

大同製鋼株式会社知多工場納
水銀整流器による直流電動機可逆運転装置
Reversible DC Motor Driving Device Using Mercury Rectifier

大 嶋 新 太 郎* 林 幸 登*
Shintaro Ohata Yukitaka Hayashi

内 容 梗 概

大同製鋼株式会社知多工場納分塊圧延機可変電圧補機用予備電源として、水銀整流器2台を交差接続した直流電動機可逆運転装置を納入した。本装置は、予備電源であるため、種々の負荷に切替使用できるよう、回路が構成されており、電動発電方式のワードレオナード制御より一段とすぐれた制御結果を得た。ここではこの装置の内容と制御方式について述べている。

1. 緒 言

直流電動機は円滑な速度調整および正逆転運転ができるので、広く電動応用装置に用いられている。従来はおもに電動発電設備を用いたワードレオナード方式（以下ワードレオナード方式と呼ぶ）が用いられているが、効率、応答性などの点ですぐれた特性を持つ水銀整流器の信頼度が高まるにつれ、水銀整流器を電源とした、いわゆる静止レオナード方式が採用されるようになってきた。

静止レオナード方式により直流電動機の一方方向回転の速度制御を水銀整流器の格子制御により行なうことはすでに広く採用されているが、正逆両方向回転の速度制御を行なうには水銀整流器が一方方向性素子であるためあまり採用されていなかった。

可逆静止レオナード方式には、水銀整流器を2組使用する交差接続方式と、水銀整流器1組で切替開閉器を使用する主回路切替方式または界磁回路切替方式とがありそれぞれに特長がある。

今回、大同製鋼株式会社知多工場納分塊圧延機用可変電圧補機予備電源として、水銀整流器を用いた直流電動機正逆転制御用電源を製作、納入するに当たり通常運転用電源がワードレオナード方式を採用している点および予備電源としての保守の容易な点などを考慮の上、水銀整流器2組による直流電動機主回路交差接続の静止レオナード方式を採用した。以下にこの設備の特長および試験結果につき報告する。

第1図に、水銀整流器交差接続方式予備電源装置の制御キュービクルを示す。

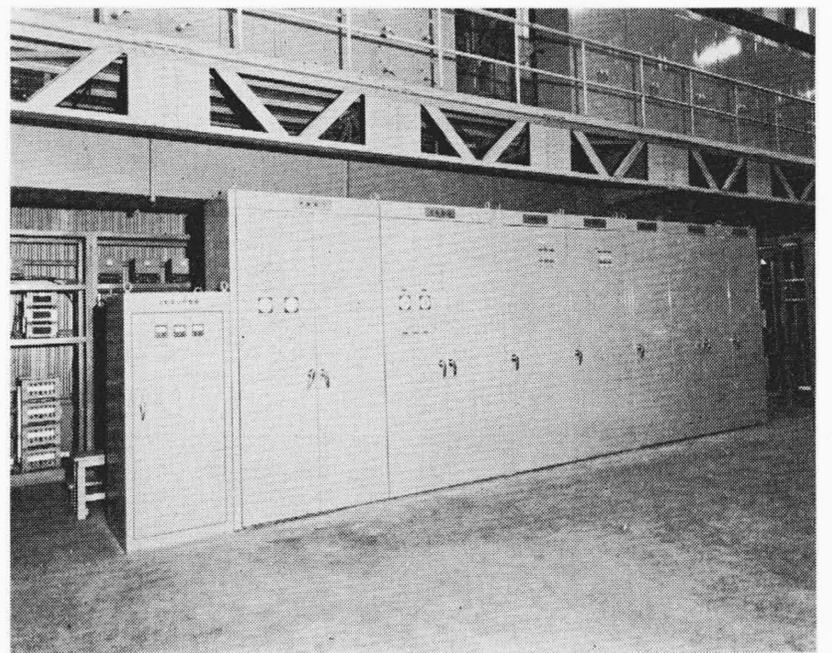
2. 設備の概要

本設備はレオナード電動機予備電源設備としての制約を受けている。

2.1 通常運転電源設備

第1表に本予備電源設備の使用される機械設備、それを駆動する電動機、およびその発電機を示す。これらの電動機は機械的負荷、負荷電流、加減速時間、電動機最終速度などすべて異なり、電動機定格電圧も220V、440Vと2種類となっている。このため通常運転時には、それぞれの電動機群ごとに発電機を持つワードレオナード方式が採用されている。ワードレオナード方式の場合の基本的な単線接続図およびブロック線図は第2図に示すとおりであるが、これは最も簡潔な場合で、実際には1台の発電機に数台の電動機が並列接続されている場合、2台の発電機および2台の電動機がいわゆるサンドイッチ接続されている場合など、種々の接続が行なわれている。

* 日立製作所日立工場



第1図 制御キュービクル

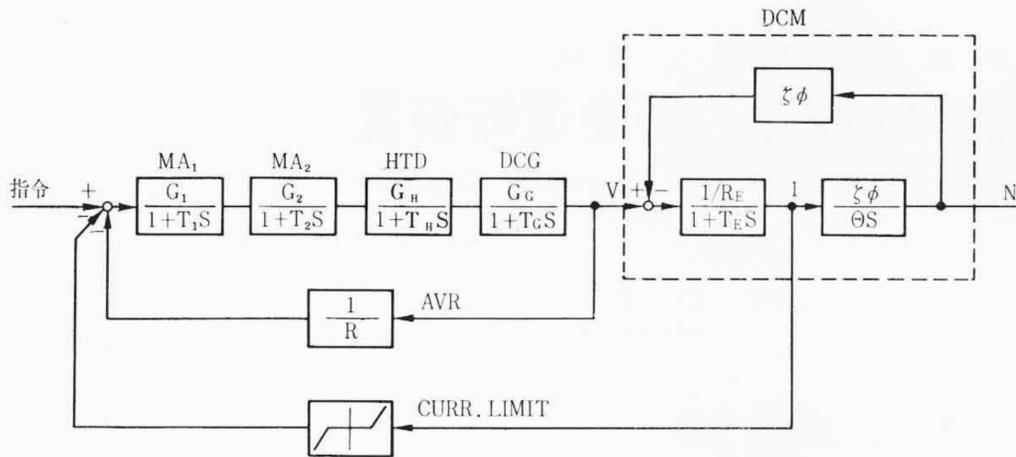
第1表 可変電圧補機一覧表

設 備	電 動 機		発 電 機		備 考
	容 量 (kW)	数	電 圧 (V)	容 量 (kW)	
インゴットバギー	37	1	220/440	50	1
前面作業テーブル	75	1	220/440	100	1
後面作業テーブル	75	1	220/440	100	1
スクリュウダウン	75	2	220/440	100	1
フィードローラ	21.5	4	220/440	125	1
マニプレータ	75	2	220	200	1
スカーファ-前面テーブル	37	1	220	50	1
スカーファ-後面テーブル	37	1	220	50	1

各発電機は、制御机上に機械設備ごとに設けられた操作器具により正逆転運転指令および速度指令が与えられ、これを磁気論理素子ヒタログを用いたアナログ指令値発生装置によりアナログ量に変換後、ワードレオナード制御回路に指令信号として加えられ、この指令値により直流電動機は正逆転および加減速制御される。制御系は磁気増幅器および回転増幅器HTDから構成され、電圧制御および電流制限制御により急速加減速を行ない、必要にして十分な安定度制御精度などの制御性能を有している。

2.2 予備電源設備

本予備電源設備は、2組の水銀整流器による主回路交差接続方式をとり、通常運転の電源設備に故障が発生した場合に、機械的ならびに電気的要求の異なる種々の直流電動機の電源として使用されるものである。その場合には、接続変更、運転操作器具の変更および運転操作方法の変更などの少ないことが望ましいので、本設備では



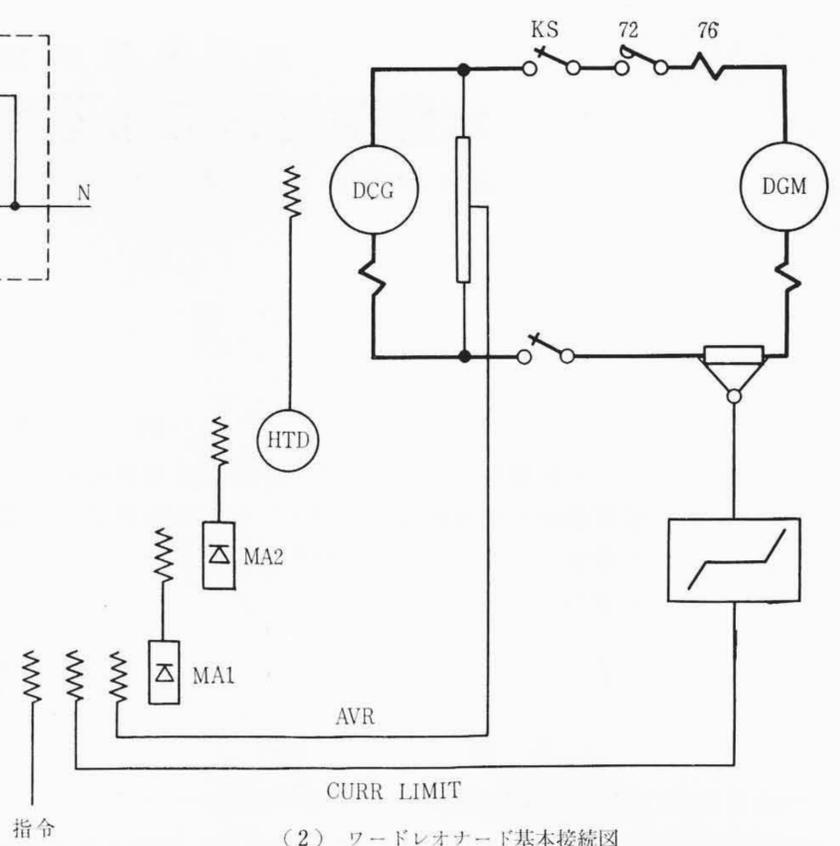
(1) ワードレオナード基本ブロック線図

(1) ワードレオナード基本接続図

- DCG: 直流発電機
- DCM: 直流電動機
- HTD: 回転増幅器
- MA2: 磁気増幅器
- MA1: 前置磁気増幅器
- KS: 刃形開閉器
- 72: 直流遮断器
- 76: 過電流継電器

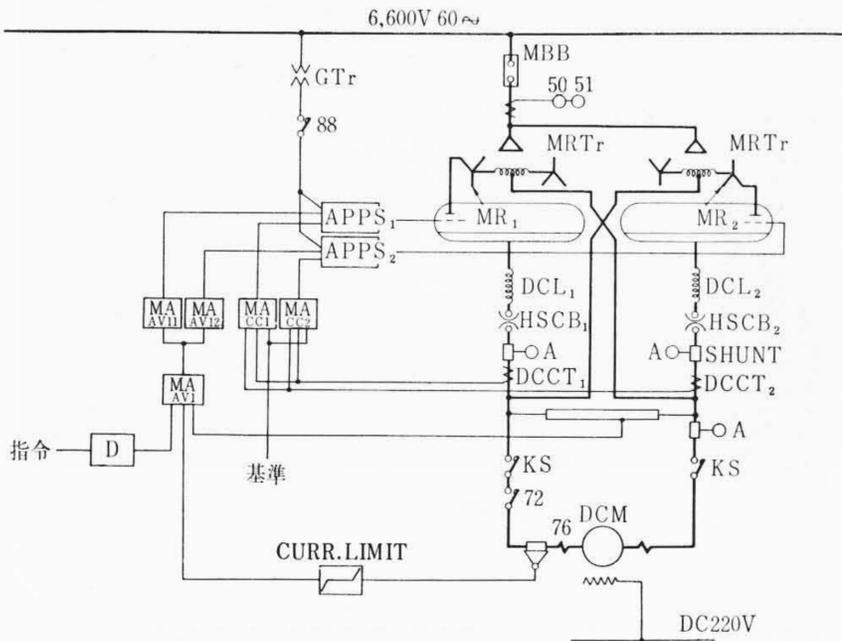
(2) ワードレオナード基本ブロック線図

- G_1, G_2, G_H, G_G : 各素子利得
- T_1, T_2, T_H, T_G : 各素子時定数
- S: ラプラス演算子
- T_E : 電動機電機子回路時定数
- R_E : 電動機電機子回路抵抗
- $\zeta\phi$: 電動機界磁定数
- θ : 電動機軸に換算した負荷を含む全GD²



(2) ワードレオナード基本接続図

第2図 ワードレオナード基本接続図



- MBB: 磁気吹付形遮断器
- MRT_r: 水銀整流器変圧器
- MR₁, MR₂: 水銀整流器
- DCL₁, DCL₂: 平滑リアクトル
- HSCB₁, HSCB₂: 高速度遮断器
- DCCT₁, DCCT₂: 電流検出器
- SHUNT: 電流計シャント
- KS: 刃形開閉器
- 50: 短絡継電器
- 51: 交流過電流継電器
- 72: 直流遮断器
- 76: 直流過電流継電器
- D: 指令装置
- MA_{AV1}: 電圧制御系前置磁気増幅器
- MA_{AV11}, MA_{AV12}: 電圧制御系磁気増幅器
- MA_{CC1}, MA_{CC2}: 速応形磁気増幅器
- APPS₁, APPS₂: 自動パルス移相器
- CURR. LIMIT: 電流制限器
- G, Tr: 格子変圧器
- 88: 格子回路接触器

第3図 水銀整流器主回路交差接続単線接続図

第2表 予備電源主要機器一覧表

機 器	略 号	員数	形 式	定 格
水 銀 整 流 器	MR	2	IFDC-6 GT	250 kW 460 V 545 A
磁気吹付形遮断器	MBB	1	BMA-15C-MA	7.2 kV 400 A
高速度遮断器	HSCB	2	HD-OM	1,000 A
	HSCB	2	HD-GM	1,000 A
水銀整流器変圧器	MR.Tr	1	SIR-3 YCW	(410/580)×2 kUA 60~
平滑リアクトル	DCL	2		0.9 mH 545 A

接続変更は主回路線および数本の制御回路線の変更のみで足りるようになっており、また操作器具は運転机上の通常使用時の操作器具がそのまま使用できる。

第3図に本予備電源の単線接続図を示し、第2表に設備を構成するおもなる機器の仕様を示す。

水銀整流器用変圧器の1次巻線には、手動切替タップを設けている。

水銀整流器は、250 kW、460 V、100% 連続の定格を持つ多極形で、6相1タンクを単位としてキュービクルに収納されており、水銀整流器タンクの温度に応じて、キュービクル内の冷却扇の速度切替、ヒータの入切を行ない、安定な運転が可能のように考慮されている。本機は、使用条件から特に、逆弧、失弧などの考慮が払われ工場試験および現地において、その安定度が十分確認された。

直流側平滑リアクトルは、直流電流のリップル低減、事故時の電流立ち上がりの抑制、水銀整流器使用時の回路特性などを考慮して設計されている。

3. 制御系の構成

3.1 制御の概要

従来のワードレオナードの電源は、第2図の単線接続図およびブロック線図に示してあるように、電圧制御と電流制限制御が行なわれているが、本予備電源では、水銀整流器の交差接続方式を採用したために必要となる2組の水銀整流器間に流れる循環電流をも制御して、通常電源装置使用時と同等またはそれ以上の制御性能を得る必要があるため、本予備電源装置においては、

- (1) 電 圧 制 御
- (2) 電 流 制 限 制 御
- (3) 循 環 電 流 制 御

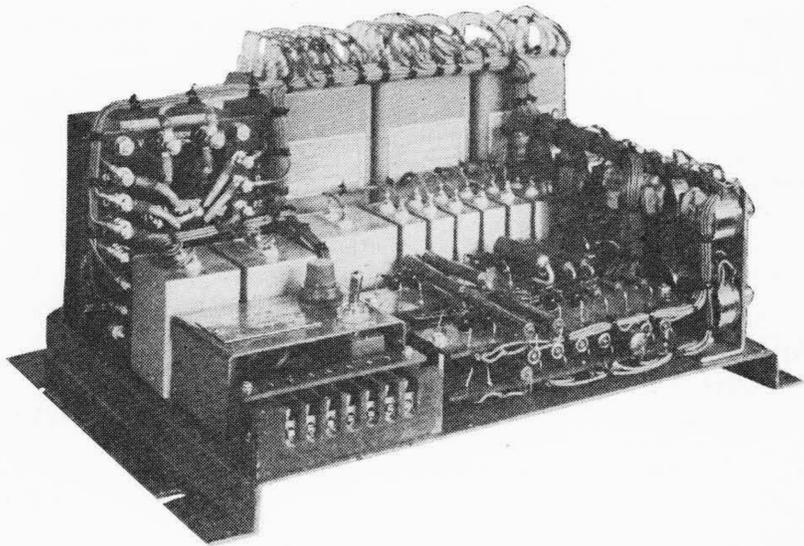
の三つの制御が行なわれている。

水銀整流器2組を交差接続した本装置では、電動機正転の場合はNo.1水銀整流器は順変換動作領域に、No.2水銀整流器は逆変換動作領域にあるように、また、電動機逆転の場合はそれぞれ逆にNo.1が逆変換動作領域、No.2が順変換動作領域になるように、それぞれの水銀整流器の格子を制御する。したがって、格子制御回路は順変換から逆変換までの電気角にして約150°の移相範囲を必要とし、時定数の小さな回路とする必要があり、さらに、静特性においても動特性においても2組の特性に差の少ない必要がある。

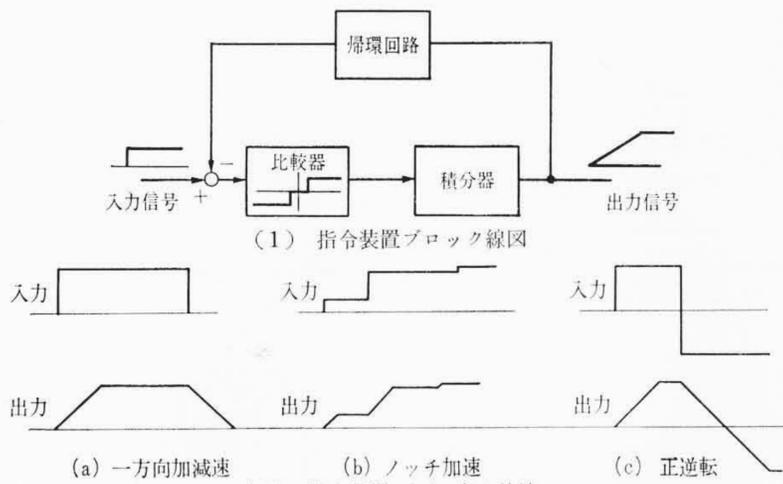
自動制御系は、420Vの磁気増幅器と磁気増幅器応用素子により構成されているが、水銀整流器回路の応答が早いことに加えられる可逆転指令信号は単位関数の指令を加えても一定値以下の傾斜を持つ信号とし電動機の最大トルクで円滑な加減速を行なうよう指令装置を設けている。

3.2 指令装置

ワードレオナード制御を採用した場合の速度指令装置としては、



第4図 指令装置



第5図 指令装置

抵抗器に設けた多数のタップを切り替えて指令値を発生する方法が採用されている。また静止レオナード制御を採用した場合には、制御系の応答が早いため、抵抗器により多くの切替タップを設けて、切替ピーク電流を小さくするように考慮されている。

本予備電源においては、電動機の急速加減速運転を目的とするため前記の段階的指令方法を採用せず、新しく開発された指令装置を使用した。

第4図に本指令装置の外観を、第5図にそのブロック線図および入出力の特性を示す。

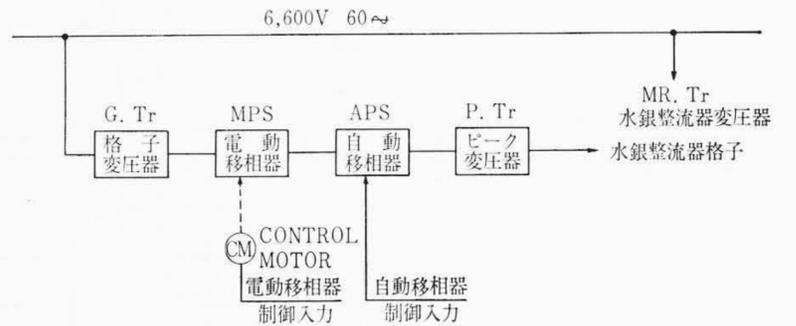
本指令装置は、従来の指令装置のステップ状信号を入力信号としてランプ状出力信号とし、入力と出力とを比較器にて比較し、それを積分器に加えて出力信号とするものである。比較器および積分器には、利得無限大の増幅器を使用し、外部回路素子CやRによりそれぞれの特性を得ている。その増幅器としては、最近開発された磁気演算増幅器を使用しているため、長寿命、高精度、高信頼性の指令装置となっており、さらに、外部回路定数の設定により出力信号の最終値とそれまでの時間などが広範囲に調整可能となっている。操作開閉器を使用する場合にも、そのノッチを全ノッチ投入でもインテグレーション操作でも急速可逆運転するときでも、指令装置の出力は同一こう配で増減するので、電動機に加減速も同一加減速度となり、いかなる操作でも、過大電流を生ずることがないようになっている。

3.3 自動パルス移相器

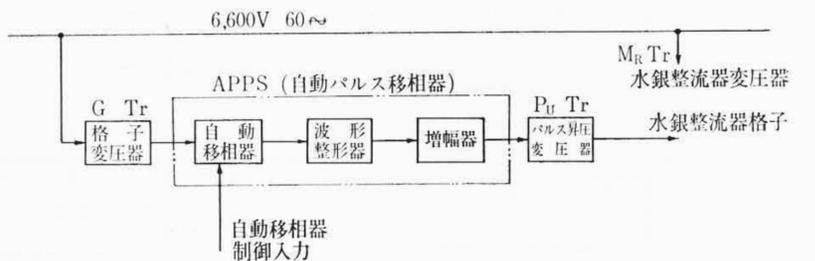
本装置では、前述のように、自動移相器が広範囲でかつ直線的な移相調整範囲と、高い安定性および速応性を持つことが必要である。したがって自動移相器としては、第6図に示す磁氣的自動移相器とピーク変圧器の組み合わせによるものではこれらの要求を満足せず、半導体および非線形磁気素子の採用によりその性能が飛躍的に改善された自動パルス移相器を使用している。

第7図は本自動パルス移相器のブロック線図を示す。

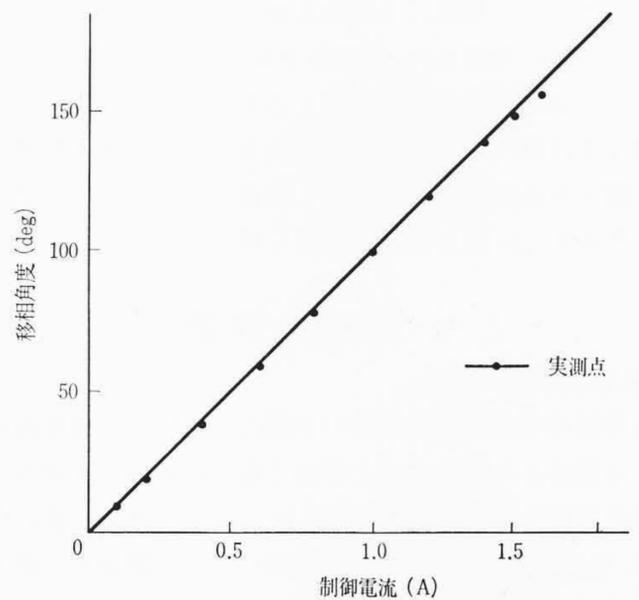
本自動パルス移相器の移相特性を受け持つ磁気自動移相器には、



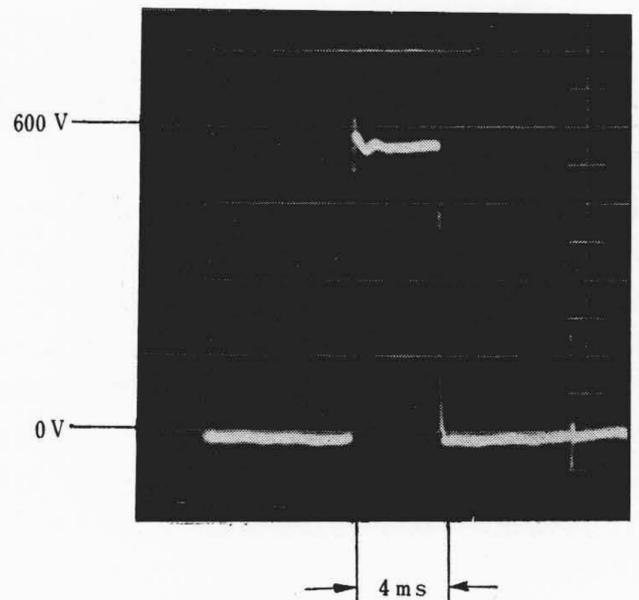
第6図 従来の移相制御方式



第7図 自動パルス移相器ブロック線図

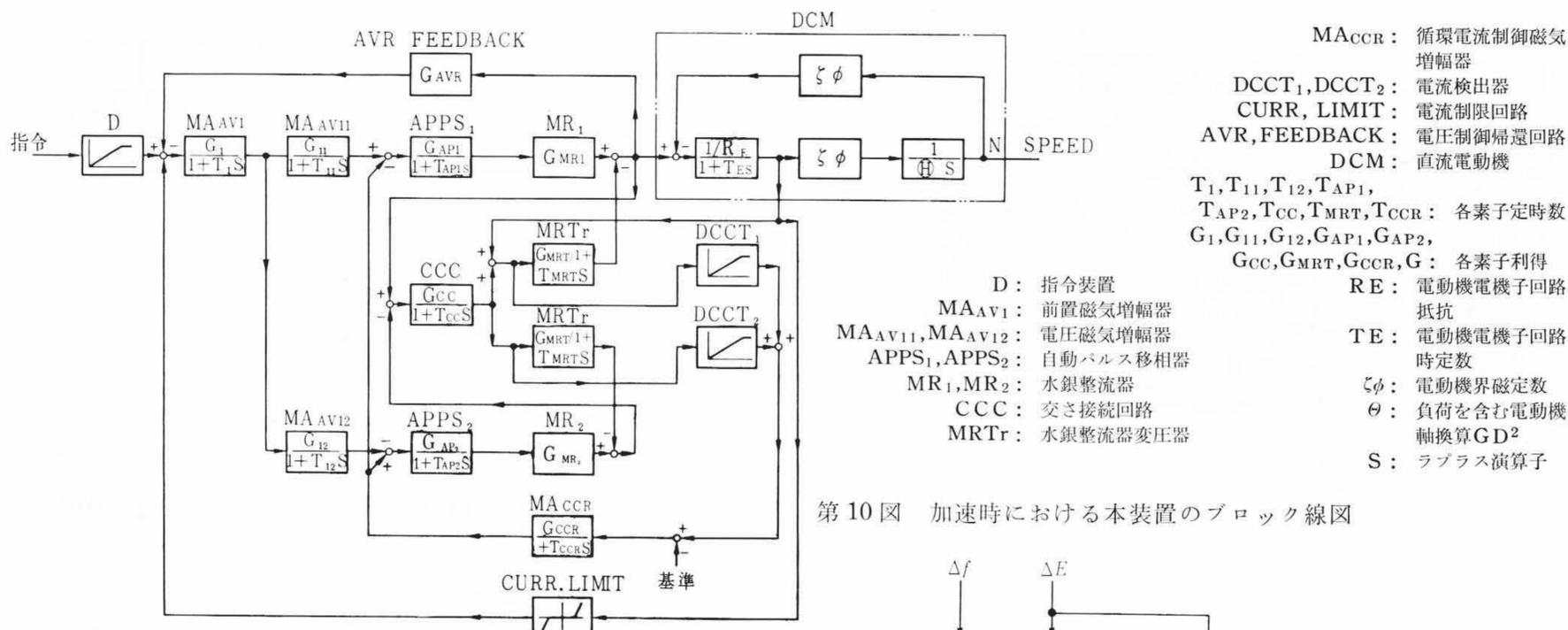


第8図 自動パルス移相器移相特性



第9図 自動パルス移相器出力波形

主回路と同期した交流信号と直流入力信号とを加え、入力信号に正比例した電気角だけ交流信号を移相する。この磁気自動移相器は、従来の同種の移相器に比べ、数分の一の時定数と、電気角で150°以上の移相角度をもち、しかも高利得のもので電源そのほか種々の変動に対し特性の安定と良好な出力波形を保っている。移相された交流信号は、パルス発生器により交流信号と同期した矩形波で、適当な幅と高さを持っており、パルス増幅器により電力増幅後矩形ヒステリシス鉄心のパルス変圧器によって、ひずみを生ずることなく、必要な電圧まで昇圧され、水銀整流器の格子に加えられる。



第10図 加速時における本装置のブロック線図

パルス変圧器の飽和によるパルス増幅器の過負荷、水銀整流器の必要とする消イオン電流、水銀整流器主回路側から発生するサージ電圧などは十分に考慮され、移相器全体にわたる温度補償、雑音補償とあわせて、過酷な使用条件に耐えるように設計製作されている。

第8図は本自動パルス移相器の直流入力信号と移相角度との関係を、第9図は本移相器の出力パルス波形を示している。出力波形は種々の条件の変化に対し良好な波形を保っている。

4. 自動制御系

4.1 自動制御系の構成

本予備電源の負荷直流電動機の界磁は、定電圧励磁電源により励磁され、本電源より供給される電機子電圧の方向と大きさによってその回転方向および速度が定められる。このため、前記のように電圧制御、電流制限制御、循環電流制御の三つの制御が必要となる。

電圧制御系は、通常定速度制御静止レオナード装置と同様に、前置増幅器を含む2段の磁気増幅器により構成され、制御開閉器その他によるステップ状信号を指令装置により一定傾斜を持つ信号に変換して前記増幅器に加え、その出力により、格子制御回路を通して水銀整流器の出力電圧を制御し、この電圧を前置磁気増幅器に帰環する方式をとっている。

電流制限制御系は、主回路電流を検出し、抵抗器とセレン整流器とを使用している、通常運転用の電流制限器の電源をそのまま用いて、前記主回路電流と基準電流とを比較して電流制限信号とし、電圧制御系磁気増幅器回路に加えて制御する方式をとっている。

循環電流制御系は、磁気増幅器に類似する主回路電流検出器により2台の水銀整流器の出力電流をおのおの検出し、特に高速応性と高安定性を持つ磁気増幅器に加え、格子回路を通して、負荷電流の少ない間は負荷電流の増加につれて循環電流を減少させ、これが規定値に達した後は循環電流を一定とする制御方式をとっている。

これらの制御方式を採用した本装置の自動制御系のブロック線図を第10図に示す。

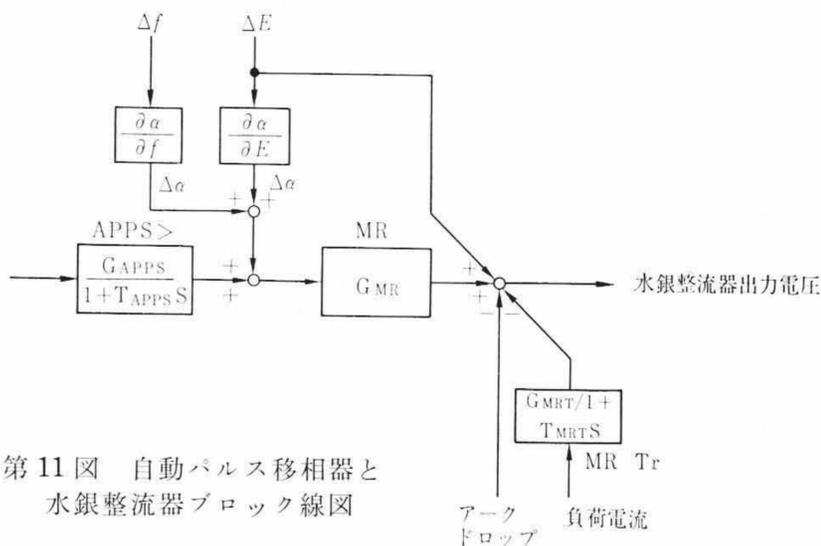
4.2 自動パルス移相器および水銀整流器

電圧制御系および循環電流制御系の制御信号は、ともに自動パルス移相器に加えられ、これにより水銀整流器格子が制御される。

自動パルス移相器の伝達関数は一次遅れ要素として取り扱ってよく、時定数は磁気移相器の時定数のみを、利得は第8図の特性曲線に示される値を考慮すればよい。

自動パルス移相器は、温度変化に伴う特性の変化に基づく特性ドリフトに対しては、十分の考慮と対策が講じられているが、主回路交流電源と同期している交流電源の電圧および周波数の変動によ

- D : 指令装置
- MA AV1 : 前置磁気増幅器
- MA AV11, MA AV12 : 電圧磁気増幅器
- APPS1, APPS2 : 自動パルス移相器
- MR1, MR2 : 水銀整流器
- CCC : 交差接続回路
- MRT r : 水銀整流器変圧器
- MA ACCR : 循環電流制御磁気増幅器
- DCCT1, DCCT2 : 電流検出器
- CURR, LIMIT : 電流制限回路
- AVR, FEEDBACK : 電圧制御帰還回路
- DCM : 直流電動機
- T1, T11, T12, TAP1, TAP2, TCC, TMRT, TCCR : 各素子定時数
- G1, G11, G12, GAP1, GAP2, GCC, GMRT, GCCR, G : 各素子利得
- RE : 電動機電機子回路抵抗
- TE : 電動機電機子回路時定数
- $\zeta\phi$: 電動機界磁定数
- θ : 負荷を含む電動機軸換算GD²
- S : ラプラス演算子



第11図 自動パルス移相器と水銀整流器ブロック線図

て、その出力信号に大きな影響がある。出力パルスの移相角変動に対しては、試験結果では、周波数一定として電圧を変化したときは電圧変動分にほぼ比例した移相角変化を起し設定移相角には無関係となり、電圧一定として周波数を変化したときでも同様な結果を得ている。

水銀整流器では、入力として格子制御パルス移相角をとり、出力信号として出力直流電圧をとり、その伝達関数を求めると、他の要素と比較して遅れ時間が省略でき、その利得は非直線特性となる。

出力直流回路の変動としては、交流主回路電圧の変動に基づくもの、自動パルス移相器の出力パルスの移相角の変化に基づくものおよび負荷電流の変化に基づくものがあり、電源の周波数変動に基づく変動はパルス移相角変化による影響を除いては、ほとんどない。

以上を総合した自動パルス移相器および水銀整流器の部分のブロック線図を第11図に示す。

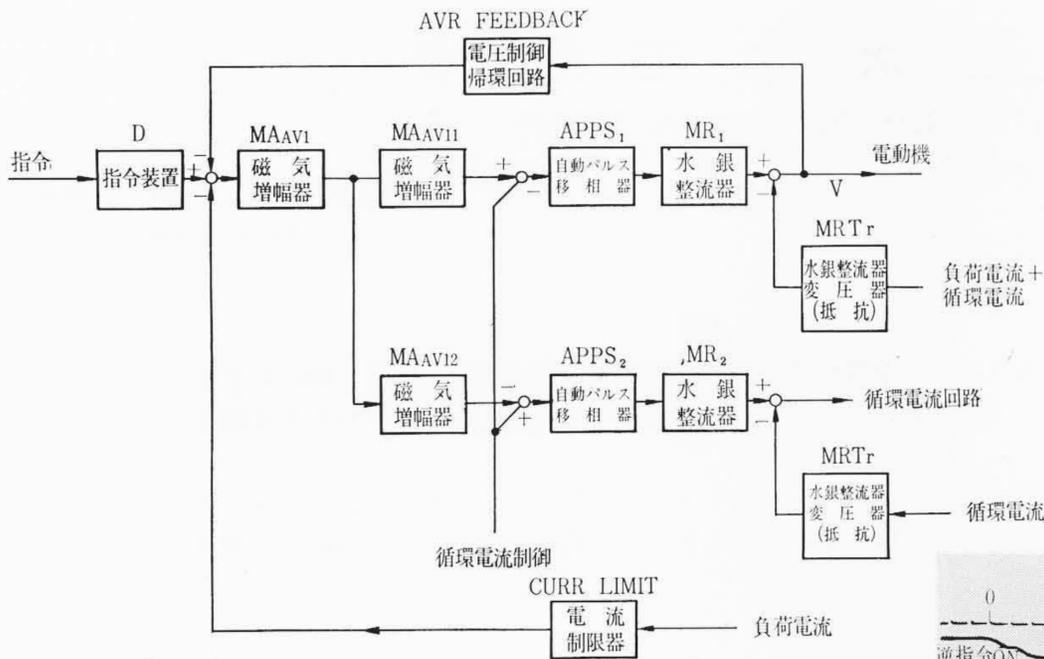
4.3 電圧制御系および電流制限制御系

電圧制御系および電流制限制御系は、前述のように、2段の磁気増幅器と自動パルス移相器により構成される。第12図はその伝達関数およびブロック線図を示したものである。

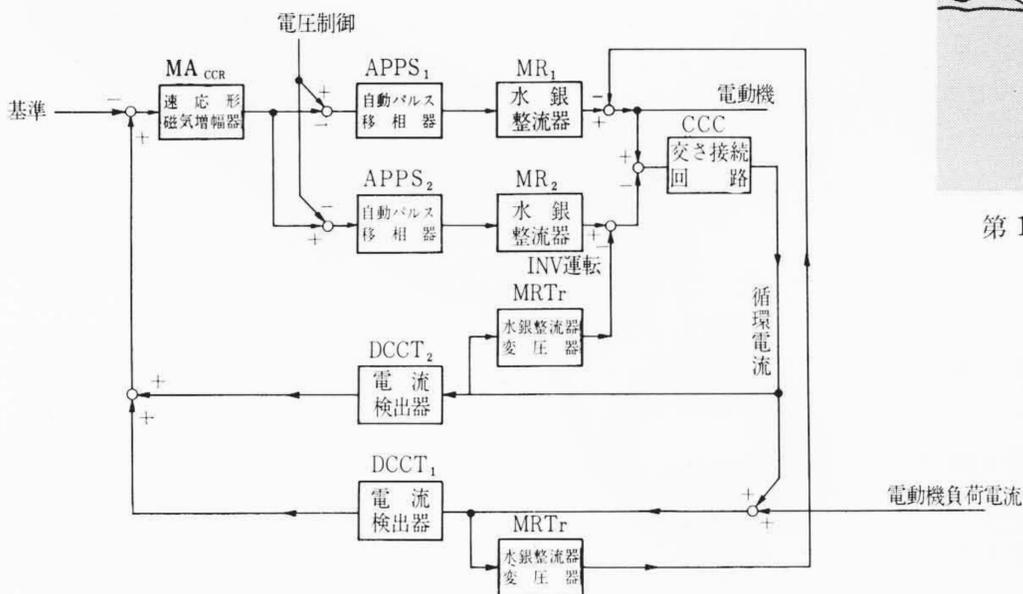
本制御系に加わる外部サージは種々あり、特に磁気増幅器電源となっている420V電源と同バイアス回路電源の変動を考えると、これらはそれ自身、自動電圧制御を行なっているので、特別な場合を除き問題ない。主回路の電源電圧および周波数が変動した場合は前項で説明したように直流電圧および直流電流の大きなサージとなる。

4.4 循環電流制御系

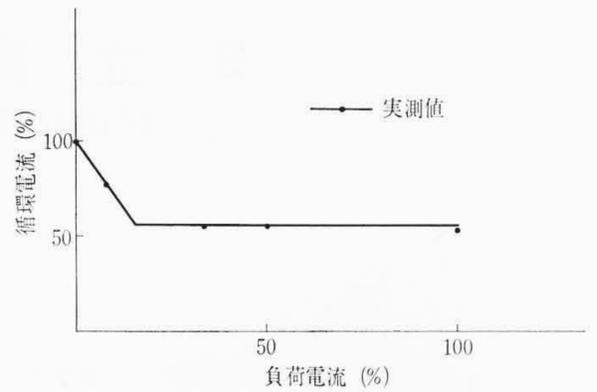
循環電流制御系は、2台の水銀整流器を交差接続したために生じたもので、指令値の急変や電源変動などによる制御系のサージの場合、水銀整流器の順変換動作側、逆変換動作側とともに制御し、循環電流を規定値に保つようにする。循環電流の値は、できるだけ小さい方が望ましいが、その値を零に制御することは、軽負荷時およびサージ時に電流の断続など不安定状態を招くので、負荷電流の小



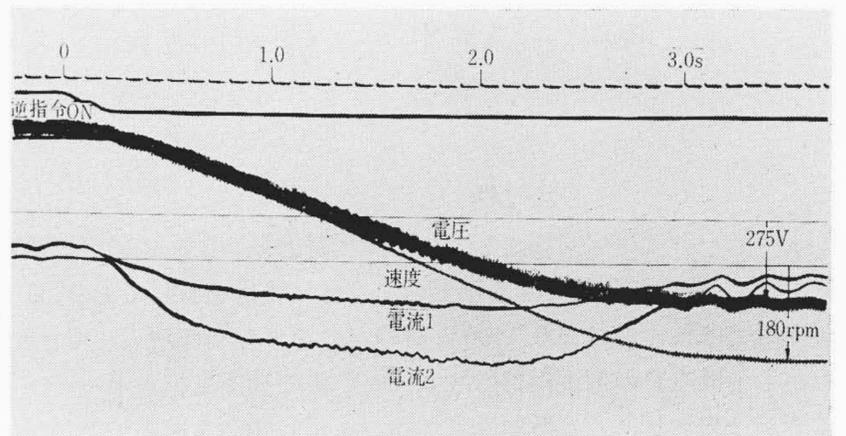
第12図 電動機加速時における電圧制御回路および循環電流制御回路ブロック線図



第14図 電動機加速時の循環電流回路ブロック線図



第13図 循環電流と負荷電流の関係 (無負荷時の循環電流を100%とした場合の循環電流と負荷電流の関係)



第15図 フィードローラに適用した場合のオシログラム

図を構成すれば第10図に示すようになる。このブロック線図は電動機を加速する場合を示しており、減速する場合とするには、ブロック線図中の一部を変更すればよい。このブロック線図と前に求めた種々の条件とから停止より最高速度までは約0.8秒、正の定格速度から負の定格速度までは約1.5秒で加減速できることがわかった。

実際に本分塊圧延機補機に接続して、加減速時間を測定したが、圧延機の所要動作特性、他との連動操作および本圧延機に採用されているカードプログラム制御などから種々の制限を受け、上記の予定値よりも遅くなっている。第15図に示すオシログラムは、本装置を最も過酷な負荷であるフィードローラに適用した場合のもので、正転定格速度より逆転定格速度まで約2.5秒で、加減速時の電流は最大150%、波形率1.34であった。

4.6 保護装置

本予備電源を使用する場合の電動機保護は通常電動発電方式をそのまま使用し、各電動機ごとに過負荷継電器などの検出装置と気中遮断器を設けて、故障時電動機を電源より切り離し保護している。水銀整流器保護装置は、通常静止レオナードに準じ、種々の検出装置と交流回路の磁気吹付遮断器、直流回路の逆流用および過電流用高速度遮断器を設け、水銀整流器を保護している。

第3表は本設備の保護装置一覧表である。

第3表 保護装置

事故	検出	MBB		MR Grid (MR, IVとも)		54P		54F		ACB
		遮断器		MR	IV	MR	IV			
コンバータ逆弧										
DC側逆流	54P	連動遮断		自己遮断	連動遮断					
AC側過電流	50	連動遮断	遮断							
インバータ逆弧										
AC短絡	50	連動遮断	遮断							
DC短絡	54F	連動遮断	遮断	連動遮断	連動遮断				自己遮断	
転流失敗	54F	連動遮断							自己遮断	
	50	連動遮断	遮断							
循環電流過大	54F	連動遮断								
	51	連動遮断								
	26H	連動遮断								
電動機過負荷	過電流RY									遮断

さい場合は循環電流を比較的多く流し、負荷電流が大きく、不安定の恐れがなくなるにつれてこれを減じ、必要最小限の電流に対する方法を採用して、水銀整流器の容量を小さくするとともに安定な運転ができるような方法とした。負荷電流と循環電流との関係は第13図に示すとおりである。

2台の水銀整流器のための主回路および制御回路は、全く同様に構成され、伝達関数およびブロック線図も同様になる。第14図は循環電流制御系のブロック線図を示す。

4.5 全体制御特性

4.1~4.4に述べたブロック線図を組み合わせて全体のブロック線

5. 結 言

本装置は、予備電源であるため、多数の電動機に切替使用するという特殊条件を持ち、過酷な使用条件となっているが、いろいろの新しい試みを採用した結果、工場試験および現地において、所期の目的どおりの性能を示し、電動発電方式ワードレオナード制御と比較して、高性能を有することが明らかになった。

終わりに、種々ご指導いただいた日立製作所日立工場ならびに日立研究所の関係諸氏および工場試験、現地調整にあたられた関係諸氏に感謝の意を表す。