U.D.C. 621.771:[621.313.3:621.314.63.07]

サイリスタモータの圧延主機への適用

Application of Thyristor Motor to Rolling Mill Drives

森野信幸* *Morino Nobuyuki*
神山健三** *Kamiyama Kenzô*
高橋潤一** *Takahashi Juńichi*
奥山俊昭*** *Okuyama Toshiaki*

優れた保守性と制御性をもっているサイリスタモータは，ポンプ，ファンなどの一般産業用のほかに，圧延機駆動用にも積極的に適用されつつある。このニーズに対応して推進してきた一連の実用化試験のうち，3,000kW実物大試作機による電圧形サイリスタモータに関連したd，q軸電流制御と交流励磁法並びに最近ホットストリップミルエッジャロール駆動用として完成した1,120kW電流形サイリスタモータシステムの概要，及び新技術の一端について紹介するとともに，圧延主機駆動用のサイリスタモータ適用に明るい展望が開かれていることに触れる。

1 緒　言

サイリスタモータは，各種交流可変速システムの中で優れた保守性と制御性をもっているため，ポンプ，ファン，抄紙機などの一般産業用の分野で積極的に適用されつつあるが，最近，これらの用途に比較して格段に高度な制御技術が要求される圧延主機駆動用の適用の機運が高まっている。

圧延主機の適用技術については，過去約10年にわたってシステマティックな研究開発を推進してきたが，以下に，電圧形サイリスタモータの適用での最近の技術，及び圧延機駆動用として世界に先駆けて完成された1,120kW電流形サイリスタモータについてその概要を紹介する。

2 サイリスタモータを用いた交流可変速制御システム

圧延機駆動用可変速制御システムとして，現在主に用いられているサイリスタレオナードは，可変速範囲，制御性能，急加減速特性，高頻度急可逆転特性などの基本制御仕様の点で，理想的な特性をもっている。しかし，サイリスタレオナードに用いられる直流電動機は整流子とブラシをもっており，これが電動機の単機大容量化や高速化，保守の簡単化などに対し制約を与えている。そこで，これらの制約をもたない交流可変速制御システムの適用検討が積極的に行なわれるようになってきた。

交流可変速制御システムには，使用する電動機に対し各種の制御方式があるが，圧延機駆動用には基本制御性能からかご形誘導電動機と同期電動機を用いた可変速制御システムが考えられる。

かご形誘導電動機を用いた可変速制御システムに関しては，最近になって，従来のスカラ制御方式に代わり，電流や電圧の大きさのほかに位相までを制御するベクトル制御方式の研究が進み，その制御性能が著しく改善され圧延機駆動への適用も可能になりつつある。

同期電動機を用いた可変速制御システム(サイリスタモータ)は，サイリスタレオナードとほぼ同等の制御性能をもっているため，圧延補機駆動用だけでなく圧延主機駆動用としても積極的に適用されようとしている。前述のベクトル制御式かご形誘導電動機と比較して，(1)力率が高くサイリスタ変換器の容量を小さくできる，(2)制御回路構成が簡単で，制御システムの信頼性が高い，(3)電機子回路と界磁回路とが独立に制御でき，広範囲の可変速領域に対して安定かつ迅速な定トルク，及び定出力制御が行なえるなどの特長をもっている。

3 電圧形サイリスタモータの主機への適用

サイリスタモータは，電圧形(正弦波サイクロコンバータ制御式)と電流形(直流方式，交流方式)に大別できる。両者の特長比較と主な適用区分については先に発表済み[1]であるので，以下では電圧形サイリスタモータを圧延主機に適用する場合の諸問題とその対策，及び最近の新技術について述べる。

3.1 システム構成とd，q軸電流制御[2]

圧延機駆動の用途では大きな過負荷耐量と界磁弱め運転が要求されるので，電動機は界磁起磁力／電機子起磁力の比rが小さな条件でも安定に運転する必要がある。一方，電機子電流と公称誘起起電力(界磁主磁束により誘起する電圧)との位相遅れθとトルクτ_eとの間には次式が成立する。

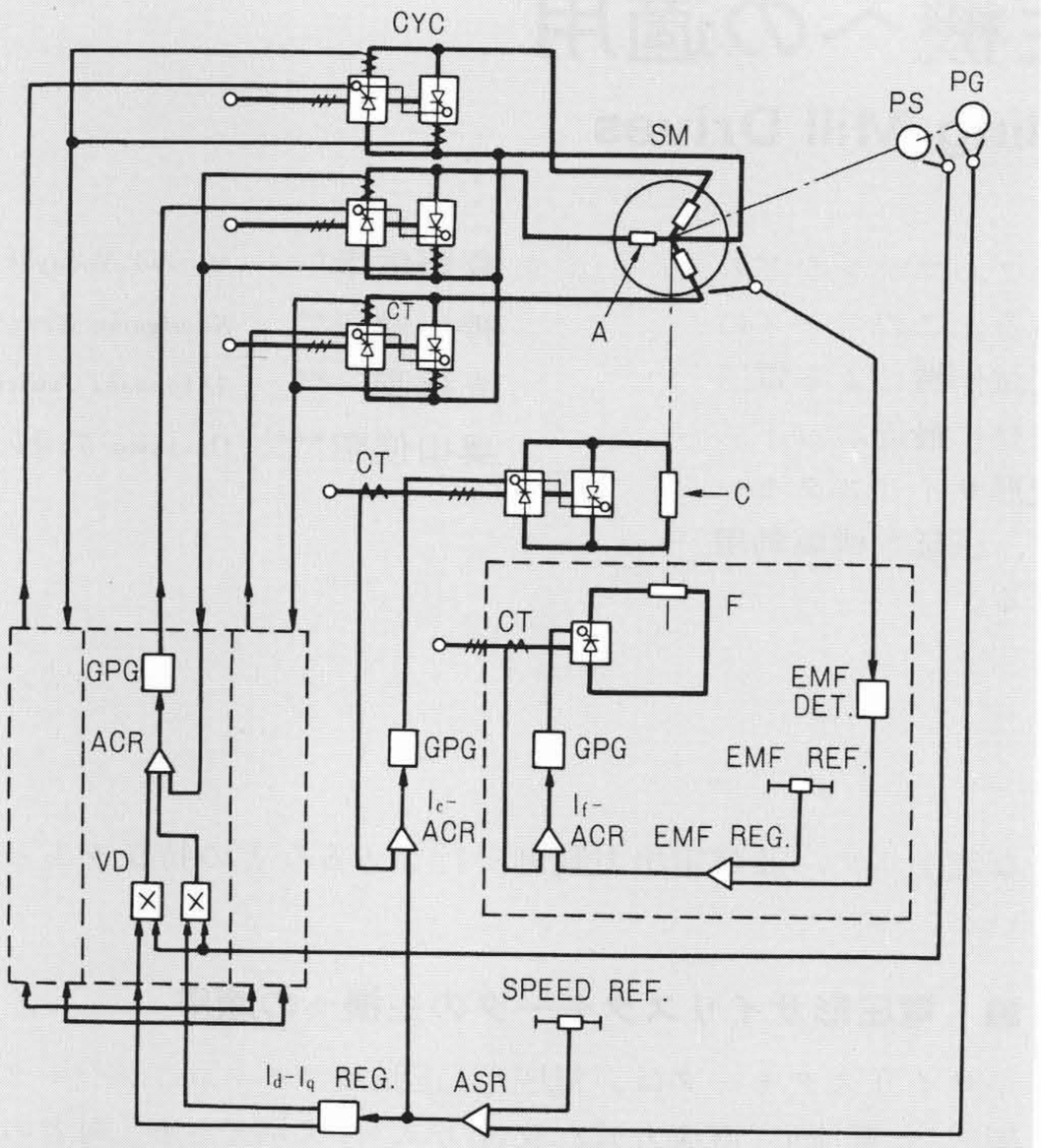
$$\tau_e = \cos\theta - \frac{1}{r}\sin\theta \quad \cdots\cdots(1)$$

すなわち，右辺第2項により，θが小さくてもrが小である場合は，τ_eは大幅に低下するため位相遅れを補償する必要がある。この目的のため，日立製作所は新たにd，q軸電流制御方式を開発し，一連の実用化試験を実施した。

図1にこの装置の回路構成図を示す。サイクロコンバータ(CYC)により同期電動機(SM)を可変速制御するもので，SMは電機子反作用補償のための補償巻線(C)を備えている。SMの軸端には界磁と電機子の相対位置を検出するための位置検出器(PS)があり，電機子電流はこの出力信号に比例して正弦波に制御される。速度制御回路(ASR)の内側にd，q軸電流制御回路(I_d-I_qREG)があり，電機子電流のd軸分は零に，またq軸分はASRの出力信号に比例するよう制御される。

d，q軸電流制御回路を3,000kW実物大試作機[3]に適用し，$r=0.16$の運転条件での定電流加減速特性を**図2**に示す。位相遅れを補償しない場合 同図(a)にはトルクは回転速度に応じて変動しているのに対し，上記制御を適用した場合同図(b)には直線加速が行なわれており，かつ加速時間も短い。したがって，上記制御を適用することによりrが0.1程度の極めて小さい条件でもトルクが安定に得られるため，過負荷耐量の増加及び広範囲の界磁弱め制御が可能になる。

* 日立製作所日立工場　** 日立製作所大みか工場　*** 日立製作所日立研究所



注：略語説明

CYC(サイクロコンバータ)	PS(位置検出器)
ASR(速度制御回路)	GPG(ゲート信号発生器)
ACR(電流制御回路)	EMF DET.(EMF検出器)
SM(同期電動機)	EMF REF.(EMF指令)
A(電機子巻線)	SPEED REF(速度検出器)
F(界磁巻線)	CT(変流器)
C(補償巻線)	VD(電流指令回路)
PG(速度検出器)	I_d-I_q REG(d,q軸電流制御回路)

図1 電圧形サイリスタモータ装置の回路構成図 d，q軸電流制御回路(Id-Iq REG)によりＤＣレオナードと同等の優れた制御特性が得られる。

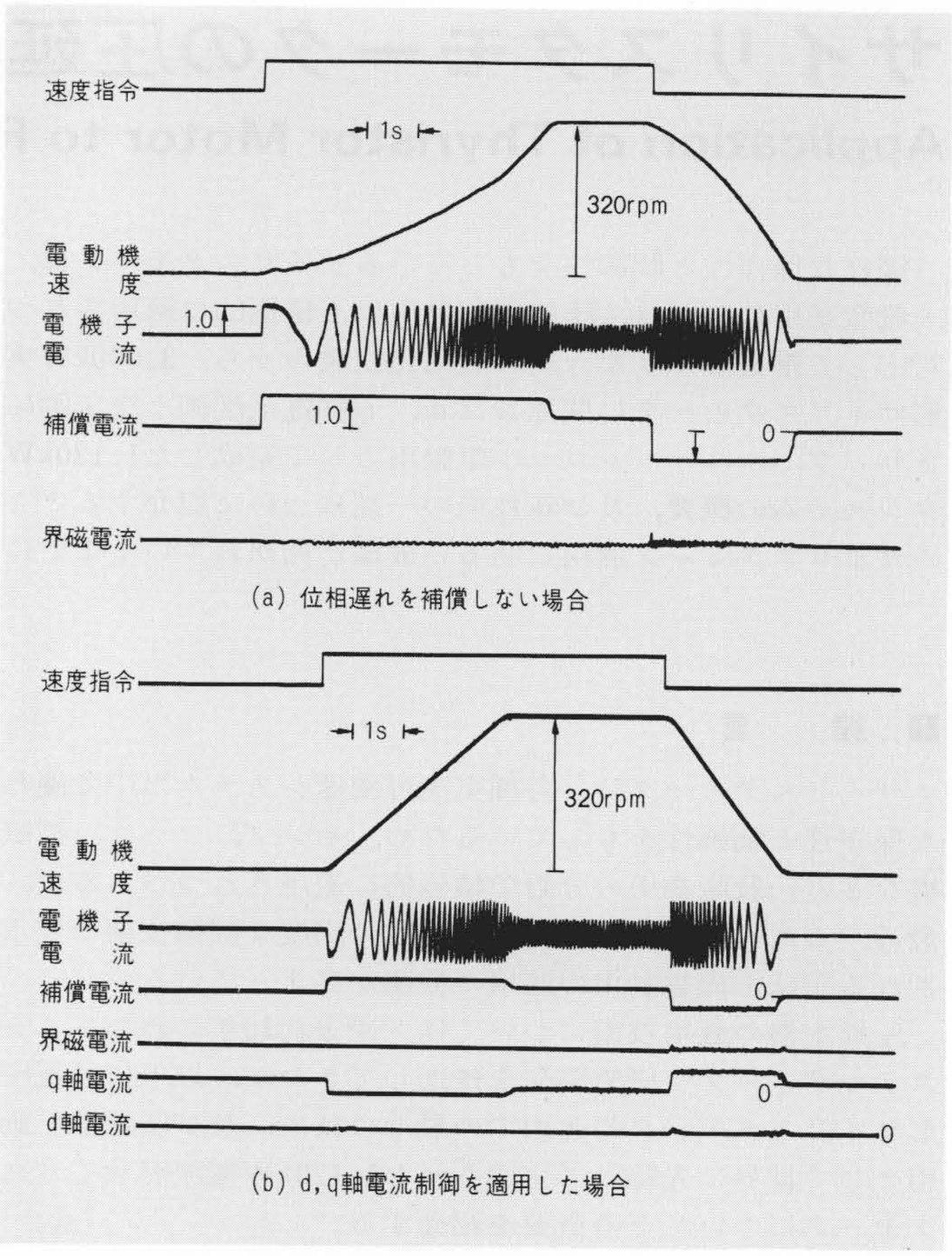


図2 定電流加減速特性 3,000kW実物大試作機により，d，q軸電流制御が優れていることを確認した。

図3に，定出力制御(界磁弱め制御)を行なった場合の正逆加減速特性を示す。基底速度(220rpm)から頂上速度(400rpm)の間で界磁弱め制御が行なわれており，ＥＭＦ検出信号(電機子電圧)は一定に保たれている。また，すべての期間で回転速度は速度指令に速やかに追従していることから，この装置は直流レオナードと同等の制御が可能なことが確認された。

3.2 機械耐力と電動機の構造

圧延主機に適用される回転機は，機械側から要求される機械的過負荷に十分耐える構造でなければならない。この種の用途のサイリスタモータとしては，一般に突極形と円筒形がある。後者は直流機と同様の回転子構造となるため，既に直流電動機で実績のある△アーム形スパイダ[1]などの高耐力構造をそのまま適用できるので，前者よりも有利である。また，直流機と異なり整流子をもたないため，ブラシまわりの保守性が大幅に改善されるとともに，ライザ関連部品が存在せず，

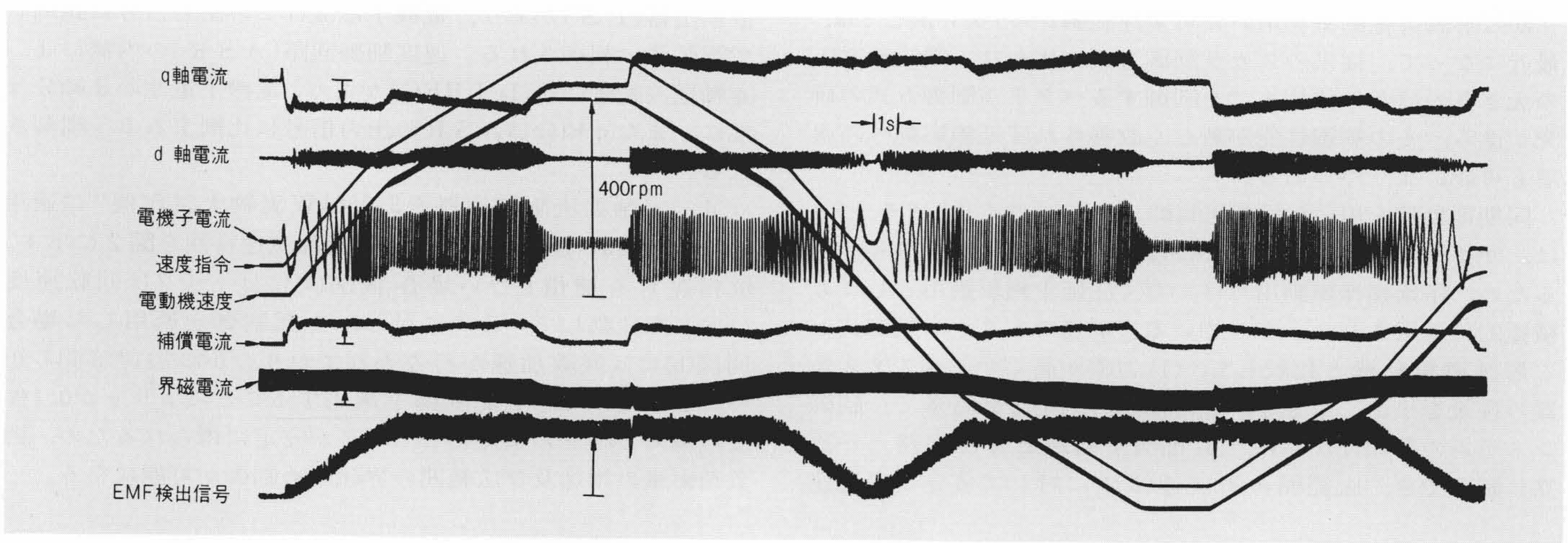


図3 定出力制御を行なった場合の正逆加減速特性 界磁弱めによる定出力制御でもＤＣレオナードと同等の制御性能をもっている。

機械的信頼性が向上する。

3.3　交流励磁方式の概要

電圧形サイリスタモータには，既述したような多くの長所がある反面，サイリスタの電流集中(停止時に特定のサイリスタアームに電流が集中して流れる現象)により，サイリスタ変換器の設備容量が必要以上に増大したり，サイクロコンバータの出力周波数に上限が存在するという欠点があった。これらを改善する目的で，最近「交流励磁方式」[4]を開発した。

図4に交流励磁を行なう装置の回路構成図を示す。**図1**の構成と異なり，二つの界磁巻線を低周波数の二相正弦波電流で交流励磁する。このため，回転子に対して角速度ω_e(ω_e：励磁角周波数)で回転する磁界が生じ，たとえ回転が停止していても電機子巻線には角周波数ω_eの電圧が誘起するようになる。誘起電圧の周波数f_Mは次式で与えられる。

$$f_M = \begin{cases} f_r + f_e\ (\text{正相励磁}) \\ f_r - f_e\ (\text{逆相励磁}) \end{cases} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに　f_r：回転周波数

f_e：界磁励磁周波数

正相励磁の場合は常に$f_M > 0$であるため，電機子電流は直流となることがなく，サイリスタの電流集中が防止される。

一方，逆相励磁の場合は$f_M < f_r$となるため，サイクロコンバータの出力周波数以上に回転速度を高めることが可能になる。**図5**に，電動運転と回生制動を含む四象限運転時の動作波形を示す。低速域では電流集中を防止するために正相励磁を行ない，高速域では速度上限の向上のために逆相励磁を行なっている。

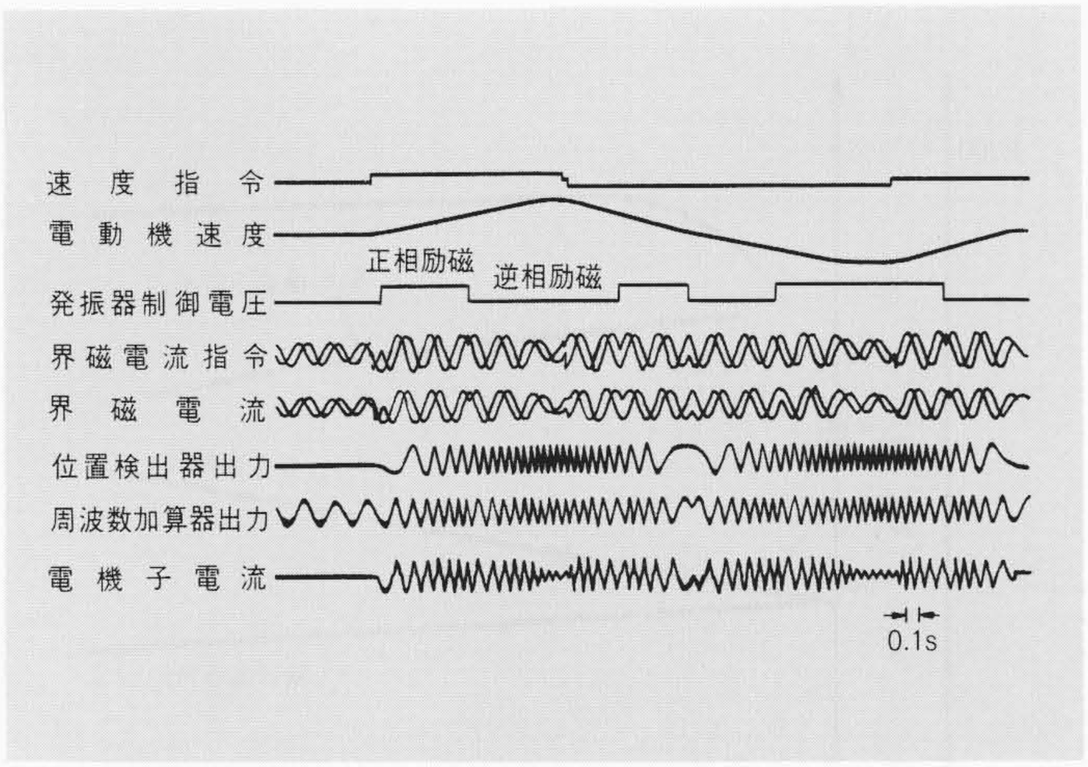


図5　四象限運転波形　低速域では，正相励磁して電流集中を防止し，高速域では，逆相励磁して速度上限の向上を図る。

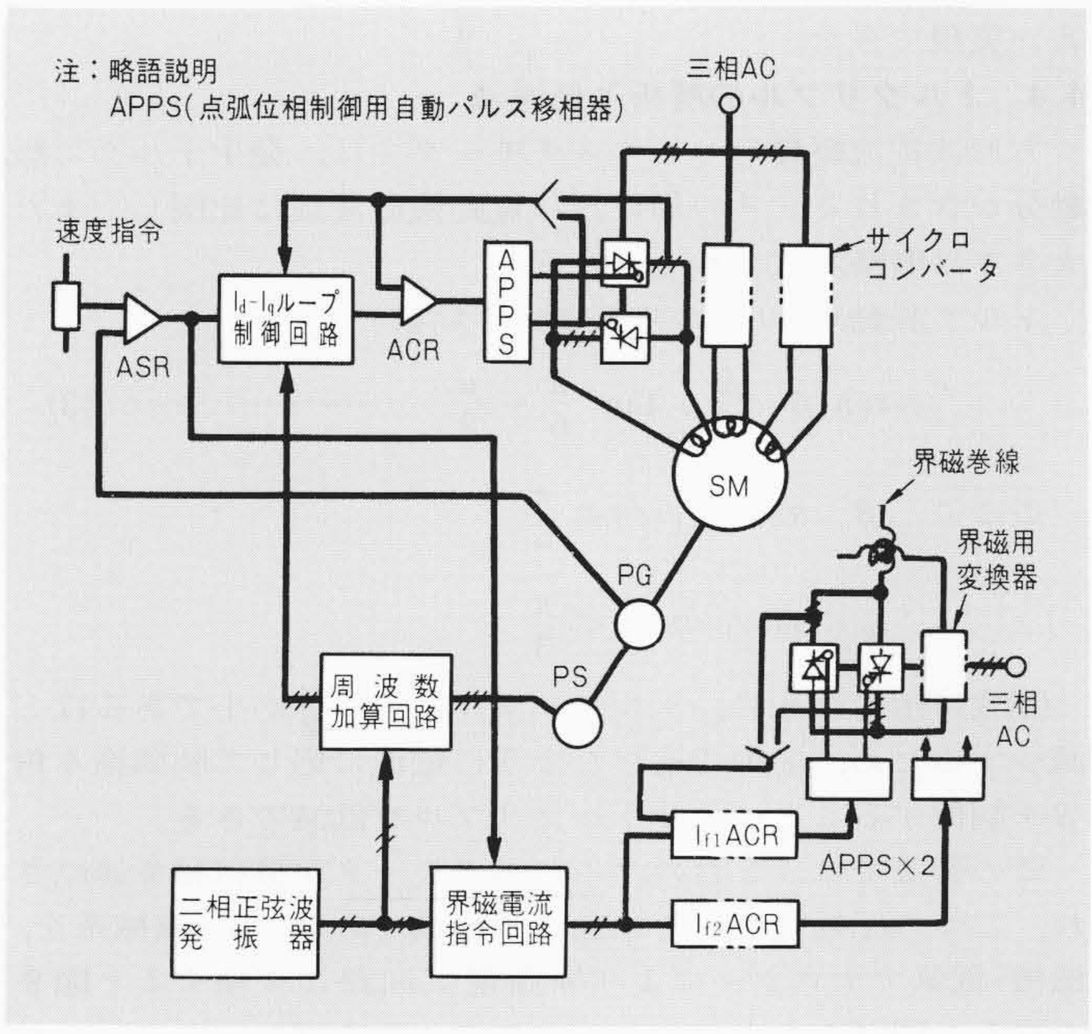


図4　交流励磁回路付装置の回路構成図　二相正弦波発振器により，二つの界磁巻線を低周波励磁してサイリスタの電流集中を防止し，速度上限を向上させる。

4　電流形サイリスタモータの主機への適用例

電圧形サイリスタモータの出力限界周波数を超える用途に対しては，電流形サイリスタモータが適用される。

以下に，最近完成したホットストリップミルエッジャロール駆動用1,120kWサイリスタモータ駆動装置[5),6)]の概要について述べる。この装置は，圧延機駆動用としては世界最大出力をもっており，世界に先駆けてこの種の用途にサイリスタモータを適用したことは画期的な意義をもつ。

4.1　装置の構成と特長

この装置には，大きな過負荷耐量，低慣性，急加減速特性，極低速度からの速度制御などの性能が要求され，従来のポンプやファン用のサイリスタモータに比べて飛躍的に高度な技術が必要である。日立製作所はシステマティックに進めてきた研究開発の成果を総合的に結集して，この装置を完成した。今回適用された主な新技術を**表1**に，また装置の仕様を**表2**に示す。

表1　圧延用電流形サイリスタモータの新技術　各種の新技術がそれぞれの目的のために適用され，いずれもその目的を達成した。

新　技　術	目　　的
1.回転電機子形電動機	(1)低慣性化→急加減速特性 (2)小形化→直流機並みの寸法
2.制御進み角(β)制御 (新形βAPPSの採用)	(1)過負荷耐量の向上(転流余裕角の確保) (2)トルク特性の改善 (3)電動機及びサイリスタ変換器の設備容量の低減 (4)トルクリプル発生量の低減
3.高速可逆切換回路	β制御で，負荷側ゲート位相を連続的に切り換えることによる円滑かつ高速な四象限運転
4.電動機-機械軸連結角度の最適化	機械軸への伝達トルクリプル量低減

注：略語説明　βAPPS(電動機側点弧位相制御用自動パルス移相器)

表2　1,120kWサイリスタモータ駆動装置の仕様　過負荷耐量が大きいこと，速度制御範囲が極低速度にまでわたっていること及び急加減速四象限運転がこの装置の特長である。

項　　目	仕　　様	
電　動　機	1,120kW，720rpm， 6極，36Hz，3相， 780V，1,347A，F種	過負荷耐量 常用最大：225% (1分間) 非常最大：275% (1秒間)
サイリスタ変換装置	1,188kW，18アーム 電流形サイクロコンバータ	
制　御　装　置	マイナACR付ASR制御，制御進み角制御回路付	
速度制御範囲	極低速度から定格回転速度まで	
運　転　方　式	四象限運転	

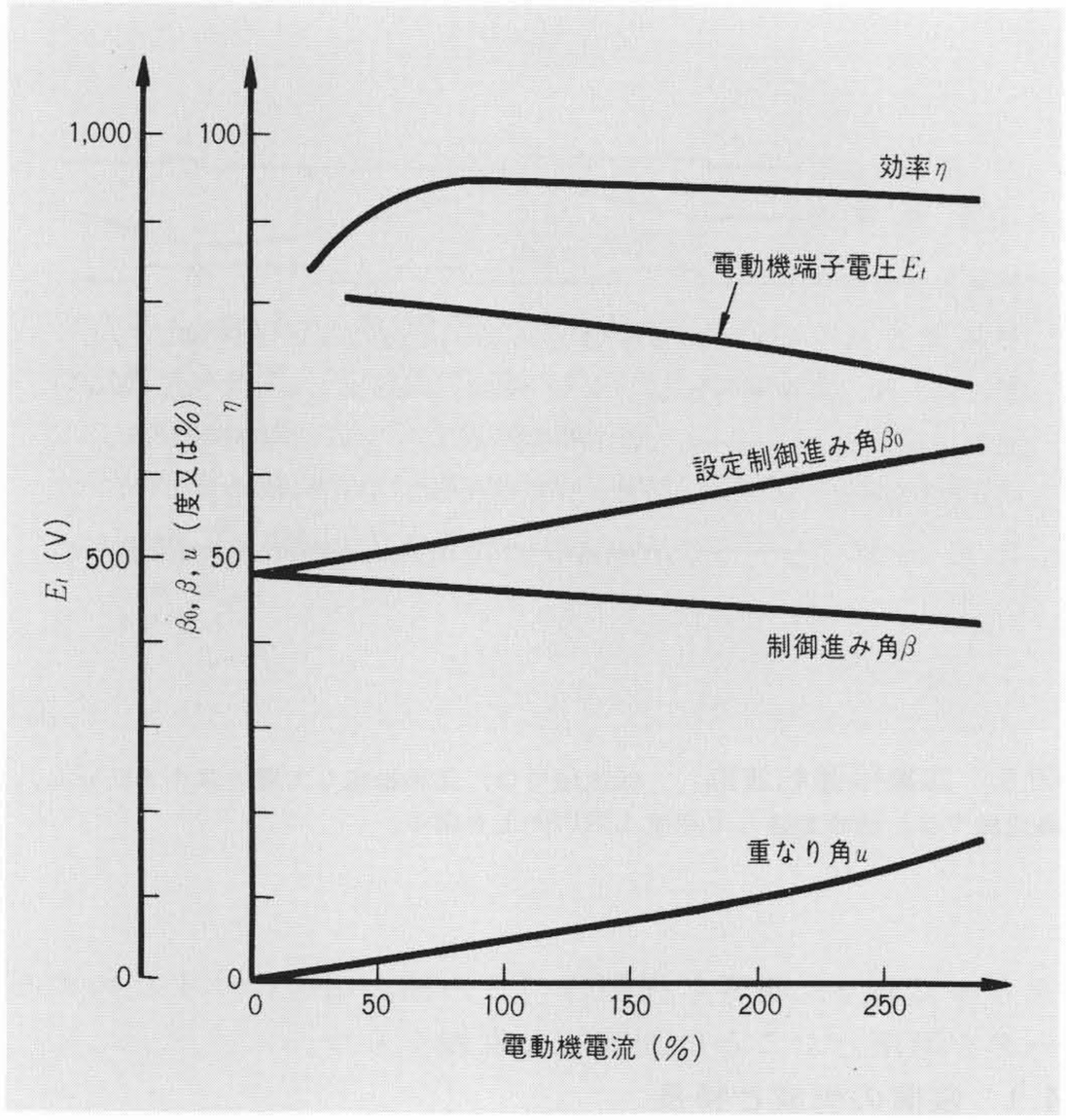


図6 1,120kWサイリスタモータ定常特性 制御進み角βを制御することにより，300%を超える過負荷耐量を実現できた。

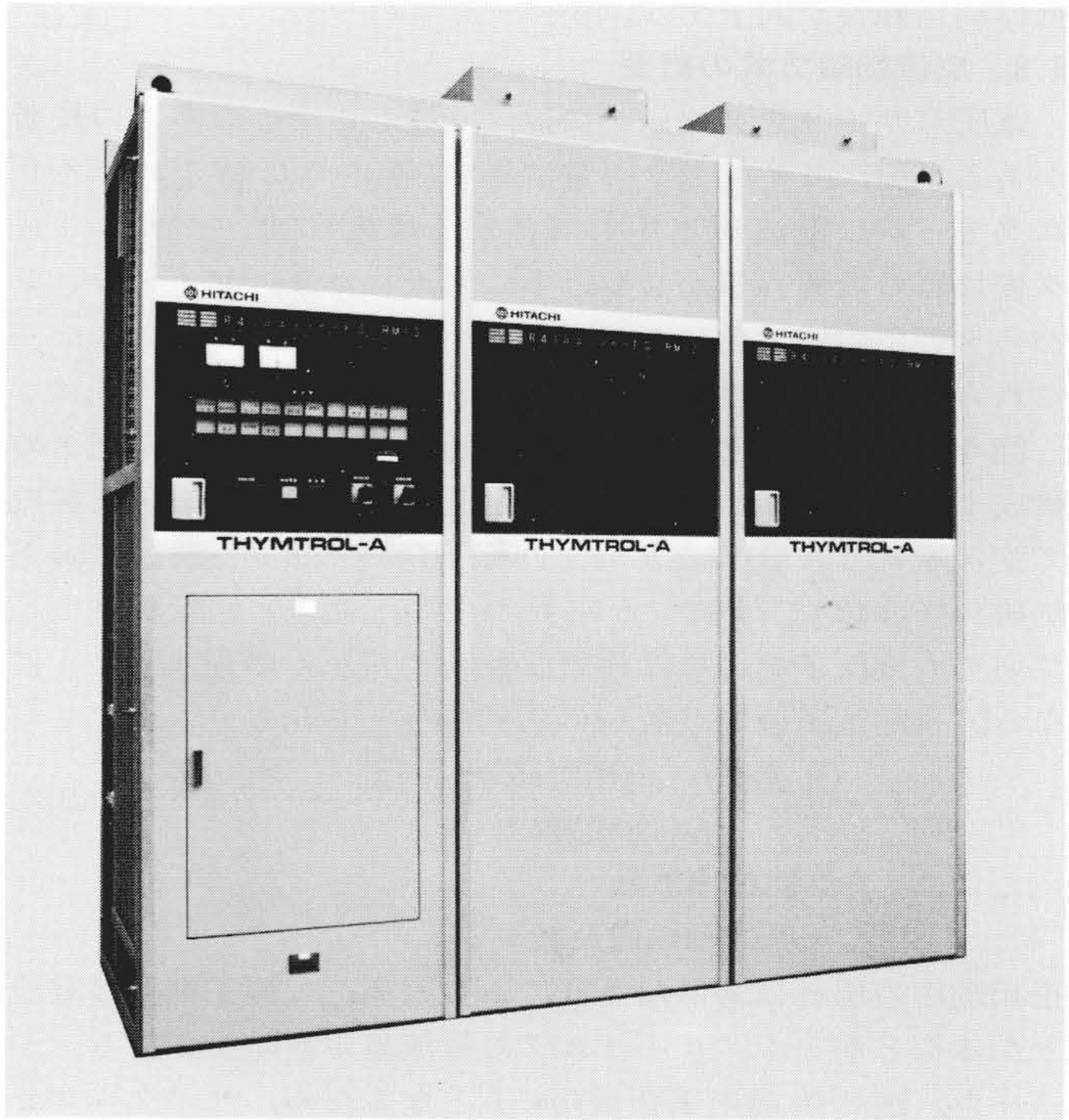


図7 410kWサイリスタモータ用制御盤 1,120kWサイリスタモータ4台のほかに，410kWサイリスタモータ2台がR4エッジャ用として同時納入された。

4.2 電動機と定常特性

電動機は**表1**に示すように回転電機子形突極構造とし，直流電動機と類似した構造を採用している。転流リアクタンスを低減する目的で界磁極にダンパ巻線を取り付けた。位置検出器はエンドプレを吸収できる特殊な構造とし，周囲の雰囲気を考慮して密閉形とした。スリップリングは砲金製とし金属ブラシをこれに摺動させ，リード線はシャフトに埋め込みその接続はろう付とするなど，耐衝撃性をもつよう考慮されている。整流子をもたないため，ブラシまわりの保守性と構造的信頼性の向上が期待できる。

図6に電動機の定常特性を示す。制御進み角β制御を採用しているため，過負荷耐量が大幅に増大し，定格の330%負荷でも十分安定に転流できる性能をもっていることが判明した。また，定格運転時のトルクリプル発生量は，β制御により62%に低減された。変換器，リアクトルを含む総合効率は90.2%であり，これはDCレオナードを上まわっており，省エネルギーに寄与することができた。

図7に，同時納入した410kWサイリスタモータ用制御盤の外観を示す。

4.3 制御方式

制御回路構成を**図8**に示す。主な特長は次に述べるとおりである。

(1) 電動機側点弧位相制御用自動パルス移相器(βAPPS)

位置検出器信号を基準とし，0～180度(正転・逆転)の範囲で連続移相が可能な可変周波パルス移相器である。これにより，今回の特長であるβ制御及び四象限運転切換が容易に行なえることとなった。

(2) β制御回路

負荷側ゲートパルス位相を設定する回路であり，電流，速度及び運転モード信号から所定のβ指令を演算処理している。

(3) 高速可逆切換回路

四象限の運転モードにより制御回路を切り換える回路である。電流零を検出することなく，電流指令信号の極性判別によりトルク方向を検出し，前述のβ制御で負荷側ゲート位相を連続的に切り換えることにより，円滑かつ高速な可逆切換えが実現できた。

4.4 トルクリプルの解析と低減法

方形波電流駆動形サイリスタモータでは，発生トルクに脈動分が含まれる。その周波数は電動機周波数に比例し，また大きさは概略次式で与えられる。

トルク脈動率(リプル片振幅／平均値)

$$=\tan\left(\beta-\frac{u}{2}\right)\ \tan\left(\frac{\pi}{6}-\frac{u}{2}\right) \quad \cdots\cdots(3)$$

ここに β：制御進み角$\geqq\frac{\pi}{6}$

u：重なり角$<\frac{\pi}{3}$

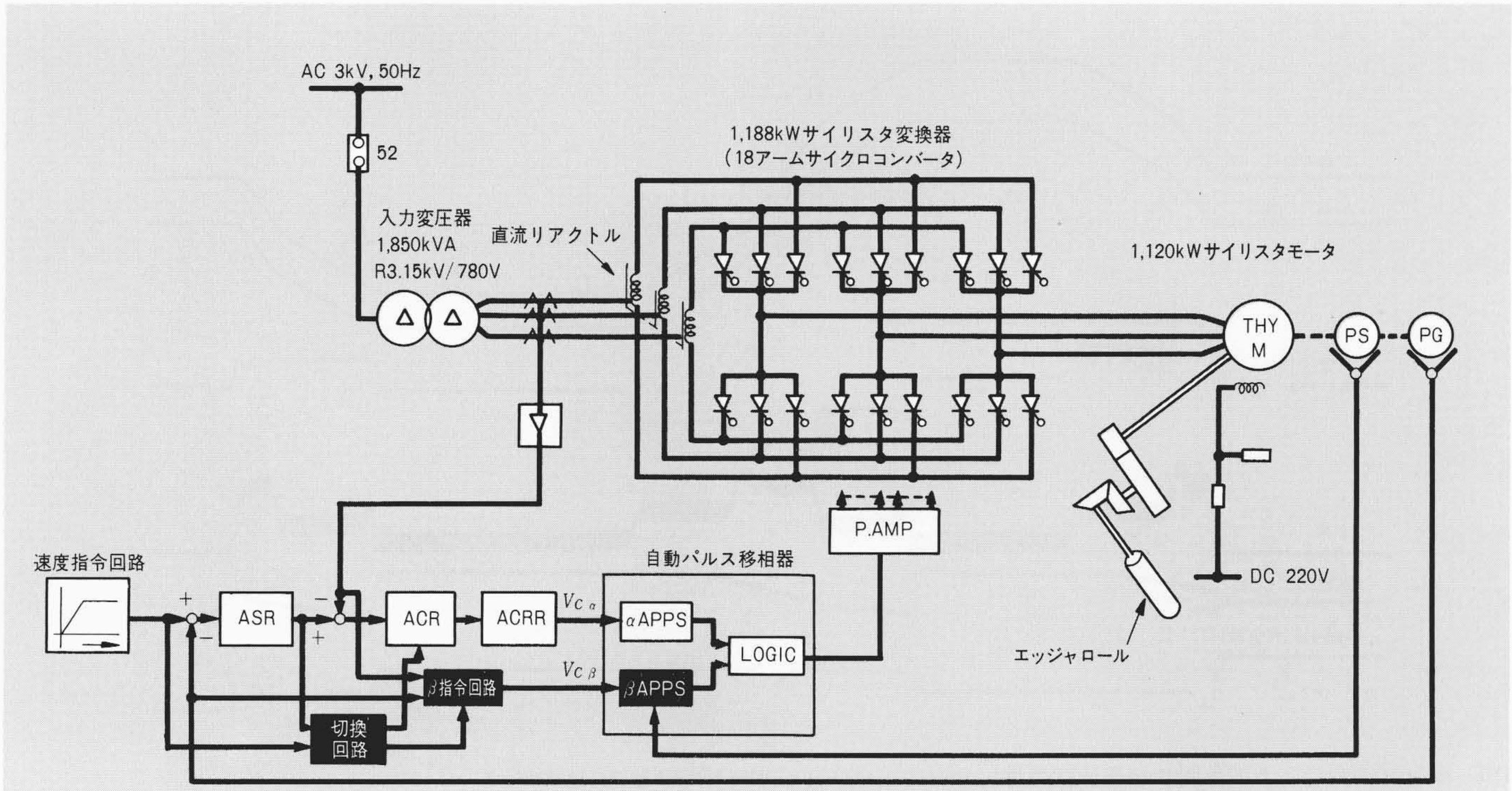
(3)式に示すように，トルクリプルは$\beta-\frac{u}{2}$が小であるほど減少するため，前節で述べたように電流に応じて制御進み角βを制御することによりトルクリプルを低減できる。

この装置では，2台のサイリスタモータが機械軸で連結され，二つの圧延ロールを駆動する構成である。この機械系を，機械-電気アナロジーにより等価電気回路に変換すると**図9**を得る。同図をもとにしたディジタルシミュレーションの結果，2台の電動機をある角度だけずらして直結することにより機械軸を伝達するトルクリプルが最小となることが判明した。工場内での等価トルクリプル試験の結果，フレキシブルカップリングなどの部品を追加することなく，トルクリプルが許容値を下まわる小さな値であることが確認された。

4.5 保護システム

サイリスタ変換装置の保護は，高い信頼性を備え，高速検出できる必要がある。この装置では，電子式故障検出器を適用しているほか，次に述べる新しい保護回路を備えている。

(1) ストール運転時の電流集中からサイリスタを保護するた



注：略語説明　ACRR(電流変化率制御回路)，αAPPS(電源側点弧位相制御用自動パルス移相器)，LOGIC(論理回路)，P.AMP(ゲートパルスアンプ)

図 8　エッジャロール駆動用電流形サイリスタモータ装置構成図　■部分が新方式のβ制御及び切換回路部分を示す。

めのストール検出器

(2)　位置検出器からの分配信号の異常(リード線の断線など)を検出する分配信号異常検出器

(3)　電源側点弧の基準信号であるAPPS電源の欠相，電圧低下，波形ひずみなどの異常を高速で検出する高速電源異常検出器

故障発生時の遮断方式は，故障の内容に応じて，(1) ゲートシフト及びゲートブロック後の主回路遮断，(2) ゲートブロック及び主回路遮断，(3) ゲートシフトによる停止，の3方式を採用している。

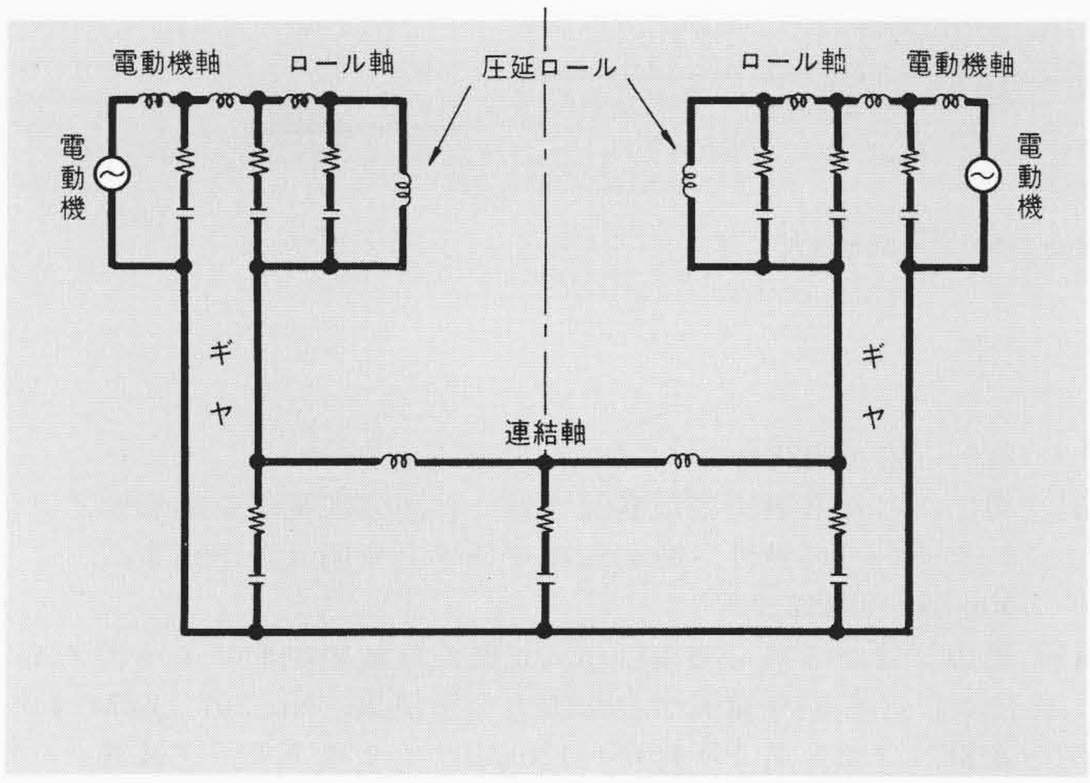


図 9　機械系の等価電気回路変換　機械-電気アナロジーにより等価変換された電気回路を用いて，トルクリプルによる機械系のねじり振動現象が解析された。

4.6　サイリスタモータ運転特性

図10に，粗ミル主ロール運転指令と同等の所定のランプ指令に対する四象限加減速運転波形を示す。指令は，正転 100%から逆転100%まで5秒間の加減速指令である。同図から，電動機速度は指令によく追従しており，また，電動から回生への切換えも円滑であることが分かる。

図11は，ステップ指令による急加減速運転波形を示す。225%電流により約0.5秒で定格回転速度に達している。低速領域では，高速領域と同一トルク値(定格の225%)に制限するための電流制限切換方式を採用しているので，全範囲で一定のレートで急加減速が実現されている。

以上のことから，圧延機駆動装置として要求される性能を十分満足し，従来の直流機と同等の性能をもっていることが分かる。

5　結　　言

圧延主機駆動用電圧形サイリスタモータの最近の技術動向及び圧延機駆動用として世界最大出力をもっている1,120kW電流形サイリスタモータの概要について紹介した。大きな過負荷耐量と急加減速性能を要求されるこの種の用途に，サイリスタモータを適用することは従来から困難とされてきたが，制御進み角制御や電流零を検出せずに高速可逆切換を行なう方式を適用して，仕様を上まわる過負荷耐量と低トルクリプルを達成し，急加減速四象現運転を実現したほか，総合効率もレオナードを上まわるなど，今後の圧延用サイリスタモータアプリケーションの輝かしい一歩を記録したことは意義深い。

今後，省力化，省エネルギーに対する市場ニーズは更に高まるものと考えられるが，今回の実績を契機としてこの分野への適用がますます拡大されるものと信ずる。日立製作所で

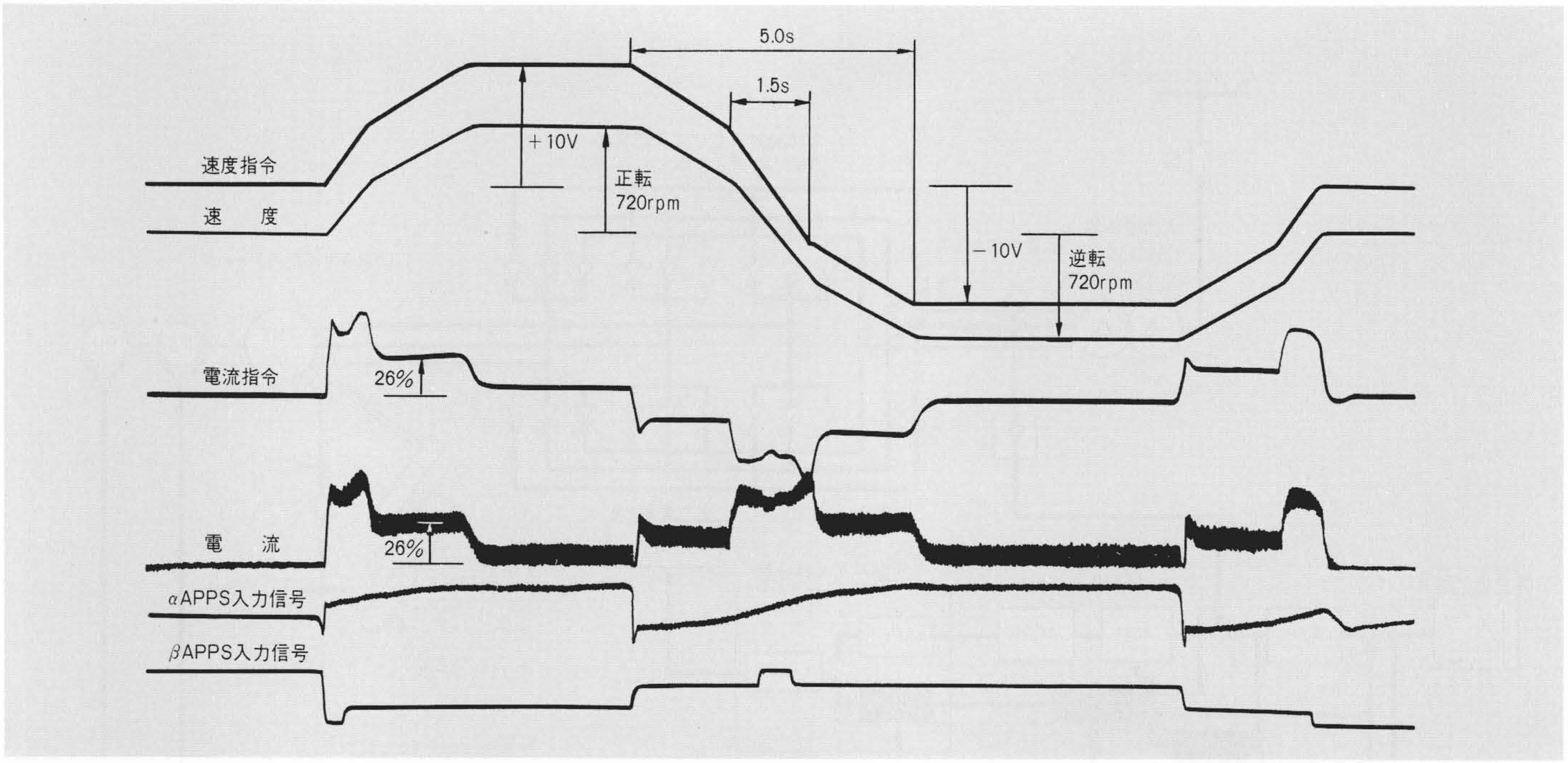


図10 ランプ指令による四象限加減速運転特性　正転100%から逆転100%まで，5秒間の加減速指令に対して電動機速度がよく追従しており，正転，逆転，電動及び回生の各切換えが円滑に行なわれている。

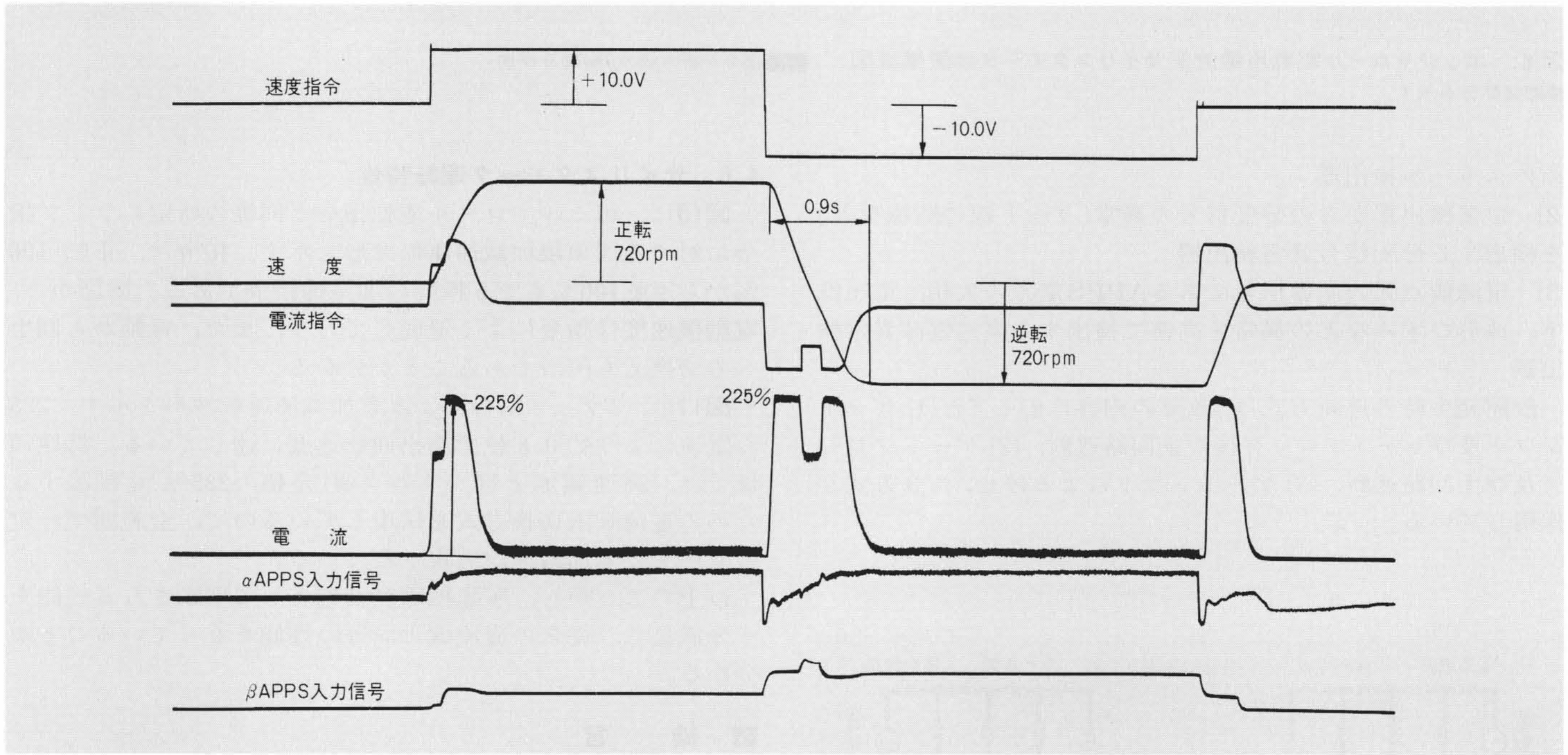


図11 ステップ指令による急加減速運転特性　定格の225%電流により，約0.5秒で定格回転速度に達している。全運転範囲で安定かつ一定レートの加減速が行なわれている。

は，既に圧延主機駆動用サイリスタモータの総合的適用態勢を整えており，今後も常に需要家各位の期待に沿うべく鋭意努力を続ける考えである。

参考文献

1) 真柄，ほか4名：最近の圧延機用電気品の動向，日立評論，58，701～706（昭51-9）
2) T. Okuyama, T. Konishi, T. Shibata, N. Morino, K. Iwata and T. Sukegawa：Cycloconverter-fed Syuchronous Motor Drive for Steel Rolling Mill, IEEE-IAS-Annual Meeting, 820～827 (1978)
3) 奥山，ほか3名：補償巻線を備えた正弦波電流駆動形サイリスタモータの特性，昭和52年電気学会全国大会予稿集，No. 892（昭52-7）
4) 奥山，ほか3名：交流励磁式正弦波電流駆動形サイリスタモータ，昭和54年電気学会全国大会予稿集，No. 507（昭54-4）
5) 森野，ほか5名：圧延用1,120kWサイリスタモータ装置，昭和54年電気学会全国大会予稿集，No. 515（昭54-4）
6) 斉藤，ほか4名：圧延プラント用電気システムの最近の動向 日立評論，61，635～640（昭54-9）