

直流電動機の全デジタル制御

Microprocessor-Based All Digital Control of DC Motor

最近、マイクロプロセッサ及び周辺LSIの普及と充実により、パワーエレクトロニクス駆動電動機の全デジタル制御が技術的にも経済的にも可能となり、アナログ制御では実現不可能な性能、機能、信頼性などに関し高度化が実現できるようになった。16ビットマイクロプロセッサの出現は、電動機制御の全デジタル化をより現実的なものとし、これを加速、拡大しようとしている。日立製作所は、この分野へのマイクロプロセッサの応用研究に早くから着手し、既に製品化技術を確立している。

この論文では、マイクロプロセッサ適用によるサイリスタレオナードのデジタル制御方式は、良好な制御特性を実現し、特に過渡特性でも、アナログ制御方式に比べて遜色のないことを述べる。

神山健三* *Kamiyama Kenzō*
 梓沢 昇* *Azusawa Noboru*
 大前 力** *Ômae Tsutomu*

1 緒 言

電動機、サイリスタ変換装置、高速マイナーループを含む速度制御装置より成る速度制御システムで、マイクロプロセッサ適用による電動機制御のデジタル化は、その他の分野に比べ、国内外共遅れている状況にある¹⁾。この主な原因は、マイクロプロセッサ適用のデジタル制御方式がリニアIC適用のアナログ制御方式に比べ、特に経済性、応答性の点で今まで対抗できなかったことにあるものと考えられる²⁾。

しかし、16ビットマイクロプロセッサをはじめとした最近のLSIマイクロエレクトロニクスデバイスの進歩と普及により、マイクロプロセッサ適用のデジタル制御方式は、経済性、応答性の点でも十分対抗できる段階に入ろうとしている¹⁾。デジタル制御方式は、アナログ制御方式では技術的にも経済的にも実現不可能な性能、機能、信頼性などに関する高度化を容易に可能とし、この方式の実用化は今後急速に進展するものと思われる。

以下、ここでは高精度な速度制御システムとして、現在最も多く使用されているサイリスタレオナードの全デジタル速度制御について、全デジタル化の背景と課題、全デジタル制御システム、制御特性などを中心に述べる。

2 背景及び課題

2.1 背 景

電動機の可変速制御システムは、サイリスタ、トランジスタ、ICなどの半導体技術を利用して、図1に示す構成が主として用いられている。速度制御ループにはリニアICを適用したアナログ制御方式が採用される。ここで、指令や負荷変動時の過渡応答や軽負荷時でのサイリスタ変換装置の非線形特性により生ずる安定性や応答性の劣化を改善するため、電流制御のほかに電圧制御や電流変化率制御の高速マイナーループが用いられている。

ところで、最近、製鉄業や製紙業などのプラントで、製品の品質や歩留まりの向上という観点より、現在使用されているアナログ速度制御装置に、図2に示すような精度、応答、安定性及び保守性の向上などの要請がある。しかし、アナログ制御方式は表1(a)に示すような特徴をもっており、構成部

品が電圧や温度変動の影響を受けたり、経年変化を受けるなどの理由から精度の向上に限界がある。また、アナログ制御方式はサイリスタ変換装置のもつ非線形特性を十分補償することが困難なため、安定性の向上にも限界がある。更に、故障診断を行なうためには、演算データを記憶する必要があるが、アナログ制御方式に演算データを記憶する機能を付加することは実用上困難であるため、アナログ制御方式は保守の簡単化にも難点がある。これに対しデジタル制御方式は、同表(b)に示すような特徴をもっている。そのため、速度制御装置の改善に課せられた要請を解決する手段として、デジタル化が検討されてきた。最近のマイクロプロセッサを中心としたマイクロエレクトロニクスデバイスの著しい進歩は、デジタル化実現の障害となっていた問題に解決を与え、速度制御装置のデジタル化が急速に進展する状況になりつつある。

2.2 課題及びその解決手段

アナログ制御方式に経済性、寸法の面で匹敵し、かつ高性能なデジタル速度制御を実現するための課題として、図2

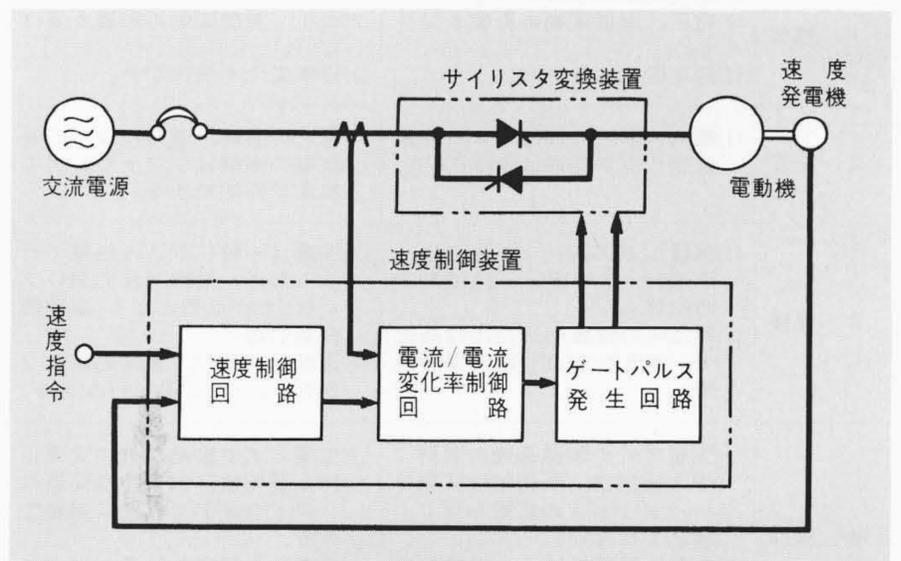


図1 電動機速度制御システム サイリスタ駆動電動機速度制御システムのブロック図を示す。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立研究所

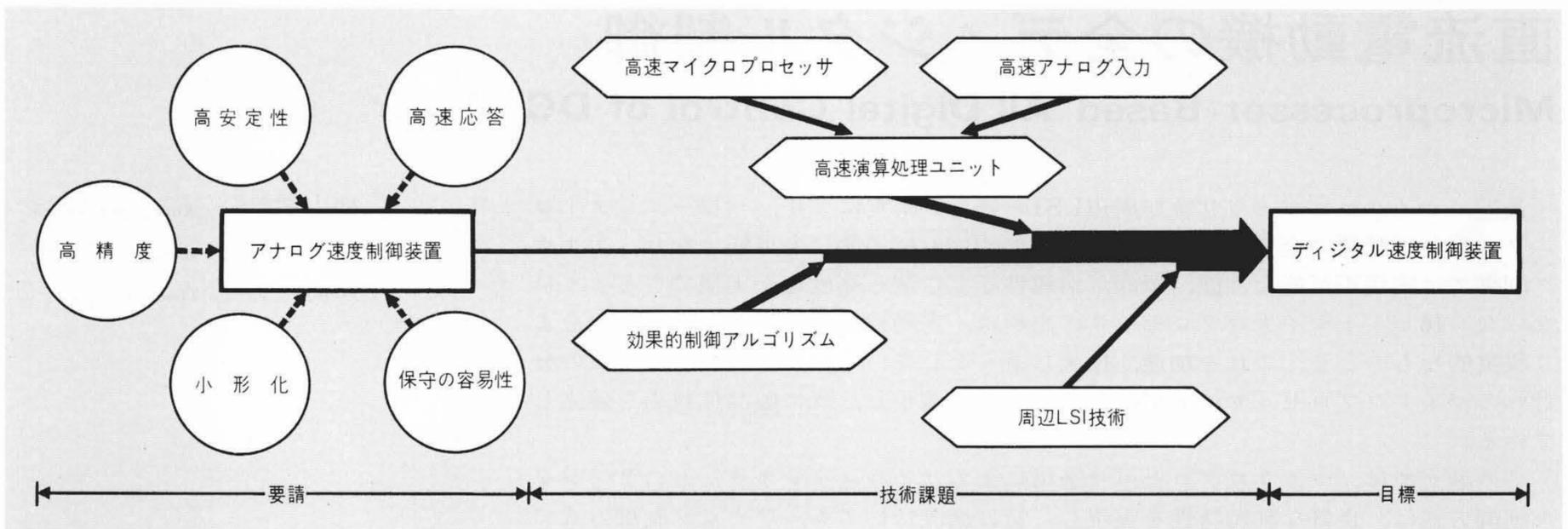


図2 速度制御装置のデジタル化の背景 速度制御装置に課せられた要請とデジタル化の課題について示す。

に示す各種技術の確立がある。すなわち、(1)高速応答を実現するための高速演算処理ユニット、(2)小形化を実現するための周辺LSI技術、(3)高安定かつ高速応答を実現するための効果的制御アルゴリズムなどの確立である。ここで(1)及び(2)は最近のLSIマイクロエレクトロニクス技術の著しい進歩による高速16ビットマイクロプロセッサや周辺LSIデバイスの普及と充実により解決可能な状況となってきた。

ところで、デジタル制御方式は、アナログ制御方式の並列演算処理に対し直列演算処理で、現状では演算処理速度に限界があるため、アナログ制御方式で採用している高速マイナーループの演算処理を行なうことは困難である。そこで、デジタル制御で容易に処理できる非線形演算を適用した効果的な制御アルゴリズム、すなわちサイリスタ変換装置の非線形特性を線形化するためにアナログ制御方式で採用してい

る高速マイナーループ制御の代わりに、非線形補償を行なう制御アルゴリズムを確立することにより、上記(3)も解決可能となってきた。また、アナログ制御方式で困難であった制御装置の故障診断は、デジタル制御方式では演算データを記憶する機能がそれ自身にあるため、演算データをチェックすることにより可能となる。例えば、電流が急激に増大する場合に、その原因が何に起因するかは、過大電流を発生する直前の演算データをチェックすることにより容易に可能となる。

3 全デジタル制御システム

3.1 ハードウェアの構成

図3に16ビットマイクロプロセッサを中枢とした、全デジタル電動機速度制御システムの構成を示す。主回路は逆並列接続の二組みの三相全波サイリスタ変換装置から成り、サイリスタレオナードを構成している。検出器は電流検出用として交流変流器を、速度検出用として回転数に応じた周波数のパルスを発生するパルス発生器を用いている。更に、周辺回路は、サイリスタのゲートパルスを発生する回路と各種信号の検出回路とがある。前者の回路には、マイクロプロセッサで計算された制御角指令をもとに、定められた位相でパルスを発生するゲートパルス発生回路がある。後者の回路には、A-D変換器、電流断続検出回路及び速度検出用カウンタがある。ここで、16ビットマイクロプロセッサ及び周辺LSIを使用すると、2点鎖線で示す制御回路部分をワンボードのコントローラとして構成することができる。

マイクロプロセッサで処理する内容を、ブロック構成で示すと図4になる。速度指令 V_s 、速度帰還信号、電流帰還信号及び電流断続の検出信号をもとに、マイクロプロセッサのソフトウェアで演算処理を行ない、最終的にゲートパルス発生回路への制御角指令 α_r を発生する。速度制御ではPI(比例積分)補償を用いている。電流制御では、電流偏差が一定値以上でかつ電流が断続しているときだけに後述する非線形補償を行ない、その他のときはPI補償を行なう方式により、電流の全動作領域で高速応答が可能となる。更に、4象限運転を行なうための切換論理、及び切換時の制御角指令 α_c を発生する処理があり、電流方向を切り換えるまでの制御角指令を発生する。

3.2 ソフトウェア

図4の機能を実行するソフトウェアとしては、常時実行し

表1 アナログ制御とデジタル制御の特徴 アナログ制御とデジタル制御の主な特徴について示す。

方式 項目	(a) アナログ制御	(b) デジタル制御
1. 精度	(1)精度向上に限界がある。 (2)電圧、温度変動の影響を受ける。 (3)経年変化を受ける。	(1)精度向上が容易である。 (2)電圧、温度変動の影響を受けない。 (3)経年変化を受けない。
2. 応答	(1)電流の断続、連続による応答改善の補償回路は複雑である。	(1)電流の断続、連続による応答改善の補償はソフトウェアで容易に対処できる。
3. 保護	(1)保護は制御ループと独立に、迅速かつ常時行なえる(並列瞬時処理)。 (2)異常時の保護処理回路は複雑で、実用的でない(事前保護処理)。	(1)保護は一般に割込み処理で行なうため、処理速度の速いプロセッサが必要となる(直列時分割処理)。 (2)運転状態監視、異常処理はソフトウェアで容易に行なえる。
4. 操作	(1)生産方式や製造品種の変更に伴う運転法、制御特性変更はハードウェアの変更を生じ、容易ではない。 (2)自動化範囲の拡大に限界がある。	(1)生産方式や製造品種の変更に伴う運転法、制御特性変更はソフトウェアで容易に対処できる。 (2)自動化の範囲を容易に拡大でき、操作の簡単化を実現しやすい。
5. 保守	(1)故障診断処理回路は複雑かつ困難で、実用的でない。 (2)運転状態監視回路は複雑で、実用的でない。	(1)故障診断処理はソフトウェアで容易に行なえ、運転開始前及び運転中の動作チェックを迅速かつ容易に行なえる。

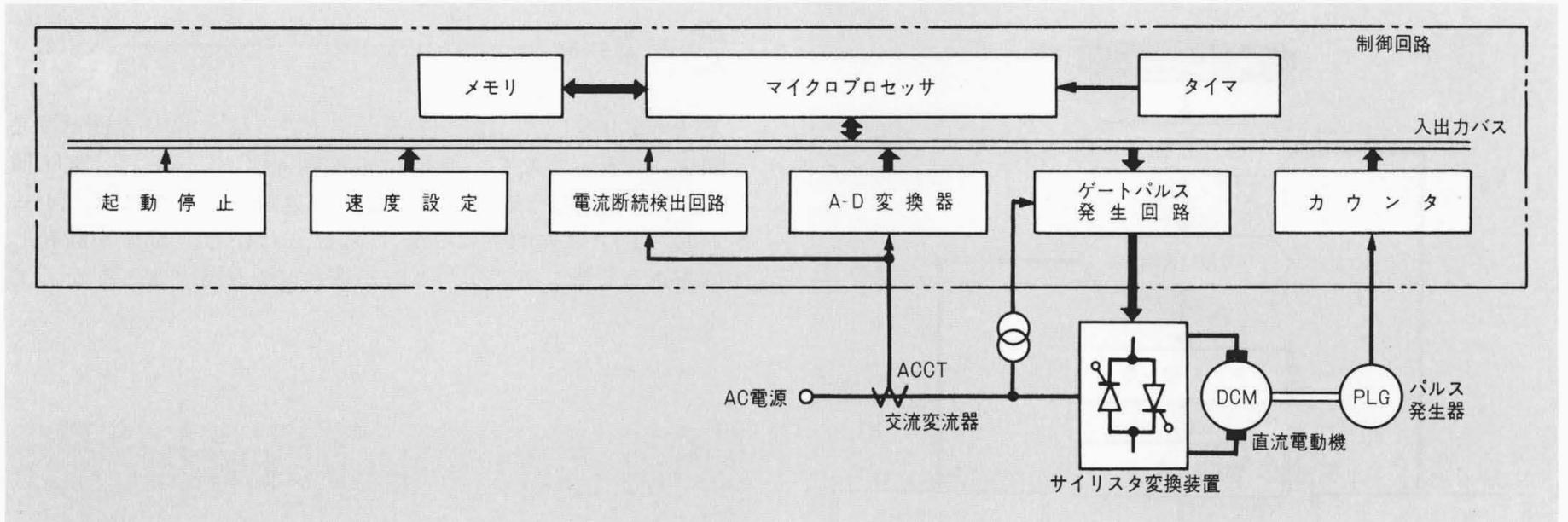


図3 速度制御システムの構成 マイクロプロセッサを用いた制御回路と速度制御システム構成の概要を示す。

ているメイン処理プログラム、時分割で実行する速度制御処理プログラムと電流制御処理プログラムとがある。メイン処理プログラムは、スタート信号及びストップ信号と速度の設定値を取り込み、電動機の起動、停止処理を実行する。速度制御処理プログラムは図5の構成である。過大回転のときは保護処理を実行する。通常の制御ではPI補償を行ない電流指令を求める。また、電流指令の演算結果が一定値以上のときには、電流指令の制限処理を行なう。電流制御処理プログラムは図6の構成である。過大電流のときは電流を制限値に抑制する処理を行なう。また、電流方向を切り換える時点であれば、切換処理に必要な制御角指令 α_c を発生し、電流を零にするとともに逆側のサイリスタ変換装置を動作させる準備をする。通常の制御では、PI補償、余弦補正と非線形補償との結果を加算した制御角指令 α_a を発生するとともに、これらの上下限値の制限処理を行なう。上記した3種の処理により得られた制御角指令 α_r をゲートパルス発生回路に設定して、処理が終了する。

また、三相全波サイリスタ変換装置は平均的には電源周波数の6倍の周波数であり、それに対応した周期でサンプリング制御される。サイリスタの転流を確実にこなうためには、制御角は最小制御進み角 β_{min} (最大制御遅れ角 α_{max} に等しい)と最小制御遅れ角 α_{min} との間で位相制御される。そのため、制御角の移相可能幅は、移相前の制御角の値により異なり、図7に示すハッチング以内となる。

特に、制御角が小さくなる方向に移相する場合、図7のハッチング以外に移相させると、サイリスタは点弧できなくなるという問題が発生する。このデジタル制御方式では、このような異常を防止するため制御角が同図のハッチング以内にあることを診断して処理を行なっている。

4 電流断続時の非線形補償

4.1 補償の必要性

図4では高速応答を得る新しい電流制御方式を採用している。以下、この方式について述べる。

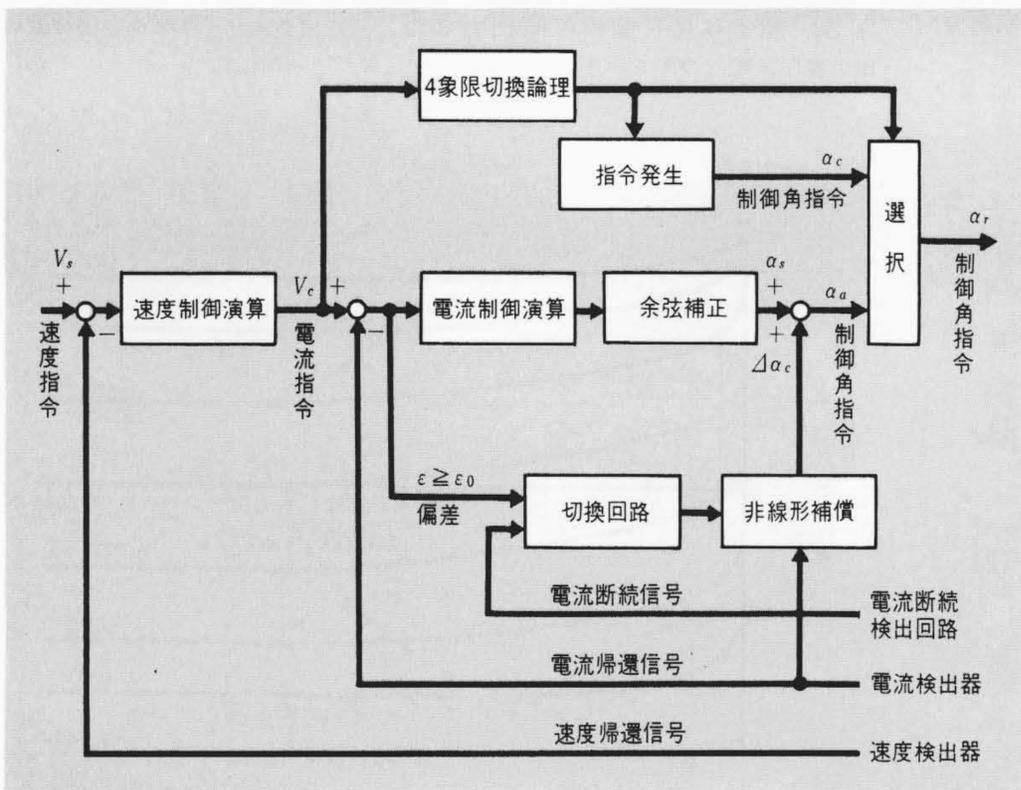


図4 速度制御システムのブロック図 マイクロプロセッサのソフトウェアで処理する内容を示す。

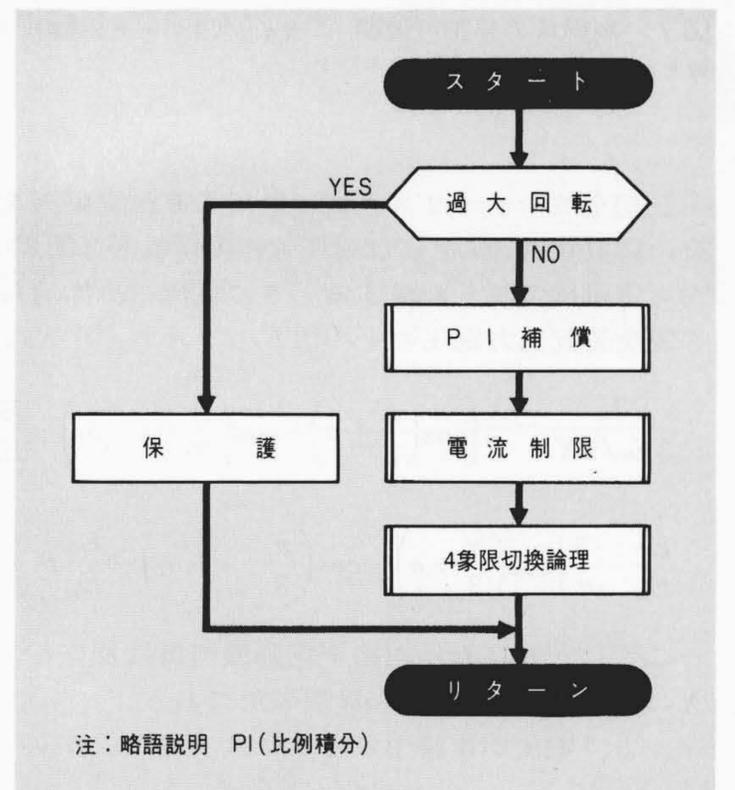


図5 速度制御のフローチャート 速度を制御するためのプログラムの処理内容を示す。

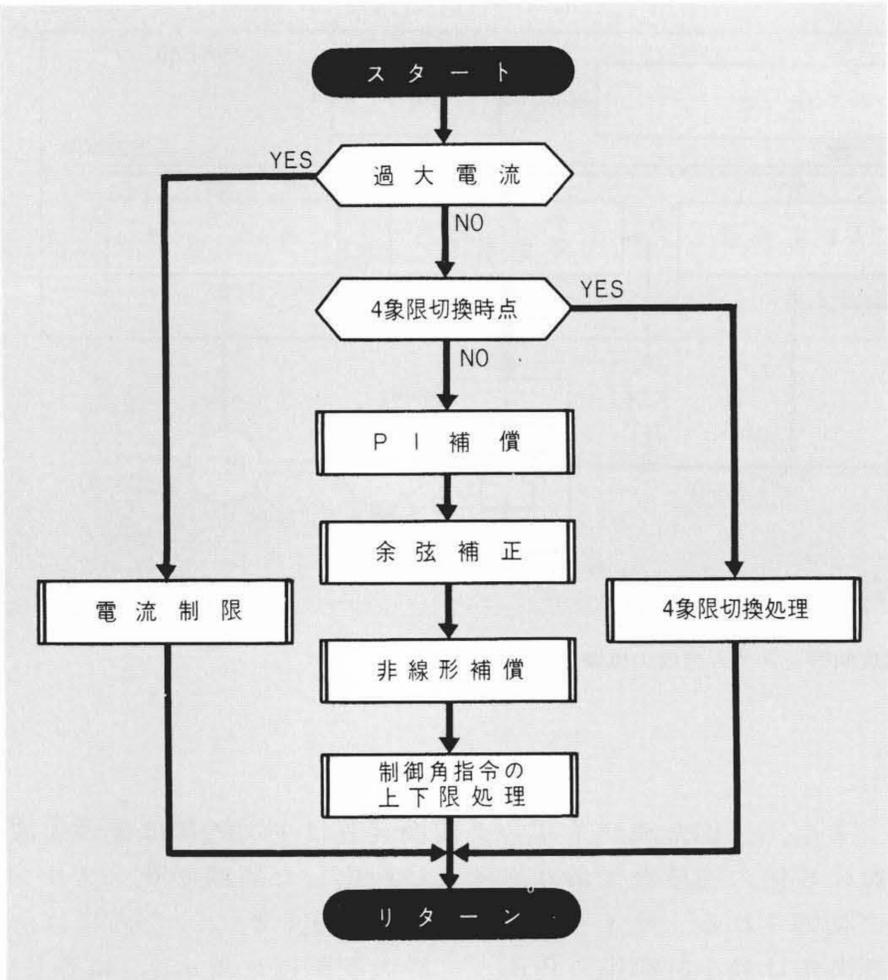


図6 電流制御のフローチャート 電流を制御するためのプログラムの処理内容を示す。

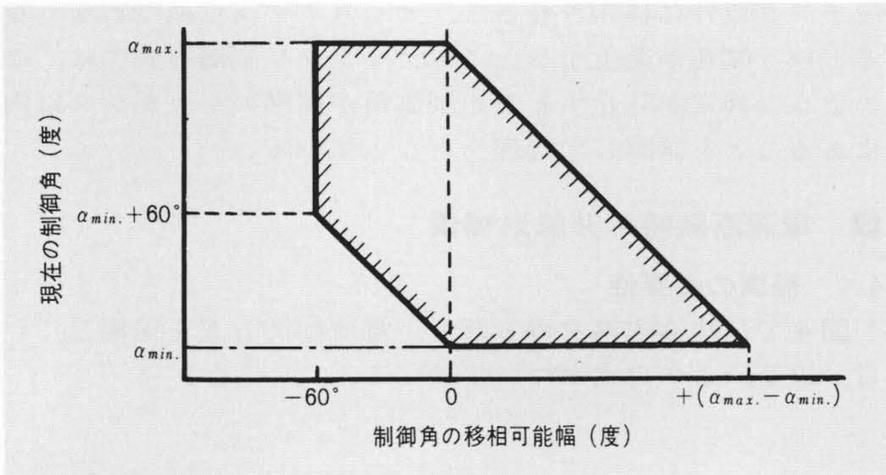


図7 制御角の移相可能幅 サイリスタの転流を確実にこなうための制御角と、制御角の移相可能幅を示す。

三相全波のサイリスタ変換装置で直流電動機を制御する場合の電動機電流 i_d 、印加電圧 e_d の動作波形は図8になる。同図から電動機電流が断続するときの電流の平均値 I_d 、サイリスタ変換装置出力電圧の平均値 E_d は、それぞれ次式で表わせる。

$$\frac{I_d}{3E_m/\pi X} = \frac{X}{R} \left[\cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + \theta_1\right) - \frac{E_c}{E_m} \theta_1 \right] \dots (1)$$

$$\frac{E_d}{E_m} = \frac{3}{\pi} \left[\cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + \theta_1\right) - \frac{E_c}{E_m} \theta_1 \right] + \frac{E_c}{E_m} \dots (2)$$

ここに、 R 、 L は回路+電動機の抵抗及びインダクタンス、 X は ωL 、 θ は通流角、 α は制御角である。

一方、電流が連続するときには次式が成り立つ。

$$\frac{I_d}{3E_m/\pi X} = \frac{X}{R} \left[\cos\alpha - \frac{\pi E_c}{3E_m} \right] \dots (3)$$

$$\frac{E_d}{E_m} = \frac{3}{\pi} \cos\alpha \dots (4)$$

$X/R=5.0$ として、(2)~(7)式から $E_d^* - I_d^*$ の関係を図示すると図9になる。ただし、*印は電流値を $3E_m/\pi X$ で、電圧値を E_m で正規化した値である。電流が連続するときには、(4)式から E_d^* は I_d^* に無関係に一定である。しかし、電流が断続しているときには、 E_d^*/I_d^* の値が連続時と比べて大きくなっている。

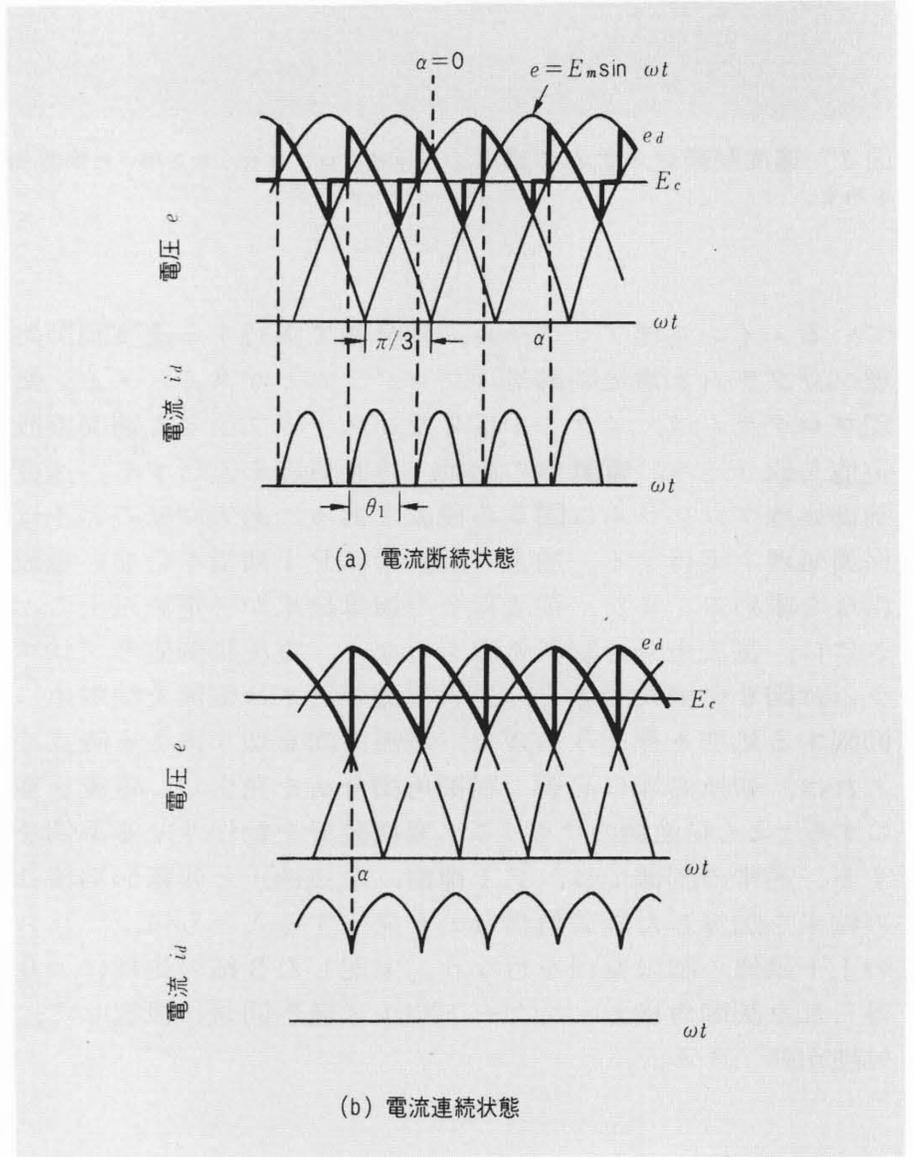


図8 サイリスタ変換装置出力波形 三相全波サイリスタ変換装置の出力電圧、電流波形を示す。

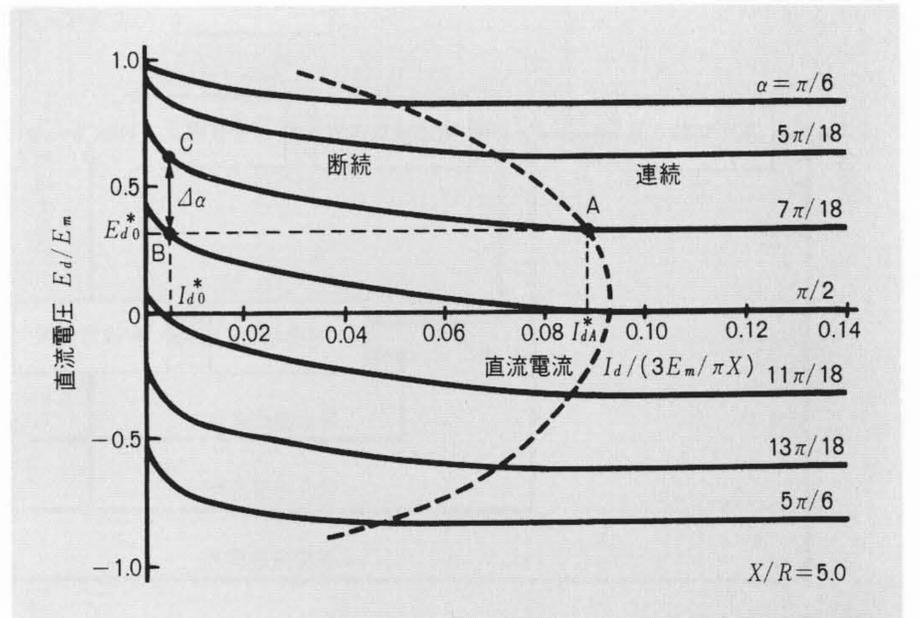


図9 サイリスタ変換装置の負荷特性 電流断続時での非線形補償の原理を示す。

このような $E_a^* - I_d^*$ 特性のために、図4のシステムで電流制御を行なう場合電流制御ループのゲインの調整に難点がある。すなわち、電流制御ループのゲインを電流連続時に最適に調整すると、電流断続時にゲイン不足となり応答が悪くなる。一方、電流断続時の状態で最適なゲインに調整すると、電流連続時には過大なゲインとなり安定性が悪くなる。そこで、この電流断続時の非線形負荷特性を補償する新しい電流制御方式を開発し、採用している。

4.2 非線形補償

いま、図9で制御角 $\alpha = 7\pi/18$ (rad) でサイリスタ変換装置を動作させ、直流電動機を駆動したとする。電動機が速度が低く電流値 I_d^* が同図のA点の値 I_{dA}^* より大きいときには、サイリスタ変換装置の出力電圧 E_a^* は E_{a0}^* で一定である。これに

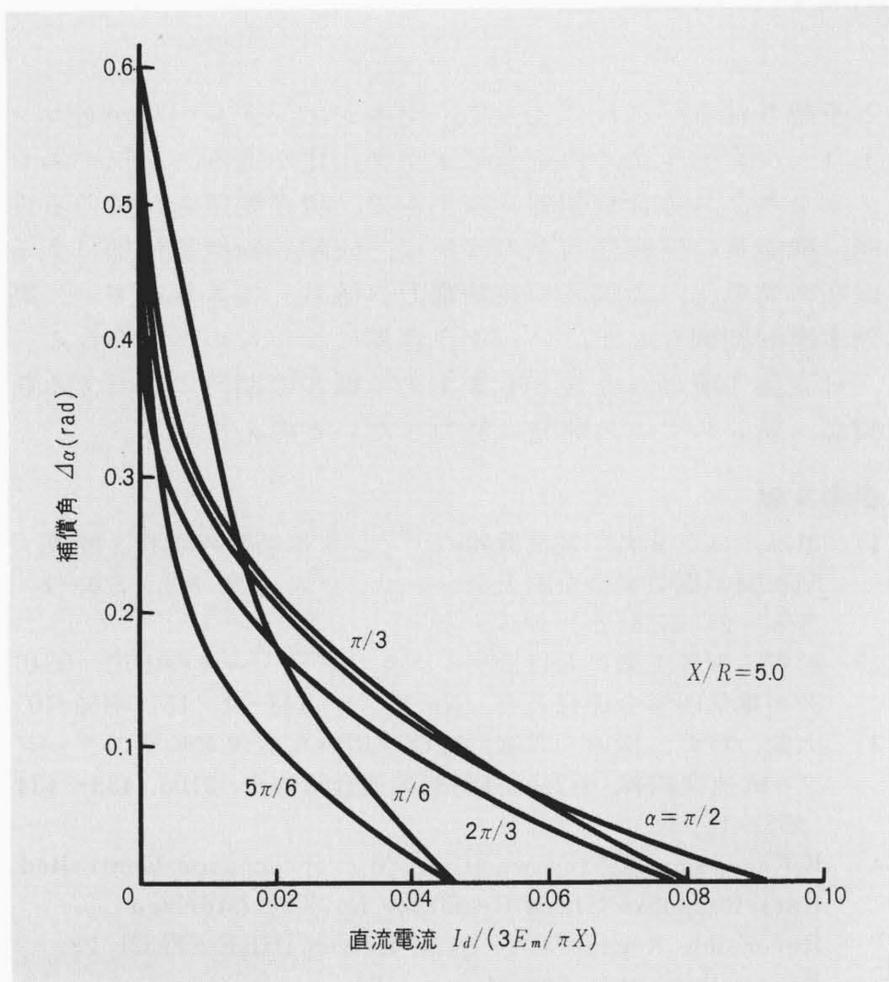


図10 非線形補償特性 $X/R=5.0$ の場合の非線形補償特性の計算例を示す。

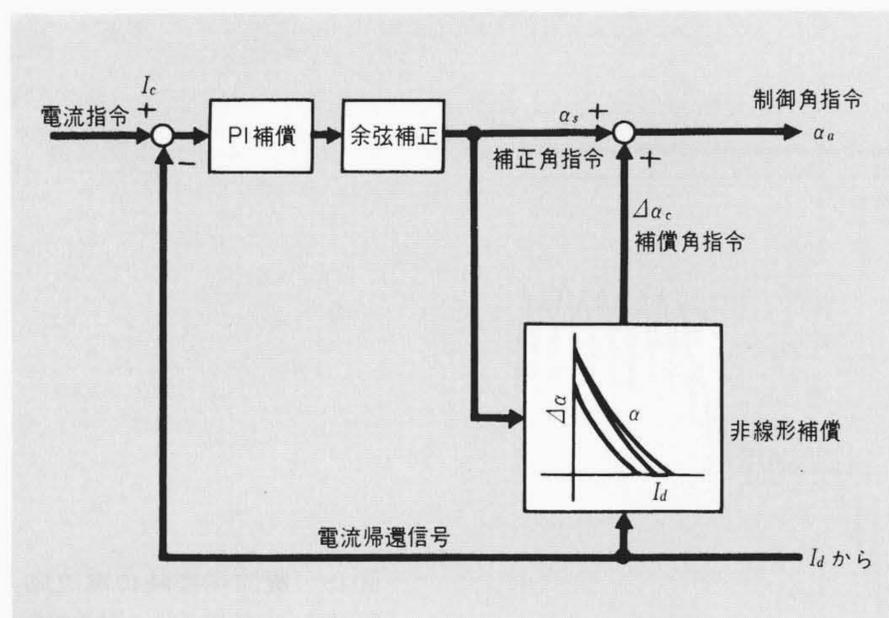


図11 電流制御システムの構成 電流断続時に非線形補償を行ない、応答を高速化させる制御系の構成を示す。

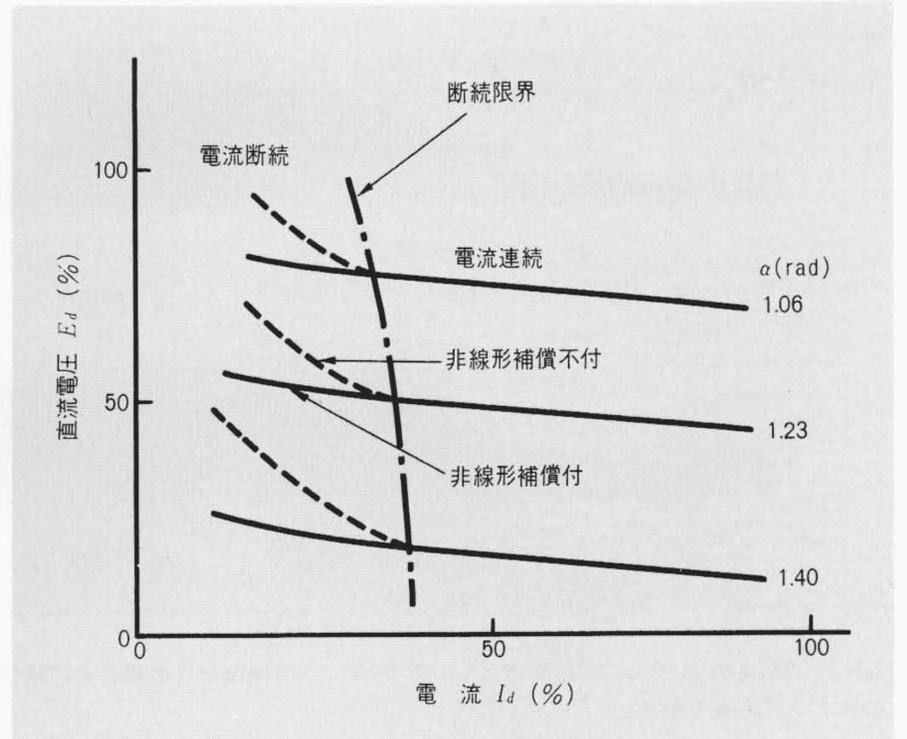


図12 負荷特性 サイリスタ変換装置の非線形特性を補償した場合と補償しない場合の負荷特性を示す。

対して、電動機が速度が高くなり電流値が I_{dA}^* より小さくなると、 E_a^* は E_{a0}^* より大きくなりA点からC点の曲線上を変化させる。ここで述べる方式は、この電流断続時での E_a^* をも E_{a0}^* 一定となるように補償する。例えば、電流が I_{d0}^* のときはB点の制御角 $\pi/2$ とC点の制御角 $7\pi/18$ との差 $\pi/9$ を $\Delta\alpha$ として、 α に加えることにより補償する。このように、電流断続時での電流値 I_d^* をもとに、補償角 $\Delta\alpha$ を求めて、もとの制御角 α に加えることで実際の負荷特性が点Aから点Bの破線で示した電圧 $E_a^* = E_{a0}^*$ の一定値上を変化することになる³⁾。

このように、電流断続時の各動作点で制御角 α に対する補償角 $\Delta\alpha$ を求め、その値をもとの制御角 α に加えた値でサイリスタ変換装置の位相制御を行なうことにより負荷特性を線形化できる。例えば、図8に示した特性を補償するための I_d^* と $\Delta\alpha$ の関係を図10に示す。

また、電流制御系の構成を図11に示す。すなわち、電流断続時に非線形補償を行なうループと電流偏差によりPI補償を行なうループの、二つの制御ループから成る。このような構成にすると、PI補償のゲインを電流連続時に最適な値に調整することで電流断続時でも電流連続時と同じ高速応答が得られる。

5 制御特性

図12は、電流断続-連続時に発生するサイリスタ変換装置の非線形特性を補償した場合と、無補償の場合の負荷特性を示したものである。同図中の一点鎖線は断続限界を示すものであり、実線が補償時の特性、鎖線が無補償時の特性を示すものである。同図のように非線形補償を行なうことにより、サイリスタ変換装置で発生する非線形特性を十分補償することができる。

図13は、非線形補償を付けた場合と、PI補償だけの場合の電流ステップ応答特性を示すオシログラムである。同図のように、非線形補償により応答を大幅に改善することができる。

図14は、4象限運転特性を示すオシログラムであり、また図15は、電動運転と回生運転との切換時での電流切換特性を示すオシログラムである。

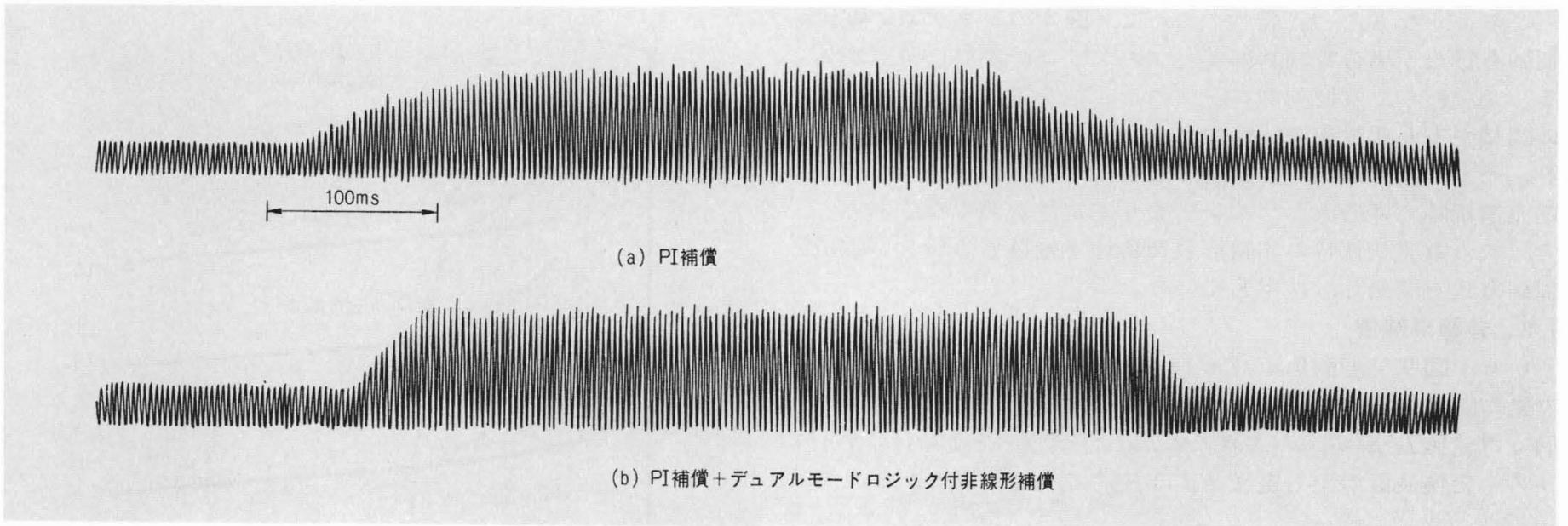


図13 電流のステップ応答オシログラム PI補償だけの場合とPI補償に非線形補償を付けた場合の電流のステップ応答を示す。

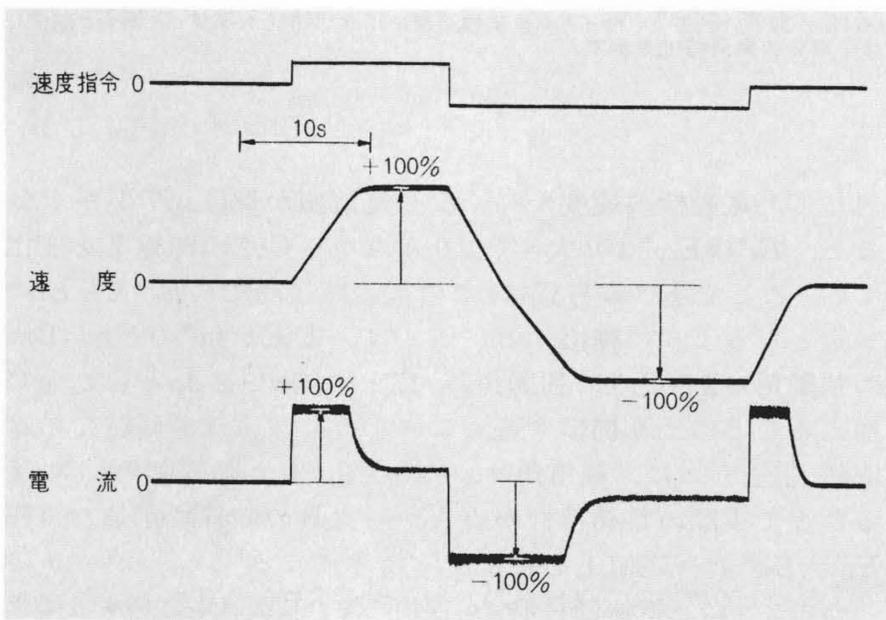


図14 4象限運転特性のオシログラム 4象限運転時の電流及び速度の特性を示す。

6 結 言

以上、マイクロプロセッサ適用によるサイリスタレオナードの全デジタル制御に関する現状技術について述べた。

電動機的全デジタル制御は実用化の点で現在まだ揺籃期にあるが^{4),5)}今後急成長が予想されるマイクロプロセッサを中心としたマイクロエレクトロニクスデバイスの進歩により、交、直流電動機制御の全デジタル化が急速に進展するもの

と予想される。これによって、マネジメントレベルからコントロールレベルまでの完全デジタル化が進み、パワーエレクトロニクスを含む制御システムで、現在要望されている性能、機能及び信頼性向上のほかに、故障診断機能付加による保守の簡単化、高調波や無効電力の低減、省エネルギー、高効率運転制御などが、いっそう容易になるものと思われる。

日立製作所は、今後ともますます顧客の期待にこたえる新製品、新システムの開発に努力したいと考えている。

参考文献

- 1) 原島, ほか 9 名: 電気機器のデジタル制御の現状と展望, 昭和54年電気学会全国大会シンポジウム, [S.8], S8-1~S8-24(昭54-4)
- 2) 松香: 製鉄工業におけるマイクロコンピュータの応用, 昭和52年電気四学会連合大会, No.39, 1-148~1-151(昭52-10)
- 3) 大前, 梓沢, 松田: 非線形補償を用いた直流電動機のデジタル式速度制御, 第21回自動制御連合講演会, 3106, 433~434(昭53-11)
- 4) K.Kamiyama, N.Azusawa et al.: Microprocessor-Controlled Fast-Response Speed Regulator for Thyristorized Reversible Regenerative DCM Drives, IEEE IECI '78 Proceedings, 216~222(March 1978)
- 5) T.Konishi, K.Kamiyama et al.: An Application Technology of Microprocessor to Adjustable Speed Motor Drives, IEEE IAS '78 Annual Meeting, 669~675 (Oct.1978)

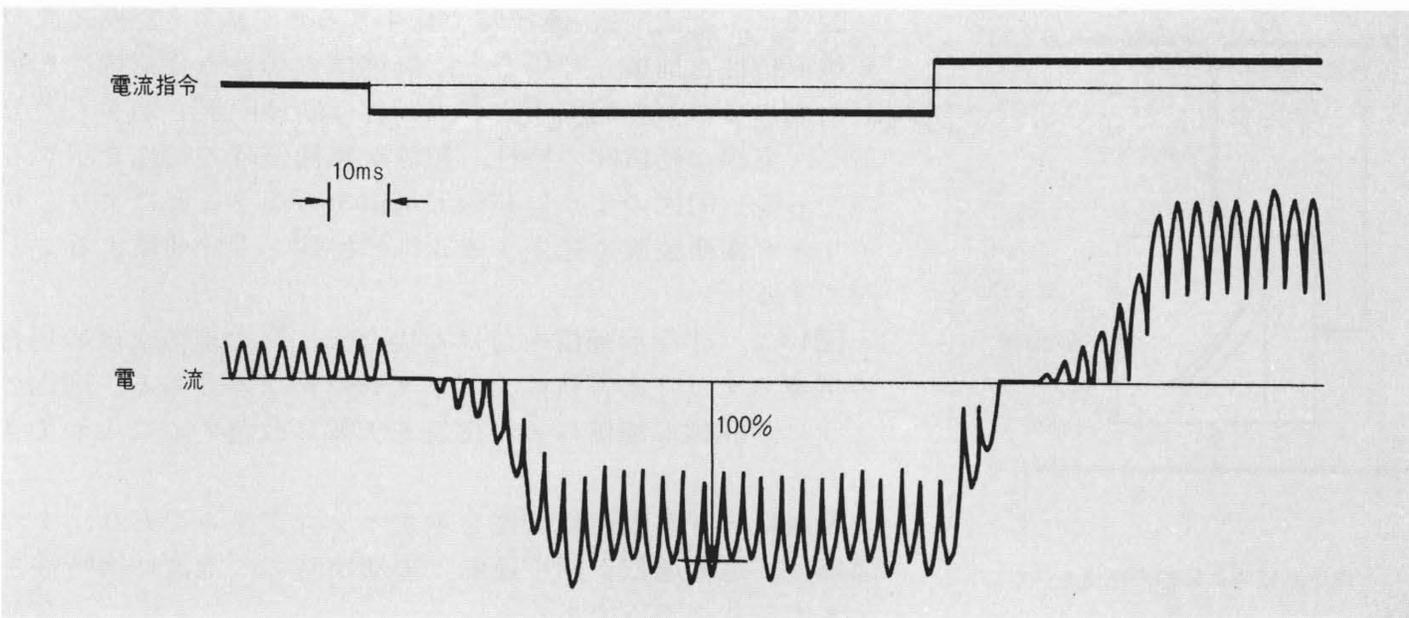


図15 電流切換時の電流応答オシログラム 電動運転と回生運転との切換時での電流切換の応答を示す。