UDC 621.313.3.076.7-531:621.314.58

直流式電動機転流サイリスタモータ(MCパーモトロン)

DC Type Machine Commutating Commutatorless Motor (MC PERMOTRON)

塚原 孝* 井上 俊夫**
Takashi Tsukahara Toshio Inoue

I. まえがき

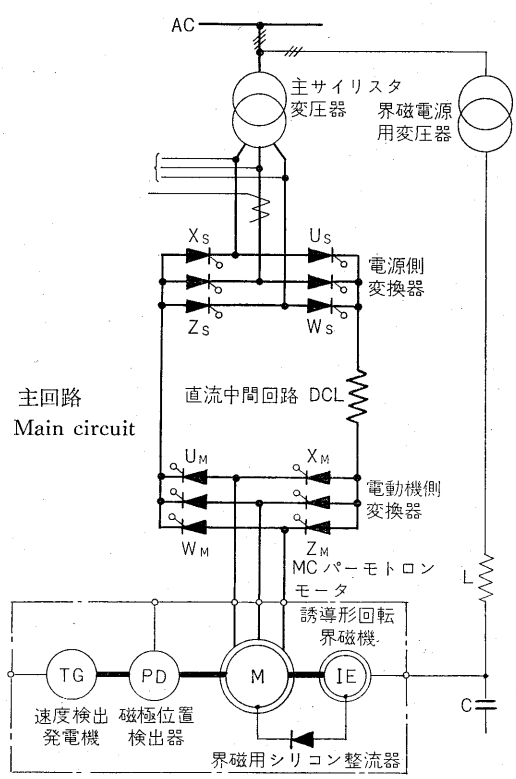
直流式電動機転流サイリスタモータは，同期電動機とサイリスタ変換装置を組み合せた，ブラシ，コミュテータ，スリップリングのない可変速電動機である。サイリスタ変換装置として，電源側整流器と電動機側整流器を備え，中間に直流回路がはっきりとした形で存在するので直流式と呼ばれている。また始動および低速時を除いては，電動機側整流器を流れる電流の転流が電動機の誘起電圧により行なわれる。このため直流式電動機転流サイリスタモータと呼ばれる。当社ではこの方式をMCパーモトロンと名付け，製品化を進めているのでここにその概要を紹介する。なお電動機としては，一例として円筒回転界磁形同期電動機についてブラシレス励磁装置を含めて説明する。

II. 主回路および制御方式

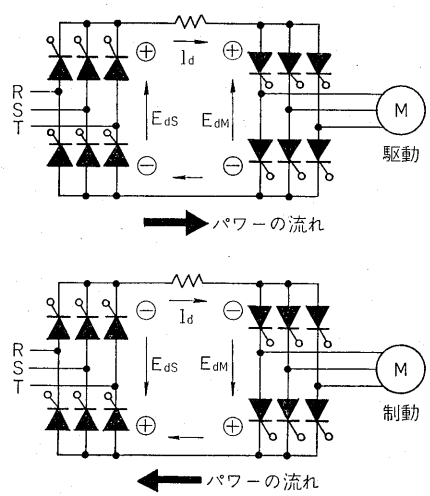
1. 主回路構成と動作

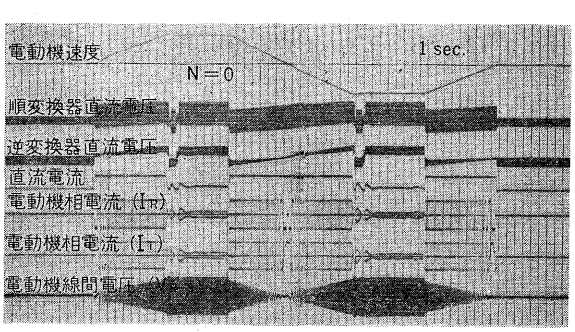
直流式電動機転流サイリスタモータの主回路構成の一例を，三相電源，三相電動機の場合について第1図に示す。電源側整流器，直流リアクトル，電動機側整流器，ブラシレス励磁装置付同期電動機から構成される。電動機の回転子には磁極位置検出器が直結され，電動機側整流器をサイリスタコミュテータとして動作させるための信号が取り出される。完全無ブラシ化を図るため，円筒回転界磁形同期電動機を用い，その界磁巻線に給電する励磁装置は巻線形誘導機と回転整流器より構成されている。主回路の動作はつぎのとおりである。駆動時には，電源側整流器は順変換作用を行ない直流電圧を発生し，電動機側整流器は逆変換作用を行ない電動機に三相交流電圧を印加する。制動時にはこの逆になり，電源側整流器は逆変換作用を，電動機側整流器は順変換作用を行なう。

この様子を第2図に示す。直流電圧，直流電流の極性



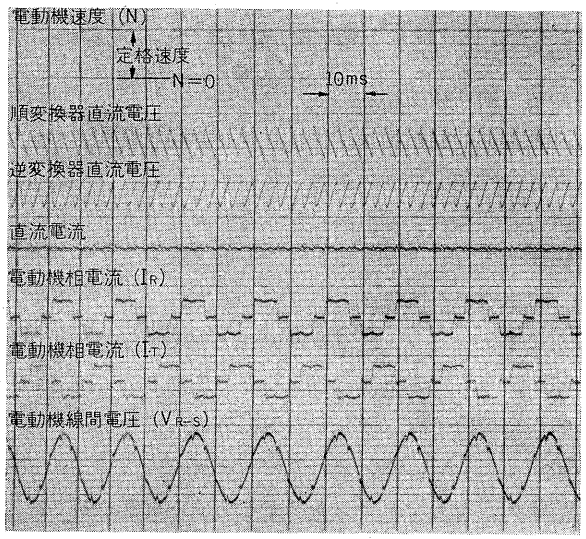
第1図 主回路
Fig. 1. Main circuit





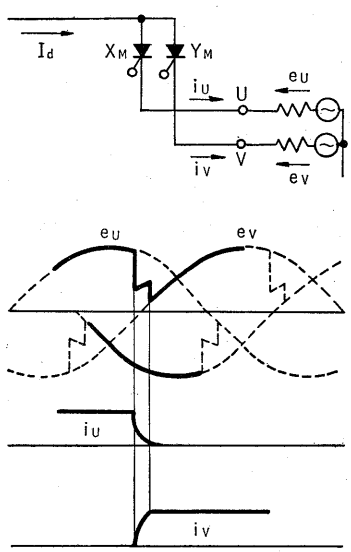
第2図 駆動と制動
Fig. 2. Motoring and generatoring

* 東京工場 ** 川崎工場



第3図　各部の電圧，電流波形

Fig. 3.　Voltage and current waveforms



第4図　電動機転流

Fig. 4.　Machine commutation

から，パワーの流れは図示のようになり，駆動，制動の関係が良く理解される。各部の電圧，電流波形を第3図に，電動機転流の様子を第4図に示す。

2. 速度制御

電源側整流器の直流電圧 E_{dS} と電動機側整流器の直流電圧 E_{dM} が電圧平衡して電動機は回転している。回路の抵抗，サイリスタの順電圧降下を無視すると，

$$E_{dS}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}E_S\cos\left(\alpha_S+\frac{u_S}{2}\right)\cos\frac{u_S}{2}\quad\cdots\cdots(1)$$

$$E_{dM}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}E_M\cos\left(\gamma_0-\delta_M-\frac{u_M}{2}\right)\cos\frac{u_M}{2}\quad\cdots\cdots(2)$$

$$E_M=K\cdot\phi\cdot n\quad\cdots\cdots(3)$$

$E_{dS}=E_{dM}$ より

$$n=\frac{E_S\cos\left(\alpha_S+\frac{u_S}{2}\right)\cos\frac{u_S}{2}}{K\cdot\phi\cdot\cos\left(\gamma_0-\delta_M-\frac{u_M}{2}\right)\cos\frac{u_M}{2}}\quad\cdots\cdots(4)$$

E_S：交流電源電圧

α_S：電源側整流器制御遅れ角

u_S：電源側整流器転流重なり角

E_M：電動機交流電圧

γ_0：電動機側整流器の無負荷誘起電圧に対する制御進み角

δ_M：電動機の内部相差角

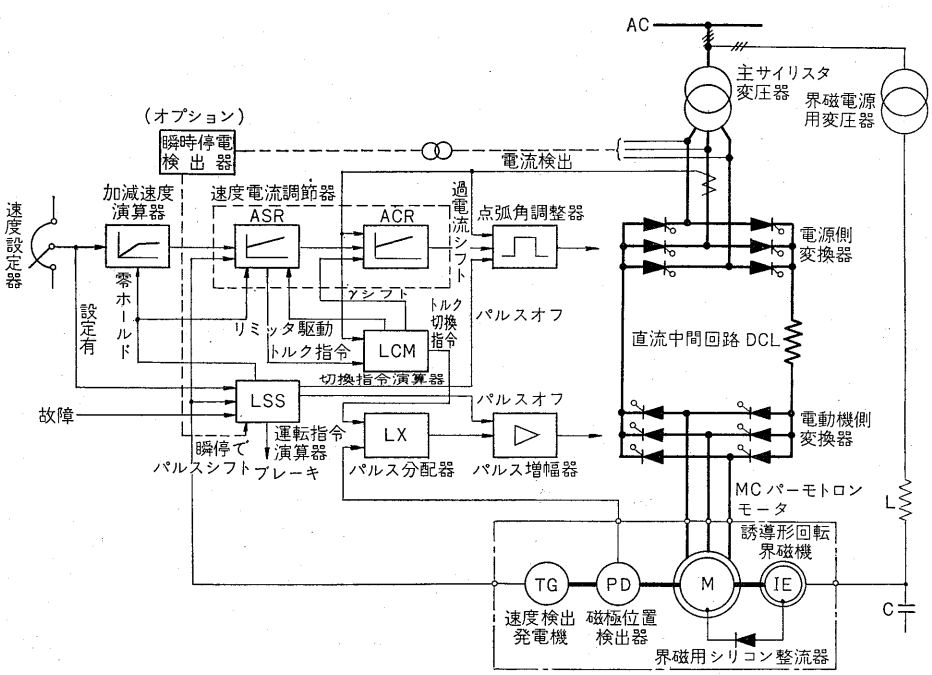
u_M：電動機側整流器転流重なり角

K：電動機で定まる定数　　ϕ：有効磁束

式(4)は電動機速度が α_S, ϕ, γ_0 を変えることにより調整されることを示している。一定界磁のものでは普通 α_S を制御する。その場合の速度制御系のブロックダイアグラムを第5図に示す。

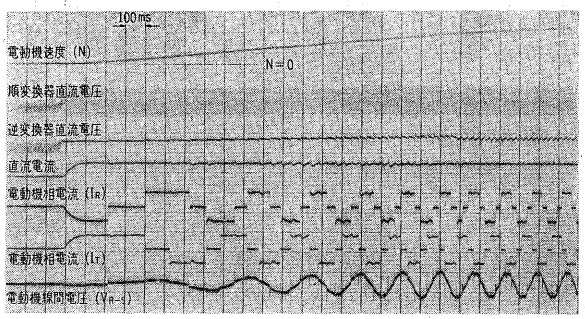
3. 始動方式

直流式電動機転流サイリスタモータの電動機側整流器



第5図　速度制御系のブロックダイアグラム

Fig. 5.　Block diagram of speed control system



第 6 図　始動のオシログラム

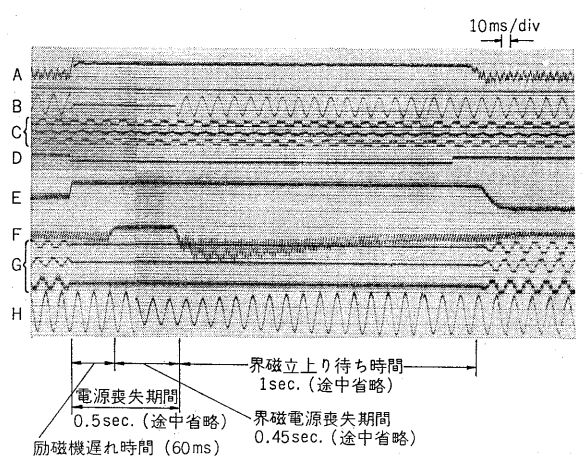
Fig. 6.　Oscillogram of starting

における転流には，電動機の誘起電圧を利用するが，電動機始動時または低速運転時には，誘起電圧は零か非常に小さい値である。このため転流に必要な電圧を確保することができない。そこで電動機転流が可能な速度までは直流中間回路の電流を裁断しながら加速している。

このときの各部の波形を第 6 図に示す。

4. 停電対策

制御装置はプラントの稼動信頼性を向上させるために電源の瞬断に対して安全に各部の処理を行ない，電源が回復するとただちに正常運転に入るような機能をオプションとして備えている。動作は，電源の瞬停が生じると，これを高速度で検出し，界磁電流が存在している間に電動機電流をいったん零にする。そして電源が正常に回復するとふたたび電動機電流を供給し，正常運転状態に回復させるが，その際電動機回転速度が，転流可能領域でも，直流電流裁断を必要とする領域いずれの領域からでも，正常運転にもどすことが可能になっている。この瞬時停電時のオシログラムを第 7 図に示す。



A：直流中間回路電圧
B：電源線間電圧
C：磁極位置検出信号
D：変換器 γ シフトおよび再通電指令
E：直流電流
F：界磁直流電圧
G：電動機相電流（三相）
H：電動機線間電圧（V_{R-S}）

第 7 図　瞬時停電時のオシログラム

Fig. 7.　Oscillogram for interruption of power supply

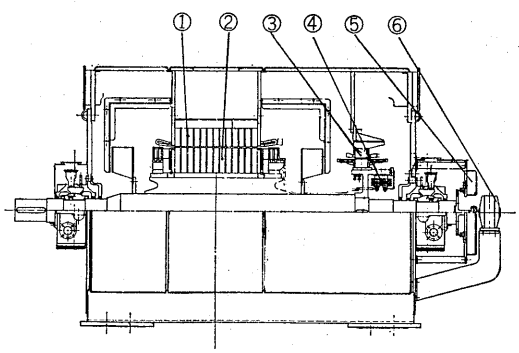
III. 装置の構成

1. 電動機

直流式電動機転流サイリスタモータの電動機には，各種形式の同期電動機が適用できるが，本稿では主として大出力範囲に適する円筒回転界磁形同期電動機を例にして説明する。

1)　電動機の全体構成

サイリスタモータは直流電動機の無整流子化に主眼をおくが，さらに完全無ブラシ化を目指すものである。比較的大容量機では，回転する界磁巻線へ直流界磁電流を供給するために，回転部分に交流電圧を発生する励磁機と整流装置をもつブラシレス励磁方式が採用される。さらに電動機側整流器にゲート信号を与えるための磁極位置検出器が装備されている。第 8 図に円筒回転界磁形同期電動機を用いた大形のサイリスタモータの全体構成を断面図にて示す。



① 電動機固定子
② 電動機回転子
③ 交流励磁機
④ 回転整流装置
⑤ 磁極位置検出器
⑥ 速度検出発電機

第 8 図　円筒回転界磁形サイリスタモータの断面図

Fig. 8.　Sectional view of commutatorless motor (cylindrical rotating field type)

2)　電動機の機能上の特質

サイリスタモータの電動機本体は，通常の同期電動機と異なる機能上の特質を有する。同期機の駆動電源周波数 f_M(Hz)は，機械の極数 P_P および回転速度 n(rpm)との間に $f_M=P_P \cdot n/120$ なる関係がある。一方サイスタ素子の許容平均電流は，普通のタイプでは商用周波数の付近で最大となり，極低周波または高周波の領域では低下する。そこで電動機の極数は，定格回転速度における周波数とサイリスタの許容電流とを考慮して選定される。普通同期機は直流機のような簡単な方法で電機子反作用の補償ができないので，一定の励磁電流の下では電動機端子電圧は軽負荷時ほど大きく，無負荷最高速度で最大となる。したがって電動機の定格電圧は，この状態の電圧と使用するサイリスタの耐圧とから決定される。

サイリスタモータの出力 P は次式で示すことができる。

$$P=ei\cos\left(\gamma_0-\delta_M-\frac{u_M}{2}\right)\cos\frac{u_M}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

ここで　P：出力

e：電動機端子電圧

i：電動機電機子電流

γ_0：無負荷誘起電圧に対する制御進み角

δ_M：電動機の内部相差角

u_M：転流重なり角

式(5)はサイリスタモータの出力が3種類の角度 γ_0, δ_M および u_M によって大きく左右されることを示している。

電動機の誘起電圧によって転流を行なう本方式においては，サイリスタのターンオフタイム T_{OFF} および電動機誘起電圧の電気角周波数 ω に対してつぎの条件が必要である。

$$\gamma_0-\delta_M-u_M>\omega T_{OFF} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

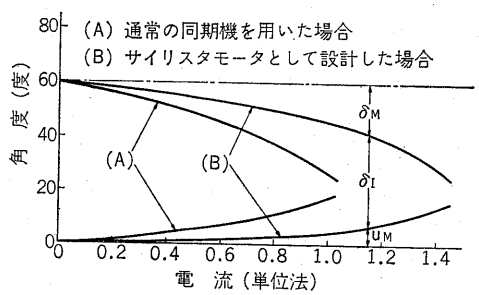
無負荷誘起電圧に対する制御進み角 γ_0 は，磁極位置検出器の検出素子および回転円板の電動機固定子巻線および磁極との相対位置関係によって機械的に固定される量である。γ_0 の設定に当たっては，式(6)の転流限界条件より決まる最大出力が要求値を満足することのほかに運転力率の向上，脈動トルクの低減などの考慮が必要である。一方電動機の内部相差角 δ_M および転流重なり角 u_M は，電動機の運転状態により変化する量でその変化の度合は電動機の内部リアクタンスにより支配される。すなわち

$$u_M=\frac{2x_2}{\frac{6}{\pi}\cdot\frac{e}{i}\cdot\sin\gamma_0+(x_d-x_q)\cos 2\gamma_0-(x_d+x_q-2x_2)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

$$\delta_M=\tan^{-1}\frac{\frac{\pi}{3}i(x_q-x_d'')\cos\gamma_0}{e-\frac{\pi}{3}i(x_d-x_q'')\sin\gamma_0} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

第9図は式(7)(8)を用いて電流 i に対して u_M, δ_M を計算したものである。図中曲線Aは普通に設計された同期機の場合であり，リアクタンスが大きいため転流余裕から決まる過負荷耐量がほとんどない。曲線Bはサイリスタモータ用としてリアクタンスを減らして設計されたもので，過負荷耐量は増加している。

一方発生トルクを考えると，矩形波電流が供給される場合にはトルクが脈動し，その量は γ_0 に影響され γ_0 を60度以上にすると負の瞬時トルクが生じ脈動が大きくなる。したがって γ_0 は通常40～60度の範囲に設定する。この場合第9図に一例として示したように内部リアクタンス x_d, x_2 は普通の同期電動機の内部リアクタンス x_d, x_2 に比して小さい値にする必要がある。同期機の内部リアクタンスは機械の大きさと直接に結びついた



第9図　内部相差角 δ_M および転流重なり角 u の変化

Fig. 9. Characteristics of δ_M and u

特性量であり，次式のように表わすことができる。

$$x=\xi\times\frac{A_1}{B_1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

ここで　A_1：固定子内周の単位長さ当たりの起磁力

B_1：空隙における磁束密度

ξ：鉄心の溝寸法，コイル形状などの幾何学的形状によって決まる漏れパーミアンスおよび電機子反作用による係数

である。A_1, B_1 は電気機械の機能と結びついた基本量である。機械の出力 P は，機械の固定子鉄心内径 D_i, 鉄心長 L, 回転速度 n と A_1, B_1 とに対してつぎの関係がある。

$$P=K_pD_i^2LnA_1B_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

したがって

$$x=\frac{C_M}{K_p}\times\frac{\xi}{B_1^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

ただし

$$C_M=\frac{P}{D_i^2Ln}=K_pA_1B_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

ここで C_M は一般に出力係数と名付けられる量で，単位体積当たりの出力トルクすなわち機械の利用率を表わす係数である。式(11)により明らかなようにリアクタンスを小にするには磁束密度を高くすることが効果的である。

このためサイリスタモータは鉄心の飽和現象から制限される限界まで磁束密度を高めた機械になっている。一方 ξ は磁気回路の構成から決まる。x_d, x_q に対しては固定子巻線の漏れパーミアンスと空隙長が，また x_2 に対してはこのほかに界磁巻線と制動巻線の漏れパーミアンスが ξ の大きさを決定する。同期機には種々の形式の機械が存在するが，円筒回転界磁形は界磁巻線の漏れパーミアンスがいちじるしく小さいのでサイリスタモータに最適の形式である。各巻線の構成を決定するに当たっては溝形状，巻線端の形状および長さなどを，漏れパーミアンスが最小になるように細心の考慮を払ってある。さらに空隙長は通常の同期機に比して大きくとり，電機子反作用を小さくしてある。しかしながら，このような種々の考慮をしても前述のようにサイリスタモータのリアク

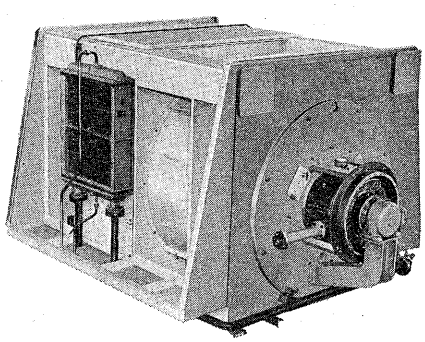
タンスは通常の同期機に比較して小さくする必要があり，出力係数 C_M を若干小さくすることは避けられない。

3) 電動機の構造上の特質

円筒回転界磁形サイリスタモータ1,000 kW，600rpm の外観および回転子の一例を第 10 図および第 11 図に示す。

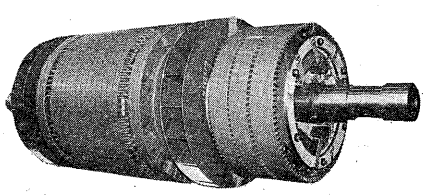
第10図は全閉内冷形機の外被カバーをはずした状態の写真である。サイリスタモータは前項に記したように内部リアクタンスが小さいので短絡電流が大きくなる。これによる電流力に充分耐えうるようにとくに固定子巻線端の支持には細心の注意を払い強固な構造としている。短絡トルクに対して固定子枠，基礎などの構造も強化してある。

さらにトルク振動，たとえば三相ブリッジ結線の変換装置を用いる場合には電動機の周波数 f_M の 6 倍周波数のトルク振動成分 $6f_M$ が生じるので，各部分の共振を避けるとともに防振対策を行なうよう考慮している。



第10図　名古屋市水道局向け 1,000 kW サイリスタモータ

Fig. 10. 1,000 kW commutatorless motor for water service Dept. of Nagoya City



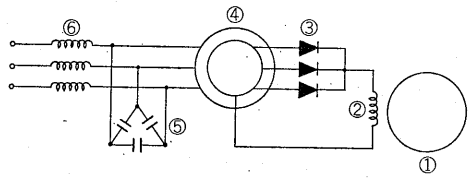
第11図　円筒回転界磁形回転子

Fig. 11. Outerview of cylindrical rotor

4) ブラシレス励磁

回転速度が変化する同期機をブラシレス励磁する励磁機として，変圧器作用を活用する回転変圧器または巻線形誘導機が利用できる。巻線形誘導機においては回転子巻線の電気的出力は，固定子巻線の電気的入力と軸からの機械的入力の和となるので，二次出力のすべてを一次巻線の電気的入力に負っている回転変圧器より一次入力が小さくなる点ですぐれている。

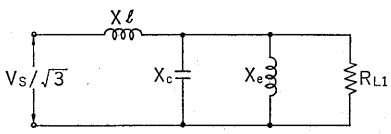
巻線形誘導機の回転子巻線に誘起される電圧は固定子



① 電動機本体　　④ 交流励磁機
② 電動機界磁巻線　　⑤ コンデンサ
③ 回転整流装置　　⑥ リアクトル

第12図　ブラシレス励磁回路

Fig. 12. Circuit diagram of brushless exciting system



V_S‥励磁電源電圧
X_l：リアクトルのリアクタンス
X_c：コンデンサのリアクタンス
X_e：励磁機の励磁リアクタンス
R_{L1}：界磁抵抗の交流換算値

第13図　等 価 回 路

Fig. 13. Equivalent circuit of brushless exciting system

への供給電圧とすべりにほぼ比例する。一定周波数の供給電圧のもとでは回転子電圧すなわち主界磁電流は，すべりを決める主軸の回転速度によって変化するのでこれを補償するために，第12図に示すようにコンデンサとリアクトルを用いた当社独特の定励磁電流回路方式を用いている。第 13 図はこれを一次側よりみた等価回路である。

界磁巻線 R_{L1} に流れる電流 I_{M21} は図中の記号を用いて

$$\dot{I}_{M21}=\frac{\dot{V}_S/\sqrt{3}}{jX_l+R_{L1}\left(1+\frac{X_l}{X_e}-\frac{X_l}{X_c}\right)} \qquad \cdots\cdots(13)$$

と表わすことができる。ここで R_{L1} はすべりによって変化する量であるが

$$1+\frac{X_l}{X_e}-\frac{X_l}{X_c}=0 \qquad \cdots\cdots(14)$$

を満たすようにリアクトルの X_l およびコンデンサの X_c を選定すれば，I_{M21} はすべりによらず次式となる。

$$\dot{I}_{M21}=\frac{\dot{V}_S}{j\sqrt{3}X_l} \qquad \cdots\cdots(15)$$

巻線形誘導励磁機は，一次側の回転磁界の方向を回転子の回転方向と逆にしてすべりを 1 以上にして用いる。ここで一次入力を P_{ex1}，二次出力を P_{ex2}，機械的入力を P_{exM} とすれば，すべり s においてつぎの関係がなり立つ。

$$P_{ex2}=sP_{ex1} \qquad P_{ex1}+P_{exM}=P_{ex2}$$

$$P_{exM}=(s-1)P_{ex1} \qquad \cdots\cdots(16)$$

励磁機の極数を P_{pex} とすれば，回転速度 n においては，

$$s=1+\frac{nP_{pex}}{120f_s}\ (f_s\ \text{は励磁電源周波数})\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

となる。すなわち励磁機の極数 P_{pex} を大きくするほど一次巻線の入力が小さくなり励磁用器具が小形化できる。

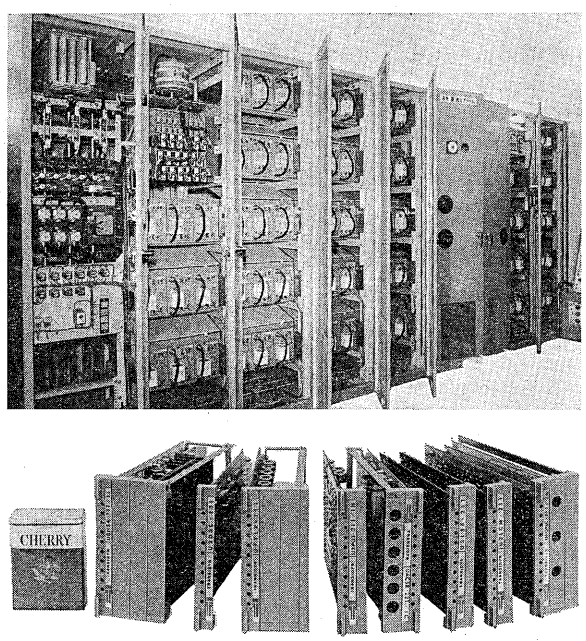
2. 変換装置

1） 電源側整流器

通常50Hzまはた60Hzの商用電源を入力とするので，従来から直流電動機の静止レオナードで行なわれている整流器技術がそのまま適用できる。

2） 電動機側整流器

整流器自体は通常の三相ブリッジ結線であるが，電動機の回転速度に対応して電流の通電期間が変化する。すなわちトルク一定の負荷の場合，低速時低周波時にサイリスタの導通時間が長くなるので接合部の温度が上昇する。したがって直流式電動機転流サイリスタモータはトルクが速度の二乗に比例するような負荷，または速度制御範囲が比較的狭い用途に適しているといえる。



第14図　1,000kW電動機用変換装置盤および制御ユニット

Fig. 14. Outerview of Thyristor-converter cubicle for 1,000kW motor and TRANSIDYN control device

3） 直流リアクトル

直流リアクトルの設置目的はつぎのとおりである。

(1) 転流困難性の緩和，すなわち転流点電流の安定化
(2) ダンパ異常高調波の軽減
(3) 異常振動トルクの軽減
(4) 電源消費VAの電動機周波数の6倍の周波数による動揺の軽減
(5) 電流断続防止による制御系の安定化

名古屋市水道局で現在好調に運転中の 1,000kWのMCパーモトロンの変換装置盤および制御ユニットを第14図に示す。

IV. あとがき

直流式電動機転流サイリスタモータの構成と円筒回転界磁形電動機について概説した。本方式は主として大出力の範囲での適用に優位性を発揮するものである。すでに本方式にて1,000kW，600rpmの上水道用ポンプモータ2台が名古屋市水道局・猪高ポンプ場にて昨年来好調裡に営業運転に入っており，高い信頼性を実証しつつある。また特殊用途として6,000mの深海を潜航する特殊艇の駆動電動機7.5kWの製作例もある。さらに本方式は大容量揚水発電所の主機始動の方法として実用に供されており，シーメンス社では405MW，300rpmの巨大な主機の24MWの始動用変換装置を製作中である。

このようにサイリスタモータは広汎な応用範囲を持っているが，実用に供されてからいまだ日も浅いので，さらに一層の合理化のための改良を鋭意継続中である。その際需要家各位のご要望が大きな進歩発展をもたらすことを付記し，ご愛顧をお願いする次第である。

参考文献

(1) 「静止電力変換装置」特集号：富士時報 **42** No.7（昭44）
(2) 難波・山本・塚原：富士時報 **44** No.3（昭46）
(3) 三橋・井上・漆畑他：富士時報 **45** No.8（昭47）
(4) 畔上・山本・片山・赤星：富士時報 **45** No.9（昭47）
(5) 漆畑・阿部他：富士時報 **45** No.10（昭47）
(6) 小川・井上・藤井・山口・永沼：富士時報 **45** No.7（昭47）

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。