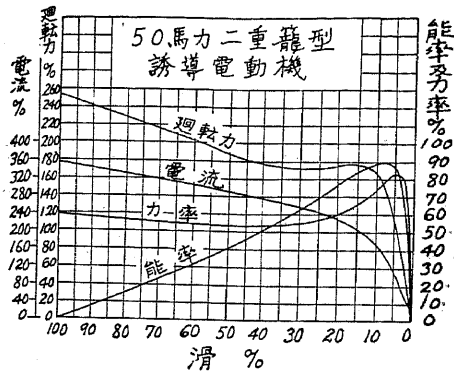
中は同期電動機として力率が高く、能率もよいといふ利益がある。

此の電動機では廻轉子に勵磁用發電子捲線を有し、別に勵磁電源を要しない様に作られたものがある。

第11表は誘導同期電動機の標準型及其特性の大略を示すものである。

第11表 低壓50及60サイクル誘導同期電動機

出力馬力	極数	全負荷能率 %	全負荷力率 % (進)	起動電流 %	起動廻轉力 %	破調廻轉力 %	停動廻轉力 %	起動装置
5	4	83.5	98	200	100	140	200	抵抗器
7.5	"	84.5	"	"	"	"	"	"



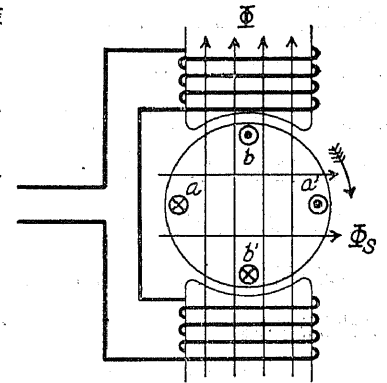
第99圖

10	6	84.5	98	175	100	140	200	抵抗器
15	"	85.5	"	"	"	"	220	"
20	"	86.0	"	"	"	"	"	"
25	"	86.5	"	"	"	"	"	"
30	"	87.0	"	"	"	"	"	"
35	"	87.5	"	"	"	"	"	"
50	8	88.0	"	"	"	"	"	"
75	"	89.0	"	"	"	"	"	"

第四節 單相誘導電動機

§ 75 單相誘導電動機の原理及構造

單相誘導電動機とは一次即ち固定子に單相捲線を有し、單相交流にて運轉される誘導電動機であつて、二次即ち廻轉子は多くは籠型である。第100圖は其原理を示す圖面であつて、廻轉子を靜止せる儘にて固定子捲線に單相交流を流せば界磁には交番磁場が起り、籠型捲線には變壓器作用 (§ 83) に依つて電壓、従つて電流が誘起され、その大きさは $\alpha\alpha'$ の位置に於て最大であつて、これを離れるほど小となり、 bb' の位置にて零となる。磁束 Φ が圖の如き方向に増加する間は $\alpha\alpha'$ の電流の方向は圖に示す如くであつて、磁場と電流との関係から此の場合には廻轉力を生じないことが判る。



第100圖

次に、廻轉子を或る方法で右廻り(又は左廻り)に廻せば、直流發電機と同様に依つて磁極下に在る導體に電壓、従つて電流を發生し、その方向は磁場の方向が圖

の如き場合には bb' にて示される如くである。斯く廻轉に依つて生ずる起電力を速度起電力 (Speed E. M. F.) と云ひ、之に對して變壓器作用に依つて生ずる起電力を變成起電力 (Transformer E. M. F.) といふ。速度起電力は磁束 Φ が最大の時に最大であつて、即ち Φ と同位相にある。廻轉子導體の抵抗はそのリアクタンスに比して無視し得る程度であるから速度起電力 E_s に依る電流 I_s は E_s より 90° おくれ、これに依つて磁界 Φ_s を磁極軸と直角の方向に生ずる。故に Φ_s は Φ より時間的に 90° おくれ、空間的にも 90° 位相が異なる。斯く時間及空間に於て 90° の位相の差を有する二組の交番磁束は一つの廻轉磁界を構成し、廻轉子はこれに引ずられて廻轉し、誘導電動機として働くのであつて、その廻轉方向は圖の如く最初廻した方向である。

§ 76 单相誘導電動機の起動法

前項の説明に依つて判る様に单相誘導電動機は静止して居る時はこれに電流を供給しても起動力がないが、いづれか一方に廻してやると其の方向に廻轉力を生じて電動機となる。故に单相誘導電動機には必ず起動装置を備ふる必要がある。

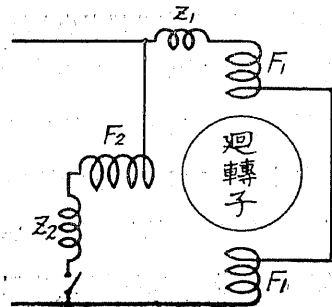
イ 分相起動法 (Split-Phase Starting)

分相起動法を行ふには固定子捲線を一はリアクタンスの大なる、他は抵抗の大なる二相捲線とし、单相交流をこれ等の兩回路に分ち、位相の異つた電流を二相捲線に流し、兩者の合成に依つて廻轉磁界を生ぜしめて起動するのである。第 101

圖はその原理を示したもので、起動後は一方の捲線を開路する。

□ 隈取線輪起動法 (Shading Coil Starting)

第 102 圖に示す如く主極の一端に短絡銅環 C を置き極片を A, B の二部に分てば C 環に變壓器作用に依つて電流を誘導して 180° 位相の遅れた磁束を生じ、其の作用は B 極を通る磁



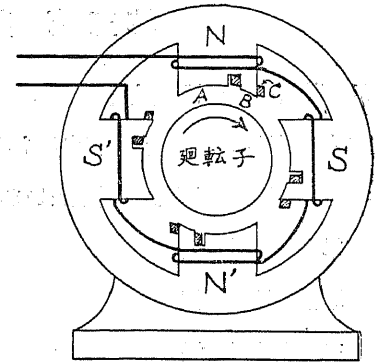
第 101 圖

束の變化を遅らせる如くに働く。其の結果 B 極の磁束は常に A 極の磁束より位相が遅れ、 A より B に移る移動磁界を生じて廻轉子を圖の如き方向に起動せしめる。

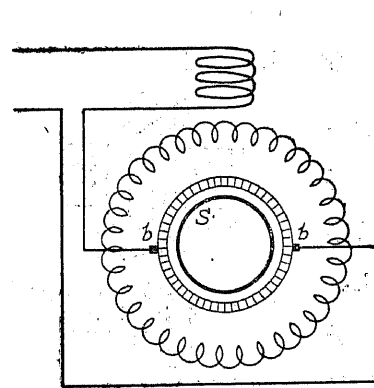
以上二種の方法は構造が簡單であるが起動廻轉力は弱いから扇風器の如く起動負荷の少ないものに用ゐられる。

ハ 整流子起動法 (Commutator Starting)

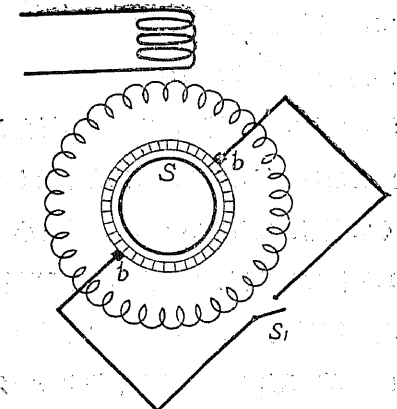
单相誘導電動機の廻轉子として直流電動機電動子を用ひ、これを第 103 圖の如く固定子捲線と直列に結べば、单相直捲電動機 (§ 78) として起動する。速度が上つた後に銅環 S にて整流子を短絡すれば直流電動子は多相捲廻轉子となつて单相誘導電動機として運轉する。其他第 104 圖の如く反捲電動機 (§ 79) として起動する方法もある。前者は刷子 bb' と固定子との結び方により、又後者では刷子 bb' を右廻り又は左廻りに移すことに依つて右廻り又は左廻りに出来る。是等の起動法は容量が相當に大にて、且つ起動時に大なる廻轉力を要する場合に使用される。



第 102 圖



第 103 圖



第 104 圖

第五節 整流子電動機

§ 77 整流子電動機の種類

交流電動機にて整流子を有するものを交流整流子電動機 (A. C. Commutator Motor) 或は單に整流子電動機といひ、種類が多いが主要なるものは

- 單相直捲電動機
- 單相反捲電動機
- 三相直捲電動機
- 三相分捲電動機

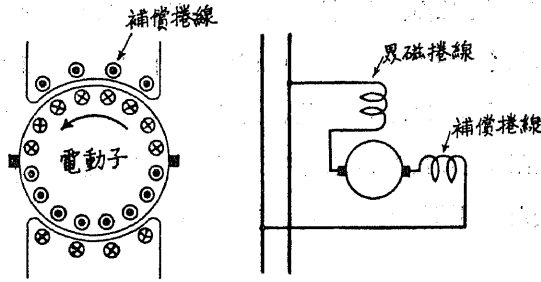
であつて、以下これ等につき簡単に説明する。

§ 78 單相直捲電動機 (Single-Phase Series Motor)

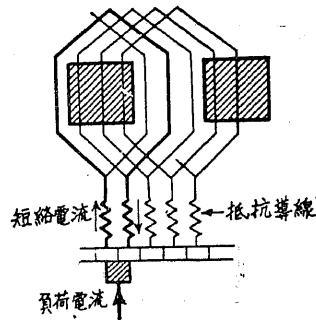
イ 原理及構造

單相直捲電動機の最も簡單なるものは直流直捲電動機の界磁鐵心を成層鐵心に代へたものであつて、界磁及電動子の電流が同時に變化するから交

流を通じても廻轉方向は直流の場合と同様に一定となる。但し此の儘では力率低く、整流も悪くて實用にならないから、空隙を小とし又第 105 圖に示す様に磁極表面に補償捲線を付し、其他第 106 圖に示す様に抵抗導線を各捲線素子に直列に入れる等の改良を施すのである。猶又此等の影響は周波数が小なる程軽いから大規模



第 105 圖



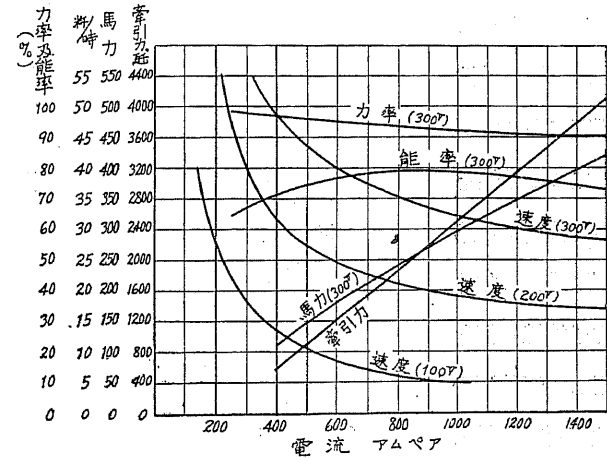
第 106 圖

に此の電動機を使用する所では 16²/₃, 又は 25 サイクルの低周波交流を使用する。

□ 特性及び用途

單相直捲電動機^{*}の特性は第 107 圖に示す如く直捲特性である。従つて電氣鐵道

用に適するので歐米に於ては相當廣く使用されてゐる。直流直捲電動機に比して製作が困難なるにも拘らず單相交流の使用される理由は、變壓器の助けを借りて 10,000 乃至 20,000



第 107 圖

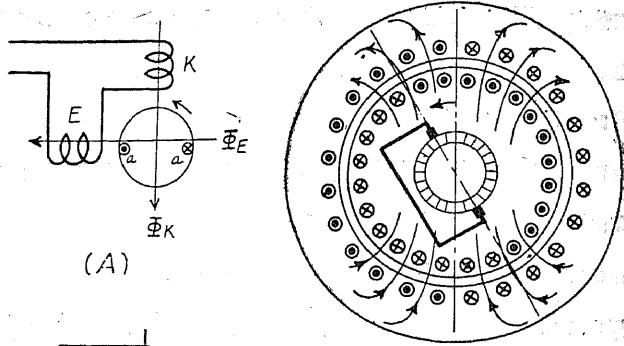
ヴォルトといふ高壓にて經濟的に電力を供給することが出来るからである。

§ 79 單相反捲電動機 (Single-Phase Repulsion Motor)

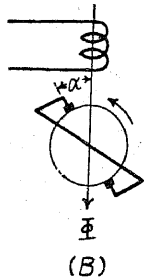
第 108 圖 (A) の如く互に 90° 位置を異にする二つの勵磁捲線 K 及 E を備え、二極機の直流電動子刷子を K 磁極軸上に置いて短絡し、勵磁捲線に單相交流を流した場合を考へると、K 捲線からの變成作用に依つて廻轉子捲線に誘導する電壓は單相誘導電動機の原理にて説明したと同様に圖の αα 附近の導體にて最大であつて、これに依つて是等導體内には Φ_K より 18° おくれた電流即ち圖に示す如き方向の電流を生ずる。然るに是等の導體は E 磁極の下にあるから Φ_E との間に廻轉力を生じ圖の方向に廻轉する。即ち E 極は廻轉力を起す為

* 107 圖に於ては速度を機關車毎時料にて表し、廻轉力は 機關車働輪縁に於ける牽引力 (託)にて示してある。

の磁束を生じ、 K 極は變成作用に依つて廻轉子に電流を生ぜしむることになるのであつてこれが反撥電動機

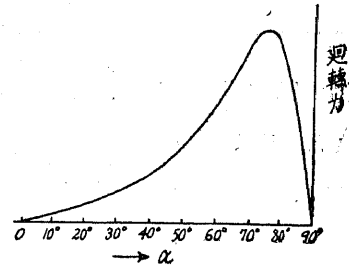


(A)



(B)

第 109 圖



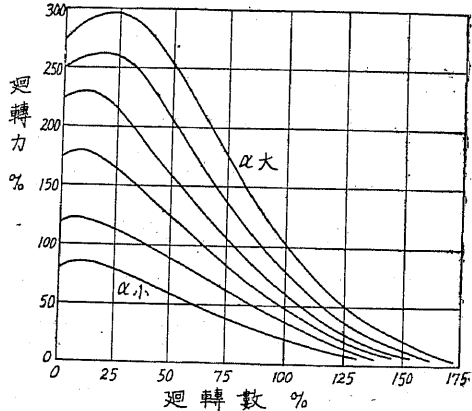
第 110 圖

對して或る角度 α だけ傾ければ、 Φ の中にて刷子軸と同方向の分力は前記 K 捲線の作用を爲し、直角分力は E の作用を爲すから廻轉子は矢張圖の如くに廻轉する。實際の反撥電動機では直角分力を有效

に働かす爲に、第109圖の如き構造の磁極を使用する。廻轉力は α の大きさに依つて第110圖の如くに變化する。

反撥電動機は直捲特性の電動機であつて、起動廻轉力強く、速度が上るに従つて、廻轉力は減

する。第111圖は種々の刷子位置に對する廻轉力速度特性を示すものである。



第 111 圖

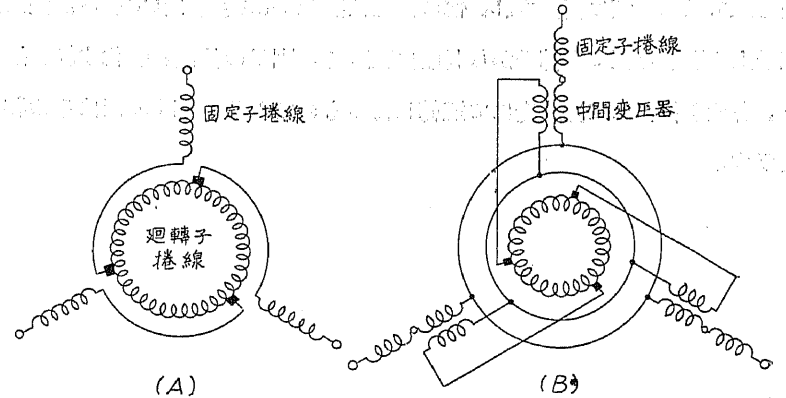
§ 80 三相直捲電動機 (Three-Phase Series Motor)

三相直捲電動機とは三相誘導電動機と等しき固定子、及び直流電動子と同じ廻轉子を有する電動機で、その最も簡単なものは第112圖(A)に示す如く固定子捲線

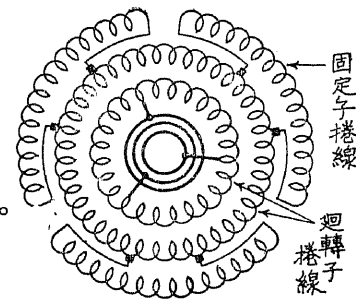
を直捲に結んで固定子に結んだものであるが、普通は同圖(B)の如く變壓器

を通して廻轉子に給電する。

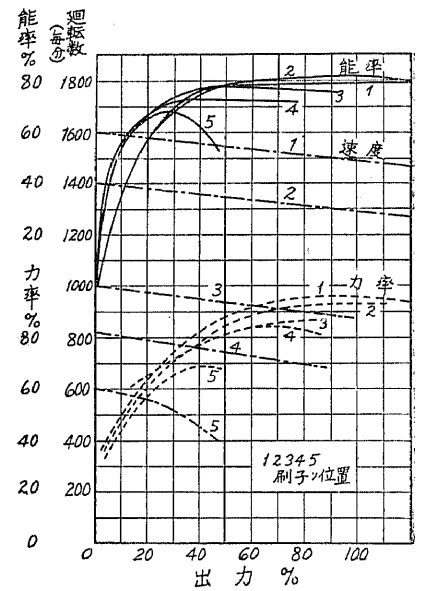
三相直捲電動機は刷子の移動に依つて能率を左程犠牲にすることなしに速度を廣く調節することが出來、又大なる起動廻轉力及び高力率を得ることが出来る。



第 112 圖



第 113 圖



第 114 圖

§ 81 三相分捲電動機 (Three-Phase Shunt

Motor)

三相分捲整流子電動機の最も著名なものはシユラーゲ電動機である。第113圖はその接續を示すものであつて、廻轉子は二重の捲線を有し、一方は三つの滑動環を経て三相電源に接續され、他の捲線は整流子に接續されて居る。固定子は整流子上の刷子を経て廻轉子から勵磁される。刷子の位置を變化すれば速度は變り、各刷子位置にて定速度にて運轉し得るものである。第114圖はその特性曲線を示す。