

大 阪 市 水 道 局 納

2,100 kW サイリスタセルビウス装置

2,100 kW Thyristor Scherbius Set for Osaka City Water Works Bureau

藁 谷 弘 治*
Hiroji Waratani地 福 順 人*
Yorito Jifuku平 輪 憲 道*
Norimichi Hirawa

要 旨

大阪市水道局楠葉取水場の取水ポンプとして納入したポンプ設備は、サイリスタを使用した静止セルビウス方式で速度制御を行っており、これに使用する 2,100 kW 誘導電動機はサイリスタセルビウスとしてわが国最大のものである。セルビウス方式は本質的に効率、運転特性などの点ですぐれているが、サイリスタ使用により従来の M-G セルビウス方式よりいっそうの利点が生かされる。本文では特性、インバータ運転、制御方式などについて述べ、あわせて本セットの仕様を紹介する。

1. 緒 言

本取水ポンプ設備は上水道用であるため、需要の変動に応じて広範囲の水量調整が必要となる。このためポンプの速度制御としては誘導電動機の二次抵抗制御が最も簡単でかつ設備費も安価であるが、抵抗制御に伴うすべり電力の損失が大きくなる。都市ポンプのように長期間連続運転する場合は、この電力損失は電力費の大幅な増加となる。しかも本設備のように大容量機 3 台の大形設備では、この電力費節減をいかにして行なうかが大きな問題となる。近年、半導体整流器が大容量まで実用化されてからは、この問題の解決法としてクレーマ方式⁽¹⁾、M-G セルビウス方式⁽²⁾、すなわちシリコン整流器と直流電動機または M-G セットを用いた二次励磁法によって、すべり電力を機械的、電気的に返還する方式が実用化され、ますます盛んになっている。

最近ではこれらの方式に加えて、M-G セットのかわりにサイリスタ・インバータを用いたサイリスタセルビウスが実用段階にはいった。この方式では効率、運転特性に加え保安の容易性、制御装置、設備据付などの点で M-G セルビウスに比較してすぐれた特長を持っている。日立製作所では早くから静止セルビウスの基礎研究を行ない、サイリスタ・インバータの制御方法を確立した。本設備においてはサイリスタ・インバータの長所をじゅうぶんに生かすため、インバータをコンバータ領域でも運転するなどの考慮を払っている。以下本設備の概要につき述べる。

セルビウス方式の原理についてはすでにくわしく述べられているので⁽³⁾⁽⁴⁾詳細は省略する。

2. 設 備 の 概 要

この取水ポンプ設備は豊野浄水場に原水を揚水するためのものであって、現在は 3 セットで運転される。速度制御のためのサイリスタセルビウスセットは主電動機 1 台に 1 セット設けるユニット方式である。構成機器は誘導電動機二次すべり電力直流変換用シリコン整流器、直流リアクトル、サイリスタ・インバータ、インバータ変圧器、制御機器などである。

取水ポンプは公称 40 万 t/day である。

本設備の主な特長としてはサイリスタ・インバータをコンバータ領域運転して最高速度を M-G 方式以上にとること、特殊仕様の速度発電機を用いて並列運転時の揃速精度を高くしたことなどでこの利点についてはあとの項で説明する。

2.1 主電動機仕様

台	数	3
---	---	---

* 日立製作所日立工場

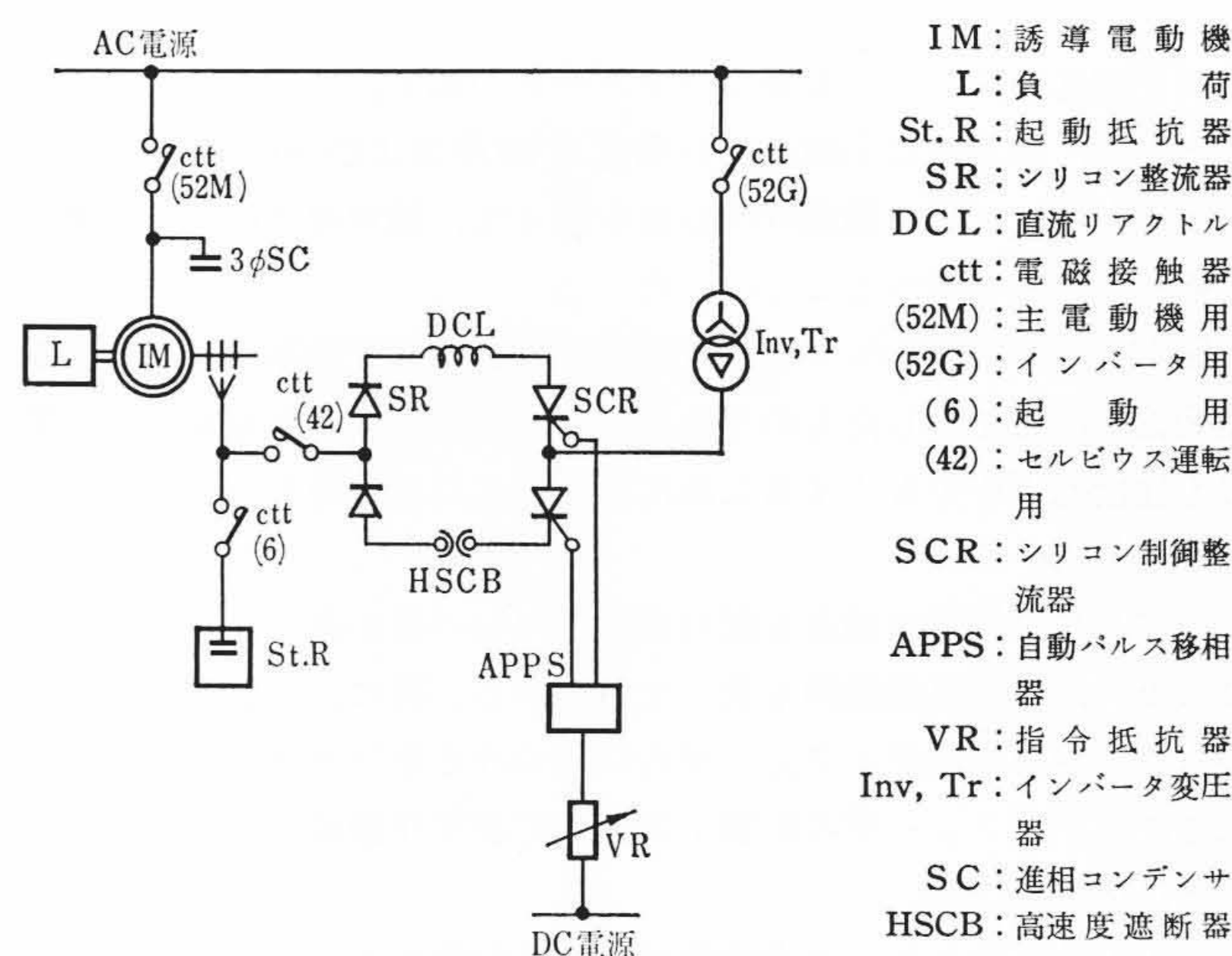


図1 サイリスタセルビウス方式制御回路図

出力	2,100 kW
用途	横軸両吸込ポリュートポンプ
形式	横軸全閉内冷形巻線形回転子
電圧	6,600 V
周波数	60 Hz
極数	14 P
速度範囲	506~354 rpm (100~70%)
騒音	75 ホン以下

2.2 電力変換設備仕様

台数	3 セット
(1) シリコン整流器	457 V 1,690 A
(2) サイリスタ・インバータ	380 V 1,370 A
(3) インバータ変圧器	900 kVA 6,600 V 60 Hz
(4) 直流リアクトル	
(5) 高速度遮断器	

3. サイリスタセルビウスの特性

シリコン整流器とサイリスタ・インバータの組合せによる静止セルビウスの原理ならびに一般的な特性については、すでに詳細が述べられているので⁽³⁾⁽⁴⁾ここでは便宜上図1に示す制御回路について主として本設備の特性を述べる。

3.1 二次励磁の方法

速度を変化するための二次電圧制御はインバータの制御進み角を変えて行なわれるが、これは M-G 式で直流電動機の界磁電流を変

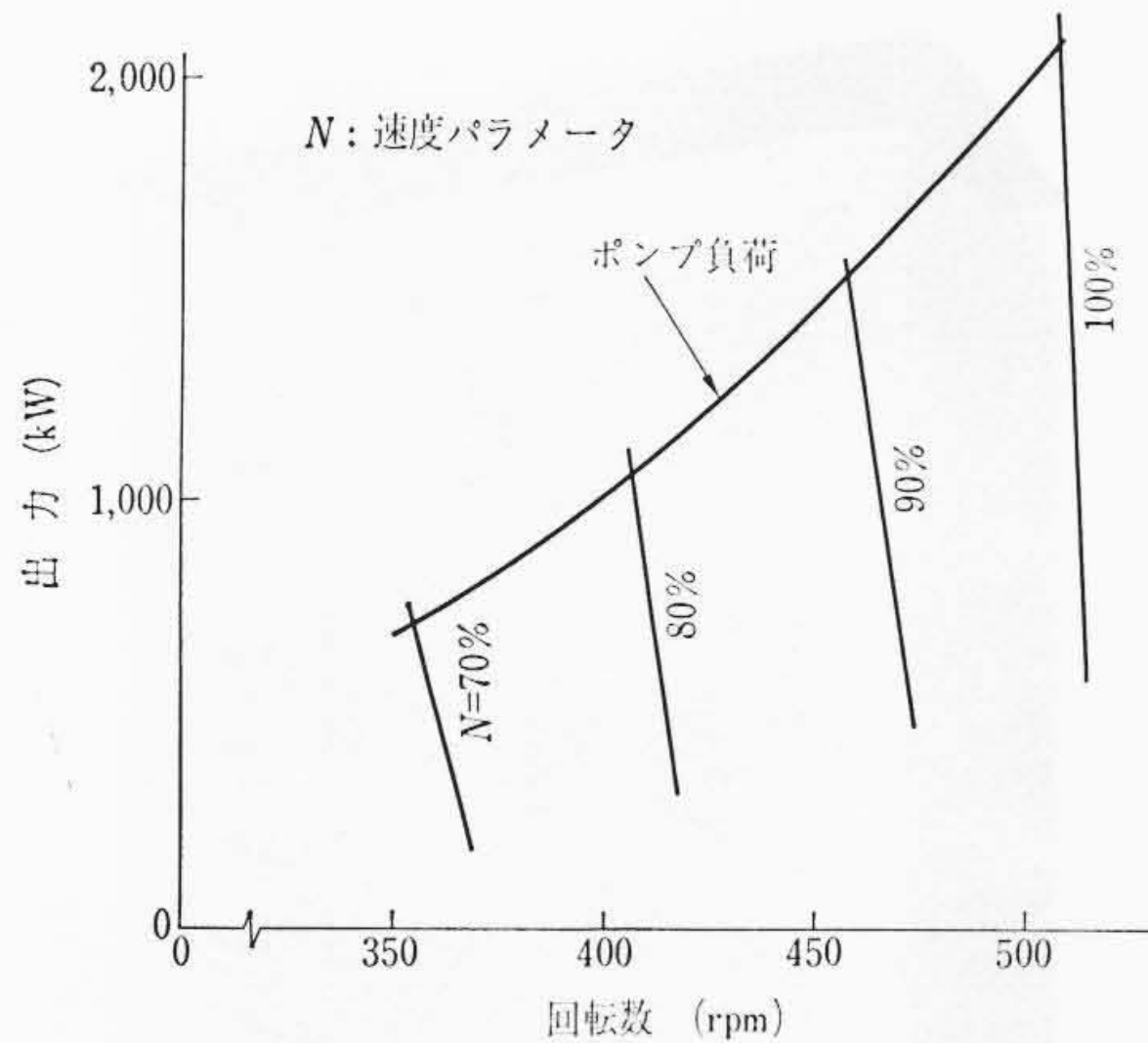


図2 速度負荷特性

えて逆起電圧を変えるのに相当している。したがって、インバータの入力側は M-G 式と変るところがない。

インバータの入力電圧、電流は M-G 式と同じ考え方で求めることができる。

制御進み角 γ の変化は自動パルス移相器(図1の APPS)によって行なわれる。インバータは他励であるので、インバータトランスから与えられる逆電圧によってサイリスタの転流が行なわれる。 γ を小さくすればインバータトランスの直流側における逆電圧が大きくなり、電動機二次側の整流電圧がこれに釣合うまで大きくなるので、すべりが大きくなる。

速度をあげるには γ を大きくすればよい。

3.2 速度—トルク特性

二次励磁法による速度—トルク特性は速度変動率の小さい、いわゆる分巻特性である。この場合、回路の抵抗、リアクタンスが大きいほど変動率は大きい、抵抗制御に比較すれば非常に小さい。ただしポンプ駆動では、負荷の目的からも変動率はあまり重要でない。本設備の特性の一部として、図2に実測データを示した。

3.3 最高速度

サイリスタ・インバータ運転では無負荷であっても、サイリスタおよびインバータ・トランスの逆電圧の残留のためにすべりは2～3%は残る。M-G 式の場合にも直流電動機の残留電圧のために、すべりは数%残る。サイリスタを使用すれば、この逆電圧をなくし、インバータ直流側の電圧をさらに小さくして、すべりを小さくすることが若干の制御回路の追加で可能となる。 γ を90度より少し大きくすると、インバータはコンバータ領域で動作し、直流側電圧は電動機二次すべり電圧の整流電圧を小さくするように働くのですべりが小さくなる。M-G 式の場合は直流電動機の界磁を逆方向にすると同様の効果が得られるが、正→逆の途中で界磁電流ゼロの

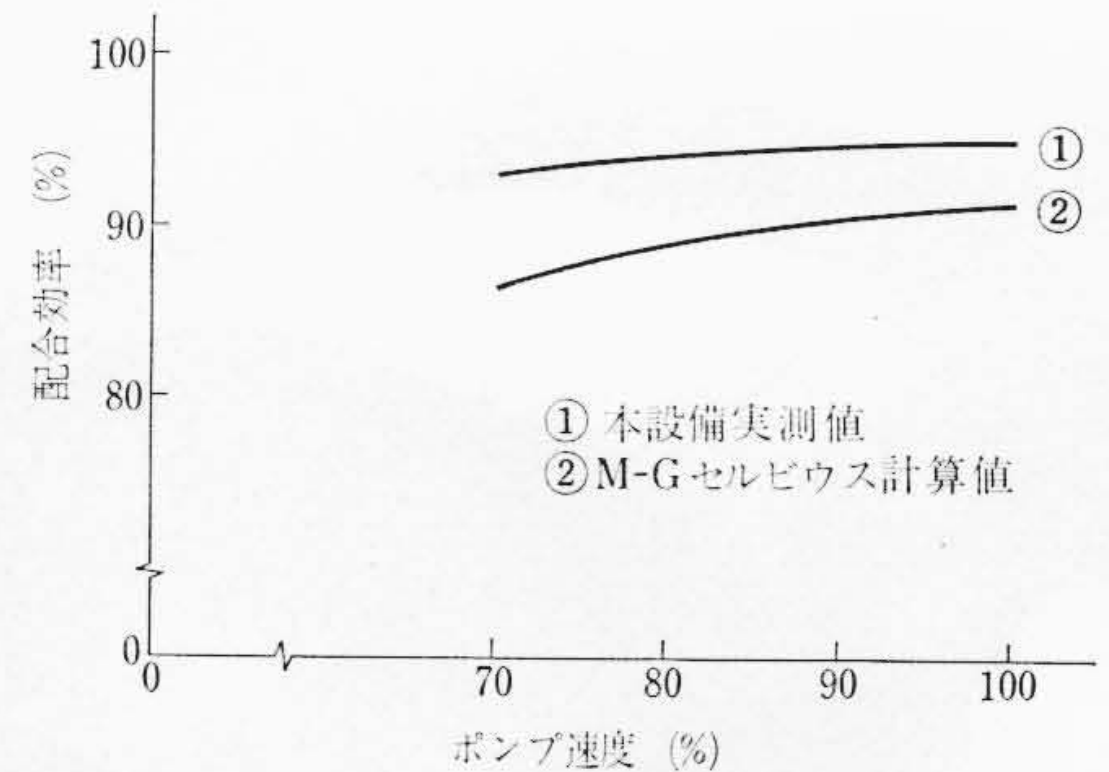


図3 総合効率

点があり、制御上実用的でない。サイリスタの場合は連続的に変化できるので操作が容易である。

定格負荷における最高速度を大きくすることは、すべりが小さくなることから、

- (1) 二次すべり電力がすべりに比例して小さくなるので、電動機入力および二次電流が減少する。
- (2) 最低速度における二次電圧はすべりに比例して減少するので、セルビウス機器の最大電圧が減少する。
- (3) ポンプの回転数がすべりに逆比例して大きくなる。

などの特長があり、(1)、(2)によって、電動機、シリコン整流器、インバータなどの機器が小さくできる。またポンプは(3)によって回転数増加分が小さくできる。

本設備において最小すべり1.5%とすることによって、二次補機類で数%低減されている。

図2の100%速度に示すように、コンバータ領域運転をすることによって、ほぼ二次短絡に近い速度—トルク曲線が得られる。

3.4 総合効率

インバータが静止形であるため、損失が少なく総合効率は無負荷損の大きい M-G 式よりも良くなる。この影響は低速になるほど大きく現われる。図3に示すように、効率の実測値は70%速度でも高い値である。比較のため、本設備を M-G 式とした場合の効率の計算値を図4に示してある。

3.5 揃速運転

2台の主電動機が揃速運転されるときは、電動機の手合差が生ずることは避けられない。ポンプ負荷では、回転数の精度に対して特に高い値は要求されないが、整流回路を持つ2台の主電動機間の高調波の悪影響をさけるため、回転数差をできるだけ小さくする必要がある。このため特殊仕様の速度発電機を用い、発電機のオフセット・エラーを小さくした。

実測結果では図4の揃速運転のオシログラムが示すとおり、2台の電動機は同じ速度指令に対し、同じ速度になっている。電動機の

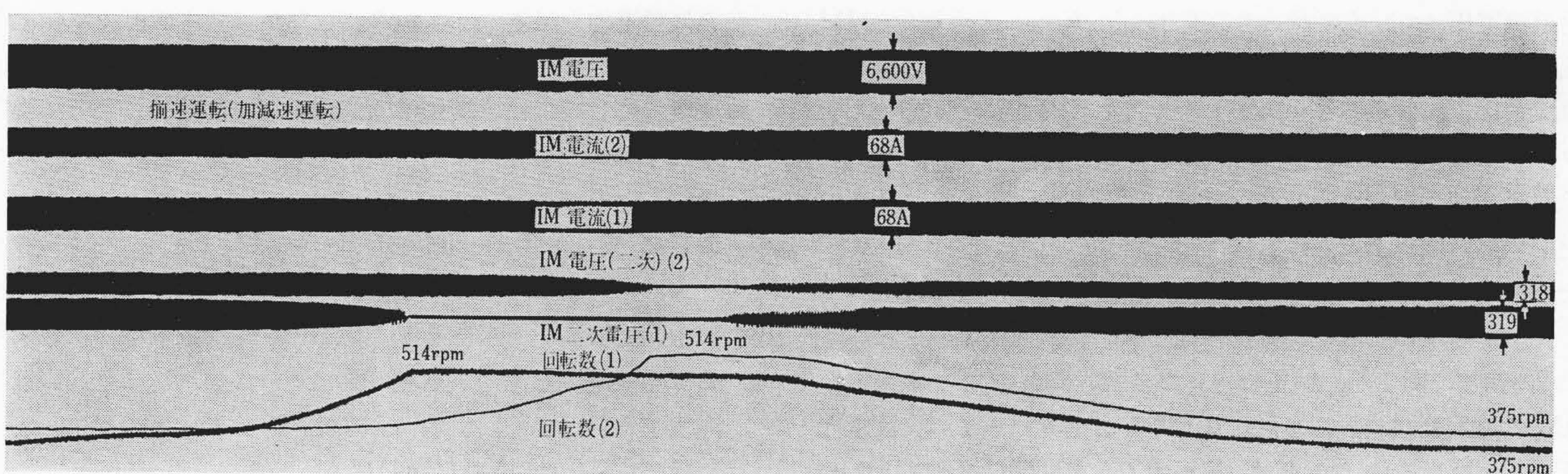


図4 2台揃速運転オシログラム

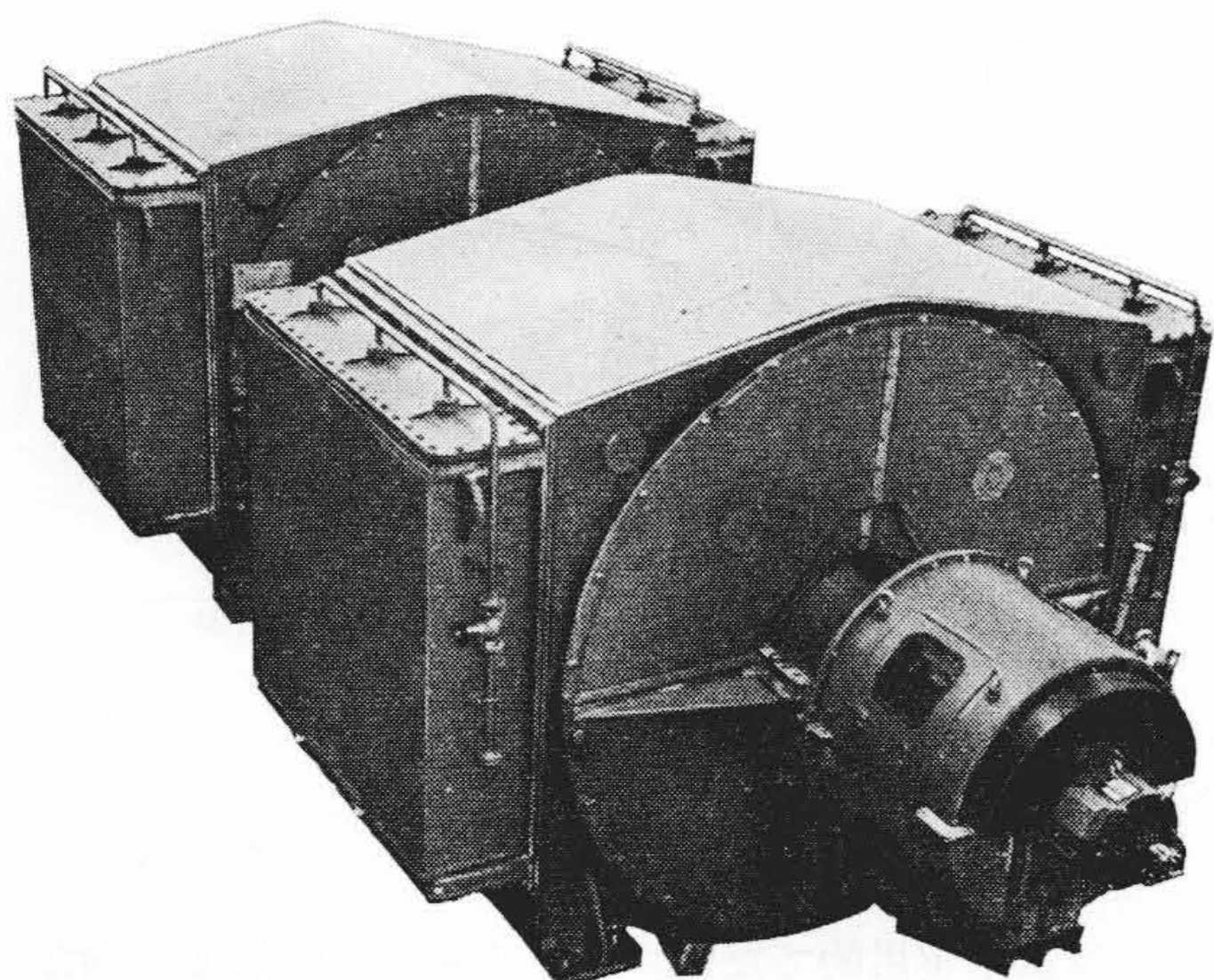


図5 組合せ試験中の 2,100 kW サイリスタセルビウスセット

入力電流は2台とも、1台運転のときと全く変動のないことがわかる。

4. 主電動機の構造

都市ポンプ用であるため、騒音 75 ホン以下を要求されたので、全閉内冷形を採用した。空気冷却器は水温最高 32℃ でも機能が發揮できるようになっている。冷却器は電動機固定子両側に2分されて配置され、機内の自己ファンによって冷却風が機内、冷却器を循環する。図5は電動機の外観を示したものである。

冷却器が横にあるため、端子箱は電動機下部に設け台床の一部にピットを設けて端子箱がはいるようにし、ケーブル接続作業がそこで容易に行なわれるようにしてある。

速度発電機は速度制御用、速度指示用の2台が直結されており、それがスリップリングの保護カバーに取り付けられ主軸と直結する構造となっている。取付構造は回転精度をよくするため、発電機のうける振動の影響が少なくなるよう考慮されている。

5. 電力変換器

5.1 変換回路の問題点

5.1.1 インバータの転流限界

静止セルビウス装置の計画においてインバータの転流余裕角の設定はきわめて重要な意味をもっている。転流余裕角の過小はインバータの転流失敗の危険性を増し、装置の運転の安定性を妨げる。一方転流余裕角の過大はインバータ、すなわちサイリスタ変換器、変圧器および直流リアクトルなどの機器容量を増大せしめ、運転時の無効電力量を増す。

インバータ転流余裕角 $(\gamma - u)$ は次式で示される。

$$E_{doi} \cos(\gamma - u) = E_{doM} + e_x - e_\gamma - e_M$$

ここに、 E_{doi} : インバータの制御進み角 $\gamma = 0$ における等価無負荷直流電圧、 u : インバータの重なり角、 E_{doM} : 誘導電動機 IM の速度調整範囲内の最大スリップにおけるシリコン整流器の無負荷直流電圧、 e_x : 変圧器、サイリスタ変換器、直流リアクトル、シリコン整流器の抵抗分による電圧降下、 e_M : IM の内部電圧降下。

インバータが安定に動作するためには $(\gamma - u)$ がサイリスタのターンオフ時間以上でなければならない。

一般にインバータの安定運転上問題となる点は、直流電圧の上昇、インバータの交流電源電圧の低下および負荷電流の増大による e_x の増加であるが、静止セルビウス装置においては直流電圧は IM の速度範囲から押さえられること、インバータの交流電源電圧の低下は上式の E_{doi} と E_{doM} が両方とも同時に変動するため $\cos(\gamma - u)$ はほぼ一定に保たれること、本装置はポンプ制御用で

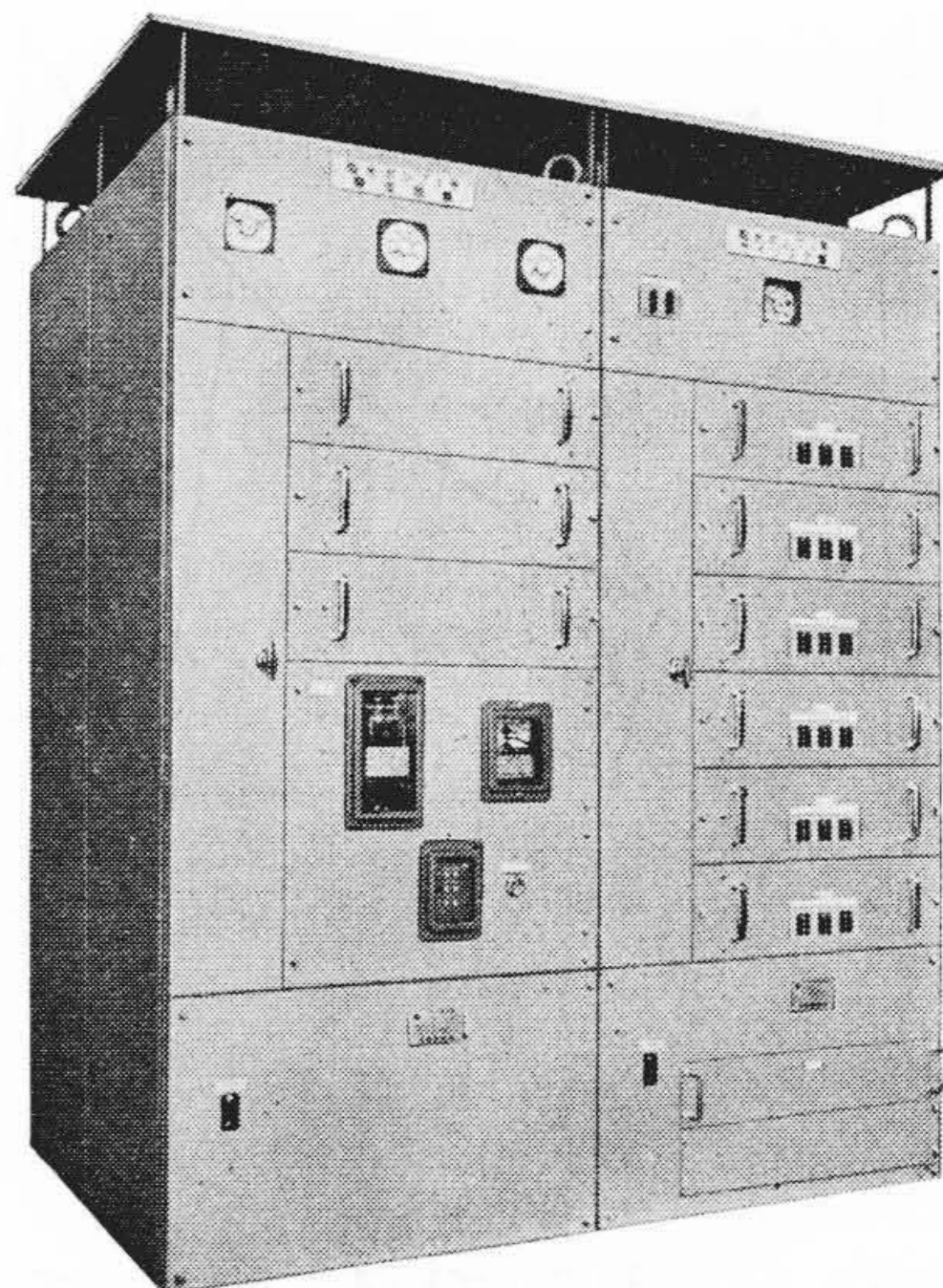


図6 シリコン整流器(左)およびサイリスタ変換器(右)

あるため E_{doM} の高くなるほど、すなわち IM の速度が低下するほど返還電流が減少し e_x の影響が少なくなること、また $e_x < e_r + e_M$ の条件が満足されることのために、インバータとしては安定な動作条件となっている。

本装置においてはサイリスタのターンオフタイム、交流電源のインパクトドロップおよび転流時の振動を考慮して E_{doM} が 475 V に対し E_{doi} を 513 V に設定した。また自動パルス移相器 (APPS) においては、電源変動により γ が影響を受けない特性とし、さらに γ を 15 度以下に移相しない特性とした。

5.1.2 直流電流のリップル

整流器を使用する回路では直流電圧にリップルを生じ、したがって直流電流にもリップルを生ずる。IM の 2 次交流電力を整流するシリコン整流器のリップルの絶対値は低いが交流が低周波で周波数が変動するためインバータの転流に影響を与える。インバータのリップルは移相制御を行なうため絶対値が大きく IM 2 次電流の無効高調波分を増大させる。したがって直流回路には直流リアクトルをそう入し直流電流のリップルを $\pm 10\%$ 以内に押えた。本直流リアクトルはあとに述べるインバータの転流失敗時における短絡電流の抑制にも役だつ。

5.1.3 力率

静止セルビウス装置の欠点の一つは力率の悪いことである。IM は 2 次回路を直流に整流するため 2 次回路の重なり角の影響で本来の力率以下に低下する。一方インバータの力率はほぼ $\cos \gamma$ となるため最低速度では 90% 近い力率となるが、最高速度では直流電圧がほぼ 0 となるため γ は 90 度前後となり力率はほぼ 0 となる。また負荷電流は力率 0 で最大となるため変圧器と同一容量の無効電力を出すことになる。したがって本装置では無効電力補償用スタティックコンデンサ (SC) をそう入する。無効電力は IM 速度に応じて大幅に変化するため、IM の速度に応じて SC の部分的な切入制御を行ない、力率を 95% 程度に保持するよう計画されている。

5.1.4 高調波

大容量静止セルビウス装置のいま一つの欠点は交流電源に高調波を発生することである。インバータは交流電源に次式で示される高調波電流を流し、電源のインピーダンスにより高調波電圧を発生する。

$$I_u \leq I_1 / n \quad N = (P \pm 1) m$$

ここに、 I_u : 高調波電流、 I_1 : 基本波電流、 n : 高調波次数、 P :

表 1 シリコン整流器サイリスタ変換器構成

	シリコン整流器	サイリスタ変換器
最大直流電圧	457 V	457 V
最大直流電流	1,690 A	1,690 A
整流素子形式	D J 16 M	C J 02 X
整流素子定格平均順電流	300 A	250 A
整流素子定格順逆耐電圧	1,300 V	1,200 V
整流素子構成	1S×6P×6A	1S×6P×6A
結線方式	三相ブリッジ結線	三相ブリッジ結線
冷却方式	風冷式	風冷式
キュービクル構造	トレイ式	トレイ式

整流相数, m : 正の整数

本装置は各インバータを6相整流とし、変圧器の一次巻線を△巻線および人巻線とし交互に配列することにより実質的には12相整流となるよう考慮し、高調波の低減を図っている。

なお、本装置の計画に当たっては交流計算盤でシミュレータによる高調波の解析を行ない、各高調波電圧とも1%以下になり特に問題は生じないという結果を得たが、最終的には現地にて実測を行ない再確認をする予定である。

5.2 シリコン整流器およびサイリスタ変換器

図6はシリコン整流器およびサイリスタ変換器の外観を表1はその構成を示したものである。

IM二次整流用シリコン整流器は交流が低周波であることから素子の電流容量に対する注意が必要となる。本装置の場合は周波数がほぼ1 Hz~19 Hzの間で変動し1 Hzのときが最大電流となるため約75%の電流の低減を必要とした。一般に三相ブリッジ結線の場合には商用周波数に対し1 Hzの場合素子の電流容量を50~80%に低減させる必要がある。

サイリスタ変換器はインバータ動作のため素子のターンオフタイムの短いことが要求ささるが、本装置では商用周波動作の他励式インバータとなるため特にターンオフタイムをつめる必要はなく、したがってターンオフタイム100~300 μs程度の高耐圧素子を使用している。

シリコン整流器は1トレイに1S×2P×6Aの素子を収納して3トレイで構成され、サイリスタ変換器は1トレイに1S×1P×6Aの素子を収納して6トレイで構成されている。冷却風はキュービクル後面下部よりフィルタを通して吸い込み、トレイ内を冷却してキュービクル上部の400 W換気扇により上面へ吐き出す構造となっている。

素子の取りはずし、交換はトレイ内に収納された、素子、冷却片、ハイラップヒューズ、およびそのほかの付属器具と1体となったスタックで行なわれる構造となっている。図7、8はシリコンおよびサイリスタスタックの外観写真である。

5.3 整流器の保護

IM二次整流用シリコン整流器は直流回路が開路された状態でIMの一次側遮断器を開路した場合、IMの励磁が大きいと異常な開閉サージにさらされることがある。したがってシーケンス上直流回路が開路のままIMの一次を遮断することを避けるとともにシリコン整流器の交流側にセレンアレスタをそう入して万一の異常サージに備えた。また直流回路の高速度直流遮断器(HSCB)には並列に抵抗をそう入し、自動遮断による直流回路の開路を防ぐとともに、HSCB自身の遮断によ

るサージ電圧を抑制している。

IMのスリップの過大による過電圧は直流過電圧リレーで保護しているが、急上昇の場合にはインバータの転流失敗に移行する。

インバータが転流失敗を生じた場合にはIMの2次回路が短絡となり過渡短絡電流は直流リアクトルで抑制してHSCBで遮断する。この場合、素子はもちろんのこと、ハイラップヒューズの溶断もないよう保護協調を考慮している。

万一素子が1個破損した場合には破壊素子をハイラップヒューズで切り放すが、その場合でも定格運転が可能なるようシリコン整流器およびサイリスタ変換器とも容量的に余裕をもたせている。なおハイラップヒューズが溶断した場合にはサイリスタ変換器は警報ヒューズで検出されるが、シリコン整流器のほうは交流の電圧および周波数が大幅に変動するため高感度のトランジスタリレーにより溶断検出を行なっている。

6. 制御方式

6.1 制御系の概要

本設備の速度制御の最終目的は、ポンプ所より約4 km離れた豊

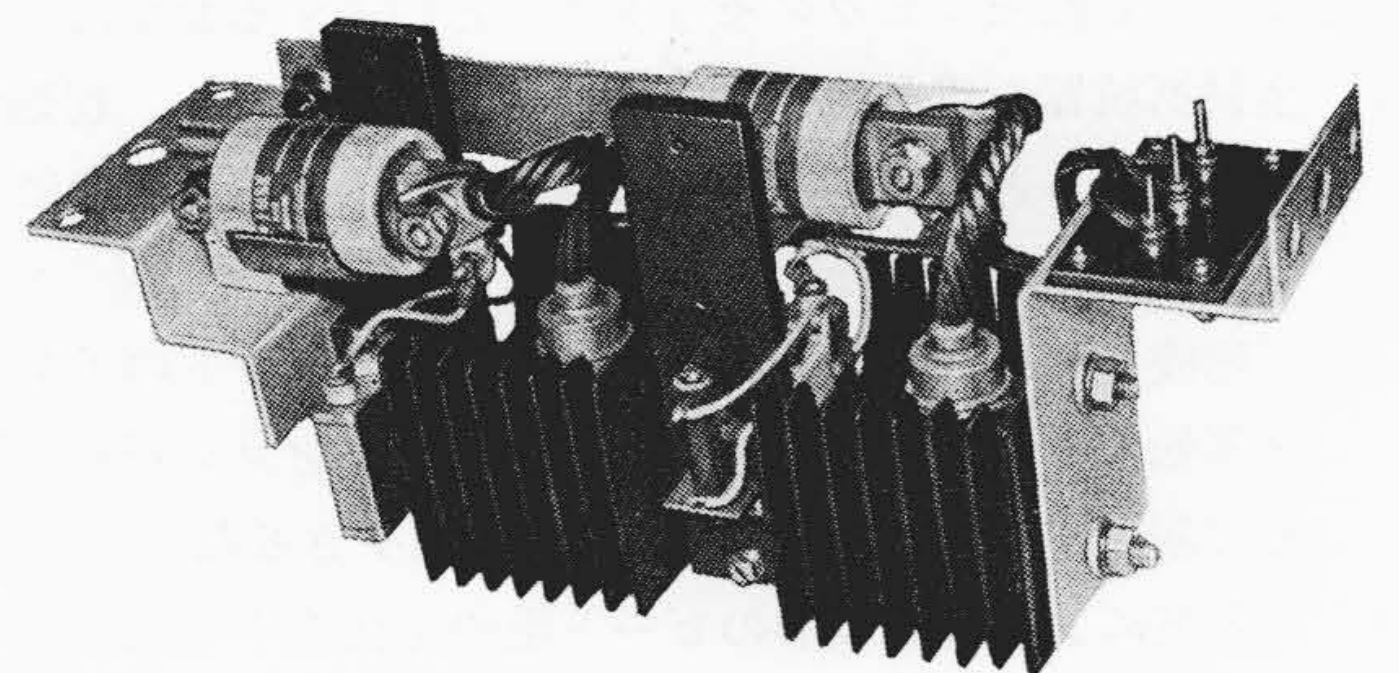


図7 シリコン整流スタック

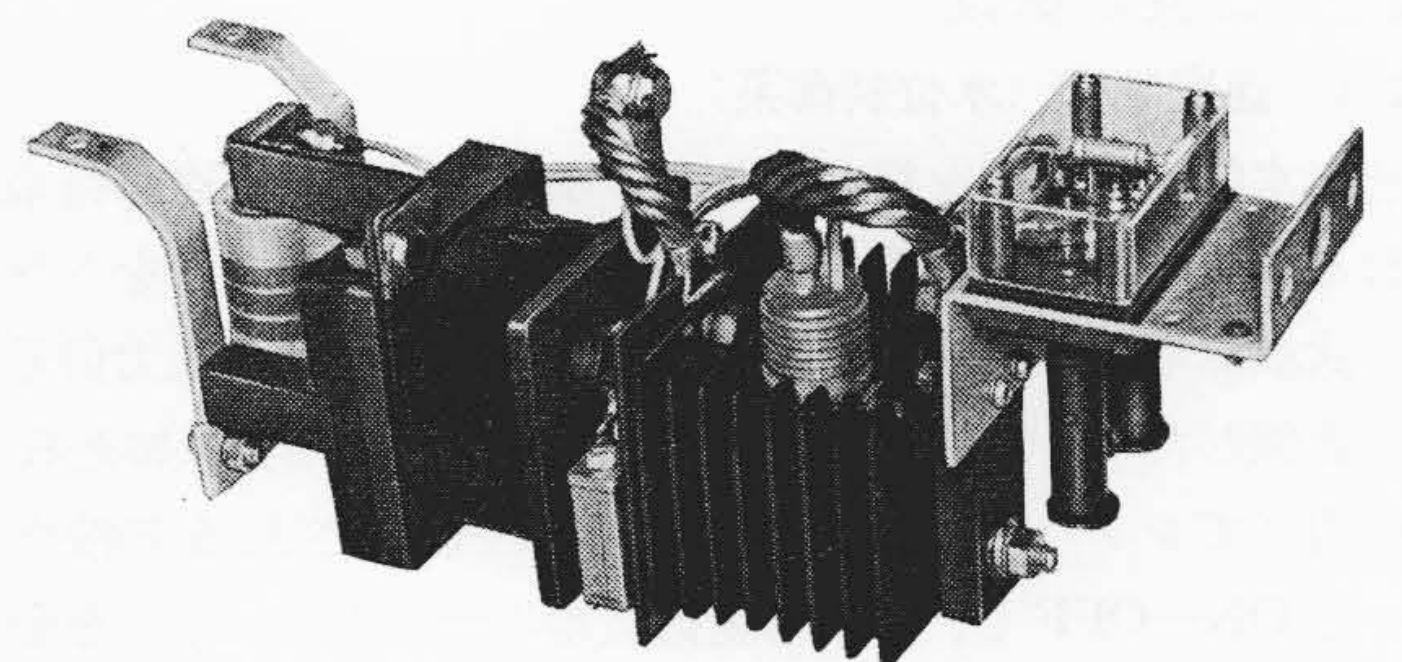


図8 サイリスタスタック

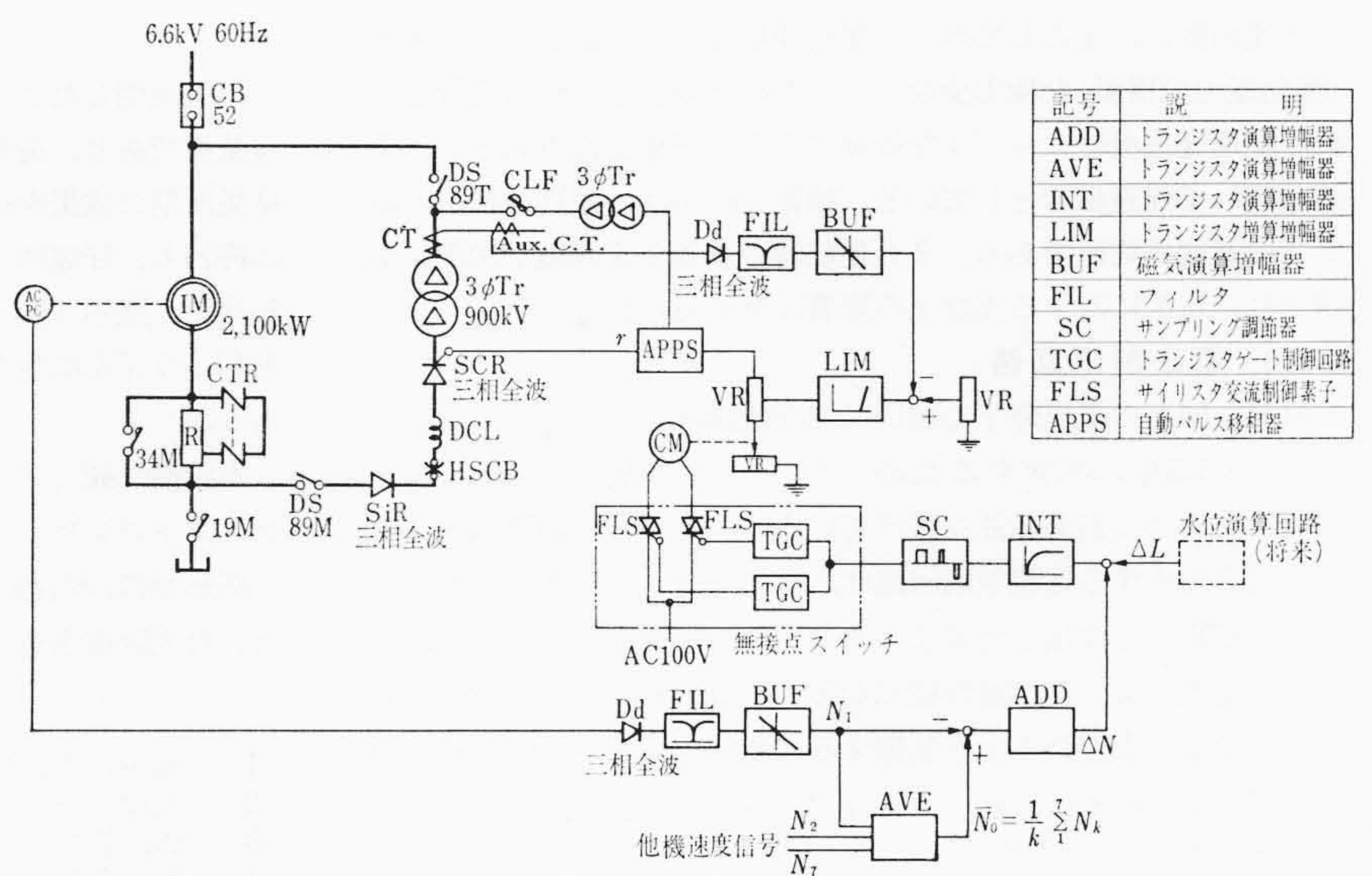


図9 制御系統図

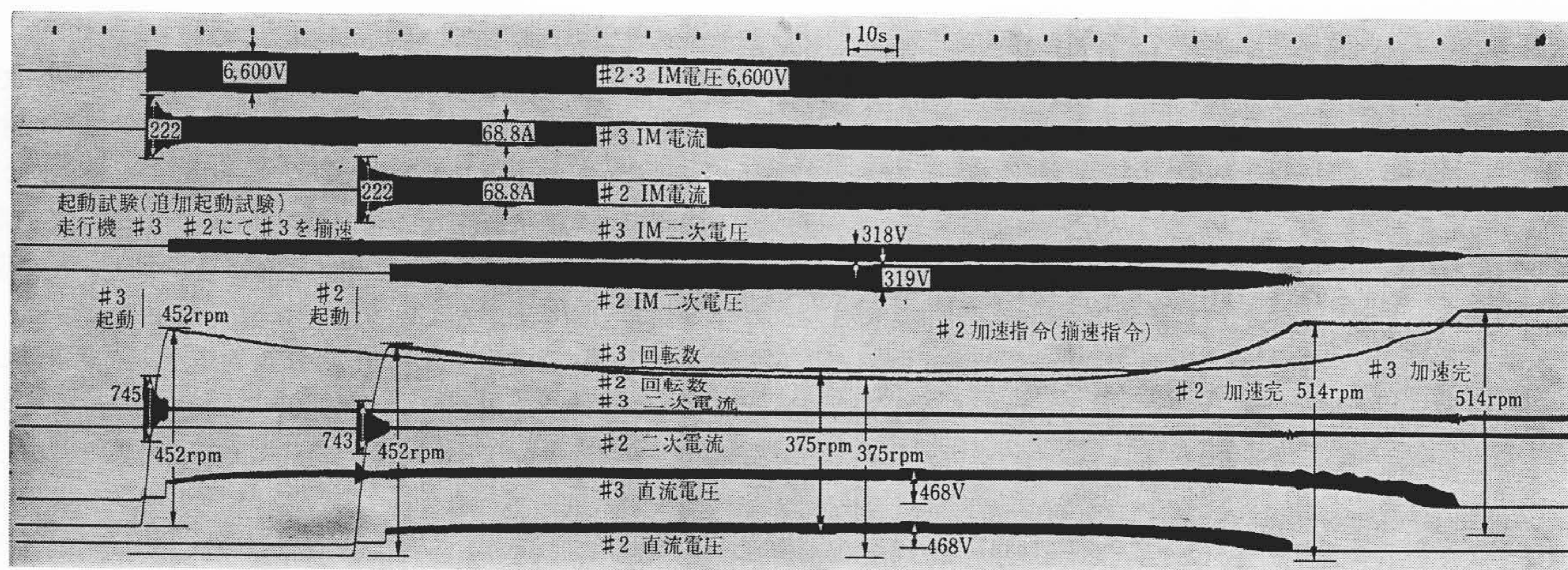


図10 起動時の各部波形

野浄水場の着水井水位一定制御にある。今回の設備は速度制御系のみで構成されているが、将来着水井からの水位制御信号を受けて上記目的が達せられるよう考慮されている。

速度制御系は、各ポンプごとに完全に独立したサイリスタユニットセルビウスセットである。図9は制御系統図を示したものである。これまでに紹介したセルビウスセット⁽⁴⁾⁽⁵⁾と相違するおもな点は

- (1) 金属抵抗器を電動機二次巻線の各相にそう入し、起動からセルビウス運転に切り換える時点で、二次直流回路に大きな突入電流が流れないように考慮した。
- (2) 電動機のデッドスリップは、セルビウスセットのインバータ運転のみでは約5%近くなるが、これをコンバータ領域まで制御することによって1.5%に減少させた。
- (3) 高調波による電源波形のビート現象を低減するため、各ポンプの揃速精度を高めた。

などである。

6.2 制御系の構成

6.2.1 速度制御（水位制御系）

吐出水位一定制御を行なうための制御信号は、別途に将来設けられる演算回路から偏差信号として与えられる。これをトランジスタ式演算増幅器で増幅し、サンプリング調節器（入力信号レベルに比例したパルス幅のパルス列出力を発生する）に加える。この出力にてシリコン交流制御素子 FLS で構成される無接点スイッチを ON—OFF し、電動可変抵抗器のサーボモータを駆動し、APPS 指令電圧を変えてサイリスタの点弧角を制御する。

6.2.2 揃速制御系

揃速精度は、主としてポンプ並列運転時の電源波形ビート現象（無効電力の揺動）を極力少なくするため $\pm 3\%$ を目標に設計された。揃速発電機のリップルを極減するよう三相交流方式とし、全波整流して帰還信号としている。揃速目標値は、並列運転中のポンプの速度平均値である。2台運転時の揃速整定精度は0.1%が得られ、電源に対する実際上の影響は全く見られない。

6.2.3 電流制限回路

直流主回路の電圧降下に起因する電動機のデッドスリップを5%から1.5%に減少するため、インバータ領域からコンバータ領域に至るまで制御範囲を広げている。コンバータ領域における過電流を防止する電流制限回路は、サイリスタ変圧器の商用電源側から CT にて検出した電流がサイリスタ定格電流相当値を越えると、電流リミッタが動作域にはいり APPS の主力パルスを制御進み角 γ が小となるよう制御する。これにより、コンバータ領域にても安定に運転でき、デッドスリップ1.5%は余裕をもって設定される。

6.3 運転と保護

サイリスタインバータは主電動機と同一遮断器に結ばれているため一次側の操作は単純化されている。

遮断器 52 を投入して起動し、一次抵抗器を新たに開発した大容量の起動制御器にて順次短絡し、起動電流を制限しつつ加速する。セルビウス切換点は速度リレーによって検出され、これまで投入されていた接触器 19M を開放すると直流回路に電動機二次電圧が印加されセルビウス運転にはいる。このときのインバータ待期電圧は最低速度に相当する電圧にあらかじめ設定されているが、速度リレーの誤設定などによって機器に損傷を与える突入電流を生じないように、残留抵抗がはいっており、セルビウス切換後もこれを起動制御器にて順次短絡し、最終段に到達すると接触器 34M により完全短絡される。セルビウス切換後、吐出弁が開きポンプ運転にはいる。

2台目以降の起動も同様であるが、セルビウス運転に切換わたのち、先行機の数まで加速し、速度が一致した時点で吐出弁を開き始める点のみ違っている。

図10は起動のオシログラムを示したものである。最小すべり時のコンバータ電流は、サイリスタ定格電流に押えられている。

停止時は、まず 19M を投入して整流器側にサージの影響がないようにしたのち、52 を開放する。起動制御器、インバータ指令装置もここで起動位置に復帰する。

回路保護方式は、一般の電動機およびサイリスタ装置と特に変わるところはない。直流高速度遮断器 HSCB は転流失敗時、ヒューズ溶断前に回路を開き、ただちに再投入できることを主目的としてそう入されている。

7. 結 言

以上説明したように、本設備はサイリスタセルビウスの最初の大容量機であり、従来の設備にない種々の特性を持っている。試験の結果所期の成果を得ることができ、ポンプとの組合せ試験も好成績に終わり、好調に運転中である。ここに本方式の大形化が実現したわけで、堅ろう安価な誘導電動機と保守の容易なサイリスタの利点をじゅうぶんに生かした方式として、今後ますます需要が増すであろう。

本設備に続くものとして1,200kW 配水ポンプ用3台、920kW セメントプレヒータファン用などを運転中である。

終わりに、本設備の計画、製作に当たり、種々ご指導、ご意見をいただいた大阪市水道局のかたがたに厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 麻生、広、白木ほか：日立評論 47, 663 (昭 40-4)
- (2) 近藤、藁谷、平輪：日立評論 49, 635 (昭 42-6)
- (3) 広、岩城、平輪：日立評論 47, 1843 (昭 40-11)
- (4) 堀、前川：日立評論 49, 517 (昭 42-5)
- (5) 平輪、藁谷：OHM 54, 24 (昭 42-2)