

# 最近の電動機制御 ③

東京芝浦電気KK 府中工場 尾山 純 一

## 4. 直流電動機の制御

### 4.1 直流電動機制御特性の改善

直流電動機は制御が容易で、可変速度制御、急速頻繁加減速、急峻光頭負荷などの用途に適するが、整流子をもつため整流限界や保守の点で欠点があり、これが改善に種々努められると共に無整流子電動機の研究がなされている。制御方法としては、電機子直列抵抗制御を基本として、直並列制御、発電制動制御、回生制動制御、界磁加速制御、ワードレオナード制御、イルグナー制御、静止レオナード制御などがある。電動機の界磁々束制御では時定数が大きく遅れがあるので、速応制御は電機子電圧制御であり、静止レオナードによる交流電圧の点弧位相制御が最大の速応性を得る。速度応答を大にするにはトルク従って電機子電流の値と変化とを大きくすることであり、これが直ちに整流の壁に突き当るので、制御特性の改善は界磁応答と整流能力との向上になる。

#### (a) 界磁電流の速応制御

界磁回路には時定数  $T_f = L_f/R_f$  があるので、励磁制御には回路抵抗を大きくするか強勢励磁とするかであり、前者は常時励磁電力損失を多くするので、一般に後者とす。強勢励磁は界磁電流が目標値に達するまでに加わる電圧の変化値に大きくすることであり、見掛上常時励磁電力の強め倍数の制御用励磁機容量を要する。

励磁電流の増加は強勢励磁で速くなるが、減少は界磁エネルギーの吸収能力で制限される。故に制御用励磁機は電力回生ができ、界磁回路抵抗損失と回生電力とで界磁エネルギー吸収を速くする必要があり、磁気増幅器よりも回転増幅機、格子制御水銀整流器、SCR が適し可逆制御は整流器を十字結線とする。

(1) 発電機界磁の強勢励磁 発電機界磁制御による電圧制御では、励磁電圧  $e_f$ 、励磁電流を  $i_f$  とすると、

$$e_f = i_f R_f + L_f di_f/dt \quad (10)$$

であるから、 $i_f$  が直線的に上昇して時間  $t_0$  で所定電圧に達するとすると、最終過渡励磁電圧  $E_f$  は、図15にて

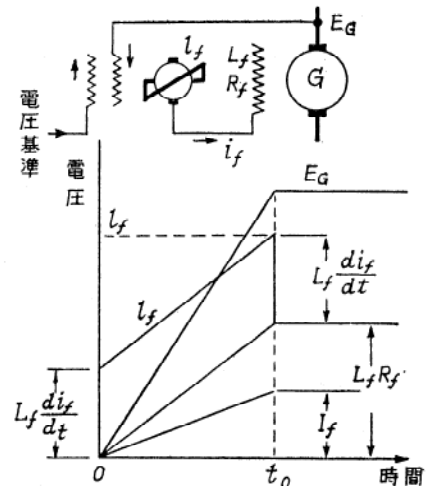
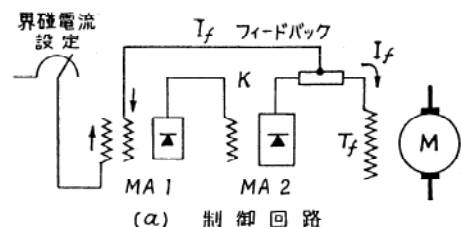


図15 発電機界磁の強制励磁

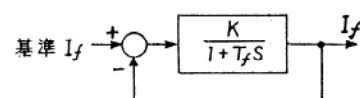
$$E_f = I_f R_f + L_f I_f/t_0 = I_f R_f (1 + T_f/t_0) \quad (11)$$

で、 $I_f$  は定常励磁電流である。即ち制御用励磁機は定常励磁電圧の  $(1 + T_f/t_0)$  倍の最大過渡電圧を発生し得る必要がある。たとえば  $T_f = 3s$ 、 $t_0 = 0.5s$  とすると7倍の過渡励磁電圧を加えればよい。

(2) 電動機界磁の強勢励磁 電動機界磁制御は一方方向電流制御となるから、界磁電流のフィードバック制御で発電機界磁制御と同様に考えることができる。図16にて制御用励磁機の増幅率を  $K$  とし、時定数を簡単のために無視すると、この励磁回路の伝達関数  $F(s)$  は、



(a) 制御回路



(b) ブロック線図

図16 電動機界磁の強制励磁

$$F(s) = \frac{K}{1 + \frac{1}{T_f s}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K} + \frac{T_f}{K} s}$$

$$\approx \frac{1}{1 + \frac{T_f}{K} s} \quad (\text{但し, } K \gg 1 \text{ とす}) \quad (12)$$

となつて、界磁回路時定数は  $1/K$  に低下したことになる。格子制御整流器や SCR で励磁して界磁電流を急減するため、格子制御位相を整流位相からインバータ位相に位相角を移すだけで簡単にインバータとなつて界磁エネルギーを電源側に返すので、整流器は1組ですむ。

(b) 界磁々束の変動

界磁々束と電機子電流による磁束とは直角にずれているので、弱め界磁高速運転中の過大電機子電流により、磁極端で増磁部分は飽和で抑制され減磁部分が強く作用して全空隙磁束が減少し、速度は負荷電流の増大により、反つて増速しようとする尻上り特性となつて、速度制御を困難にする。界磁々束の値により電機子反作用、補極磁束の相互作用、刷子位置による複巻作用、直巻コイルと分巻コイルとの相互誘導などが変化し、電動機時定数  $T_m = JR_a / K_v K_T$  の  $K_v K_T$  も界磁々束で変化するので、自動制御系の安定化に対する回路定数の選定に注意を要す。上記尻上り特性は数分の一の直巻コイルターンで防止され、負荷電流による速度変動を線化できるが、可逆運転にて直巻コイルを切換えねばならない。

一般に弱め界磁高速運転では補極が主極より強くなりすぎて、整流劣化を来すので許容最大電機子電流が低下する。これは界磁電流に応じて補極コイル電流の分流値を制御することにより著しく改善される。

(c) 整流特性の改善<sup>12)</sup>

(1) 磁路の積層 制御の速応性を大きくすると電機子電流の値とその  $di/dt$  が大きくなり、これは整流子短絡コイルのリアクタンス電圧を増し、補極磁束の飽和と磁路のうず電流による磁束確立の遅れとなる。界磁制御を速くするため、継鉄及び補極の磁路を薄鉄板の積層構造にすると、塊状磁路に比して補極磁束の時定数は、 $1/5 \sim 1/10$  に低減し、整流を著しく改善する。

(2) 補極磁束の強さ 電機子電流の変化率に対しては誘導分路の設定、主極の弱め高速運転に対しては補極コイルに分路抵抗を設け、その分流値を界磁電流値に応じて調整し、補極磁束の強さを適正値に補正する。

(3) 整流子構造の改善 整流子面の通風冷却による表面皮膜抵抗の適正化と刷子粉の排除、分割刷子による刷る抵抗の利用などがある。

(d) 整流器励磁に対する界磁コイルの保護

界磁の速応制御のために直流電源から整流器による位

相制御を行なうと、過渡過電圧を要するから、強め界磁率を10倍にすると、定常運転時電圧はその  $1/10$  であり、整流器の制御角  $\alpha$  は  $80^\circ$  附近になつて、大きな鋸歯状波電圧が界磁コイルに加えられる。故に界磁コイルの両端に相当高い振動電圧を発生し、これにより電機子コイルに誘起する変圧器起電力が整流を著しく阻害すると共に界磁コイルの絶縁を損傷する。これは異磁コイルに並列コンデンサを接続して電位分布を改善するか、直列リアクトルを接続して振動電圧をリアクトル部分に集中させることで防止される。

4.2 直流電動機速度制御

直流電動機を使用するのはその速度制御性能の高いことであるから、急速加減速及び一般の高精度の速度制御に使用される。急速加減速では許容最大電機子電流で加減速させるのが最短時間を与えることになり、それ以上は複数動機の並列駆動による全  $GD^2$  の減少である。

(a) 複数電動機の負荷平衡

並列運転する電動機の負荷特性は一致することが望ましいが、同一仕様の電動機でも完全に同一特性にすることはできない。直巻電動機の負荷特性は垂下特性であるから負荷電流の大きい電動機が速度が低下しようとして比較的容易に負荷が平衡する。分巻電動機では同一界磁電流でも界磁々束に相当の差があり無負荷速度が異なり、電機子回路抵抗や電機子反作用も外部接続電線や磁極形状や空隙距離の差のため必ず僅少の差異があり、負荷特性が異なるので、負荷平衡には他の補助装置が必要で普通は界磁電流平衡と電機子電流平衡とを行なう。図17(a)は和動及び差動直巻界磁で交接続とし、電機子電流の大きい電動機の界磁の強さを強くして速度を下げ、他の電動機の界磁の強さを弱くして速度を上げ、両電動機の負荷を平衡させる。図17(b)は界磁励磁機によるもので、直巻界磁交叉接続は速応性が大であるが、これは負荷分担比をずらすことができる利点がある。

電動機を直列接続すると各電動機の端子電圧分担に差を生ずるが、直巻電動機では前と同様にその差が小さく、

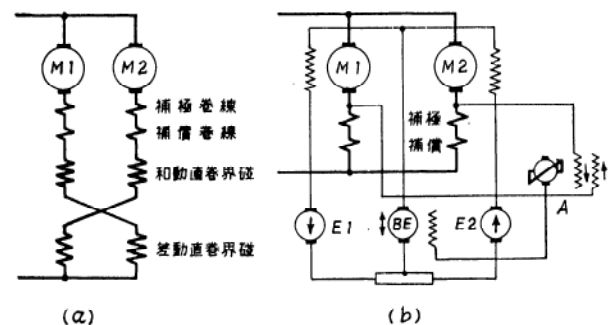


図17 負荷電流平衡方式

分巻電動機では界磁々束の差だけ電圧分担がずれるから電機子電圧平衡のために異磁電流調整を要す。

直列接続運転では直流電圧を高して電機子電流を低減できるので配線が容易になり、電機子電流調整をする場合に制御が簡単になる。

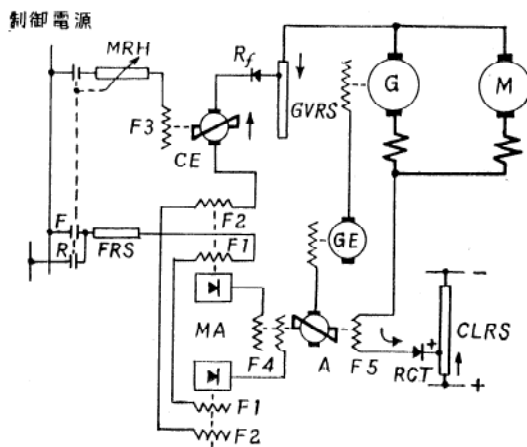
(b) 急速加減速制御

レオナード制御で電動機時定数  $T_m$  を小さくし、電圧上昇を急速にして許容電機子電流値に電圧上昇率を抑制するように電圧の急速制御と電機子電流制限制御とを行なう。

(1) 電圧の急速制御 ワードレオナード制御では発電機の強制励磁を、静止レオナード制御では交流電圧の点弧位相制御で半波応答まで速くできる。

(2) 電機子電流制限制御 電機子電圧を高めると速度が電圧に追従するように電機子電流が流れて加速トルクを得るが、電圧上昇率の高い程、 $T_m$  の大きい程、この間の電機子電流が著増し、許容電機子電流を超えようとする。最短時間は加速過程中の電流がこの許容値一杯になることで得られるので、整流の許容限界内で電増上昇、従って電流上昇率を高くし、許容値に達するとこの電流値を保つように電圧上昇率を抑制する。

図18はワードレオナード制御における要旨を示し、GVRsの電機子電圧の分圧値がCEの逆電圧を超すまでは、MAの抑制巻線FZの励磁電流は逆流阻止整流器R<sub>f</sub>で阻止されるので、MAの制御巻線FIで回転増幅機Aと励磁機GEを経て主発電機は最大の強勢



- A : 回転増幅機
- CE : 制御用励磁機
- CLRS : 電流制限抵抗器
- GE : 発電機用励磁機
- GVRs : 発電機電圧検出抵抗器
- FRS : 界磁抵抗器
- MRH : 主幹制御器
- RCT : 逆流阻止整流器
- MA : 磁気増幅器

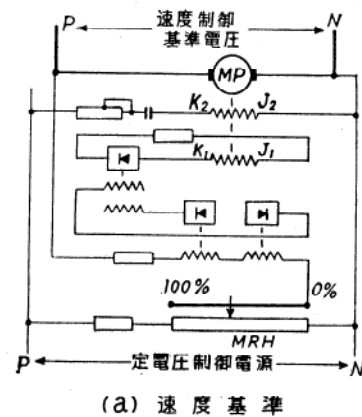
図18 急加速制御方式

磁となり、電機子電流が CLRS の設定値以上になると A の電流制限巻線 F5 に通電して F4 の励磁を減少させて電圧上昇を抑制する。電流制限回路のアンペアターンはこの過励磁分を打消すに足る値でなければならないので、電機子電流の制限値以上の電流偏差に対する電流制限回路のゲインが十分大きくなければならない。

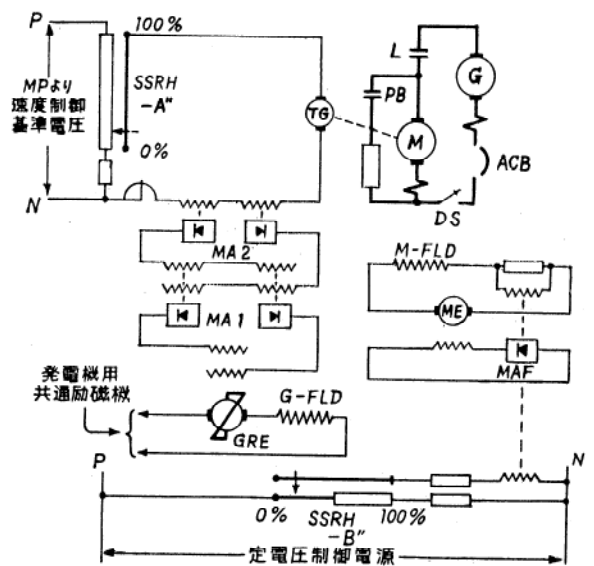
(c) 連系速度制御

複数個の電動機を相互に関連して速度制御するのが、プログラム制御に多い。それに基準速度の制御と各個電動機の制御とが併用され、連続運転で比較的速度応答が低い場合には電動機界磁による速度制御を、速応制御には各個発電機による電機子電圧制御が採用される。

図19は後者の一例で、図(a)は基準速度を与える発電機 MP の電圧を主速調整器 MRH の分圧で自動制御している。この MP 電圧を、各電動機の手速調整器 SSRH に加え、その分電圧と速度発電機 TG 電圧と比較して発電機 G 電圧を自動制御し、電動機界磁は SSRH の設定値により界磁電流一定制御とする。各電動機の関



(a) 速度基準

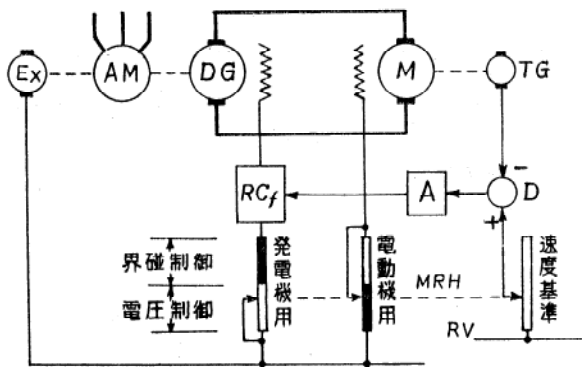


(b) 各個速度

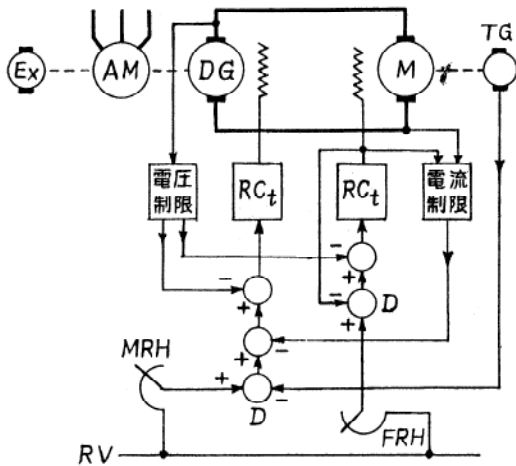
図19 連系速度制御

係速度は *SSRH* の設定で与えられ、全電動機のプロセス速度は *MRH* により設定されるので、プロセス速度の加減速と各個電動機の関係速度とは別々に任意に設定することができる。各個電動機の微細調整を *TG* 電圧の分電圧の調整によると他に影響がなく便利である。

多数の電動機をプロセス速度に関係して一斉に速度制御するに共通発電機による電機子母線をプロセス速度に応動させ、各個電動機の自動速度制御をその界磁電流制御や直列昇圧機の電圧制御によるグループ制御が経済的である。速度精度を余り要しない用途では電機子電圧降下補償により簡単で実用的な定速度制御になる。



(a) 広範囲定速制御



(b) 急速制御

- A : 増幅器
- AM : 交流電動機
- D : 検出部
- DG : 直流発電機
- Ex : 励磁
- FRH : 界磁調整器
- M : 直流電動機
- MRH : 主速度調整器
- RCt : 励磁制御器
- RV : 制御基準電圧
- TG : 速度発電機

図20 広範囲速度制御

(d) 広範囲速度制御

電動機加減速過程を停止から弱め界磁高速までになる場合は図20がある。図 (a) は比較的緩く速度を制御する連続運転の場合に使用され、停止から高速までは *MRH* により最初電動機界磁の強さは最大で発電機電圧を高める電圧制御で増速し、定格電機子電圧に達すと次には発電機電圧はそのまま電動機界磁を弱めて増速する。減速はこの逆の経路で行なわれ、1台の *MRH* で全速度範囲を連続的に制御できる。

図 (b) は上記の急速制御で電流制限値の限度内にて電機子電圧制御から電動機界磁制御まで速度を急速に変化できる回路構成を示す。電動機界磁電流は *FRH* の設定値に相当するように図16の回路で定電流制御をなし、電機子電圧制御の間は強め界磁にする。電動機は *MRH* の設定速度電圧と *TG* の速度電圧と比較され、誤差電圧は主発電機電圧を強勢励磁で急速に高め、電機子電流制限制御により電圧上昇率を抑制する。電機子電圧が定格値に達すると、電圧制限回路の出力が電圧の上昇を停止させると共に電動機界磁電流を低減させて速度を更に増加せしめる。界磁電流制御中ももちろん電機子電流制限制御は電機子電圧を抑制する方向に動作し、これは電圧抑制と同時に弱め界磁制御動作も抑制することになる。*MRH* を減速にすると、速度誤差電圧は電圧を低下させようとして電圧制限回路出力がなくなり電動機界磁を強める方向となって、電動機は回生制動電流になり制動減速され、電機子電流制限は回生電流が逆方向であるから電圧の低下を抑制して回生電流を制限することになる。

4.3 静止レオナード制御

直流発電機の界磁制御による電機子電圧制御の代りに、交流電圧の点弧位相制御による電圧制御が静止レオナード制御であって、格子制御放電管、磁気増幅器、水銀整流器、*SCR* を電圧制御電源に使用する。

(a) 磁気増幅器式静止レオナード制御

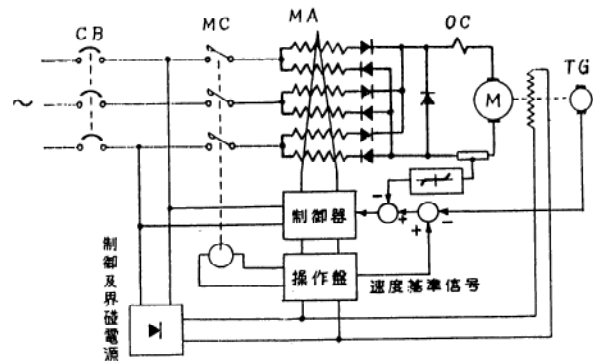


図21 磁気増幅器形静止レオナード方式

図21はその要旨で三相磁気増幅器により直流電動機を運転し、速度制御と電流制限とを行なう。磁気増幅器では可逆や電力回生ができないので、制動減速や可逆運転をなすには電機子回路に切換接触器を挿入し制動抵抗を附加する必要がある。従って普通は負荷トルクが正で、連続運転し可変速度を要する負荷に適している。

(b) 放電管式静止レオナード制御

図22はその一例で単相半波整流により直流電動機を運転する。速度制御は可飽和リアクトル *SRX* の直流励磁制御によりリアクタンスを変えて格子点弧位相を制御している。普通はこれに電流制限を直流制御信号電流に加え、更に *IR* 降下補償や速度フィードバックを加える。放電管も電流は道に流ないので、可逆運転や制動減速には電機子回路の切換や制動抵抗を附加したり、イン

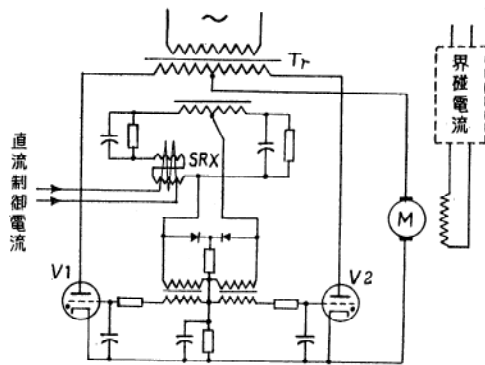


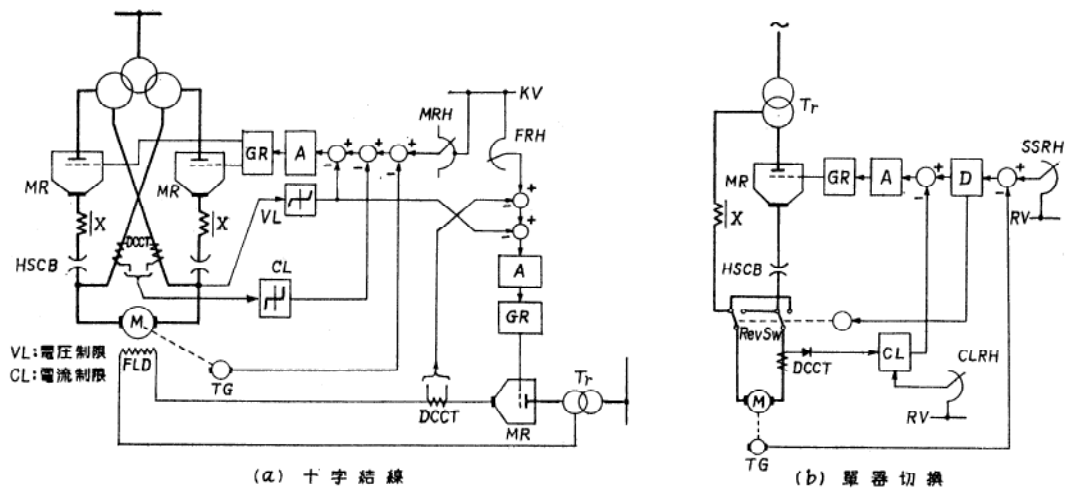
図22 電子管形静止レオナード方式

バータ接続にす必要があり、回路が複雑になり保守に手数要するので、逐次 *SCR* 制御に置換される。

(c) 水銀整流器式静止レオナード制御

大容量電機機の急速制御や精密制御には水銀整流器が使用される。図23はその制御要旨を示し、図(a)は十字結線による可逆制御を、図(b)は単器切換による可逆制御を示す。図(a)では片側整流器が整流器運転とすると他の整流器はインバータ運転となるように格子点弧位相を制御し、両器の位相角を互に逆方向に比例して移相させている。制御動作は図20と同様に電機子電圧制御と界磁電流制御とを単一で連続的に行ない、電流制限制御も行なわれている。図(b)は1個の水銀整流器により電機子回路を高速可逆接触器で切換えることにより可逆運転を行なう場合の電機子回路を示す。減速操作で整流器出力直流電圧が電動機の逆起電力より小さくなると電機子電流が0になるので、この点で可逆接触器を切換えると共に、接触器補助接点で格子制御位相をインバータ側に切換えて更に減速操作すると、インバータ運転となり回生電流となる。低速設定値になるとインバータ電流が0となり再び可逆接触器が切換えられて整流器による電動機運転になる。このように減速過程では数回可逆切換動作をなし、そのまま逆方向運転信号に与えるとインバータ位相制御から切換動作なしに整流器位相制御に移行して逆転整流器運転にもなる。単器切換は水銀整流器が1台ですむから経済的となる。

(d) *SCR* 静止レオナード制御



- |      |          |         |              |
|------|----------|---------|--------------|
| A    | : 増幅器    | MR      | : 水銀整流器      |
| CL   | : 電流制限   | RV      | : 制御基準電圧母線   |
| CLRH | : 限流値設定  | Rev. Sw | : 電機子可逆開閉器   |
| D    | : 検出器    | SSRH    | : 運転速度設定     |
| DCCT | : 直流変流器  | TG      | : 速度発電機      |
| GR   | : 格子制御器  | Tr      | : 主変圧器       |
| HSCB | : 高速度遮断器 | X       | : 主回路直別リアクトル |
| M    | : 主電動機   |         |              |

図23 水銀整流器式静止レオナード

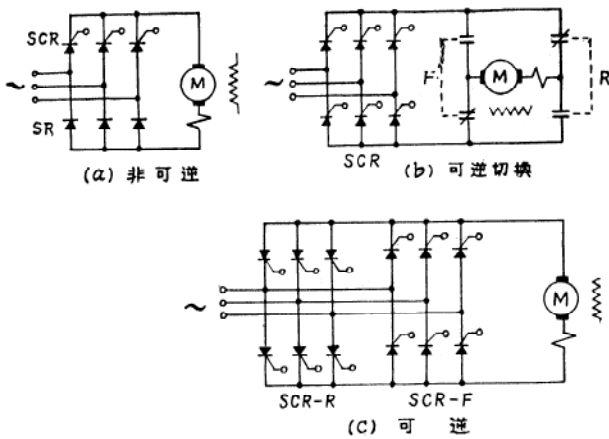


図24 SCR レオナード主回路

SCR は陰極が絶縁できるので 交流電源から直接に制御された直流が得られ、変圧器中性点を設ける必要がない。図24はその主回路要旨を示し、(a) はブリッジ回路の片側を整流素子とした非可逆回路で、SCR 個数を半減できるので 格子制御回路を含めて経済的となる。図 (b) はグレース接続で電機子の可逆切換によるもので、広範囲の速度制御に使用される。図 (c) は SCR 可逆回路で、片側 SCR は整流器動作、他はインバータ動作として水銀整流器の十字結線に相当する。

SCR ゲート制御回路には各種の方法が全示されているが、特にインバータ運転では格子制御の失敗（転流の失敗）は通弧となり回路短絡を生ずるので、ゲート回路の動作確実でサージノイズで誤動作しないものが必要である。図25はトランジスタによる交直重畳法の一例で、SCR 一相分のゲートパルス発生基本回路である。電源交流電圧を移相した補助電源  $e$  と制御信号電圧  $v$  との重畳電圧でトランジスタをスイッチ動作させ、ゲートパルスを得る。 $v$  が大きくなればパルス位相は進み、小さくなれば位相は遅れ、制御信号電圧に対し速応動作する。電源交流電圧が低下すると  $e$  も比例して低下し、パル

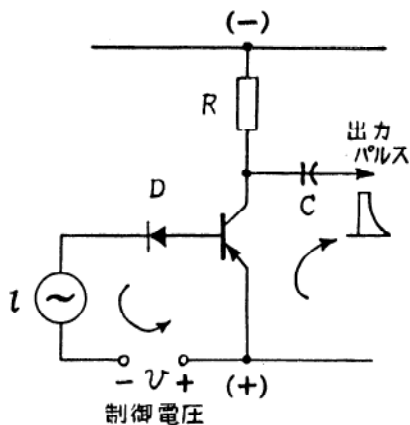


図25 ゲートパルス発生回路

ス位相が進められ、電源電圧の変動を瞬時に補償するので、電圧変動の激しい系統でも十分安定した運転ができる。

#### 4.4 静止レオナード制御の得失<sup>14)</sup>

静止レオナード制御は精度と速応性との点でワードレオナード制御に比し極めて優れているが欠点もある。

##### (a) 電源に対する影響

静止形では電動機が直接交流電源に接続されるので、電動機の負荷変動は直接電源負荷変動となり、電源電圧変動が補償を迅速に行なわないと直ちに電機子電圧変動になって速度制御の大きな外乱の一つとなる。ワードレオナード（以下回転形と云う）では電動発電機の回転エネルギーがこれらの瞬時変動を吸収放出により緩和し、消費電力の緩衝作用として働らく。

静止形の誘導負荷に対し、 $V = V_0 \cos \alpha$  で整流電圧を得るので、（電動機逆起電力+IR 電圧降下）より整流電圧が大きい限り通電し、点弧位相角  $90^\circ$  で通電すると、電流が  $90^\circ$  遅れたことになり無効電力になる。電動機はトルクとして電流をとるから、整流電圧が低くても大きな電流が流れるので、低速領域では無効電力が大となり、力率を低下し、電源電圧降下を大きくする。電動機定格電圧附近でも電源電圧降下や電圧制御余裕のために制御角は正規電圧値にて  $10^\circ$  以上にとられるので、整流器や変圧器の KVA 出力は大きくなる。制御角が大きいと逆弧や通弧し易くなり、これらは回路短絡となるので保護用高速遮断器や各素子回路保護ヒューズが必要である。また、通電々流波形が鋸歯状波となり、多くの高調波を含み、電源波形を歪ませ、誘導障害を生じ、並列静止レオナード系の制御電源波形の歪みはその不規則点弧の一

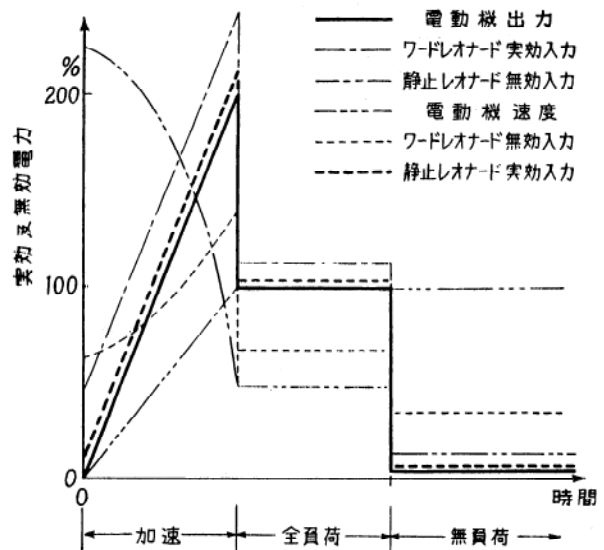


図26 ワードレオナードと静止レオナードとの入出力比較

因になる。特にインバータ運転中の停電にインバータ短絡となる。図26は加速、定速全負荷及び無負荷の電力比較の一例を示す。

#### (b) 利用率と効率

設備の損失を無視して、設置した機器定格出力と実負荷との比を設備の利用率とすると、静止形は回転形より設備容量が大きく、回路方式にもよるが整流器を可逆にすると2倍の設備を要するので、利用率が低く、更に多数の複雑な格子制御回路器具をもち、通電が間歇的になるので見掛上多くの設備容量が必要となる。

効率では定格負荷にて水銀整流器は95%、SCRでは98%にも達するが、回転形では88%位がよい方であり、過負荷になると回転形は $I^2R$ で損失が増すが、静止形は $I$ に比例した損失のみとなり更に効率は優れており、軽負荷では機械損のため更に回転形の効率が下る。

#### (c) 過負荷耐量と経済性

回転形では電動発電機の経済性から高速回転にするので、直流発電機の整流限界に制限されるが、静止形では逆弧通弧の可能性で制限される。静止形では温度が高くなると逆弧や通弧し易くなるが、制御上定格値にて十分の余裕角を残すので過負荷耐量が回転形より大きい。冷却を有効にすると連続過負荷にも耐え易い。制御角 $\alpha$ が大きいと電源リアクタンスが小さいと逆弧発生確率で制限される転流責務限界容量が低下するので、低速連続運転には電源変圧器タップにより交流電圧を低くして $\alpha$ を大きくして使用する。水銀整流器は損傷を来さない熱的限界容量は大きい、半導体素子では負荷変動が大き

く頻繁であると熱疲労による素子破壊があり、過負荷を制限する。電流遮断が速いと過電圧を発生するので、光頭電流限界容量についても検討が必要である。

従って電動機と負荷とから要求される速度制御性能の点で静止形にしなければならない場合を除くと、所要KVA容量は静止形が大きくなり、可逆制御方式で異なるが回転形の機械設備が経済的になる。土木建設費にて占有面積は可逆制御では静止形が大であるが、単一方向連続運転では静止形が小さく、基礎費が低い。運転保守費は一般に静止形が高効率で保守に手を要しないので小さくなるが、低速運転の総合時間によっては全受電系統として見ると無効電力損失による電力費を無視できないことがある。回転形で保守に手を要するとしても、負荷駆動直流電動機の保守があり、特に保守にならない。回転形の騒音は大きい、静止形でも冷却ファンの騒音、リアクトルの高調波振動音が予想外に出る。

(以下次号に続く)

## 文 献

- 米山, 鬼頭: 直流機継鉄成層の効果について  
昭和33年11月電気学会東京支部大会 No. 123
- ⑬ 岸: 水銀整流器の振動防止回路について  
昭和35年電気四学会連合大会 No. 684
- ⑭ P. Willems: Comparative study of the Transformer Rectifier Converter and the Ward-Leonard Set as means of Controlling the Power drawn from a Polyphase Elektial Distribution Network, Direct Current Jan 1962