

東京都水道局納 6,200 kW クレーマセット

6,200 kW Krämer Set for Tokyo Metropolitan Water Works Bureau

麻 生 豊* 広 豊* 白 木 勇*
Yutaka Aso Yutaka Hiro Isamu Shiraki

地 福 順 人* 岩 城 秀 夫*
Yorito Jifuku Hideo Iwaki

内 容 梗 概

このたび東京都水道局朝霞浄水場に納入した 6,200 kW クレーマセットはシリコン整流器を用いたクレーマセットとしては世界有数の大容量機である。このクレーマ方式は効率良く誘導電動機が速度制御できるという特長をもっているが、本論文ではまずクレーマ方式の速度制御の原理と効率の良い理由を述べ、つづいて本設備の構成と構造を説明し、誘導電動機、直流電動機、シリコン整流器などの諸機器を一体にまとめて小形とし、据付面積の減少をはかった点に言及している。次に各機器に対しクレーマセットに使用するために考慮した点にふれるとともに、それらを総合して有機的に保護、制御した方式についてのべている。最後に本クレーマセットの試験成績を速度負荷特性などについてのべている。

1. 緒 言

誘導電動機は速度制御法としては数多くの方法が知られており、実用化されているが、いずれにも一長一短がある。誘導電動機本体は構造簡単であるが、補機類が複雑であるとかあるいは効率の点で劣るというように考えられていた。特に二次抵抗制御法は簡単で設備費が安価であることからかなり実用化されているが、効率が悪いという大きい欠点があるので、用途が限定されざるを得なかった。

この二次抵抗制御法にかわる効率のよい方法としてはクレーマ、セルビウスの二方式があり、古くからその原理は究明されていたが、その補機に回転変流機などの複雑なものを要するのでほとんど用いられなかった。しかるに最近半導体整流器の著しい進歩により、これを用いて容易にクレーマ、セルビウスセットが構成できるようになった。

日立製作所においては早くからシリコン整流器を用いたクレーマ、セルビウス方式の経済性に着目し、基礎研究を行なっていたが、今般東京都水道局朝霞浄水場納ポンプ用 6,200 kW クレーマセットを完成し運転にはいった。本セットはクレーマ方式としてはじめての本格的なものである。以下その詳細について述べる。

2. 設 備 の 概 要

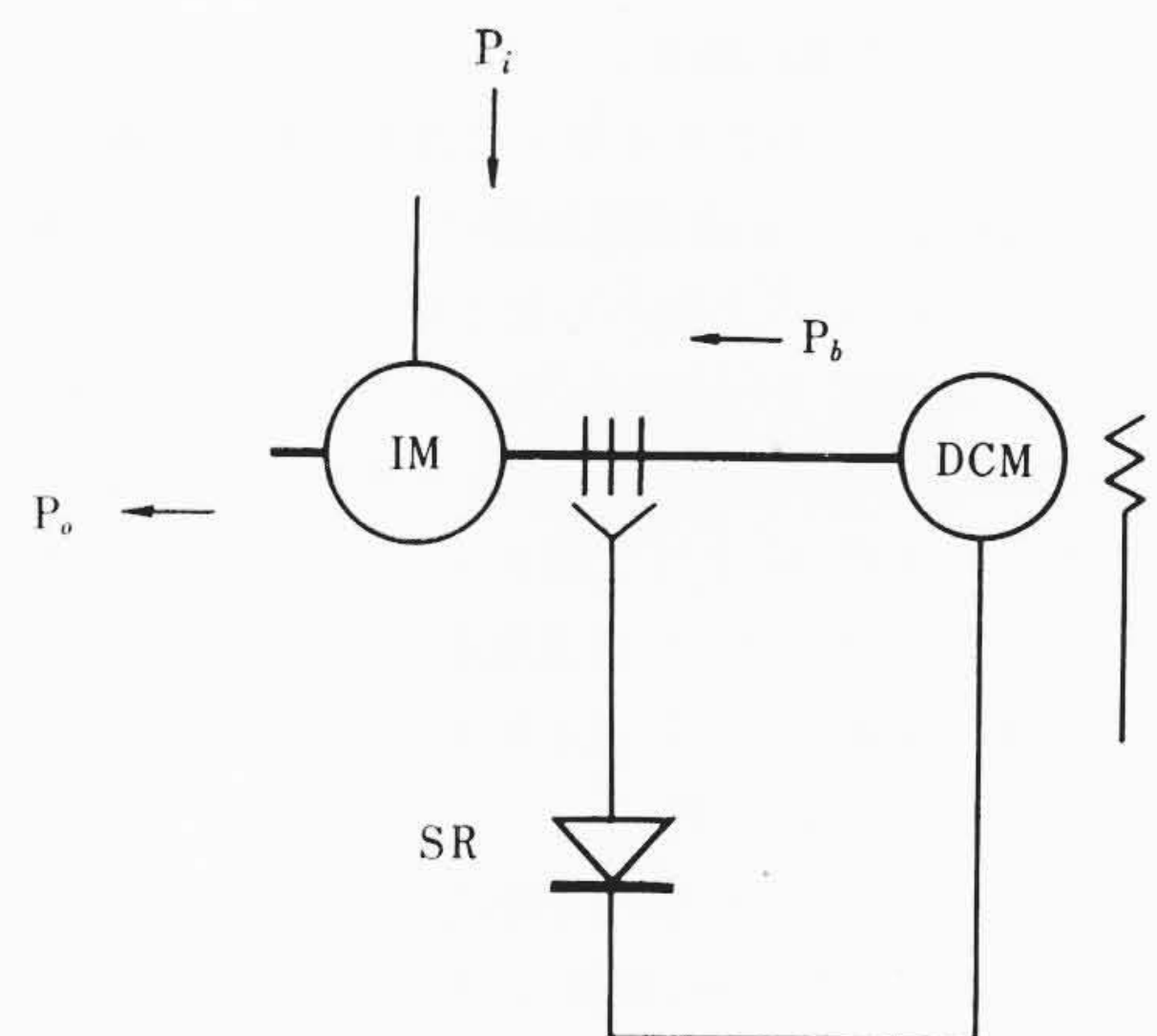
本クレーマセットは朝霞浄水場に設けられるポンプ駆動用であって、その目的の詳細は別稿に譲るが、利根川から荒川を経て自然流下によって導かれた原水（浄化されていない水）を約 17 km 離れた東村山浄水場まで送水するためのものである。

東村山浄水場の必要水量は需要に応じて変化するので、その流量指令によってクレーマ方式によりポンプの回転数を制御し、常に規定水量を送水することが必要である。

2.1 クレーマセット仕様

台 数	3 (うち 1 台は予備)
用 途	立形片吸込単段ボリュートポンプ
出 力	6,200 kW (407 rpm において)
形 式	立形全閉内冷形巻線形回転子式 直流電動機、シリコン整流器内蔵形 VTF LoW-DRQ
電 圧	6,300 V

* 日立製作所日立工場



第1図 クレーマ方式の構成

周 波 数	50 c/s
極 数	14 P
速 度 範 囲	407~326 rpm (100~80%)
直 流 電 動 機	全閉内冷形 VTF BoW-SPKK 768 V, 2,010 A
シリコン整流器	三相ブリッジ結線 AHE-6B 836 V, 2,010 A

3. クレーマセットの原理と動力の回収

3.1 誘導電動機は速度制御の原理

誘導電動機の二次電圧とすべりとの間には次の関係がある。

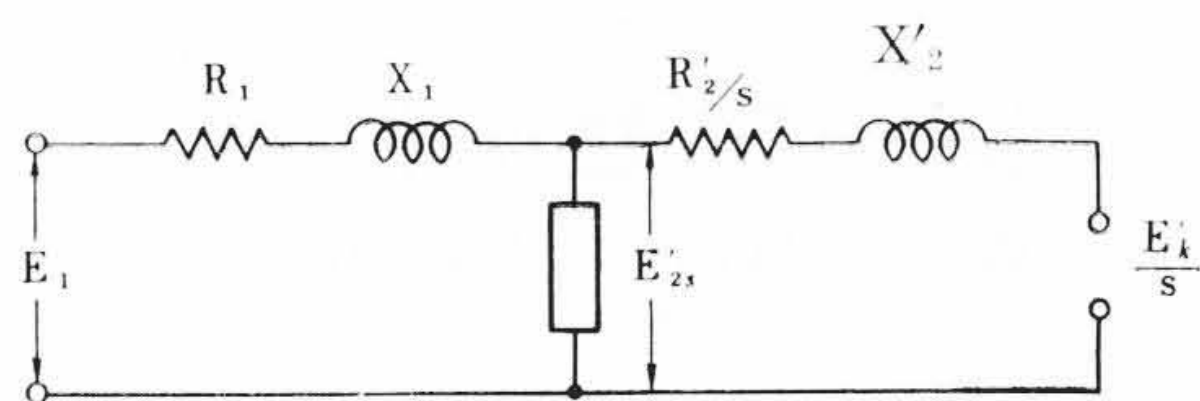
$$E_2 = s E_{2s} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 E_2 : 二 次 電 圧

E_{2s} : 最大二次電圧

s : す べ り

E_{2s} は電動機によって定まる定数であるから、二次励磁を行なって E_2 を変化させればすべり s を変化させることができる。すなわち誘導電動機は速度制御ができるのである。この E_2 をクレーマ方式では第1図のようにシリコン整流器を経て誘導電動機に直結された直流電動機に印加し、直流電動機の起電力と平衡させ、界磁制御によりその起電力を変化させて E_2 を変化し、誘導電動機は速度を制御するものである。



第2図 誘導電動機二次励磁等価回路

次に二次励磁の場合の電動機二次電流 I_2 は(2)式で表わされ、その等価回路は第2図となる。

$$I_2 = \frac{s E_{2s} + E_k}{R_2 + j s X_2} = \frac{\frac{E_{2s} + \frac{E_k}{s}}{s}}{\frac{R_2}{s} + j X_2} \dots\dots\dots (2)$$

- ただし、 R_1 : 一次側抵抗
 R_2 : 二次側抵抗
 X_1 : 一次側リアクタンス
 X_2 : 二次側リアクタンス
 E_k : 二次励磁電圧
 E_1 : 一次電圧
 $'$: 一次側に換算したものを示す

3.2 クレーマセットのエネルギーの流れと総合効率

すべり s で運転している誘導電動機は、各部の損失を無視して考えると、二次入力 P_2 のうち軸から出る機械的出力は $(1-s)P_2$ であり、 sP_2 が二次側にすべりのエネルギーとして現われる。この sP_2 が二次励磁機器を経て返還可能なエネルギーとなる。二次抵抗制御法ではこの sP_2 がすべて損失となるので効率が悪いのであるが、クレーマ法では sP_2 が直流電動機の入力となり、直結された誘導電動機軸に返還されて負荷を駆動する。すなわち総合出力は $(1-s)P_2 + sP_2 = P_2$ となり s に関係なく二次入力 P_2 が出力となるので、二次抵抗制御法に比べて特に s の大きい点(低速)においても総合効率が良くなるのである。

さらに各機器の損失を考慮すると次のようになる。

- いま P_i : 誘導電動機入力
 P_2 : 二次入力
 P_0 : 総合出力(全軸出力)
 P_b : 返還出力(直流電動機出力)
 η_1 : 誘導電動機一次側効率
 η_{IM2} : 誘導電動機二次側効率
 η_{SR} : シリコン整流器効率
 η_{DCM} : 直流電動機効率
 η_2 : 二次側総合効率 $= \eta_{IM2} \times \eta_{SR} \times \eta_{DCM}$

とすると

$$P_2 = s \times \eta_1 P_i$$

$$P_b = P_2 \times \eta_{IM2} \times \eta_{SR} \times \eta_{DCM}$$

$$= s \eta_1 \eta_2 P_i$$

となり、全軸出力 P_0 は

$$P_0 = (1-s) \eta_1 P_i + P_b$$

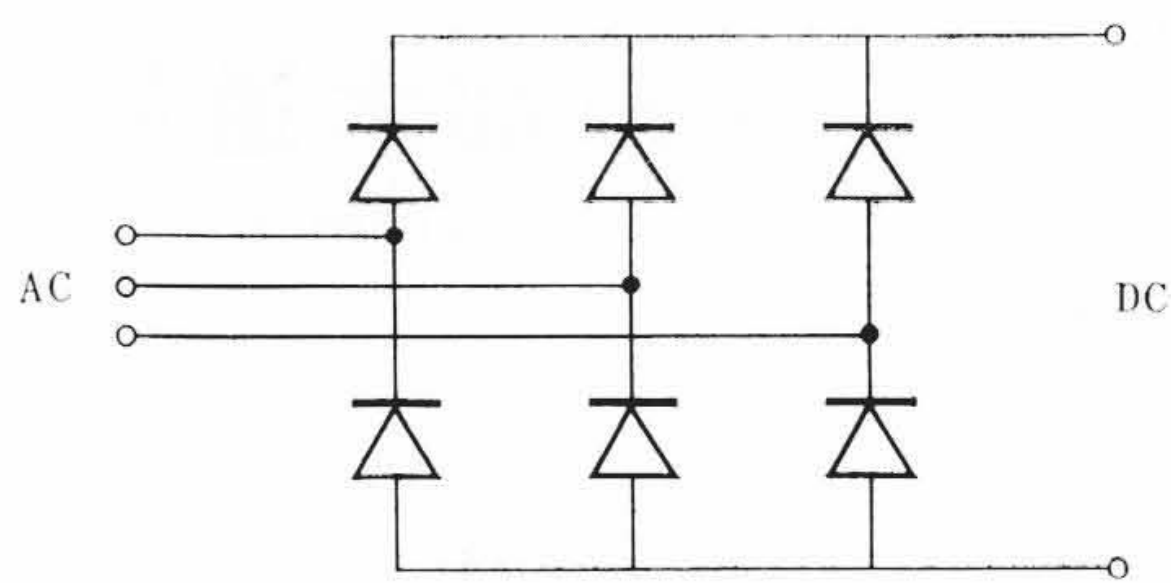
$$= (1-s) \eta_1 P_i + s \eta_1 \eta_2 P_i$$

$$= \eta_1 P_i \{1 - s(1 - \eta_2)\} \dots\dots\dots (4)$$

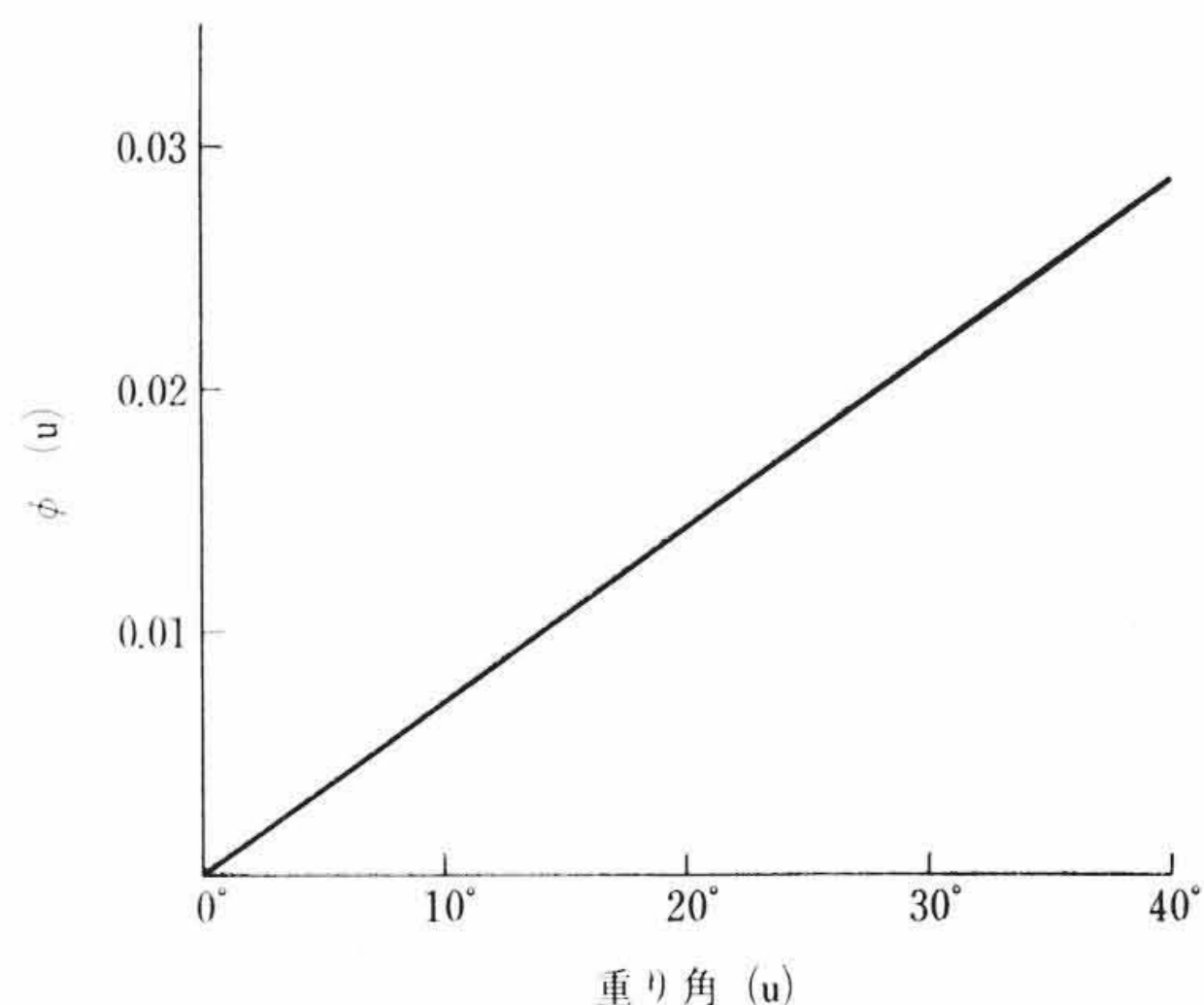
よって総合効率 η は

$$\eta = \frac{P_0}{P_i} = \eta_1 \{1 - s(1 - \eta_2)\} \dots\dots\dots (5)$$

一方これを周波数の点から考えると誘導電動機の二次出力はすべり周波数 sf サイクルの交流であり、これをシリコン整流器で整流して直流に変換し、これが直流電動機の入力となる。



第3図 シリコン整流器三相ブリッジ結線



第4図 重り角と ϕ の関係

3.3 直流電圧と直流電流⁽²⁾

3.3.1 直 流 電 圧

シリコン整流器は第3図の三相ブリッジ結線で整流を行なうので、この場合の無負荷直流平均電圧は

$$E_{d0} = \frac{1}{\frac{2\pi}{6}} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} E \cos \theta d\theta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \dots\dots (6)$$

ただし、 E_{d0} : 無負荷直流平均電圧

E : 交流相電圧

(6)式をクレーマセットに適用すると E として sE_2 が交流相電圧となる。 E_2 に対応する無負荷直流平均電圧を E_{2d} とすると

$$s E_{2d} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} s E_2 \dots\dots\dots (7)$$

次に直流電動機に加わる電圧を求める。 sE_{2d} は誘導電動機の二次側の起電力であるから、直流電動機端子電圧 E_{kd} は各部の電圧降下を引いたものである。よって

$$s E_{kd} = s E_{2d} - (e_{r2} + e_{X2} + e_{SR}) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 e_{r2} : 誘導電動機二次側抵抗による電圧降下分

e_{X2} : 誘導電動機二次側リアクタンスによる電圧降下分

e_{SR} : シリコン整流器内電圧降下分

以上いずれも直流換算値とする。

3.3.2 直 流 電 流

第3図の三相ブリッジ結線の整流回路により交流が直流に変換されると、重なり現象のために直流電流は(9)式となる。

$$I_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-3\phi(u)}} I_2 \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 I_d : 直流電流

u : 重なり角

$$\phi(u) = \frac{\sin u (2 + \cos u) - u (1 + 2 \cos u)}{2\pi (1 - \cos u)^2}$$

なお u と $\phi(u)$ の関係は第4図に示すとおりである。

3.4 速度負荷特性

(8)式の直流電動機端子電圧 $s E_{kd}$ は

$$s E_{kd} = E_m + e_b + R_m I_d \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $E_m = K_e \Phi_m N$: 直流電動機逆起動力

e_b : 刷子接触電圧降下

$R_m I_d$: 電機子回路の抵抗による電圧降下

K_e : 直流電動機設計定数

Φ_m : 直流電動機主界磁空けき磁束

N : クレーマセット回転数

よって(8)式より

$$s E_{2d} = E_m + e_{r2} + e_{X2} + e_{SR} + e_b + R_m I_d \quad \dots\dots\dots (11)$$

上記電圧降下は I_d に対しては非線形のものもあるが、これらをすべて一括し等価抵抗 R_d を考える。

$$R_d = \frac{e_{r2} + e_{X2} + e_{SR} + e_b}{I_d} + R_m \quad \dots\dots\dots (12)$$

この R_d を使って(11)式を書きなおすと

$$s E_{2d} = K_e \Phi_m N + R_d I_d \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここでクレーマセットの同期速度を N_0 とすると

$$s = \frac{N_0 - N}{N_0}$$

を代入して整理すると、クレーマセットの速度は

$$N = \frac{E_{2d} - R_d I_d}{E_{2d} + K_e \Phi_m N_0} N_0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

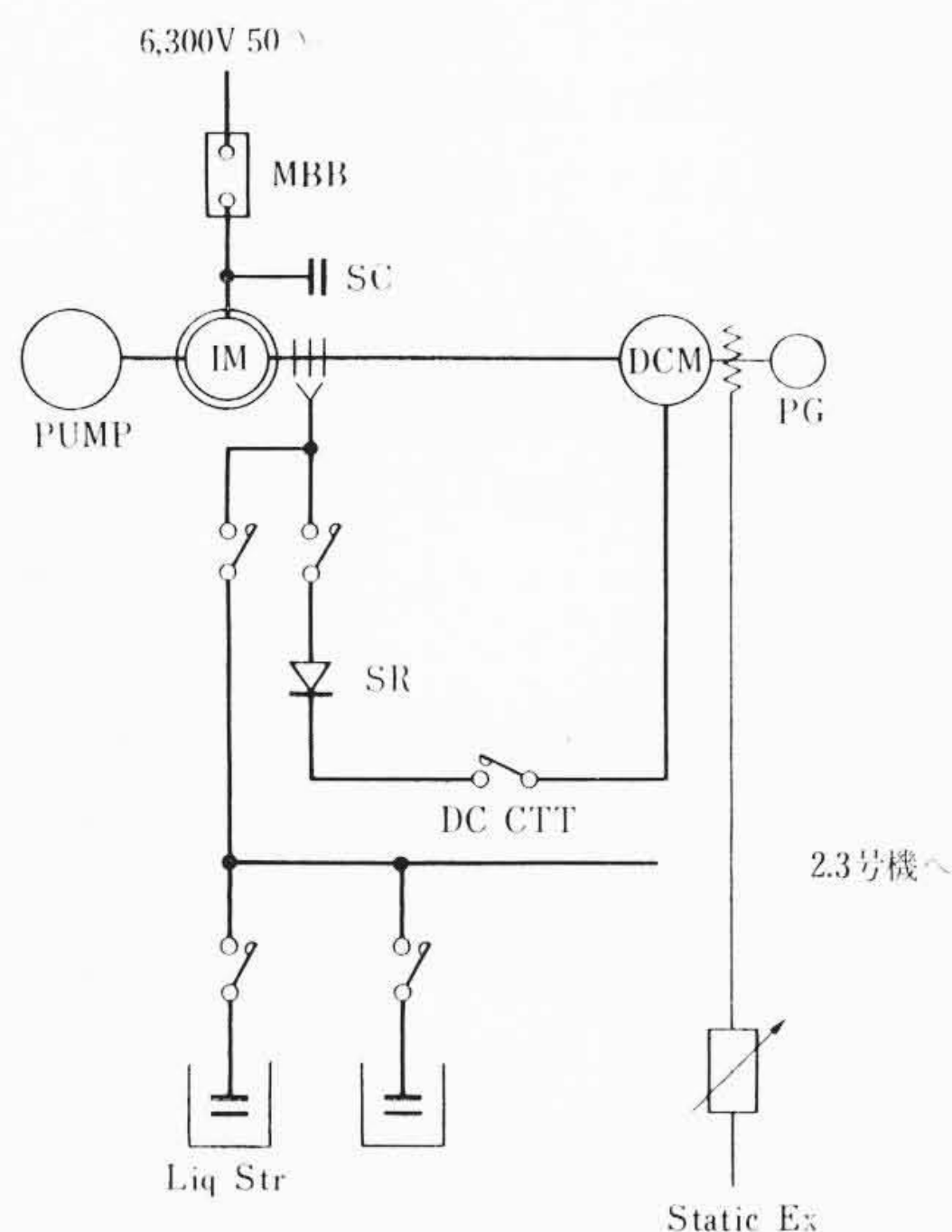
I_d は負荷 P によって定まるので(14)式がクレーマセットの速度負荷特性を表わす。(14)式にて変数は Φ_m, I_d であり、さらに Φ_m は直流電動機の界磁電流 i_f によって制御されるので、回転数 N は i_f, P の関数となる。

$$N = f(i_f, P) \quad \dots\dots\dots (15)$$

すなわち i_f を制御して速度 N が制御できることが示されているのである。

4. 回路の構成と速度制御

以上述べてきたクレーマ方式を本設備においては第5図のスケルトンダイアグラムに示す回路にまとめた。直流電動機の励磁は15 kW の静止励磁装置で行ない、速度検出には速度発電機(PG)を主軸に直結している。また起動にクレーマ方式を使うと補機が大きくなるので、起動用には液体起動器を電動機3台に対し2台設けて切替使用し、設備費の軽減をはかっている。起動は通常の誘導電動機



第5図 6,200 kW クレーマセットスケルトンダイアグラム

と同様であるが、加速してクレーマ速度範囲にはいると速度検出してクレーマ運転に切替える。通常運転は2台の速度を同一とする揃速運転であって、流量指令に基づき、直流電動機の界磁電流を制御して、2台の速度を合わせつつ、速度変化を行なう。逆転時直流電動機が発電機として動作して、シリコン整流器で短絡させるのを防ぐために回路遮断用の直流接触器を設けるほかに力率改善用として静止蓄電器を接続している。

5. 機器の詳細

5.1 全体構造と冷却方式

5.1.1 構造

ポンプ場全体の配置は前掲の論文に詳述されているので省略し、ここでは駆動機の構造についてのみ述べることにする。

第6図に駆動機の構造を示す。

ポンプが立形であるので、電動機も立形となり、ポンプの上に設置される。クレーマ用直流電動機は誘導電動機の上部に乗せられ、一方下部にはポンプ軸が直結される。この直流電動機の回転子重量、ポンプの推力、および誘導電動機の回転子重量はすべて誘導電動機上部に設けた推力軸受により支持される。この軸受はポンプの停止時の逆転を考慮し130%速度3分間逆転しても支障なきように製作されている。また案内軸受は誘導電動機の最下部と上部の二箇所のみ設け、直流電動機には設けず構造の簡易化がはかられている。

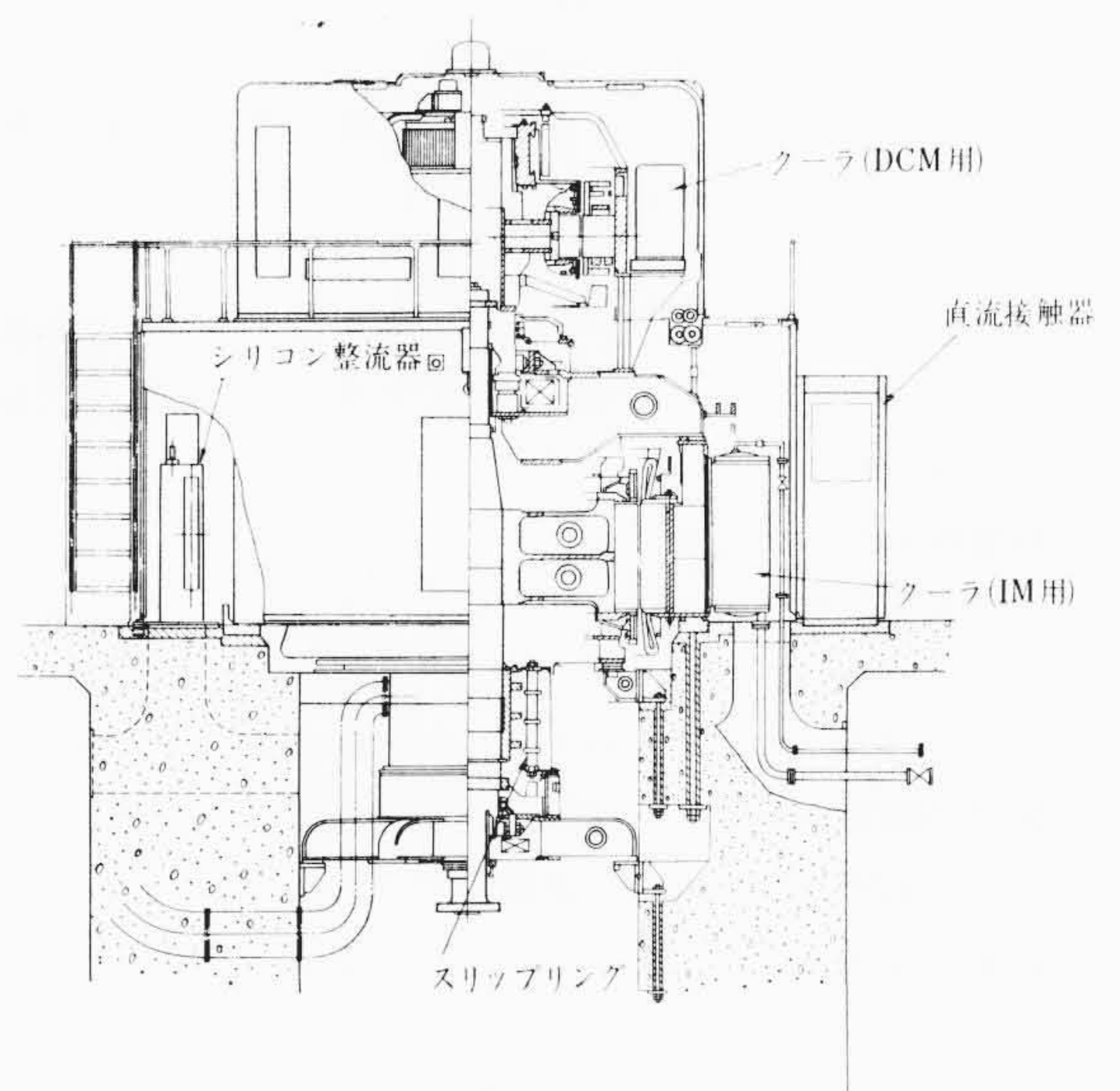
電動機冷却用の水冷却器は6個に分割してその周囲に配置され、その間の空間を利用して同様6分割されたシリコン整流器が第6図のように配置され、据付平面積の減少がはかられている。

直流接触器を電動機に接して配置し、整流器-接触器-直流機と、直流回路をすべて電動機まわりに集めたので、大電流の直流回路をすべて電動機カバー内におさめることができ、外部配線を簡潔なものにすることができた。このためカバー内で相当多量の配線を行なうことになったが、局部過熱などないように配線を計画施工した。

このように種々の考慮をはらった結果クレーマ方式を採用したにもかかわらず据付平面積の増加がなく、建設費の低減が可能となった。全体の外観を第7図に示す。

5.1.2 冷却方式

冷却は直流電動機、誘導電動機本体とシリコン整流器、および



第6図 6,200 kW クレーマセット構造図



第7図 6,200 kW クレーマセット

スリップリングの三系統にわかれる。

直流電動機は全閉内冷形であって周囲に空気冷却器をおき、冷却空気は閉回路をとって循環し、電動機発生損失熱は冷却器を経て冷却水により外部に放出される。途中にカーボンドスト除去用エアフィルタをおいてある。誘導電動機も同じく全閉内冷形であるが、循環系の一部より整流器冷却用の空気を導いている。全閉内冷形では冷却器に露を結ぶ場合もあり、シリコン整流器に有害であるので、中途に水切りをおいて水滴の浸入を防止している。

これらの通風はいずれも軸直結の自己ファンによっている。冷却器のまわりはカバーによりおおって冷却通風路を形成するとともに、誘導電動機、直流電動機の騒音をも遮へいし、85ホン以下に押えている。また本機は速度制御を行なうと大幅に負荷が変動するので、機内の温度が変動し、配水管などに結露し、冷却風に混入するおそれがある。これを防ぐため可能なかぎり合成樹脂による防露対策を講じている。

スリップリングは下部にあり、基礎の中にはいるので、防音の考慮を必要としない。スリップリングの冷却系統を電動機本体と別にしたのは刷子粉の混入を恐れたからで、すぐ下のポンプ室から冷却風をとり、ポンプ室に排気するようにしている。

5.2 誘導電動機

本機はクレーマセットとして大容量であるばかりでなく、立形誘導電動機としても屈指の大容量機であり、次の諸点に留意している。

- (1) 回転子回路に整流回路がはいる結果、二次電流に高調波分が含まれるので、各部の温度上昇に考慮をはらった。
- (2) 回転子軸にはポンプ、ランナ、直流機電機子が直結され、大きい重量が3点に分布するので、入念にバランスをとり、きわめて振動の少ないものとした。
- (3) 効率を良くするためにケイ素鋼板には損失処理をした低損失のものをうい、一方通風方式も考慮して、通風損失を減少させた。
- (4) 軽量化のために基礎コンクリート部を活用し、下部エンドブラケットを簡易化するとともに、スリップリングをおさめた。
- (5) スリップリングはみぞ付きとして電流の不平衡を防いで、刷子の摩耗を減少させる。また刷子には日立製の抵抗の少ない、耐摩耗性のものを使用した。
- (6) 固定子は 6,300 V であるのでコイル絶縁にはポリエステル絶縁を使用し、特性の向上をはかった
- (7) 推力軸受はポンプ停止時の逆転のため 130% 速度になるので、正逆両回転に適するよう中心支持方式とし、油膜形成

が容易なバットの形状とした。案内軸受はセグメント軸受とした。

これらの軸受はいずれも油自蔵式であるため、油循環ポンプなどは不要であり、油タンク中に水冷却管を設けて、冷却水により油を冷却し、良好な潤滑を行なうようにしている。

5.3 直流電動機

5.3.1 仕様

最大電圧	768 V
最大電流	2,010 A
定格回転数	407~326 rpm
定格	連続

立軸全閉内冷形、他励磁方式、補極巻線付
VTF BoW-SPKK

クレーマセット用直流電動機として特に考慮を払ったのは次の諸点である。

5.3.2 整流

本機は主誘導電動機とシリコン整流器とに電氣的に接続されているので、リップルを含んだ直流が流れるから、その整流対策には特に注意を払った。脈動電圧の値は誘導電動機のすべりに比例して低くなるが、回路インピーダンスもすべりとともに小さくなるので、脈動電流の値はすべりにあまり関係せずほぼ一定で、全振幅では最大電流 2,010 A の約 17% にも達する。このような脈流運転時の残留リアクタンス電圧を算定し、これが火花電圧より低くなるよう設計し、脈流運転でも無火花が得られるよう考慮した。補極鉄心の成層、タンデム刷子の採用、重波巻線線の採用など相まって、良好な整流性能を得ている。

5.3.3 セン絡に対する考慮

セン絡の危険性を少しでも低くするため本機の整流子片間電圧を比較的低くとり、もし誤って最強界磁のままで最高速度で運転しても、セン絡に対し十分余裕のある値に設計してある。

万一直流電動機がセン絡した場合、またはシリコン整流器が短絡して直流電動機が整流器を通して短絡された場合、ともに直流機側主回路に大電流が流れる。この場合過電流継電器により、誘導電動機一次側主回路を遮断するとともに直流電動機界磁も遮断し、放電抵抗を通じて界磁電流を急激に減衰せしめる。この場合の被害を極力少なくするため界磁巻線の耐電圧を上げ、放電抵抗の値を大きくとり、界磁電流の減衰時定数を切りつめている。

5.3.4 逆転に対する考慮

停電時には水の逆流のために 130% 速度で逆転する。この場合直流電動機の残留磁束のために極性が逆となって大なる電圧が誘起する。シリコン整流器はこの電圧に対しては短絡となるので、この場合に短絡電流を流さないよう第5図に示すように直流接触器をその間に入れ、回路を開路するようにしている。

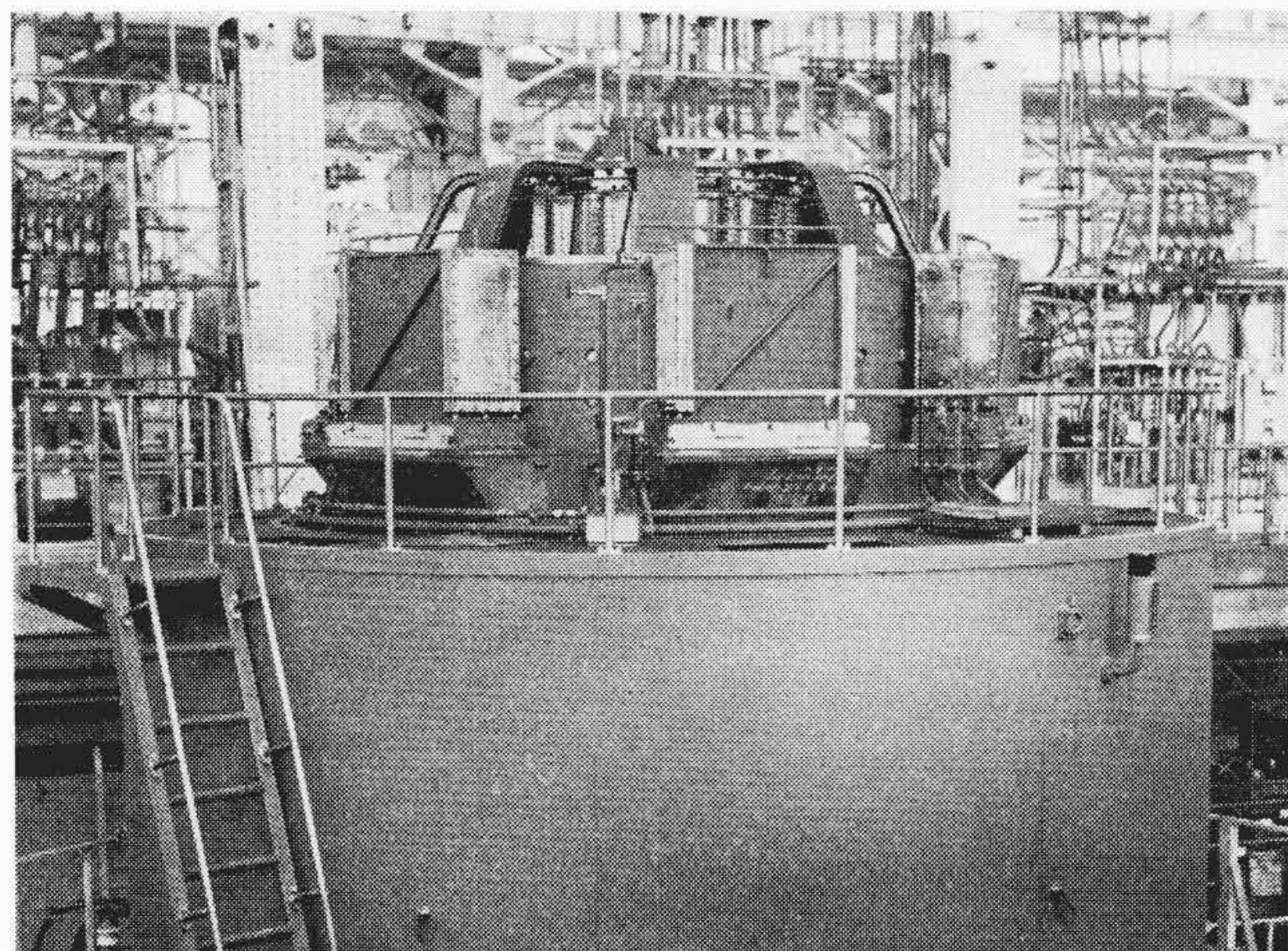
5.3.5 構造

組立中の直流電動機の外観を第8図に示す。

本機は誘導電動機上部に軸端フランジ部分で直結し、軸およびスパイダは鋼板溶接のスキンストレス構造として重量の低減をはかった。

外被構造は全閉内冷形で、直結側にある自己通風用ファンにより、ビニールスポンジ製エアフィルタ、空気冷却器を通して上部整流子側から機内を通気する内部循環通風方式をとっている。ファン出口には温度継電器を取り付け、排気温度を検出して、直流電動機過熱保護を行なっている。

補極ライナにはすべて渦流防止のスリットを設け、非磁性ライナには SUS 材を使用、また補極コイル押え板はすべて閉回路をつくらぬよう考慮し、脈流運転時の整流改善と、渦流による鉄損



第8図 組立中の直流電動機

増加の低減をはかった。

直流機の上軸端には、スリップを絶対起こさないシンクロベルトにより、駆動される速度発電機が取り付けられている。

5.4 シリコン整流器

5.4.1 仕様

形 式	AHE 6B
定格直流電圧	836 V
定格直流電流	2,010 A
主回路周波数	2.5~12 c/s
結線方式	三相ブリッジ
冷却方式	誘導電動機の自己ファンによる風冷式
設置場所	1アームずつ6分割して、電動機のカバー内に設置

整流素子

形 式	DJ 15 L
定格平均順電流	200 A
定格せん頭逆耐電圧	1,000 V
構 成	4S×9P×6A

第9図はシリコン整流器1アーム分の外観を示したものである。

5.4.2 熱容量

クレーマ装置用のように誘導電動機の二次整流用に使用されるシリコン整流器の問題点は主回路の周波数の低いことである。本機の場合は2.5~12 c/sで使用されるが、素子を通る電流の平均値は同じでも、通流期間が異なると通流終期における素子のジャンクション部の温度上昇が異なってくる。通流期間が長いほど、すなわち周波数が低いほど温度上昇が高くなる。通流終期における素子のジャンクション部の温度上昇は素子の過渡熱抵抗と重ね合わせの理を用いて求められ、三相ブリッジ結線の場合は次の(16)式で近似される。

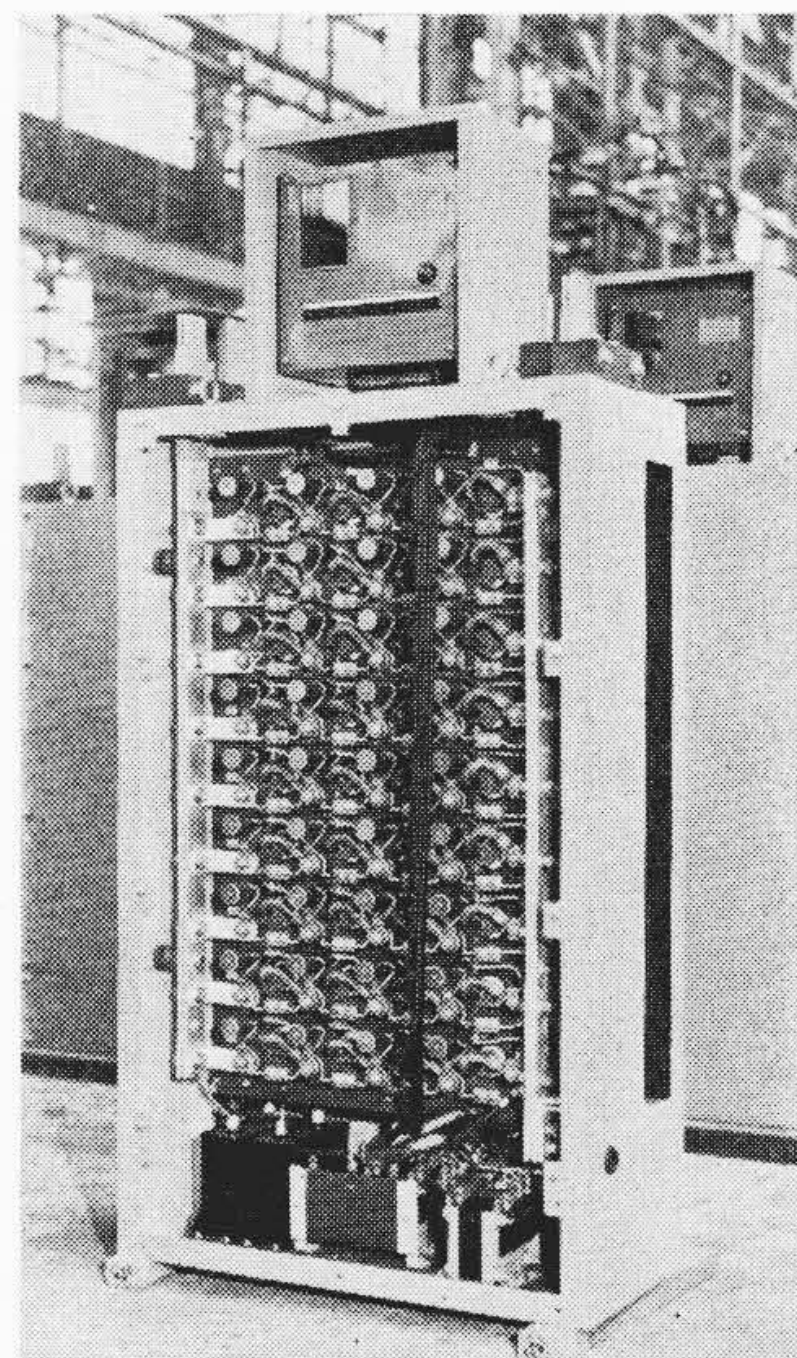
$$\Delta T = \left(\frac{1}{3} r_{\infty} + \frac{2}{3} r \frac{4}{3f} + r \frac{1}{3f} - r \frac{1}{f} \right) P \quad \dots (16)$$

ただし、 r_a : 時間 a における過渡熱抵抗

P : 素子の通流期間における損失

(16) 式よりジャンクション温度を一定とした場合の 50 c/s と 2.5 c/s における許容損失の比を求めると 2.5 c/s の場合は 50 c/s の約 85~90% となる。

周波数の違いは事故電流においてさらに詳細な検討を要する。定常時と同様に過渡熱抵抗と重ねの理を用いてジャンクション部の温度上昇が一定となる過電流せん頭値の比を求めればよい。



第9図 クレーマ装置用シリコン整流器

5.4.3 異常電圧に対する対策

シリコン整流器が回転機と異なる点の一つはサージ電圧に対し十分注意をしておかねばならぬことである。誘導電動機の励磁電流が大なるため、特に整流器の負荷側が開路されているとき、誘導電動機の一次側を遮断すると異常なサージ電圧が発生し、シリコン整流器を破壊に至らしめる危険性がある。よって本セットでは電動機一次側は必ず整流器の二次側が閉路の状態では遮断するようにしてある。このほかに起動、切替、遮断の種々の組み合わせについては、別の 2,250 kW 機によって試験するとともに、直流機界磁喪失、全停電などの事故を再現させあらゆる場合のサージを測定し、サージの最も小さい回路を選定するとともに、整流器の交流側にセレンによる特殊アレスタを使用して異常電圧の軽減につとめている。

5.4.4 素子の直並列枚数

本器は素子短絡検出装置をもっているが、これは万一素子が1個短絡した場合、それを検出して警報を発し、次の機器停止の機会に不良素子を交換することを目的としたものである。この場合素子一個が不良となっても運転を継続せねばならないので、素子の直列数は必要枚数よりも1個余分に使用している。

5.4.5 耐震性と耐湿性

前述のようにこの整流器は主誘導電動機のカバー内におかれ、空気冷却器を出たあとの冷却風によって冷却される。整流器を出た冷却風は再び電動機にはいる構造となっている。そのため整流器には十分な耐震性と冷却器よりの水分に対する耐湿性が要求される。これに対しては豊富な経験のある車両用と同程度の耐震、耐湿性が考慮されている。

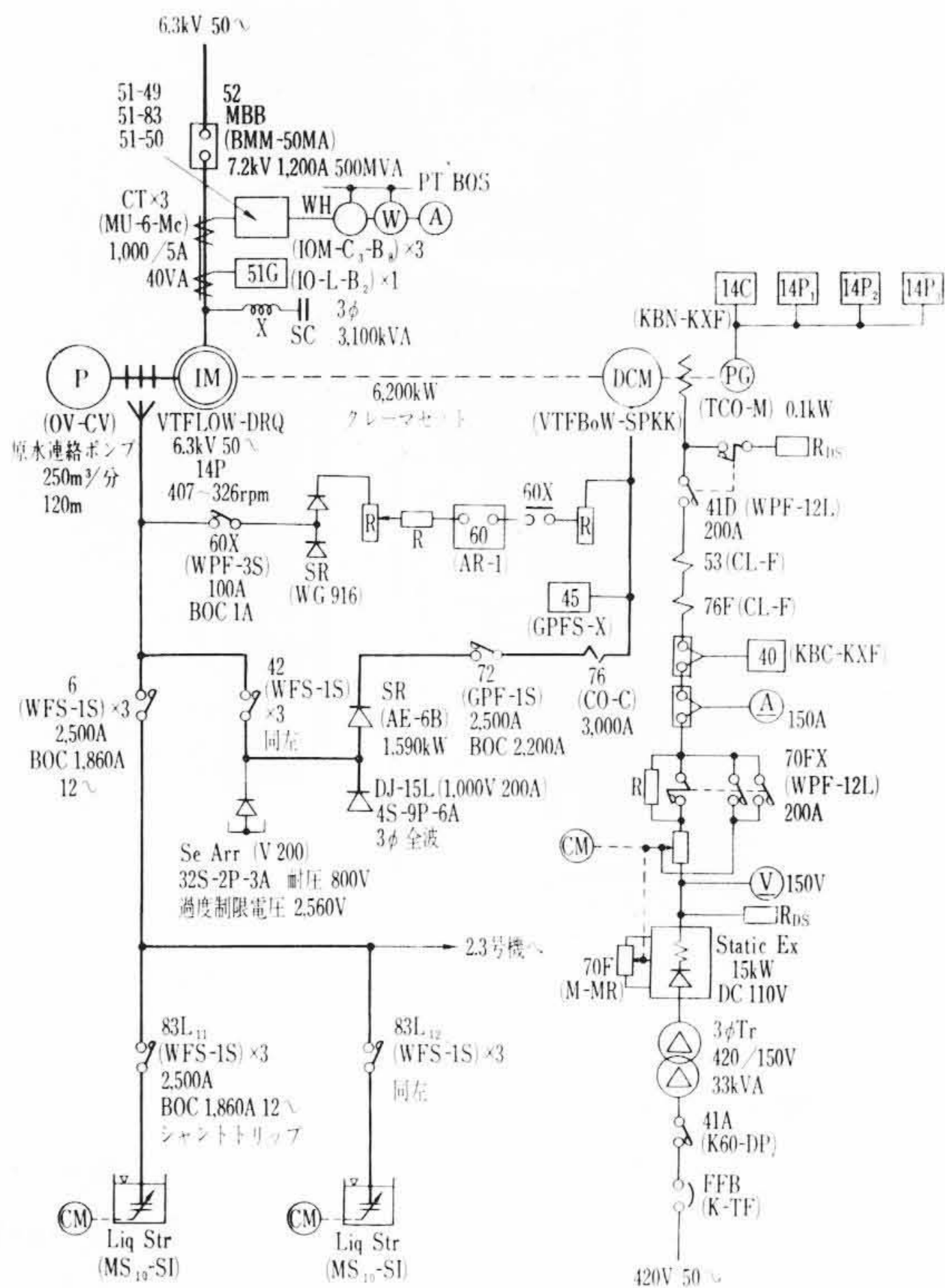
6. 制御方法と制御装置

本設備の制御装置の設計製作上特に考慮した事項は、(1) 起動停止法、(2) 界磁調整法、(3) 自動流量制御法、(4) 保護警報方式である。

6.1 起動停止法⁽⁷⁾

第10図は本設備の制御結線図を示している。起動は次の条件が満足されているとき一次遮断器 52 が投入され液体抵抗器により始動する。起動条件としては

- (i) 受水井の水位が起動水位を越えていること
- (ii) 冷却水ポンプが運転中であること
- (iii) 他のポンプが起動中でないこと



第 10 図 6,200 kW クレーンセット単線結線図

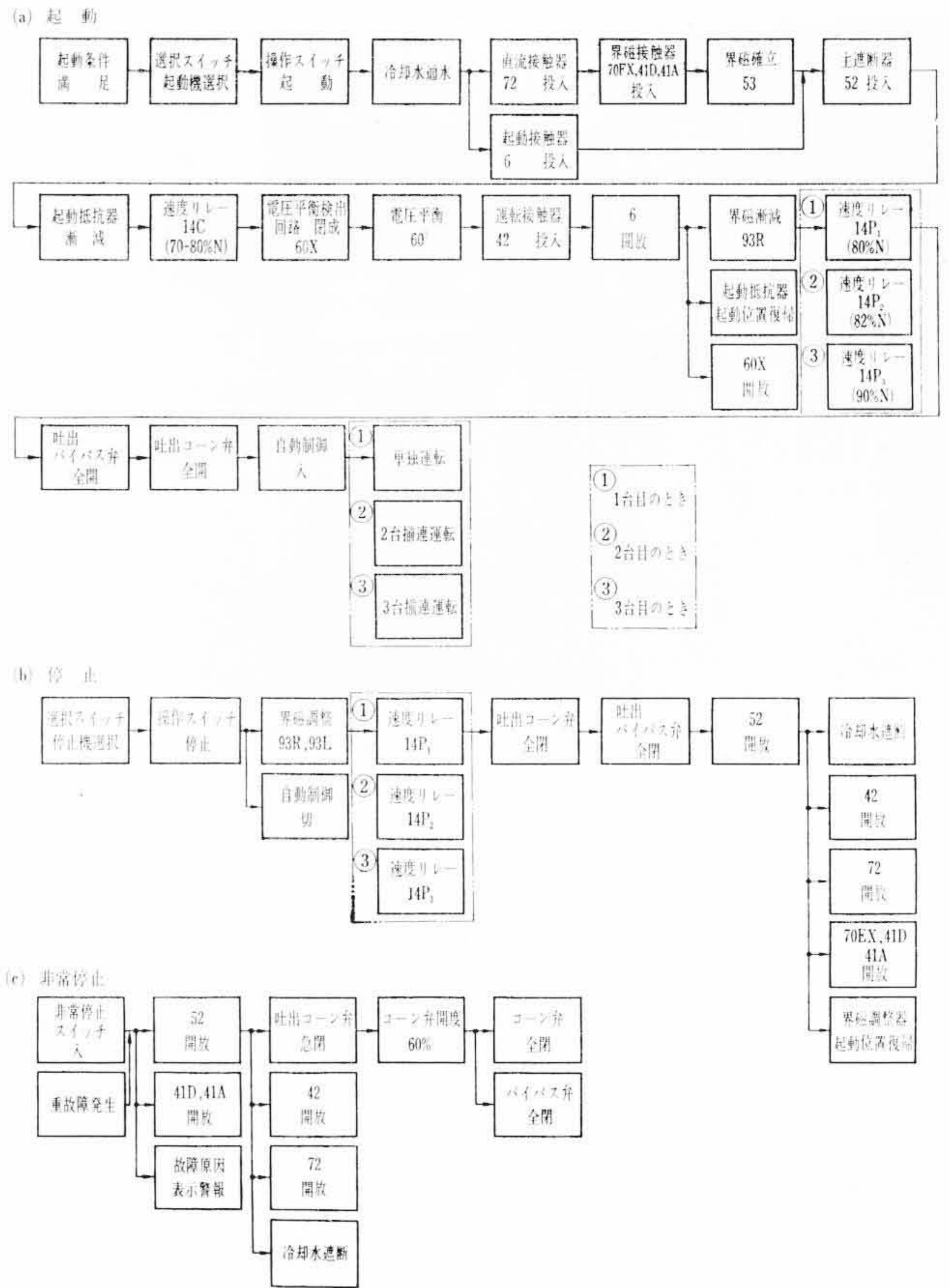
- (iv) 圧油タンク油面および油圧が規定範囲であること
- (v) 各弁が起動位置にあること
- (vi) 液体起動器が 1 台選択されかつ起動位置にあること
- (vii) 直流電動機の界磁抵抗器が起動位置にあること
- (viii) 励磁電源が正常であること
- (ix) 二次側の接触器 (6 および 72) が起動位置にあること
- (x) 主ポンプおよび電動機の軸受油面が規定以上であること
- (xi) その他の保護継電器が動作していないこと

ポンプの速度がクレーン運転の最低速度近くになると、速度発電機 (PG) の出力電圧を検出するリレー (14C) により切替比較用回路 (60X) を閉じ IM の 2 次電圧と DCM の起電力との差が 10V 以下になるとき、これを電圧リレー (60) が検出し 42 を投入クレーン回路を形成しついで 6 を開き切替時の直流電流を小さくするようにする。試験結果では切替時の電流を定格電流の 15% 以下にすることができた。クレーンに切替えられるとさらに界磁抵抗器で速度が上昇し、ポンプに逆流しない程度の低速度を 14P₁, 14P₂, 14P₃ (1 台目 80%, 2 台目 82%, 3 台目 90%) により検出しその速度にいったん保持し、吐出弁を開き、起動追加により吐出量に大幅な変化を生じないようにしている。このことはポンプ吸水位の異常低下と吐出圧の異常上昇を防ぎ、締切運転時の振動の軽減となりかつ自動制御系へのじょう乱を少なくしている。吐出弁全開により揃速回路が閉路し、ポンプの速度は設定流量に応じ揃速されて運転にはいる。

ポンプの速度調整も吸水位の異常低下、吐出圧の異常変動が生じないように後述するサンプリング調整器により、界磁抵抗器の操作電動機にパルス状の電圧を与えてゆるやかな調整が行なわれるようにしている。普通停止の場合は停止指令により揃速回路を開いて起動時と同様逆流を生じない程度の速度 (14P₁, 14P₂, 14P₃ 検出速度) まで停止せんとするポンプの速度を自動的に下げ、そこでいったん保持して弁を全閉して、52 を開き 42, 72, 41D を開いて停止させている。第 11 図はそれらの動作順序を示すフローチャートである。

6.2 界磁調整法⁽⁸⁾

直流電動機の界磁調整範囲はセルビウス方式に比べクレーン方式



第 11 図 機器動作フローチャート

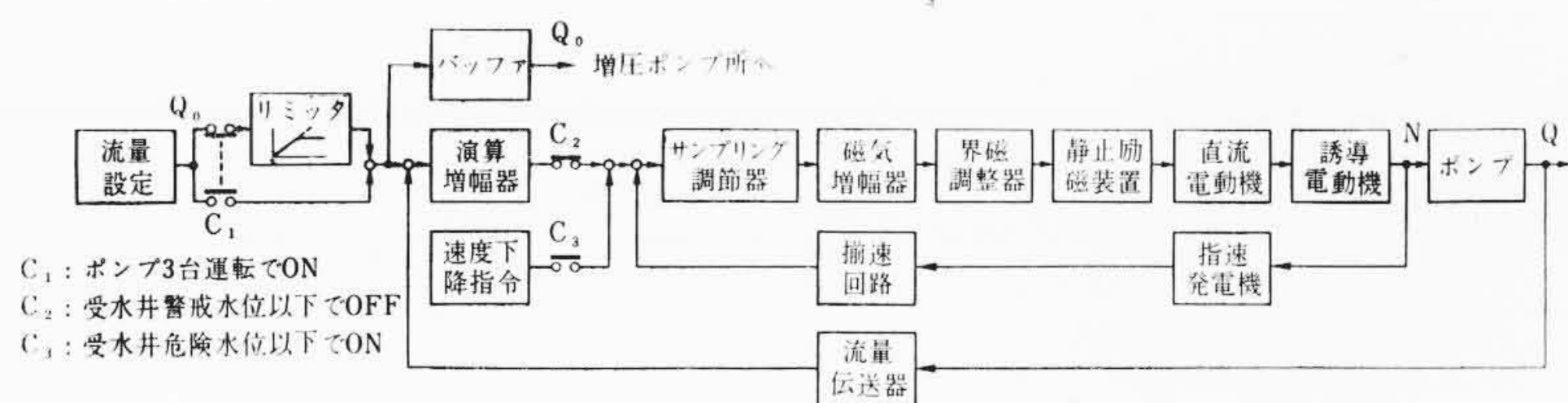
のほうが同じ速度調整範囲のとき広範囲となるが、本設備においては 87A より約 3A 程度に及ぶ広範囲となっている。この励磁源として大容量磁気増幅器を用い、その整流器にシリコン整流器を採用して静止励磁電源装置を用いている。しかし磁気増幅器の場合は 87A の定格電流のものでは 8A 以下の微小電流を安定に得ることがむずかしいため、本設備では 87~20A の間を磁気増幅器によって電流調整し、20A で界磁回路の接触器 70FX を開き、界磁調整器 70F の抵抗を零の状態で見磁に直列にそう入し、20~3A の間はその抵抗変化によって界磁調整を行なっている。界磁調整は最終目的の流量を直線に調整するようにすることが望ましいが 1 台、2 台、3 台運転時その関係が異なるので、電動機回転数を直線的に調整するようにしている。

6.3 自動流量制御法

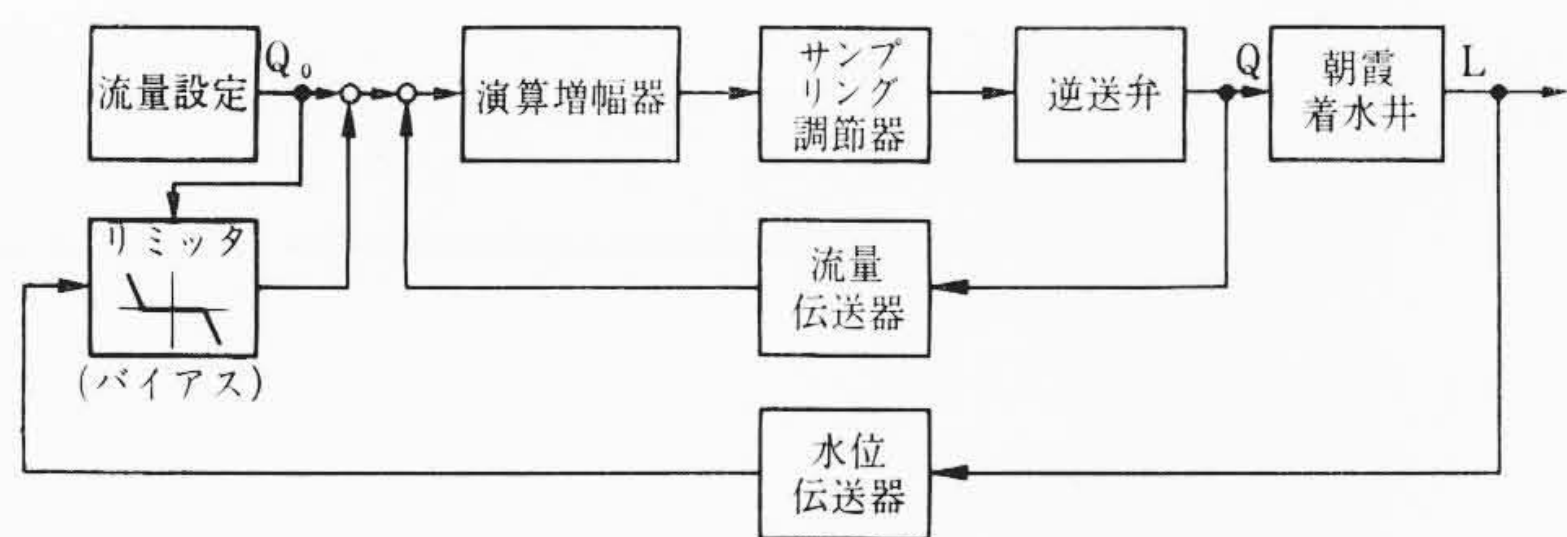
第 12 図は流量自動制御系のブロック図である。本ポンプの台数および回転数を調整して利根川系原水を東村山着水井に送水する場合 (順送) はあらかじめ決められた設定流量に吐出流量を保つよう流量一定制御を行なっている。複数台運転時はそれらのポンプは自動揃速運転を行ない、さらに近く東村山と朝霞の間に増圧ポンプが設置されると 2 台運転時設定流量によっては、本原水連絡ポンプが過大流量になる危険があるので設定流量を制限する回路を付加している。

また本ポンプを使用せず東村山着水井より朝霞着水井へ自然流下で送水する場合 (逆送) は朝霞着水入口に設けた逆送弁の開度を調整し、あらかじめ決められた設定流量に逆送流量を保つよう流量自動制御を行なっている。この場合朝霞着水井の越水および異常減少を防ぐため制限回路を設けその制限値を越えるときは弁の全閉、全開を行なうようにしている。その制限値は設定流量に応じて自動設定する。

この自動制御回路の構成には磁気増幅器式演算増幅器と磁気増幅

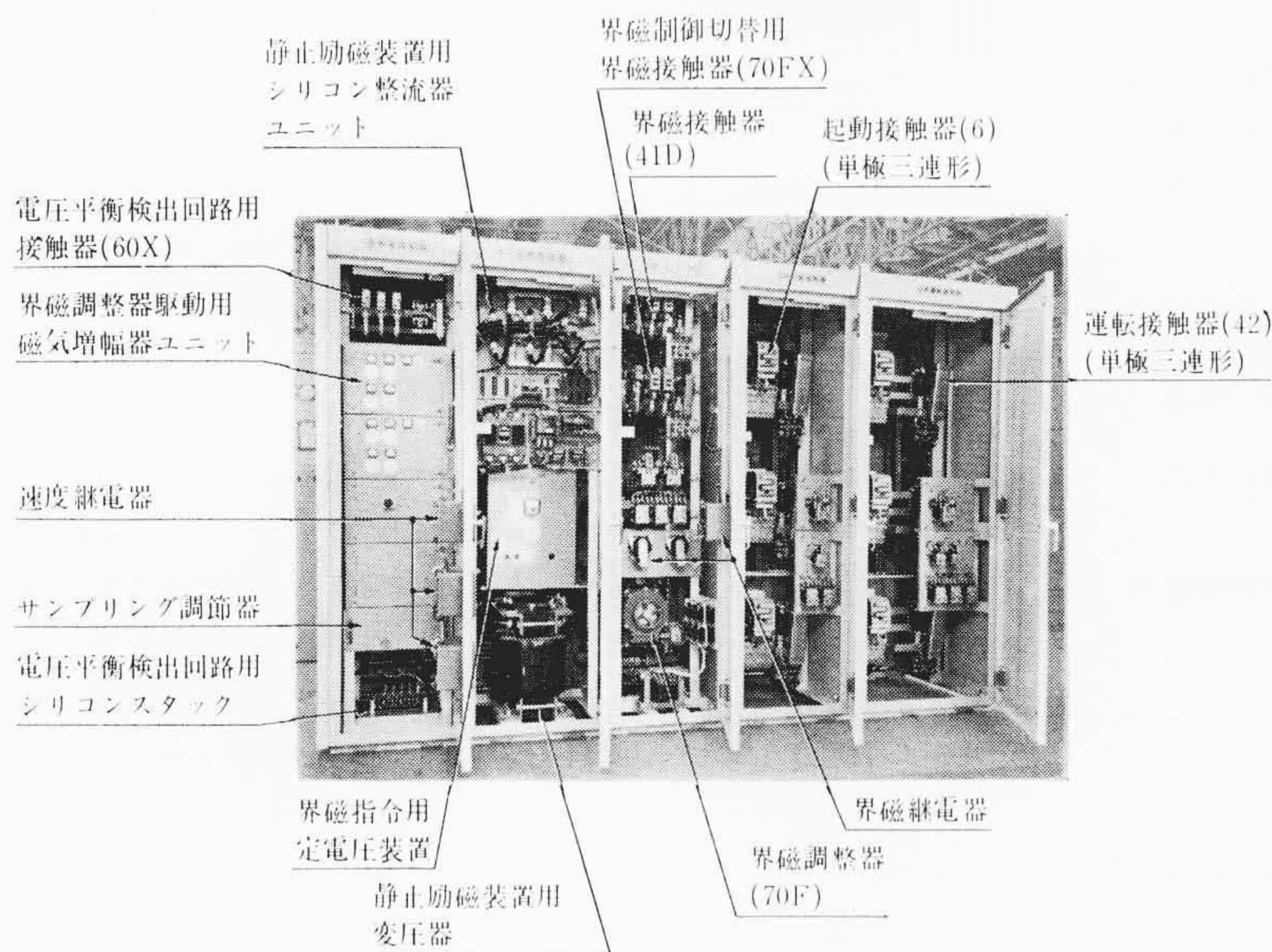


(a) 順送流量制御系

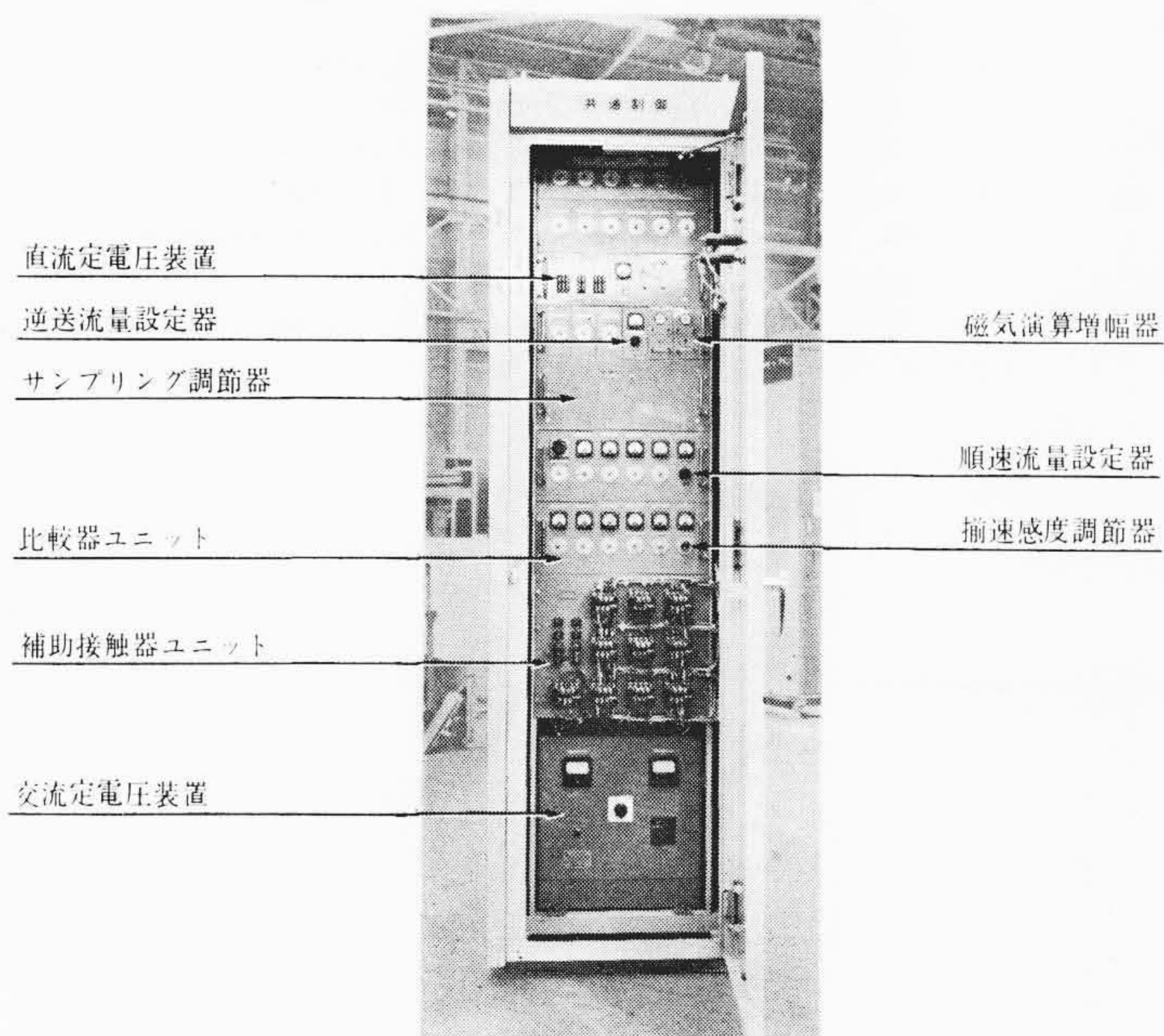


(b) 逆送流量制御系

第12図 流量制御系ブロック図



第13図(a) クレーマ制御盤



第13図(b) 自動制御盤

器式サンプリング調節器を用い、系の安定と信頼性を高めている。サンプリング調節器はアナログ入力をパルス状出力に変換するもので、入力電流(偏差電流)が 0.7 mA のときオンタイム 1 秒、オフタイム 6 秒、3 mA のときオンタイム 1.5 秒、オフタイム 2.5 秒、6.5mA でオンタイム連続となるように設計されている。

6.4 保護警報方式

保護警報方式は重故障と軽故障に分けられ、前者は原水ポンプ場監視室にベル警報を行ない、その監視盤上の故障表示器に点灯し照光シンボルをフリッカーするとともに、一次遮断器 52、および界磁回路 41D を開き 42 および 72 を開いて、電動機を非常停止するとともに吐出弁を閉じるようにしている。後者はブザー警報し故障表示器を点灯し警報するのみで、一次遮断器を開くことはしない。保護の種別と要領は下記のとおりである。

(i) 誘導電動機の保護

- (a) 軸受油面低下(軽故障) (b) 軽過負荷 (150~120%程度(軽故障)) (c) 過負荷と過電流(重故障) (d) 軸受過熱(重故障) (e) 冷却水の減少(重故障) (f) 一次回路接地(重故障) (g) 低電圧(重故障)

(ii) シリコン整流装置の保護

- (a) シリコン整流装置の温度上昇(軽故障) (b) シリコン整流素子の短絡(軽故障)

なお 72 開路時 52 を開くと IM の 2 次側に高いサージが発生しシリコン整流装置を損傷するのでシーケンス上かかるとが生じないように考慮するとともにセレンアレスタを並置して保護の万全を期している。

(iii) 直流電動機の保護

- (a) 界磁過励磁(軽故障) (b) 電機子過電流(重故障) (c) 過電圧(重故障) (d) 界磁喪失(重故障)

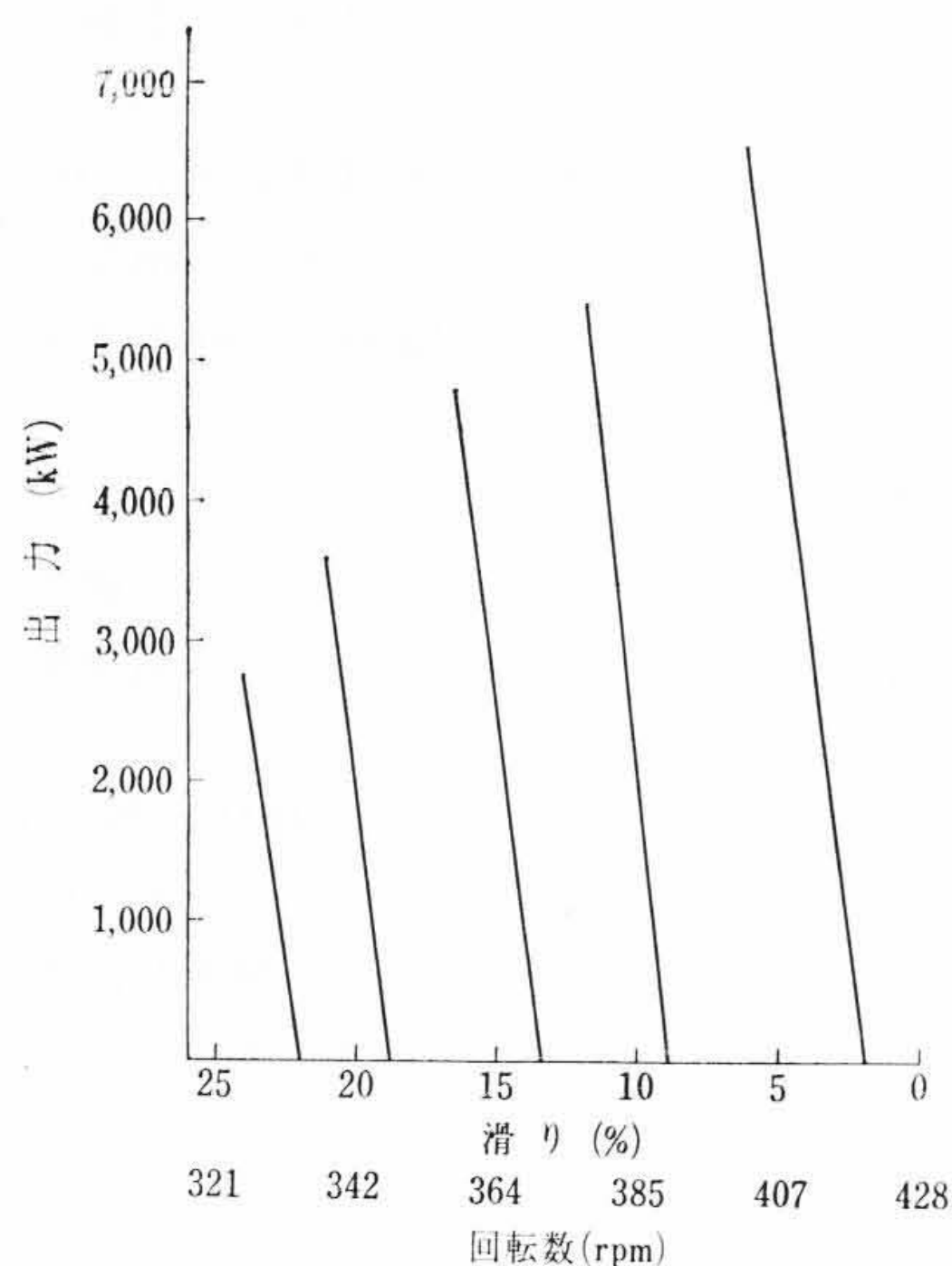
なお直流電動機にせん絡を生じた場合は過電流にて検出し 52 を開き 41D で界磁回路を開きかつ界磁に放電抵抗を接続して 0.1 秒の時定数で界磁電流を零とし被害をできるだけ小さくするようにしている。

(iv) ポンプおよび補機の保護

- (a) 主ポンプ軸受過熱(重故障) (b) 起動渋滞(重故障) (c) 主ポンプ軸受油面低下(軽故障) (d) 受水井下限水位(重故障)、同危険水位、警戒水位(軽故障) (e) 朝霞着水井上、下限水位(軽故障) (f) 東村山着水井上、下限水位(軽故障) (g) 圧油槽内油圧低下(重故障) 同油圧上昇(軽故障) (h) 圧油槽内油面上昇(軽故障) (i) 貯油槽油面低下(軽故障) (j) 主ポンプ運転中の冷却水ポンプ全台停止(軽故障) (k) 主ポンプ温度上昇(軽故障) 同締切運転(軽故障) (l) 冷却水ポンプ締切運転(軽故障) (m) 圧油ポンプ 2 台目起動(軽故障) (n) 補機—圧油ポンプ、空気圧縮機など—過負荷(軽故障) (o) ポンプ回転数上下限(軽故障)

このうち(b)の起動渋滞は、操作開閉器を「起動」側に操作したのち、吐出バイパス弁が開きはじめるまでの時間、ならびに起動よりクレーマ運転への切替時間がそれぞれ設定時間以上になった場合の保護である。

(d)の受水井位低下に対する保護は、自動制御中下



第14図 速度負荷特性

記のように行なわれる。すなわち受水井水位が警戒水位以下になるとポンプ回転数は警戒水位のときの値に保たれ、さらに危険水位以下になれば、最低回転数まで強制的に下げられる。なお水位が低下し下限水位に達すれば非常停止する。

以上制御装置の設計上留意した点について説明を加えたが、これが本設備の制御装置の特長ともいってよい事項である。本設備は原水ポンプ場監視室よりの一人制御で操作監視できるようになっており、その操作法も監視室を小さくするため特殊な方法が用いられており監視に便利のように照光式シンボル表示が行なわれている。

第13図aはクレーマ制御盤の外観、第13図bは自動制御盤の外観を示したものである。

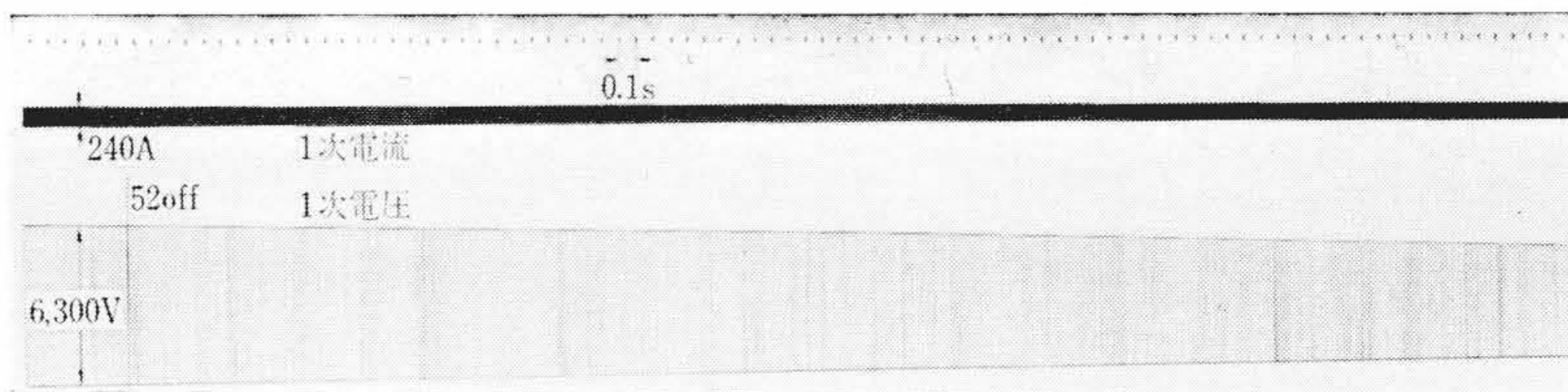
7. 試験結果

7.1 総合特性

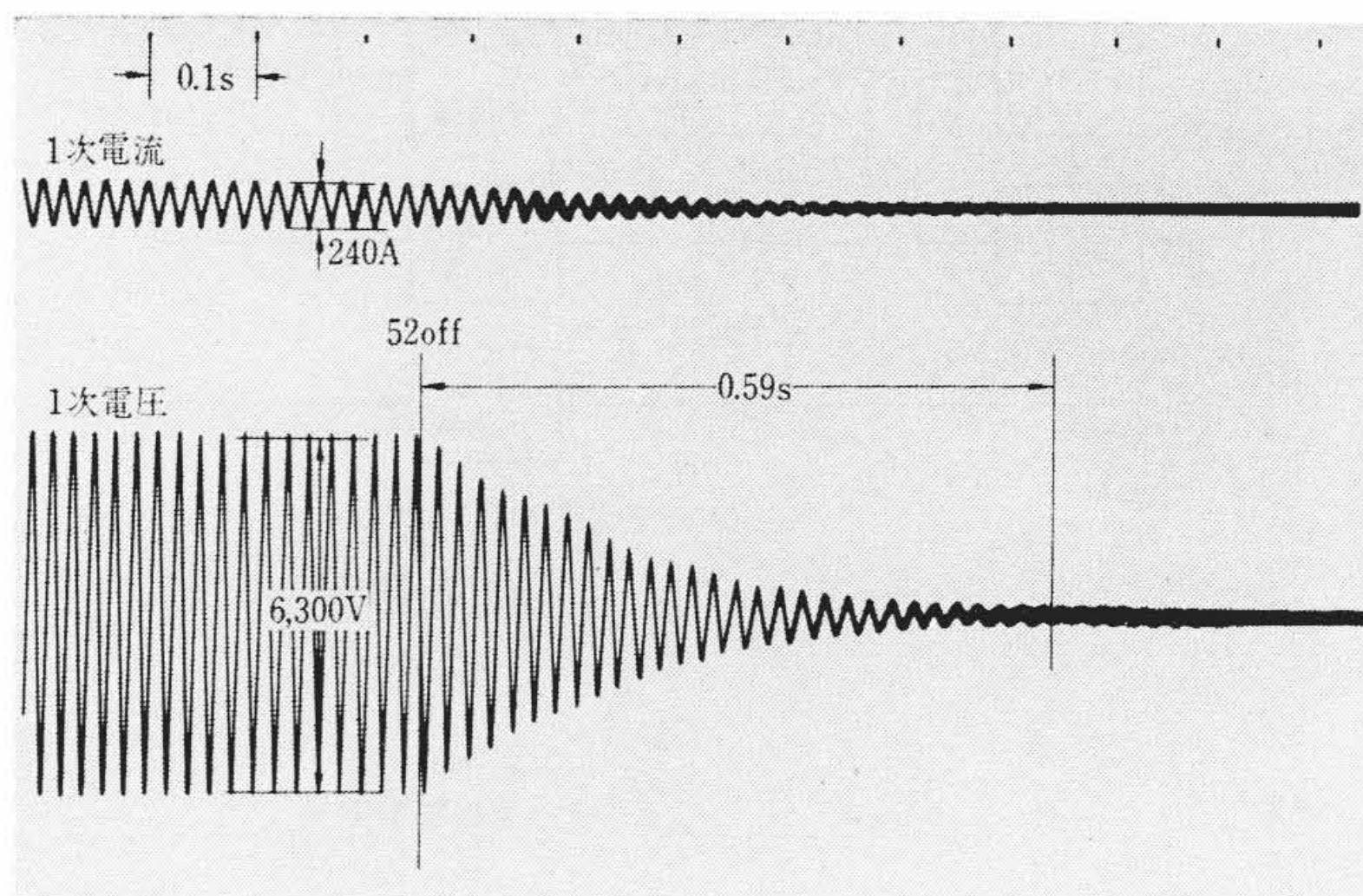
直流電動機界磁電流をパラメータとして速度負荷特性を第14図に示す。これは(14)、(15)式の実測データである。

7.2 残留電圧

前述のように総合力率改善のために静止蓄電器を誘導電動機に並列に永久接続している。その容量は万一誘導電動機が二次短絡状態で電源遮断が行なわれても自己励磁による残留電圧上昇を起こさない範囲で3,100 kVAと決められたが、これは確認試験によって確かめられた。このオシログラムを第15図に示す。クレーマセットの場合は誘導電動機の二次側には直流機という抵抗分があることになるので電源遮断時の残留電圧の減衰ははるかに早い。この場合の測定結果は第16図に示すとおりである。



第15図 二次短絡時残留電圧オシログラム



第16図 クレーマセット残留電圧オシログラム

8. 結 言

このたび完成した東京都水道局納 6,200 kW クレーマセットについてその原理、構造、特長、試験結果について述べるとともに、特にシリコン整流器を使用したセットとしては初めての本格的なものであるから、それがはいたために考慮をはらった点についても詳述した。

本セットは現在好調に運転中であり、予定どおりの高効率が得られるとともに、振動騒音ともきわめて少なく、好評を得ている。この成功によってさらに大容量のものへの製作の見とおしを得ることができた。

終わりに本クレーマセットについて終始ご指導をいただいた東京都水道局の各位に深く感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) 堀：電気学会東京支部大会予稿（昭37-10）
- (2) 電気学会編：水銀整流器（昭35-2）
- (3) 広平輪：電気学会中国支部大会予稿（昭39-11）
- (4) 武田：三菱電機 Vol. 35, No. 11 (1961)
- (5) W. V. Lyon: Transient Analysis of Alternating Current Machinery (1954)
- (6) F. W. Gutzwiller: AIEE C. P. No. 69 (1960)
- (7)(8) 実用新案申請中