

# 直流電動機のエレクトロニクス制御

## Electronic Control for DC Motors

Among control methods for electric motors, thyristor-Leonard systems for speed control of DC motors have been most outstanding in performance and efficiency.

The article describes the automatic current rate control method and electronic overcurrent protection relays which are coming into the field of thyristor-Leonard systems for technical improvement. Newly developed electronic control systems, HILECTOL and ACYCLOL series, are also introduced.

平輪 憲道\* *Norimichi Hirawa*

神山 健三\* *Kenzô Kamiyama*

小山 紘\* *Hiroshi Koyama*

真壁 幸男\* *Yukio Makabe*

加賀谷 了\* *Satoru Kagaya*

### Ⅰ 緒 言

直流電動機の技術は、地味ではあるが着実な進歩改良の努力が続けられている一方、エレクトロニクス技術の応用が制御システムの質的向上と小形化に大きな役割を果たしており、さらに性能、機能の面で高い信頼性、保全性を追求した製品が次々と開発され製品化されている。

パワーエレクトロニクス技術、特にサイリスタ素子を用いた直流電動機の駆動方式として、現在サイリスタレオナード方式が広範囲に使用されている。これは性能（速応性、高精度など）機能（円滑な加減速、高速正逆転および回生制動などが可能）の面で最も高度な技術的要求を満足するためである。このことはレオナード方式が持つフレキシビリティにもよるが、IC（半導体集積回路）に代表される良質で信頼性の高いエレクトロニクス制御素子を用いることにより、制御回路の時間遅れが無視でき、解析結果がそのまま具現できることもあずかって力があるものである。

また、エレクトロニクス化により、装置の経済性、高信頼性、設備稼働の早期化、保全性などについても著しい進歩を示している。その実例としてサイリスタレオナード制御装置の標準化製品である、“HILECTOL”新シリーズとアサイクロール1000の概要を紹介する。HILECTOLは、主として可逆運転や加減速特性、負荷変動などの運転条件に高度な要求をされる圧延機補機、その他ヘビーデューティの産業用直流電動機の制御に適している。一方「アサイクロール」は、一方向回転のプレス、押出機など汎用的な直流電動機の制御に適している。

### Ⅱ 最近の動向

直流電動機を可変速制御する方式としては、サイリスタ素子を用いた静止レオナード方式が最も一般的であり、ここではサイリスタレオナード装置の最近の動向について述べる。

サイリスタレオナード方式の特長は、広範囲な可変速制御ができ、かつ可逆運転および減速時の回生制動が容易に行なえるということであり、現在主として鉄鋼業分野に多く使用されている。最近、製品の品質および歩どまり向上に対する企業内外の要請が高まるとともに機械の性能も向上し、製紙、ゴム、プラスチック、自動車などの一般産業の分野にも積極的に適用されている。

最近の企業環境では自動化、省力化および高性能化が指向

され、サイリスタレオナード装置の有する機能、性能のほかに、一般に経済性、高い信頼性・保全性などが要請されている。一方、技術的には近年急速に発達したサイリスタ素子を始めとしたパワーエレクトロニクス、ICおよびLSI（高密度実装半導体集積回路）などのいわゆるエレクトロニクスおよび制御技術により、これらの要請事項に関しても最近著しい進歩、改善がなされている。すなわち、装置の経済性に関しては、主回路では回路構成が簡単でかつ安価な逆並列接続無循環電流方式が多く採用されており、また最近ではその利点を最大限に利用した自動パルス移相器（APPS）1台で順逆変換回路を駆動するいわゆるパルス切換方式がより一般的になっている。この場合、運転方向を切り換えるために必要な切換回路は、制御要素、器具のエレクトロニクス化により無接点化されて信頼性が向上し、また、切換信号のみ、あるいはそれと高感度電流断続検出回路を併用することにより回路の単純化と安全かつ迅速な切り換えが行なえるようになった。さらに、切換え時のデッドタイムおよび軽負荷時の特性劣化は、切換回路の単純化および制御技術の進歩によりほとんど無視できるようになった。

信頼性および保守性に関しては、スクリーニングとデバッキングによる部品の品質保証ならびに主回路、制御回路の単純化および制御回路の専用ICパッケージ化により使用部品を大幅に低減して、装置のMTBF（平均故障間隔）の向上が図られている。さらに、万一生じた事故に対しては標準化とビルディング・ブロック化されたパッケージあるいはユニットを迅速に交換し、かつ再セット時に必要な調整箇所を少なくすることにより、MDT（平均故障時間）の短縮が図られている。また、保護方式に関しては、過電流に対し一対一の保護協調をとることを基本とし、さらに用途によりサイリスタ変換回路専用の電子式保護装置を適用することにより、過電流から短絡電流域までを安全かつ瞬時に保護することができる。電流異常が生じたとき、制御遅れ角を最大にして異常電流を急速断続状態にしてからゲートパルスをブロックするいわゆるシフトアンドブロック方式も必要に応じ採用されている。次に、最近のサイリスタレオナード方式に適用されている特徴のある技術の一例として装置の経済性および性能向上に対し、有効な電流レート制御系およびサイリスタ変換回路の過電流保護用電子式保護装置について述べる。

\*日立製作所大みか工場

3 特徴のある技術

3.1 電流レート制御系を持った速度制御系

サイリスタレオナード方式では、一般に主ループとして速度制御 (ASR) あるいは電圧制御 (AVR) 系が、またマイナーループとして電流制御 (ACR) 系が採用されている。ACR 系は軽負荷時電流が断続する領域になるとその特性が劣化して、主ループ制御系に影響を与えるため、その対策として従来 ACR 系の内側に高速のマイナーループ AVR 系を付加して特性改善を図っていたが、これに用いる電圧検出器は瞬時応答形でかつ安全上主回路から絶縁することが要請されているため、大形となり経済性が見地から難点があった。

このたび軽負荷時の ACR 系の特性改善に対してマイナーループ AVR 系と同じ効果を有しかつ以下に述べる特長を有する電流レート制御 (ACRR) 系を実用化した。図 1 は、マイナーループとして ACRR と ACR 系とを持った主ループ ASR 系の一例を示すものである。図 2 は図 1 の ASR 系において回生制動をしながら減速 (インバータ) 運転中再加速 (コンバータ) 運転に切り換えたときの電流の応答波形である。図 2

よりわかるように ACRR を持った ACR 系は次のような特長を持っている。

- (1) ACRR 系による ACR 系の電流断続域の特性劣化に対する改善効果は、高速マイナーループの AVR 系を付加した場合と同一である。
- (2) ACRR 系は、マイナーループ AVR 系のように電圧検出器を必要とせず、電流検出器から得られる電流検出信号を使用することができる。
- (3) ACR 系の応答は、電流指令の大小には関係なく電流レート ( $di/dt$ ) が一定となる。

3.2 ソリッドステートの電子式保護装置

サイリスタ変換回路の保護としては、過電圧および過電流に対する保護が必要であるが、ここでは過電流保護用として開発した電子式保護装置について述べる。

過電流に対しては反限時動作通常過電流、瞬時動作非常最大過電流および短絡電流に対する保護が必要である。また、特殊な用途に対しては、電源欠相および逆相に対する保護も必要となる。ここで短絡電流は、最終的にはヒューズで保護することができ、また逆相は、試運転時に確認できるので、

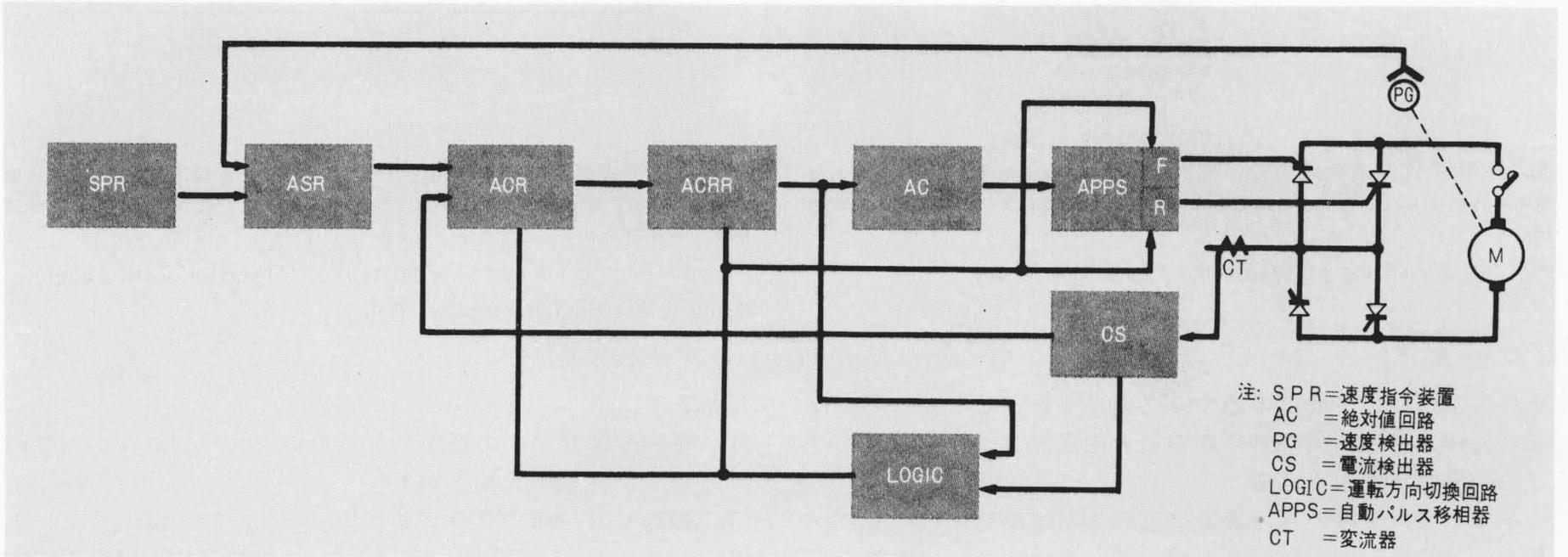


図 1 電流レート制御系を持った速度制御系 マイナーループとして、ACRR系とACR系とを持ったASR系の一例を示す。

Fig. 1 Speed Regulator with Current Rate Control in Its Minor Loop

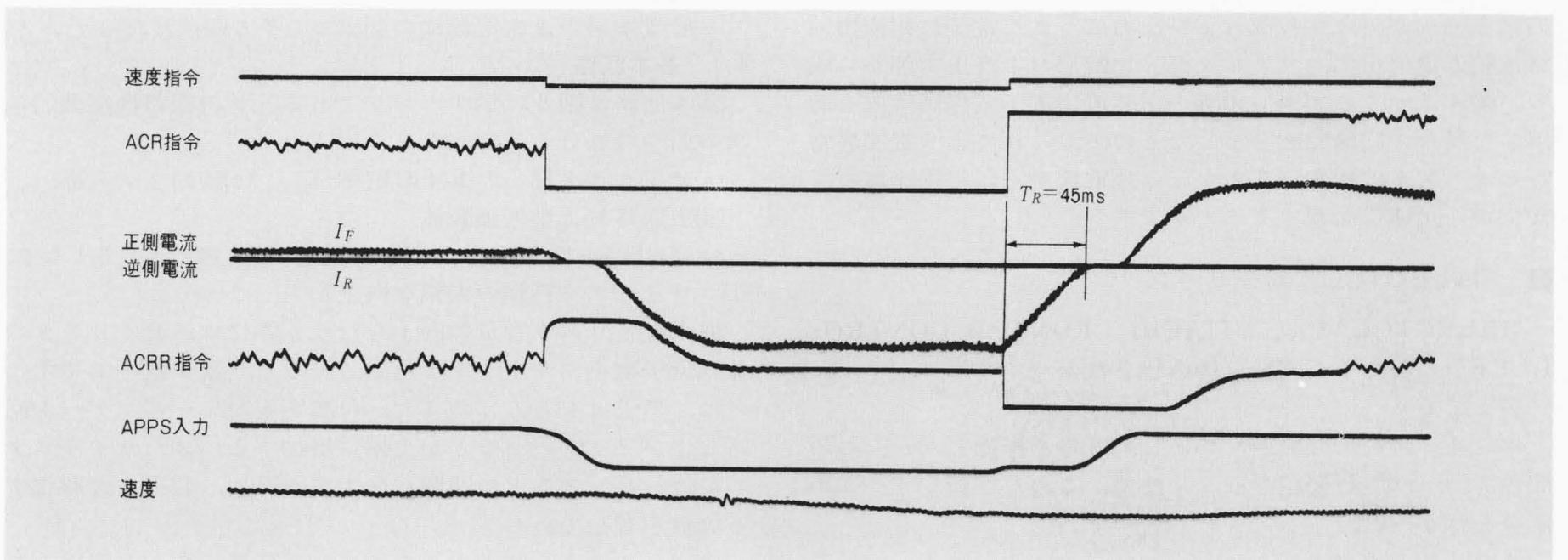


図 2 ACRR を持った ACR 系の応答波形 回生制動をしながら減速運転中、再加速運転に切り換えたときの電流の応答波形を示す。

Fig. 2 The Wave Form of Current Regulator with Current Rate Regulator

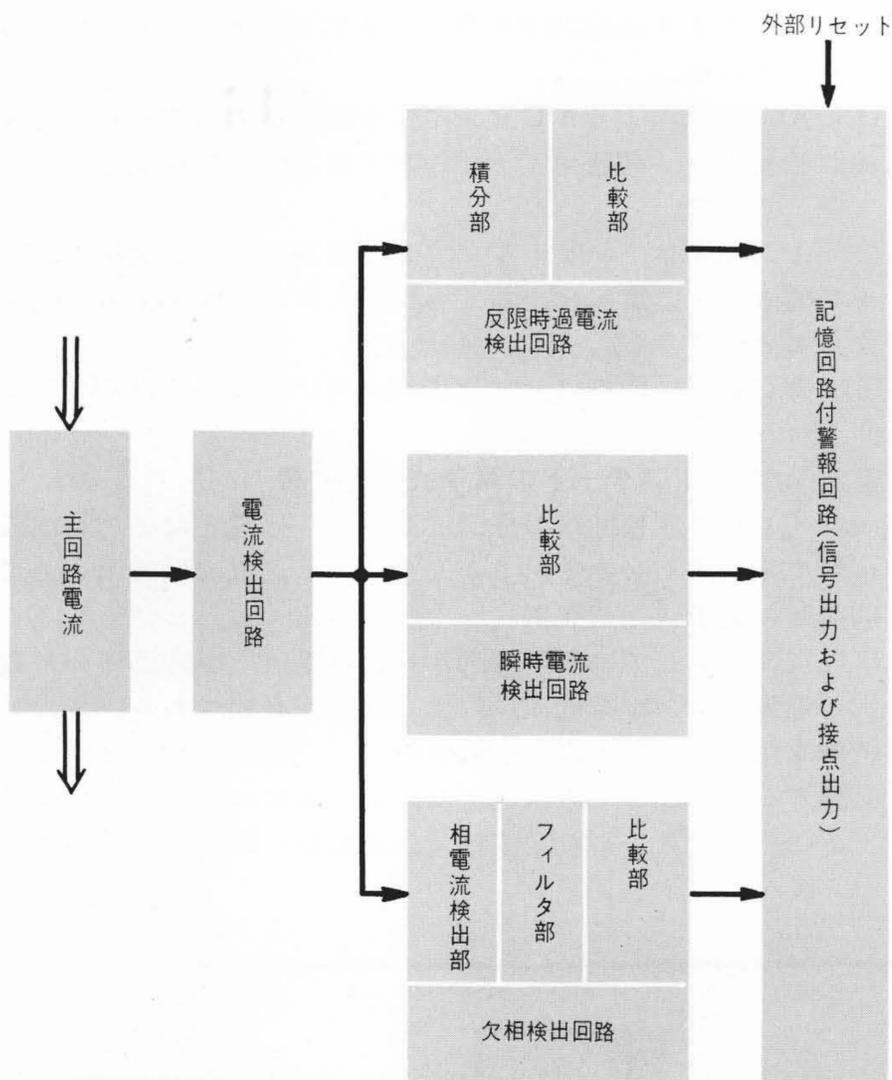


図3 電子式保護装置の全体構成 電子式保護装置は、125%程度の反限時動作過電流、200%程度の瞬時動作非常最大過電流および電流欠相の三つの機能を有する。

Fig. 3 Structure of Electronic Protection Relay

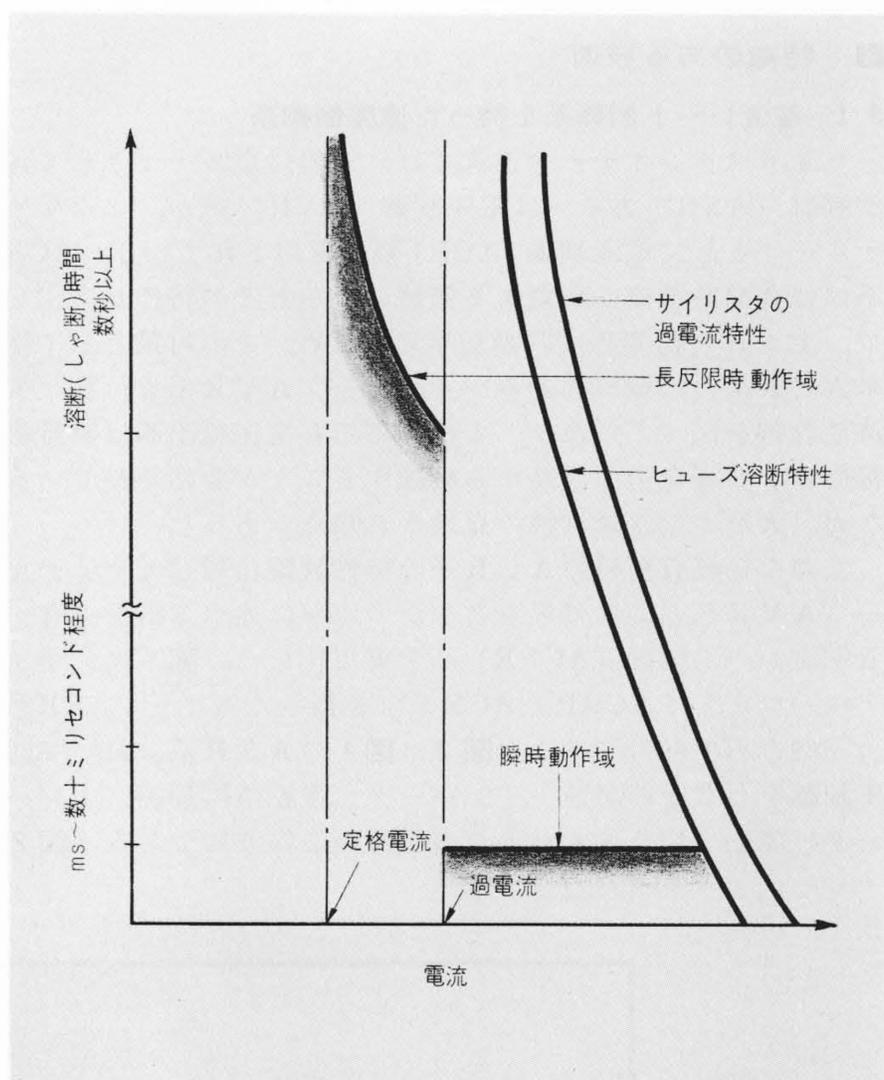


図4 電子式保護装置の過電流保護に対する守備範囲 電子式保護装置により、電流異常時ヒューズを溶断することなしに過電流から短絡電流域までを保護することができる。

Fig. 4 Protection and Coordination of Thyristor Conversion Using Electronic Protection Relay

それらについて一般に考慮する必要はない。したがって、反限時動作過電流、瞬時動作非常最大過電流および電源欠相の三つの保護が要求される。

ところで、従来の保護装置は電磁または熱動作式のものが多く、一般に一つの機能しか持っていない。三つの機能を満たすためには一つの機能を持った保護装置を併用するため高価で、かつスペースが大となり、また動作精度も一般に悪い。

図3は電子式保護装置の原理を示すブロック図である。反限時過電流検出回路は、積分部、比較部および出力部、瞬時過電流検出回路は比較部および出力部、また電源欠相検出回路は相電流検出部、フィルタ部、比較部および出力部から成る。図4はサイリスタレオナード装置に電子式保護装置を適用した場合の守備範囲を示したもので、これにより電流異常時ヒューズを溶断することなしに過電流から短絡電流域まで安全かつ迅速に保護することができる。

#### 4 “HILECTOL” 新シリーズ<sup>(1)(2)</sup>

“HILECTOL”とは、“HITACHI LEONARD CONTROLLER”の略称で、開発、標準化されたサイリスタレオナード装置である。

本シリーズも、開発されてから約3年を経過したが、この間の各ユーザーの要望を取り入れて、このたび新シリーズの開発を行なった。

その特長とするところは、

- (1) IC化による据付面積の大幅な減少
- (2) 専用パッケージによる保守性の向上
- (3) 標準化に伴う信頼性の向上

に加えて、

- (4) 平形サイリスタの採用による単位キュービクルあたりのサイリスタ容量の大幅な向上
- (5) 補助リレー類のプラグイン化
- (6) シミュレータ装置によるチェックの簡易化とMDTの向上などであり、直流電動機の広範囲な速度制御を行なうことを目的とし標準化されたものである。

その応用範囲も、高精度、高信頼性が要求される圧延機用直流電動機の制御から、メンテナンスフリーを特に要求される一般産業用の直流電動機の制御まで多方面にわたっている。

#### 4.1 基本回路

基本回路は図5に示すとおりである。この回路は実装的に次の四つの部分から構成されている。

- (a)サイリスタ部 (b)IC制御部 (c)補助リレー部
- (d)主回路および保護装置

今回の開発・標準化のポイントを列記すると次のとおりとなる。

- (1) サイリスタ容量の大幅な向上

従来サイリスタ容量の向上を行なう際には、サイリスタの並列素子数をふやすことで対処してきた。素子数をふやすことは、素子はもちろんのこと、付属するヒューズ、ゲート回路およびアブソーバなどが大幅に増加する。またサイリスタの電流バランスなどの問題が発生するため、装置が大形化する欠点を有していた。

今回、この点を解消するために、並列素子数が2個以上の場合は、大容量平形サイリスタを採用することにより大幅に並列素子数を減少し、装置の小形化を図った。

サイリスタの接続方法として、装置の小形化、部品点数の

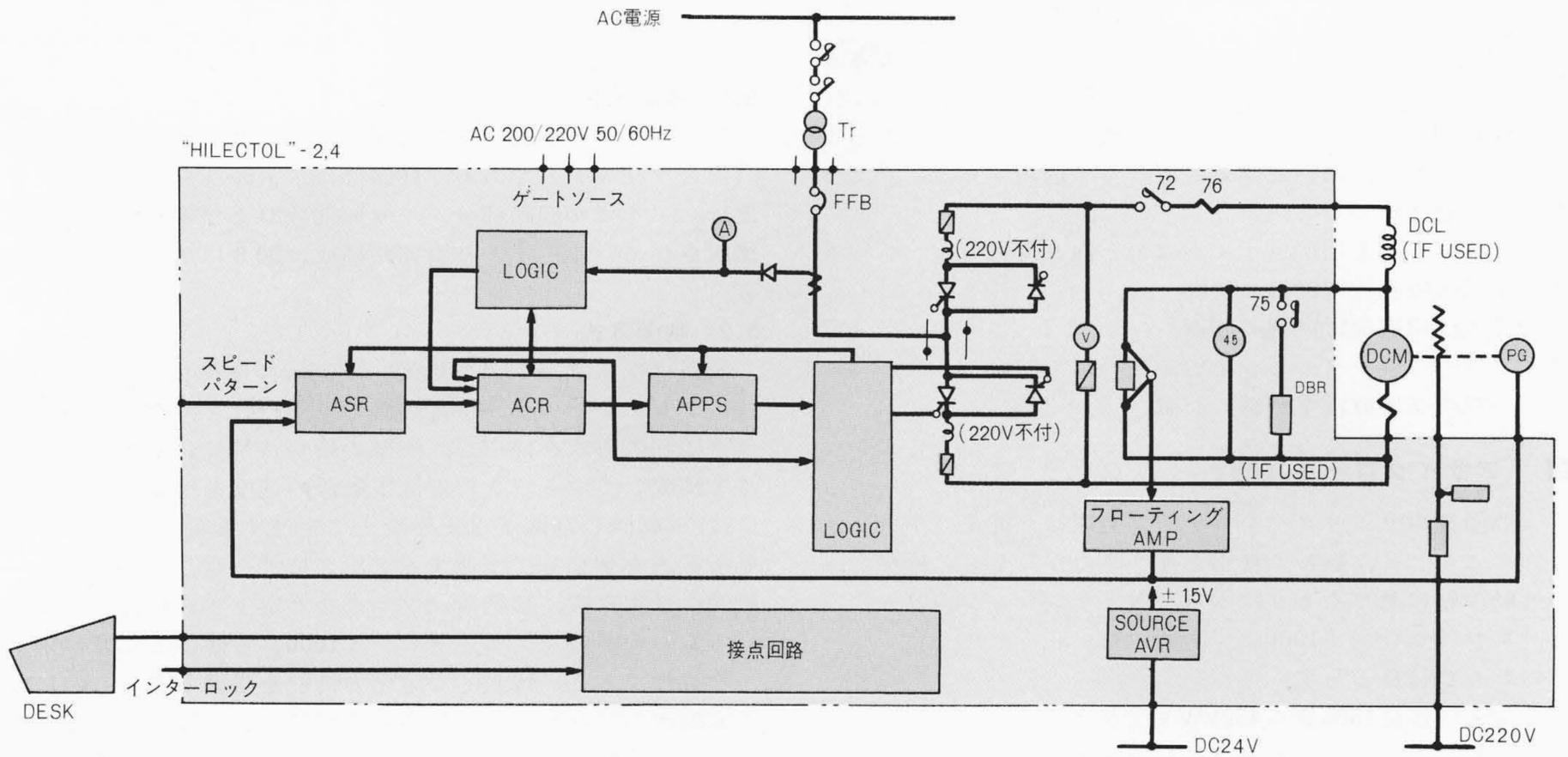


図5 “HILECTOL”基本回路図 サイリスタ、IC制御回路、補助リレーおよび主回路の四つのブロックから構成されている。

Fig. 5 Standard Circuit of “HILECTOL”

減少など多くの特長を持つ逆並列を1スタックとする方式を今回も採用した。

(2) IC部のMDTの向上

IC部は基本的には実績のある従来の方式が採用されているが、これに加えてアナログ回路の調整のしやすさと保守性の向上を目的としたシミュレータ装置をオプション機構として設け、MDTの短縮を図った。

(3) 補助リレー部のプラグイン化

補助リレーには、弱電用リレーから強電用大電力接触器へのパワー増幅およびその逆のものならびに運転操作用リレーや、故障検出リレーなどの中間的なリレーで、動作頻(ひん)度の多いもの、高信頼性を要求されるものなどがある。しかし、リレーであるため寿命や塵埃(じんあい)などによる接触不良が避けられず、これが装置のMTBFを低下させる原因の一つとなっていた。また、故障時の交換作業の煩雑さによるMDTの悪化を伴っていた。

今回、この欠点をなくすため密閉カバー付プラグイン形補助リレーを採用し、MTBFおよびMDTの向上を図った。

4.2 制御方式

基本的には、マイナーループにACRを持つ速度制御および電圧制御方式が採用されている。

その特長は、

- (1) マイナACRによる高応答速度制御が可能である。
- (2) 高性能電流制限特性により、サイリスタおよび電動機の保護協調が非常にすぐれている。
- (3) 調整個所の減少により、保守および調整が容易である。
- (4) 少品種・多用途パッケージによる予備品数の大幅減少などである。

この制御方式に種々のオプション装置を付加することにより、広範囲な応用が可能となる。

4.3 キュービクルの構成

構成としては、サイリスタ、IC、補助リレーおよび主回路の基本回路別にユニット化され、盤表面にはメンテナンス用の計器、故障表示器および運転状態を表示する表示灯が設けられている。図6は“HILECTOL”の外観を示すものである。

今回、従来と比較して改良された部分は、保守性の向上に重点をおいて盤の構成を考慮したことで、その主要点を列記すると、

- (1) サイリスタをスタック化して交換作業を容易にした。
- (2) 主回路および外部配線点検スペースの拡大を図った。

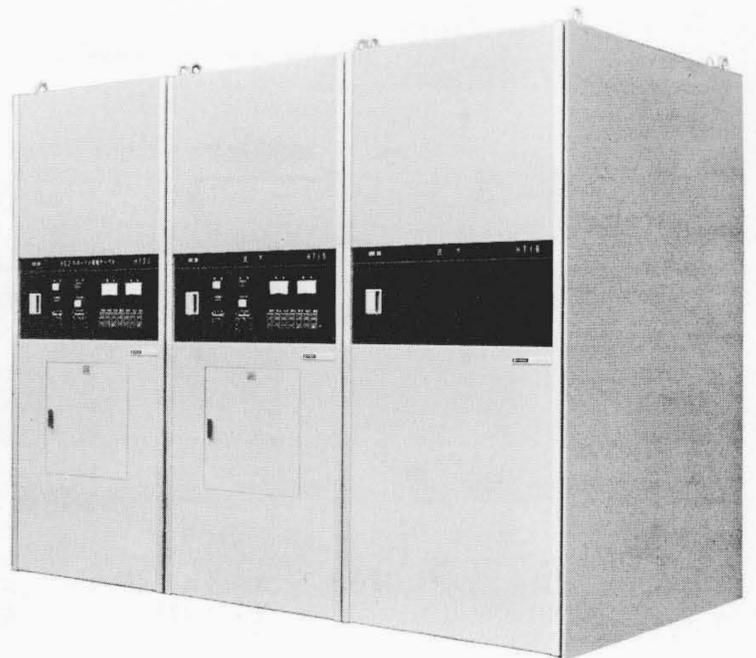


図6 新“HILECTOL”の外観 サイリスタ、主回路回り、アナログ制御回路、補助リレーが一式内蔵されている。表面ドアには監視制御用メータ、ランプ、スイッチが集中配置されている。

Fig. 6 Control Enclosure of “HILECTOL”

4.4 適用

“HILECTOL”は、その用途に応じてシリーズ化がなされている。各シリーズの適用基準は、図7に示すとおりである。

応用範囲は従来と同様、直流電動機の制御全般にわたっており、高信頼性、高精度制御装置として適用することができるよう考慮されている。

その二、三の応用例を示すと次のとおりである。

- (1) 圧延機用直流電動機の制御
- (2) 抄紙機用直流電動機の制御
- (3) プロセッシングライン用直流電動機の制御
- (4) 一般産業用直流電動機の制御

5 「アサイクロール1000」

一般産業用サイリスタレオナード装置は、従来「アサイクロール」として、数多く使用されてきたが、さらに機械設備の連動運転に適するようになるなど、オプション内容が豊富な「アサイクロール1000」を開発した。

そのおもな特長として、

- (1) 従来の容量150kWを450kWまで拡大した。
- (2) IC化パッケージおよびユニット化により配線の部品点数を少なくするなど、高信頼性を確保した。
- (3) 盤の構成は、豊富な制御オプションを容易に追加できるようにし、応用機種が多様化を図った。
- (4) 指令装置を設けることにより、始動時の過渡的な問題を対策した。
- (5) 電動機の絶縁クラスをF種にし、いっそうコンパクト化を図った。
- (6) 電動機の温度異常を、電動機内に取り付けた感温素子で直接検知し、保護するようにした。
- (7) 速度検出器には交流小形発電機（ACPG）を使用し、ブ

ラシの交換を不要にした。などがあげられる。

5.1 基本回路

特に需要の多い30～185kWまでは、三相全波整流半波制御（混合ブリッジ）である。回路部は、電源部分、サイリスタ部分、アナログ回路部分、リレー部分および電動機部分から構成されている。その基本回路構成は図8に示すとおりである。

5.2 制御方式

回路は電流制限回路付速度一定制御で標準化しているが、特にプレスなどのように電動機の垂下特性を持たせたいときは電圧制御方式を採用し、機械の持つ特性に合わせて制御回路を構成している。また直流電動機を速度を可変させるためには、電動機の電機子電圧を変えて変速する定トルク特性と、界磁電流を調整して変速する定出力特性を有しているが、一般的には押出機、製紙機、プレスなど定トルク特性で使用されるものが多い。「アサイクロール1000」も標準としては定トルク特性である。代表的な定出力特性を必要とするものには巻取機があげられるが、製品の種類によっては定トルク特性を有する機械に対し、定出力特性の電動機を使用する場合もある。「アサイクロール1000」は定出力特性の回路構成をオプションとし容易に変更できるようにユニット化している。定トルク特性と定出力特性を図示すれば図9のようになる。

アサイクロール1000の保護方式は図8の回路に示されている。機器の破損によって生ずる過電流現象はFFB（ヒューズフリーブレーカ）およびEF（ヒューズ）によって保護される。操作、負荷および回路上から生ずる過負荷とか電動機の温度上昇の現象はアナログ回路にてサイリスタのゲートサプレスを動かされるか、またはサーマルリレーを動作させることにより運転を停止させている。その他界磁そう失（40）

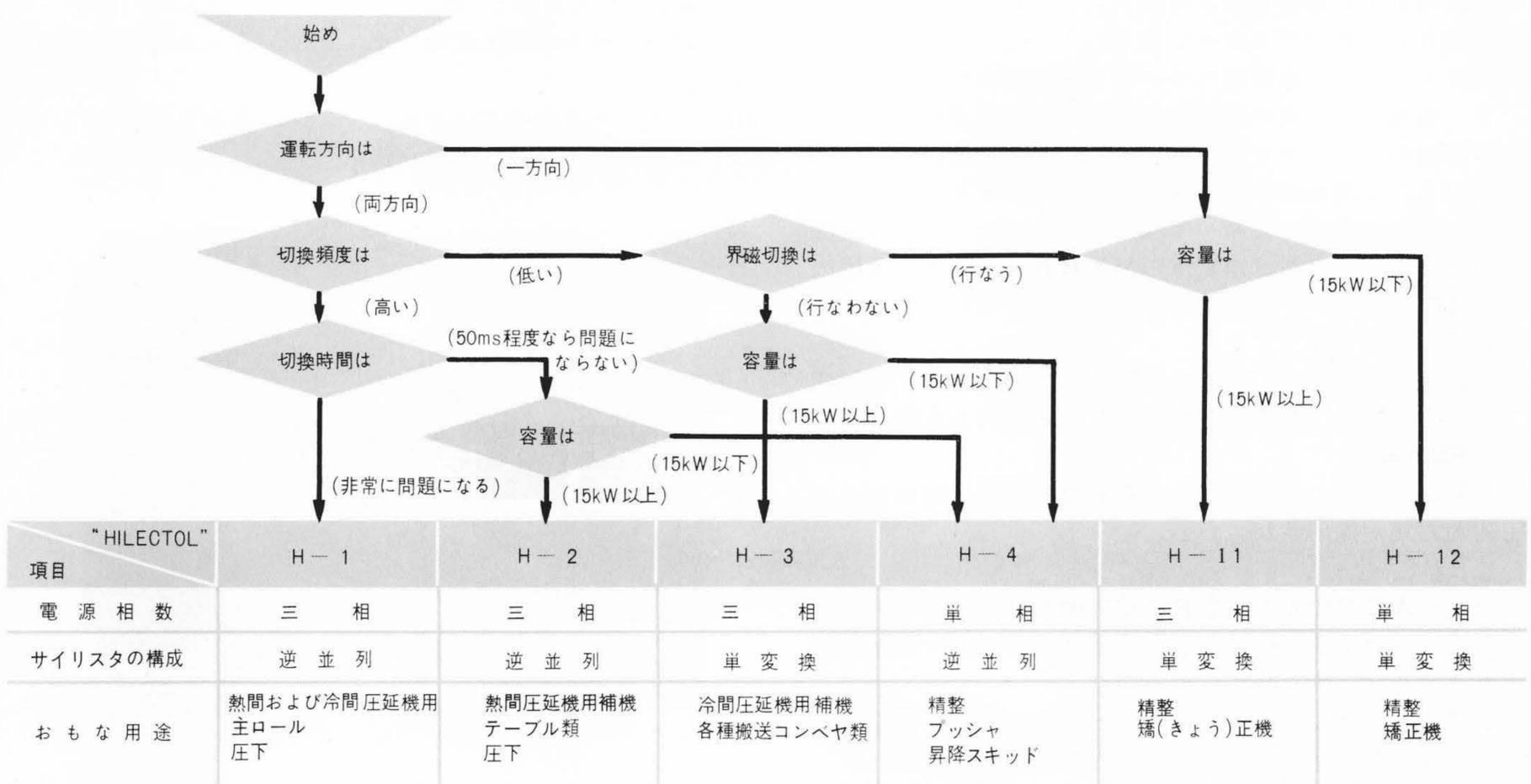


図7 “HILECTOL”シリーズを選択するためのフローチャート 負荷の運転条件を考慮すれば、用途に最適の機種がおのずと決まる。

Fig. 7 Flow-chart for Selection of “HILECTOL”

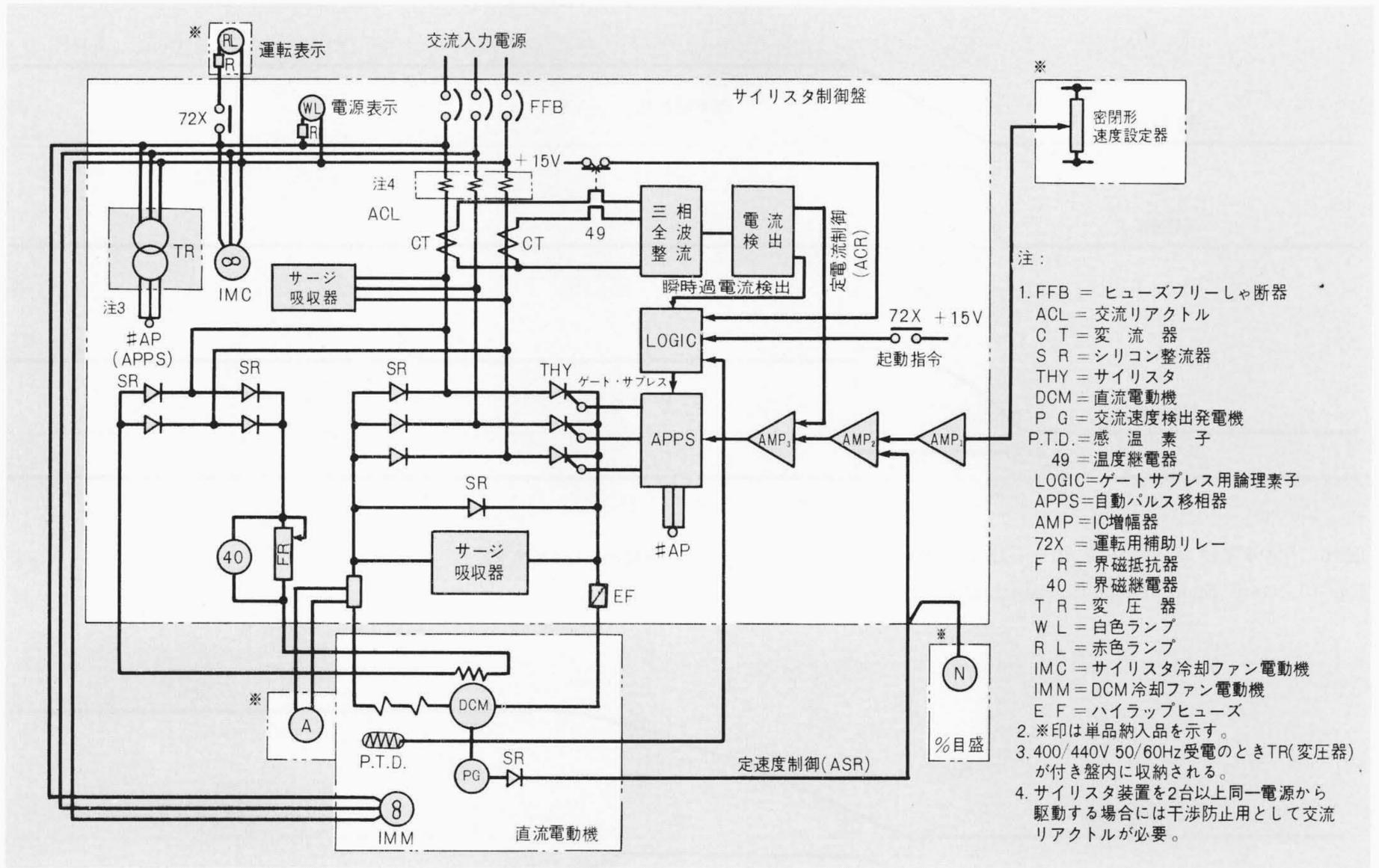


図8 「アサイクロール1000」基本回路図 「アサイクロール」のサイリスタ制御盤には、整流電源および制御回路がすべて収納されている。

Fig. 8 Standard Circuit of "ACYCLOL-1000"

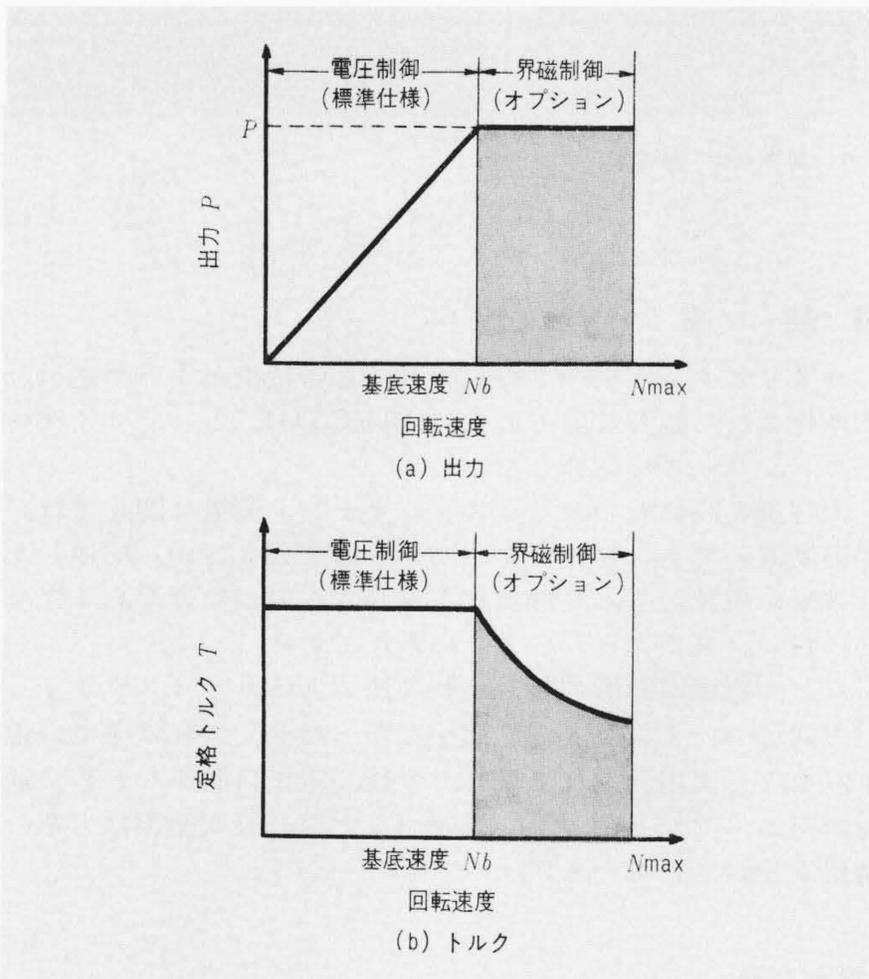


図9 回転速度と出力、トルクの関係 「アサイクロール」は主トルク特性を持つが、オプション機能として定出力特性を付加することもできる。

Fig. 9 Relation between Revolution and Power, Torque

やサージに対する保護により、総合的な保護協調が取られている。「アサイクロール」の回路上で特記すべきことは、

- (1) 保守の容易さに重点を置き、主接触器および過電流リレーをなくし、この回路の制御を無接触の論理素子で行なっている点である。電動機の停止、過負荷時および温度異常時には、主サイリスタにゲートサプレッスをかけることにより1サイクルでのゲートシャ断を行なっている。その結果、主サイリスタのアーム短絡および負荷短絡などの不測の事故の場合でもゲートサプレッスにより、他に事故が波及しない。図10はゲートサプレッスの動作を示すオシログラムである。
- (2) 電流制限回路には特殊フィルタ付のマイナACR方式を採用している。図11は電流制限の動作を示すオシログラムである。
- (3) 「アサイクロール」のアナログ回路部は標準パッケージ化されている。一部のインピーダンス定数の設定を調整することにより、あらゆる機種に適用することができる。

### 5.3 キュービクルの構成

標準仕様の場合、制御盤の寸法は幅700mm、高さ1,430mm、奥行550mmであり、サイリスタレオナード制御盤としては最もコンパクトになっている。オプションを追加するときは、別ボックスをビルディングブロック化し、全体として一面にまとめている。

### 5.4 適用

「アサイクロール1000」の開発により、応用範囲が広くなり、一般産業用としては高度の技術的要求に応じられるようになった。表1は適用例を示すものである。

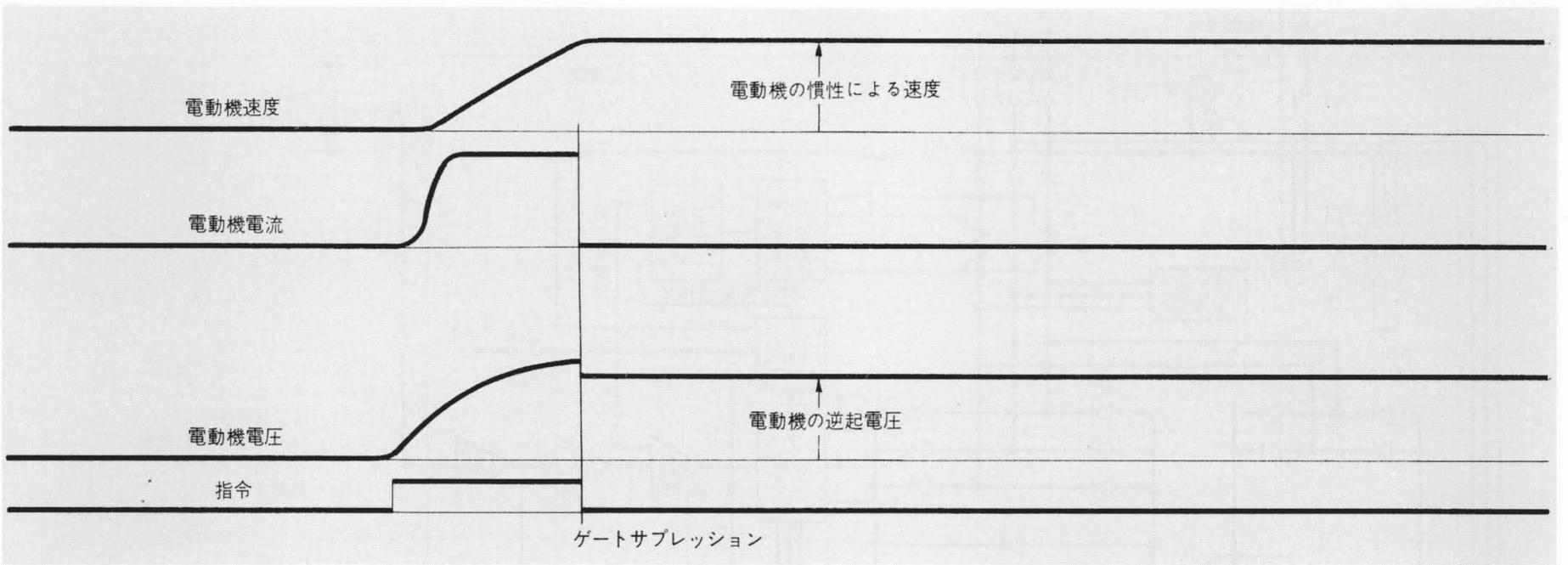


図10 「アサイクロール1000」のゲートしゃ断特性 ゲートサプレッによる電流をしゃ断する。  
 Fig. 10 Gate Suppression Characteristics of "ACYCLOL-1000"

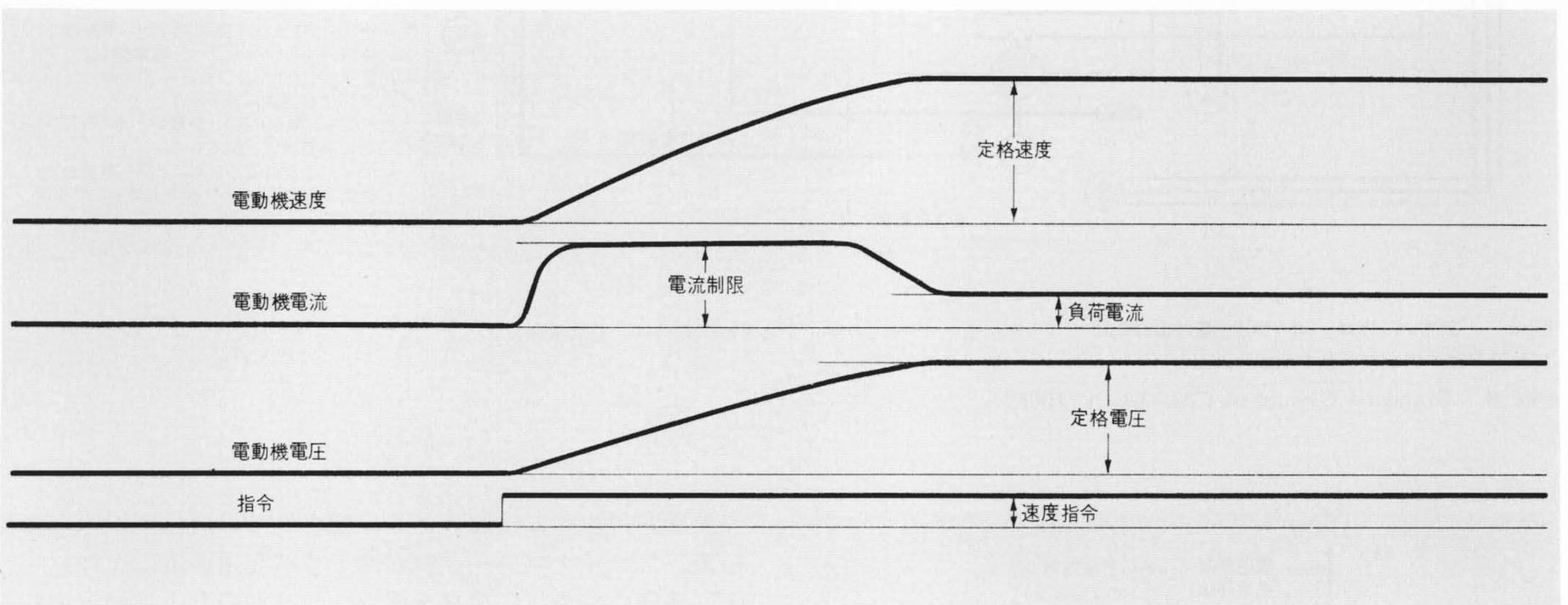


図11 「アサイクロール 1000」の加速特性 マイナACRの電流制限効果により、なめらかに加速する。  
 Fig. 11 Accelerating Characteristics of "ACYCLOL-1000"

表1 「アサイクロール 1000」の適用例 「アサイクロール」は、一般産業用の直流電動機を速度制御するために広く適用できる。

Table 1 Applications of "ACYCLOL-1000"

産業区分	適用例
ゴム・プラスチック工業	押出機, カレンダ, 中空成形機, ラミネータ
製紙工業	抄紙機(ラインシャフト式, ヤンキー式), カレンダ, リワインダ, 段ボール製造機, ラミネータ
製線工業	巻取機, 伸線機, 撚線機
製鉄工業	プロセッシングライン, 鋼板巻取機, パイプミル, コンベヤ, テーブル駆動, 遠心鑄造機, 鋼管引抜機, 電縫管ミル, スパイラルチューブ製造機, ビレットグラインダ
工作機械	プレス, ターニング, ボール盤, 深穴専用機
繊維工業	繊維仕上機械, 精紡機
印刷工業	輪転機
木工機械工業	ロータリレース, ベニヤスライサ, 合板製造機
その他	ポンプ, フロウ, コンプレッサ, キルン・コンクリートパイル, コンクリートヒューム管, グラインダ, かくはん機, 研摩機, その他

## 6 結 言

サイリスタレオナード方式の展望と新技術について述べ、標準化された制御装置である“HILECTOL”と「アサイクロール」シリーズを紹介した。

大容量・高性能のサイリスタレオナード装置に関しては、制御装置のアセンブルの方法が小形機と異なるが、前述した新技術を駆使して、高性能化を図りさらに信頼性が高く安全性の良いシステムとしてまとめられている。

なお、直流電動機の新しい制御法であるサイリスタチョッパ方式について言及する紙面がなかったが、これはすでに地下鉄などで実用化されており、今後、電気自動車などの交通システム、プロセッシングラインなどの一般産業用にもその適用が検討されている。

## 参考文献

- (1) 齊藤奎二:「HILECTOLシリーズ サイリスタレオナード装置」日立評論 53, 1052~1057 (昭46-11)
- (2) 神山健三:「最近のサイリスタレオナード装置」日立評論 54, 587~590 (昭47-7)