

最近の電動機制御 ②

東京芝浦電気KK府中工場 尾山 純 一

3. 交流電動機の制御

交流電動機は極数 p と周波数 f とにより毎分回転数 $N=120 f/p$ で定まる一定速度電動機であるが、直流機に比し構造が堅固で安価であり、定速度用はもちろんであるが種々の可変速度を要する用途に使用される。

3-1 かご形誘導電動機の制御

(a) 電動機用スイッチ

低圧電磁スイッチはプラスチック材料、接点材料の発達と、電磁操作機構と接点開閉動作との協調、量産化などで高性能（寿命の著増、軽量、開閉容量の向上）で安価となり、低圧かご形電動機の直入始動に広く使用されている。電磁スイッチに回路の故障電流を開閉し得る容量をもつことは構造的に困難となるから、ヒューズ付刃形スイッチまたはノーヒューズブレーカと組み合わせたコンビネーションスイッチを単独使用することも多い。

高圧気中電磁接触器が開発され、電源容量も大きくなって大容量電動機の直入始動が容易となったので、油入開閉器の代りに高圧電動機の始動スイッチに使用され、油を使用しないので寿命が長く保安も容易である。電動機用電力ヒューズ（電動機の始動電流で動作せず電動機

保護用過負荷継電器と協調して事故電流で溶断する）と組み合わせた高圧コンビネーションスイッチは電動機用配電盤や電源盤の代りに賞用されている。

(b) コントロールセンタとロードセンタ

多数の電動機用電磁スイッチを単独に設置する代りに、それ等を単位箱に組み込み、この単位箱を所要個数積み重ね配列したコントロールセンタは、押釦スイッチや信号灯または電流計と組み合わせ、電源母線を共通にして据付配線工事を簡単にし点検保守を容易にする。

ノーヒューズブレーカを単位箱に組み込んで短絡保護とすることも多く、大容量電源では電源引込口に限流リアクトルを挿入して短絡電流を制限する。

電動機容量が大きくなると、電動機分岐回路保護用気中遮断器を単位箱に組み込んで積み重ね配列した構造のものを特にロードセンタという。

(c) かご形誘導電動機速度制御

(1) 極数変換制御 極数 P を固定子巻線の接続変更や二重巻線の接続切換で変更して同期速度を多段（普通2ないし4段）に制御する。船舶荷役ウインチは4P、8P、32Pの3段切換等で、軽荷重高速、定格荷重中速定格速度とすると共に、荷重取扱いに必要な低速を得る。

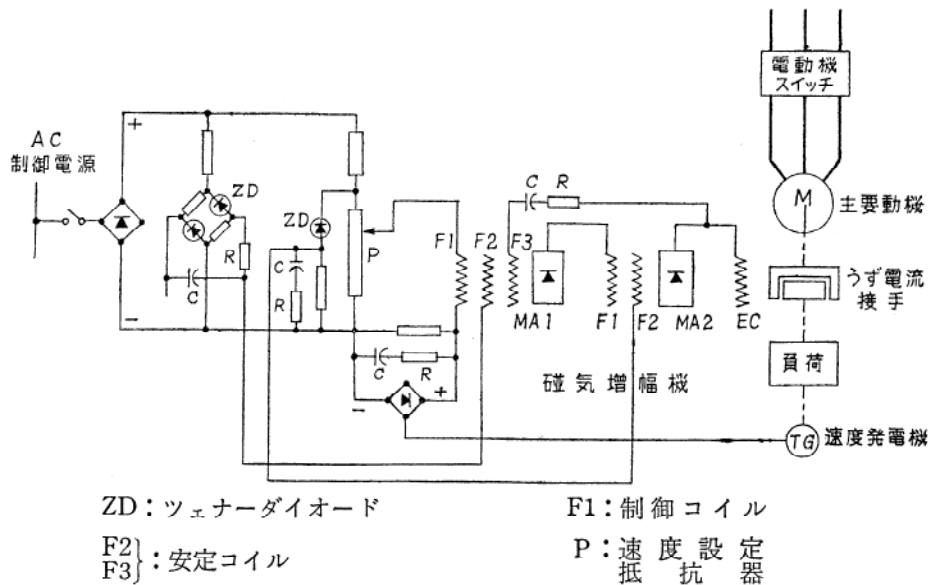


図2 うず電流接手による速度制御

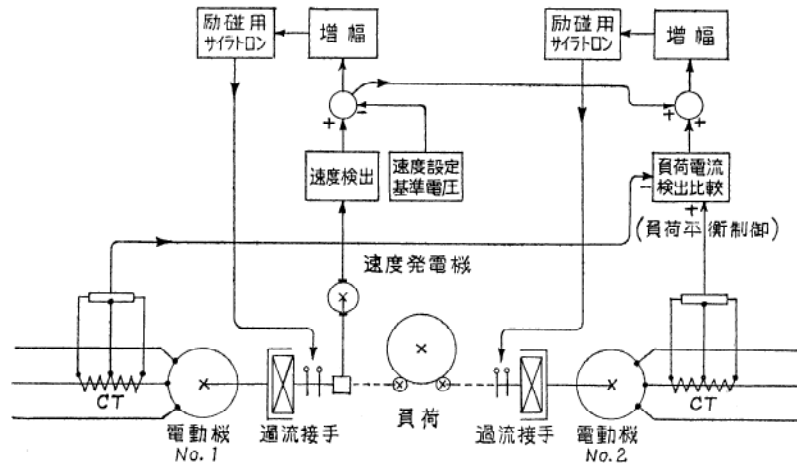


図3 2電動機のうず電流接手制御

(2) 一次リアクトル制御 二次高抵抗かご形誘導電動機に一次直列リアクトルを接続すれば、可変トルク負荷に対して速度制御ができる。給炭機のように塊状石炭で送りがつかえた場合に速度を下げて石炭の破碎を待ち機械を保護する等の簡単な用途に使用される。

(3) うず電流接手制御 うず電流接手の励磁電流を制御すると伝達トルクを制御できるので、ある程度以上の負荷トルクのある負荷の速度制御に適している。電動機は一定速度で連続運転させ、接手にて滑りを生ずるので、接手の回転子に電力損失を発生し、全負荷トルクでも滑りが10%近くになるので能率は低下する。しかし簡単に広範囲速度を制御でき、ワードレオナード制御の直流電動機と比較すると、速応性が劣るが経済的になる。

図2は磁気増幅器による本速度制御方式の要旨で、速度変動率1%を得られる。電動機容量が大きくなると滑り損失のため水冷式となるが、一般に空冷式である。

図3は負荷を2電動機のうず電流接手による速度制御の要旨で No. 1 電動機は速度発電機による接手速度自動制御とし、No. 2電動機は負荷電流平衡制御とする。

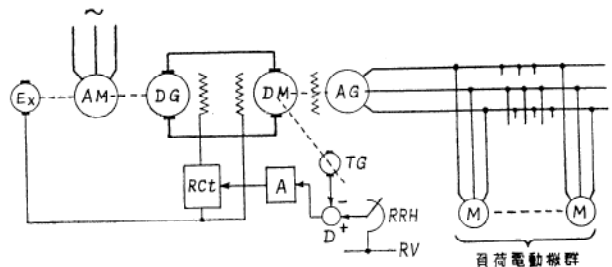
(4) 可変周波数制御 ローラテーブルや紡糸機の如く多数のかご形電動機群を共通に速度制御するには、図4のように電動機電源周波数をレオナード制御による交流発電機速度で制御するのが簡単である。図では交流発電機の回転数をその駆動用直流電動機のワードレオナード制御により自動制御しているが、シリコン制御整流素子SCRによる静止形周波数変換器やSCRによる静止レオナード制御が使用されるようになった。

3-2 巻線形誘導電動機の制御

巻線形誘導電動機のトルク-速度制御は二次抵抗値により容易に行なわれるが、速度変動率が大きく滑りに相当する電力損失を伴うので能率が低下する。しかし間歇速度制御には制御装置も簡単で保守も容易であるから最も実用的で逆トルク制御と併用されている。

(a) 制動トルクによる二次抵抗制御

二次抵抗のみでは軽負荷又は制動負荷(負トルク負荷)の速度制御は困難である。特に間歇的に低速度を要する用途が多く、それには損失が増すけれども電動機に制動トルクを機械的に加え、二次抵抗により電動トルクを制御すれば、容易に低速制御ができる。図5にて二次抵抗による電動機トルクが曲線 M_M 機械的ブレーキトルクが曲線 M_B であるとすると、合成負荷トルク特性は曲線 M_L となり、負荷トルクの正負に対し、同期速度以下の低速



- | | |
|-----------|------------|
| A: 増幅器 | Ex: 励磁機 |
| AM: 交流電動機 | M: 電動機 |
| AG: 同期発電機 | RCt: 励磁制御器 |
| D: 検出部 | RRH: 速度設定器 |
| DG: 直流発電機 | RV: 制御基準電圧 |
| DM: 直流電動機 | TG: 速度発電機 |

図4 可変周波数制御

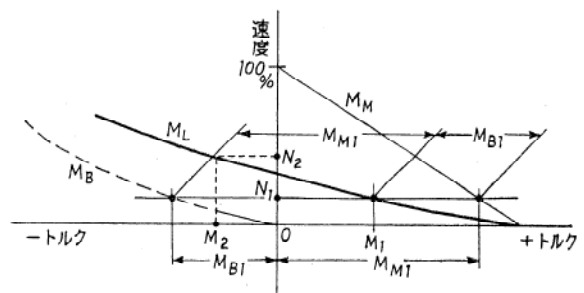


図5 ブレーキ力による速度制御

が得られる。 M_B 特性を急峻にする程低速がえやすい。機械的ブレーキのトルクを摩擦シューの押圧力で調整すれば、荷重トルクの変動でも安定した低速が得られるので、荷役機械の巻上停止直前の低速制御にスラスタブレーキの油圧ポンプ電動機の電圧自動制御が使用されている。しかし機械的ブレーキを長時間かけると温度上昇による摩擦係数増加のため安定運転が難しくなる。

うず電流ブレーキは励磁電流により制動力を制御でき温度上昇を冷却により抑制できるので、比較的長時間のブレーキによる速度制御ができる。図6は荷重の巻上、巻下に対し、二次抵抗による電動トルク制御で、低速領域における正負荷重の速度制御のトルク特性を示す。

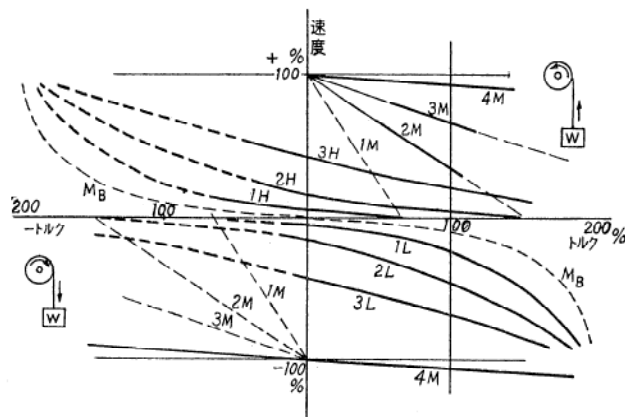


図6 うず電流ブレーキ制動の速度—トルク特性

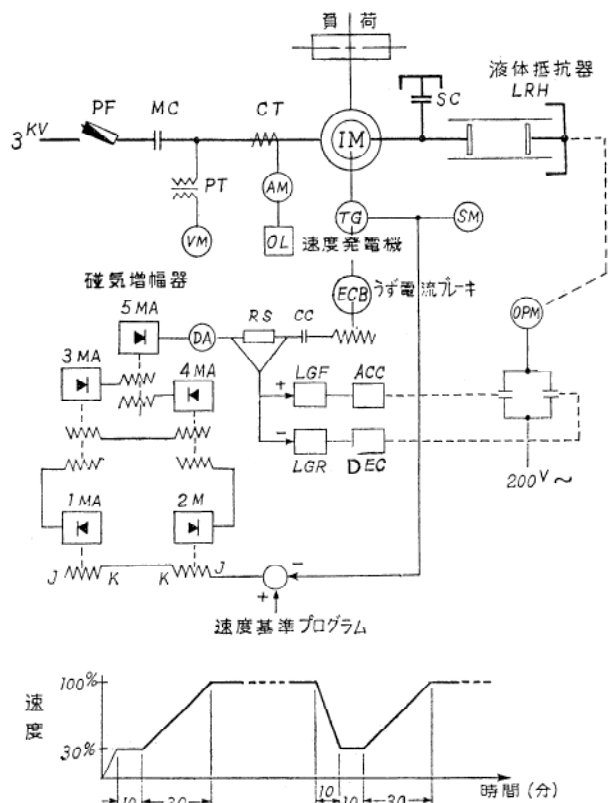


図7 うず電流ブレーキによる速度制御

図7は二次液体抵抗器とうず電流ブレーキとを組み合わせ速度の時間的プログラム制御を行なう例である。ブレーキの励磁電流を磁気増幅器により調整すると共に、その励磁電流の上下限で液体抵抗器を操作して二次抵抗値を調整する。うず電流ブレーキの励磁回路時定数が大きく、液体抵抗器による積分制御が加わるので、速度変化プログラムの緩やかな用途に適し、3000 kW 程度のものにも使用されている。

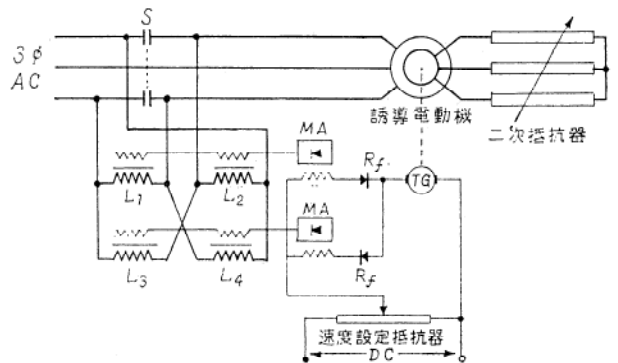


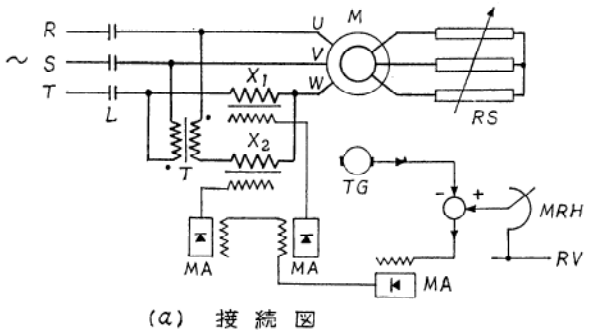
図8 ブリッジ形接続リアクトル制御方式

(b) 一次可逆リアクトル制御⁽⁶⁾

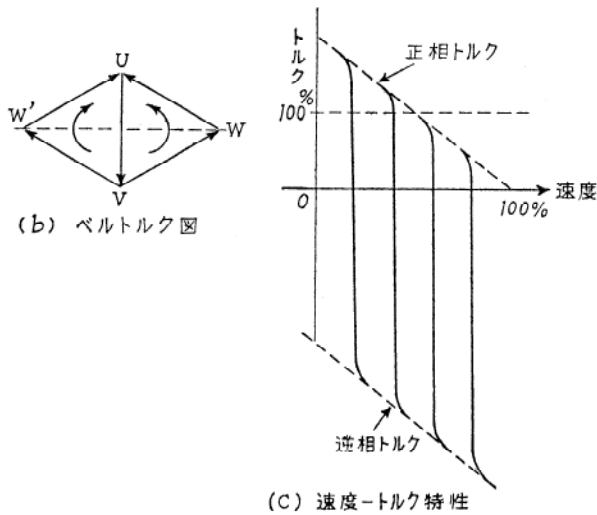
電動機に制動トルクを発生させるには、各種の発電制動制御（直流励磁、単相励磁、蓄電器、不平衡接続等）があるが、正負に変化する荷重に対しては一次可逆リアクトルの直流励磁制御による電動トルクから逆トルクへの連続トルク制御がある。図8は一次リアクトルをブリッジ接続にして、リアクトルの直流励磁電流制御による自動可逆速度制御を行なっている。図9は1個の変圧器と2個のリアクトルにより相回転を反転させて可逆トルクを制御している。何れも二次抵抗値を大きくして、一次正相及び逆相分の電圧比を変えてトルクを調整するので、逆相分トルク（制動トルク）を充分大きくすることができるから、高速から制動減速して短時間低速運転する用途に適し、巻上機類に使用される。

(c) 二次励磁制御^(6~8)

誘導電動機を滑り s で運転すると電動機入力 W の中で $(1-s)W$ が電動機の機械的出力であり、二次抵抗制御では sW なる電力が抵抗器の熱損失となるが、図10のように補助機器 A を使って sW の滑り周波数 sf なる二次電力を電源周波数 f に変換して電源に戻すとシエルピラス方式 (scherbius) となり、 sW を主電動機軸に直結した補助電動機に加えて機械的出力に変換して負荷に加えるとクレーマ方式 (Krämer) となる。補助機器 A には回転変流機、整流子形交流電動機や周波数変換機、他励分巻直流電動機、誘導発電機などが組み合わされていたが、最近では水銀またはシリコン整流器に



(a) 接続図



- L : 主回路開閉器
- MA : 磁気増幅器
- RS : 二次抵抗器
- T : 変圧器
- X₁, X₂ : 可飽和リアクトル
- M : 主誘導電動機
- MRH : 主速度調整器
- RV : 基準電圧
- TG : 速度発電機

図9 可逆可飽和リアクトル制御

よる電力変換（滑り周波数電力→直流→インバータまたは直流電動機）を行なう静止形シエルビアスやクレマとなる。

速度制御は二次回路の電圧を制御して二次電流を変えることにより電動トルクを調整するので、負荷トルクがないと減速度は小さく、無負荷では速度制御ができない。誘導電動機の始動時には二次電圧が高く、補助機器は速度制御範囲に応じた低い電圧にて製作されるので、電動機は別の始動装置で始動し、同期速度近くの低い二次電圧になってから補助機器に切替えるのが普通である。速度制御範囲が広くなると、二次電圧が高くなり補助機器容量が増加し不経済となりやすいため、二次回路に電圧調整器を通して補助機器を適当な電圧とする方式があり、荷重の特性によって経済的であるが、一般に速度制御範囲が30%程度の用途に使用される。

(1) シェルビアス方式 図11(a)は sW をシリコン整流器 SR で整流して直流電力に変換し、直流電動機

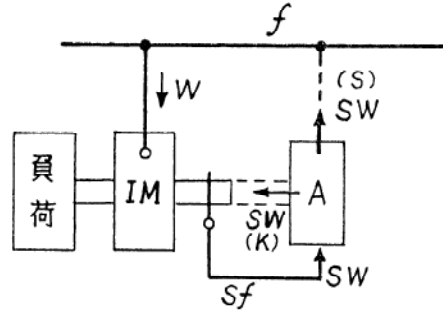
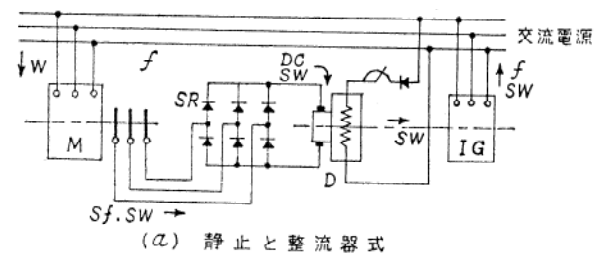


図10 二次励磁制御の概念

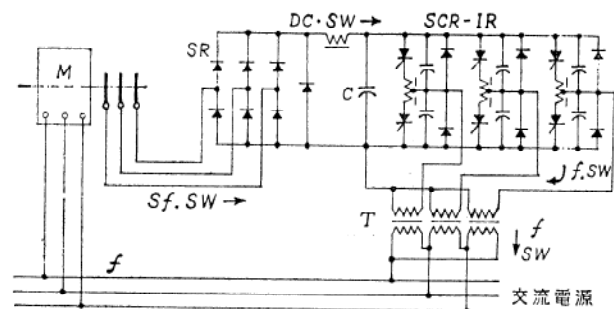
で誘導発電機 IG を駆動して電源に回生している。速度制御は直流電動機の界磁の強さを強くすると、電機子逆起電力が大きくなり、二次電流を減じて電動トルクを低下させて電動機が減速し、その二次電圧が高くなってそれに応じた負荷トルクの二次電流にて平衡した速度となる。故に正負荷トルクがないと減速できない。増速は界磁の強さを弱くすると電機子逆起電力が小さくなり、二次電流を増し電動トルクが大きくなるから誘導電動機が加速する。IG は直流電動機の入力がなければ同期速度近くの誘導電動機として運転するから、直流電動機の入力がこの IG 系の無負荷損失以上になれば直ちに誘導発電機として運転できるから制御は極めて容易である。

図(b)は誘導発電機を SCR インバーターに置換した完全な静止形である。

(2) クレマ方式 図12(a)は静止クレマで二次電圧をシリコン整流器 SR で整流して誘導電動機に直結した他励分巻直流電動機 D の電機子に加え、D の界磁の強さを強くすると電動機速度は低下し、二次電力は D により電動機負荷軸に加えられるので、定出力特性と



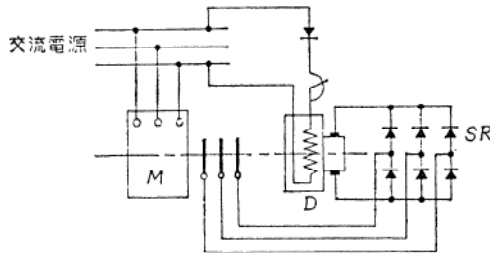
(a) 静止と整流器式



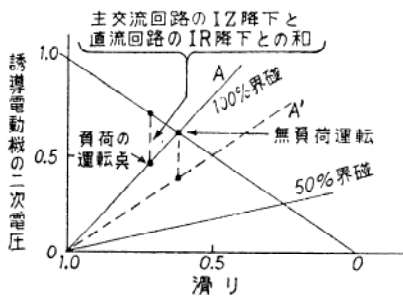
(b) 静止インバータ式

図11 シェルビアス方式

なる。故に速度制御は D の界磁電流による逆起電力制御であるが、その速度特性は図(b)のように無負荷でも界磁の強さを強くすると二次電圧が大きくなり低速が得られ、負荷が増加すると、主交流回路の IZ 降下と直流回路の IR 降下との和だけ D の端子電圧が下るだけで、その速度変動率は小さく分巻特性に近くなる。負荷変動による速度低下は自動調整により D の界磁を弱めると図の OA 曲線は OA' 曲線となり始めの速度に回復する。



(a) 静止クレーマ接続



(b) 静止クレーマの速度特性

図12 静止クレーマ方式

クレーマ方式は広範囲の負荷変動に対しても比較的速度変動が小さいので定速度制御に適し、補助機器も負荷変動、電源変動による変化分を補正するだけで定格を小さくできる。しかしこの外乱による速度誤差は正負何れの方にも出るので、定周波電源などの速度は誘導電動機の同期速度より小さく選び、50 c/s 8 p 電動機の滑りを0.2として12 p 交流発電機から60 c/s 電源を得ることとし、補助機器 (D 及び SR) の定格出力は誘導電動機の定格の25%位にとることになる。

(d) 低周波制御^(9,10) 精密停止位置制御では停止直前の速度が極めて安定な低速であることが望ましい。一般に制動停止距離 S は、V を速度、β を減速度、F を制動力、W を荷重、J を慣性モーメントとすると、

$$S = \frac{V^2}{2\beta} = \frac{JV^2}{2(F \pm W)} \quad (9)$$

となり、速度の2乗に比例するので、低速にする程停止誤差が小さくなる。誘導電動機では低速を得るために電源周波数の1/10~1/20の低周波電圧を電動機に加える。図13はその一方式で、停止制御距離に入ると電源周波数から低周波電源に切り換え、その低周波電圧を速度基準電

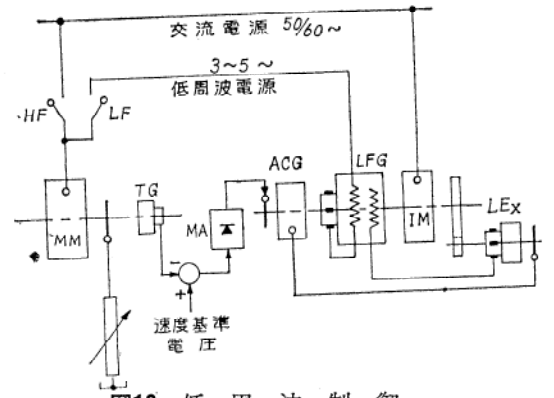


図13 低周波制御

圧と速度発電機電圧との誤差電圧で低周波励磁機を経て低周波発電機により自動制御している。周波数を低下すると、同一磁束密度にするため電圧を周波数に比例して低下させるが、電圧降下のリアクタンス分が減少し抵抗分が増加するので、低周波電圧は周波数の比例値よりも多少大きくしなければならない。

3-3 同期電動機の制御

(a) 磁極構造：塊状磁極と積層磁極

磁極頭における制動巻線の断線事故が比較的多いので塊状磁極 (ソリッドポール) が見直されている。塊状磁極では制動巻線がなく、磁極頭のうず電流を利用するので、運転中の鉄損が多くなり、効率が約1%低下し、始動効率 (始動トルクと始動電流との比) も低い。しかし制動巻線加熱の繰り返しによる疲労断線がなく熱容量も大きいので、始動頻度が大で、負荷の GD² が大きく始動負荷トルクが小さく、同期速度運転中の負荷変動の激しい用途に適している。磁極頭のうず電流通路抵抗を大きくして始動特性の改善が試みられている。

(b) 無刷子励磁制御⁽¹¹⁾

同期電動機を無刷子機器による励磁制御が SCR と整流器と交流励磁機との組み合わせできる。図14にて励磁用交流発電機 E_x の出力交流電圧整流して、SCR1 を通して同期電動機の界磁コイルを励磁し、E_x の界磁コイルは磁気増幅器 MA1 でまづ基底励磁を与えると共に、同期電動機の負荷電流から MA2 を通して複巻励磁作用を行ない、力率の自動補正をなす。この励磁系では E_x の界磁コイルを固定子側に設け、E_x の電機子、整流器、放電抵抗器 DRS, SCR 及び各種整流素子はすべて同期電動機の界磁コイルと同じ回転子上に取付けられるので、励磁用の刷子が不要になる。

この励磁系では電動機の始動時は界磁コイルが整流器 D1 と SCR 3 とで DRS にて短絡され、界磁誘起電圧と周波数とが高いのでCを通る充電電流が大きく SCR 2 を通電させて SCR 1 のゲートを短絡し SCR

(以下24頁に続く)

(29頁より続く)

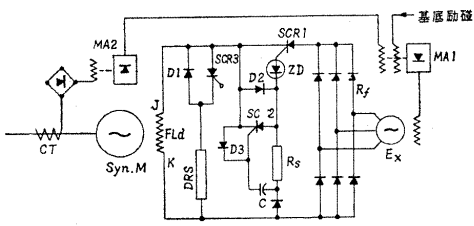


図14 無刷子励磁制御

1の通電を阻止している。同期速度に近づき周波数と電圧とが小さくなるとSCR2の通電が阻止され、SCR1のゲートに通電してSCR1を通電させ、正規励磁状

態になる。脱調時には界磁誘起電圧でSCR1は通電阻止され、続いて自動同期化される。(次号に続く)

文 献

- ⑤ 東, 渡辺: 可飽和リアクトルによる誘導電動機の世界速度制御, 東芝レビュー38年7月
- ⑥ 小林: 交流レオナード方式, 電気雑誌 OHM 32年10月
- ⑦ 神崎: 誘導電動機の世界速度制御方式に関する考察 電学誌, 35年9月
- ⑧ 柴田: 誘導電動機の世界速度制御の方式 電学誌 37年3月
- ⑨ 藤木他: 立坑巻上機の低周波制御 日立評論 別冊26号 33年10月
- ⑩ 甘粕: 低周波制御巻上機用誘導機の過度トルクとその数値解法, 電気雑誌 OHM 37年6月
- ⑪ G.M. Rosenberry: A New Brushless DC Excited Rotating Field synchronous Motor AIEE T.P No 60-127 Feb-1960