

SCR によるプレーナの制御

Control of the Planer with SCR

白 木 勇*
Isamu Shiraki

宮 田 俊 夫*
Toshio Miyata

斉 藤 勉*
Tsutomu Saitō

内 容 梗 概

近時、シリコン制御整流器 (SCR) 素子の製造技術が進歩し、工作機制御にもこれが採用されつつある。本稿では SCR を用いたプレーナのレオナード制御について直流機の技術的問題と制御上の問題を概観する。

1. 緒 言

プレーナにかぎらず工作機械の制御方式は、新しい制御要素の開発とともに新しく脱皮しつつある。たとえば、無接点位置検出器はすでに各方面に広く用いられているが、プレーナのテーブル自動可逆運転その他を無接点化して保守のめんどろをすくなくし、また磁気増幅器のほかに SCR を積極的に使用して回転機を静止機器におきかえるなどはその一例である。プレーナ用直流電動機は、その容量が比較的小さいにもかかわらず、広範囲な速度制御、急速加減速など直流電動機の有する特長をフルに発揮することを要求され、制御上興味ある多くの問題を提示している。本稿では SCR を用いたプレーナのレオナード制御における、直流機自身の技術的問題と制御上の問題に焦点を絞り、以下順をおって論ずることとする。

2. 回 転 機

プレーナは加工物に直線運動をあたえ、バイトに直線送り運動を行なわせて平面を削り出す機械である。あまり長くないベッドの上でテーブルが往復運動を行なうものであるから、その駆動方式、制御方式により、大幅に作業性能も異なってくる。ここではもっとも高性能、高稼働率をあげうる SCR によるレオナード制御の直流機について二、三述べることにする。

2.1 テーブルの行なう仕事

今プレーナのテーブルが行なう運動を線図で表わすと第1図のようになる。またテーブルの行なう仕事は (i) 削る仕事 (ii) 摩擦に打ち勝ってテーブルを動かす仕事 (iii) 正転より逆転、逆転より正転に切替える仕事に分けられる。プレーナ本来の仕事は (i) の削る仕事であるが (iii) の正転より逆転、逆転より正転に切替える仕事が案外に大きい。これらは次の式で表わされる。

$$\text{削る仕事 (kW)} = \frac{\text{切削反力 (t)} \times \text{テーブル速度 (m/min)}}{6 \times \text{歯車効率}} \quad (1)$$

ここに歯車効率は 0.85~0.90 くらいと言われている。

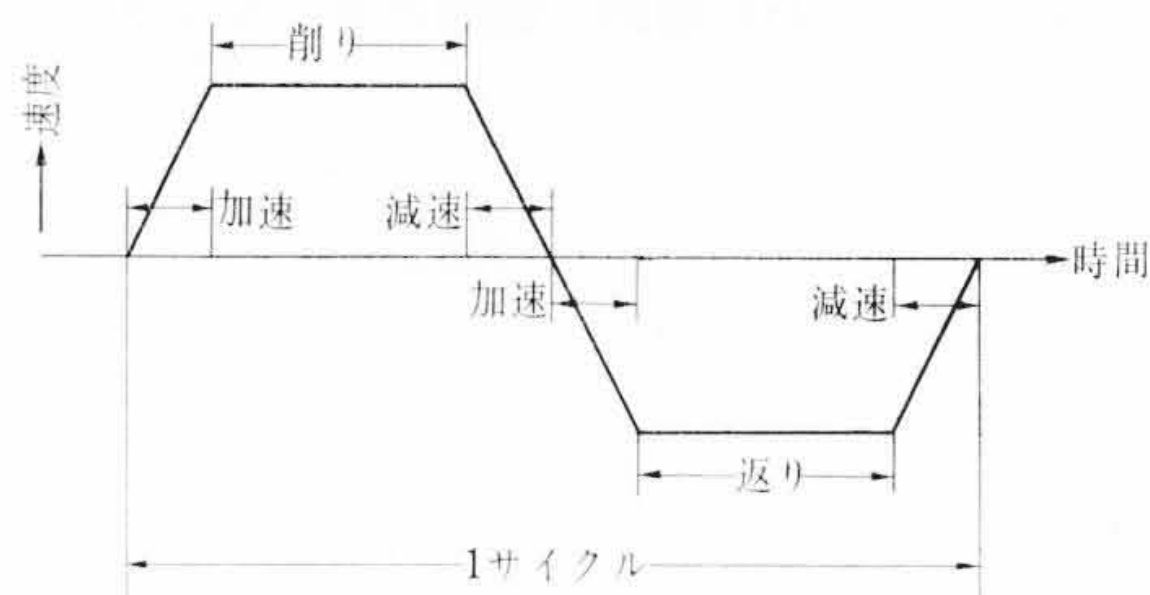
$$\text{摩擦の仕事 (kW)} = \frac{[\text{加工品重量 (t)} + \text{テーブル重量 (t)}] \times \text{摩擦係数} \times \text{テーブル速度 (m/min)}}{6 \times \text{歯車効率}} \quad (2)$$

ここに摩擦係数は 0.08~0.1、十分使いなれてくると 0.03 くらいといわれている。

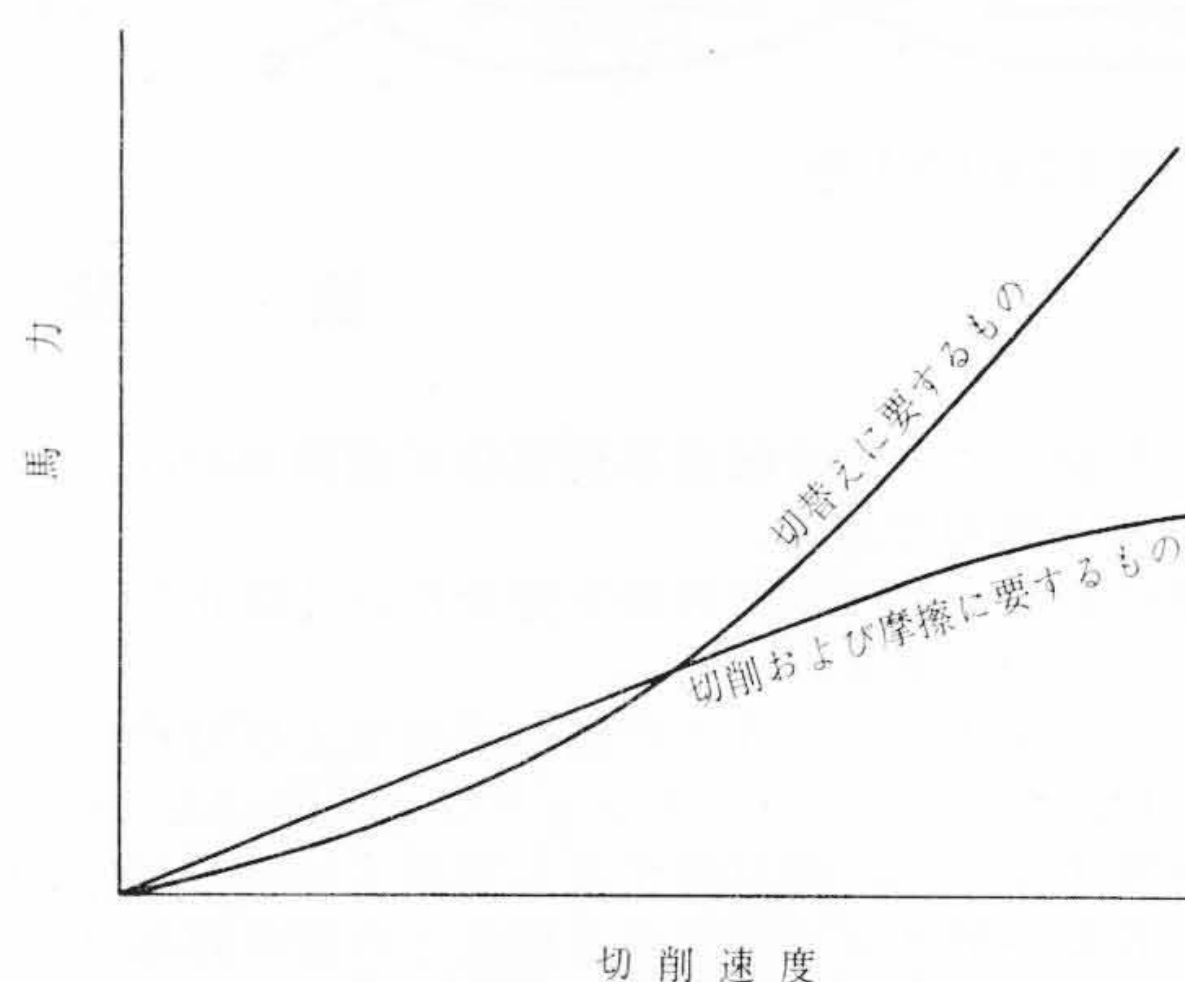
正逆の切替えを行なうに必要なトルクは

$$\text{トルク (kg-m)} = \frac{\text{電動機軸に換算した GD}^2 \text{ (kg-m}^2\text{)} \times (\text{削りの rpm} + \text{返りの rpm})}{375 \times \text{切替え時間 (s)}} \quad (3)$$

となる。



第1図 プレーナテーブル速度—時間曲線



第2図 (削る仕事+摩擦の仕事)と切替え仕事の関係

(3)式に示すトルクは、切替え時間を縮めようとすればするだけ大きくなる。削り全速から戻り全速への切替えには 0.8 秒を標準としている。これら (1)~(3) 式を実用に合わせて検討してみれば次のようになる。

(1)式の削る仕事において重切削を行なう場合には、比較的低速度で、仕上げなどを行なう場合には、高速度で行なうのが通常である。すなわち低速から中速までは大略トルク一定、中速から高速にかけては大略 kW 一定となる。

(2)式の摩擦の仕事において、加工品重量の大きいものは比較的低速で、加工品重量の小さいものは比較的高速で仕事をするのが通常である。一方摩擦係数は高速において増す傾向にあるため結局、低速から中速までは大略トルク一定、中速から高速にかけては大略トルク一定と kW 一定の中間を行くものとなる。

(3)式の正逆の切替えトルクにおいて切替え時間を一定とすれば、高速では加工品重量が小さく、モータ軸に換算した GD^2 は多少小さくなるが、トルクは削りの速度、返りの速度の増加につれて大きくなる。

(1), (2) 式の(削る仕事)+(摩擦の仕事)と正逆切替えトルクを比較してみると第2図のようになり、本来の仕事でない切替えの仕事の占める割合が大きいことがわかる。

2.2 イナーシャ (GD^2) の構成

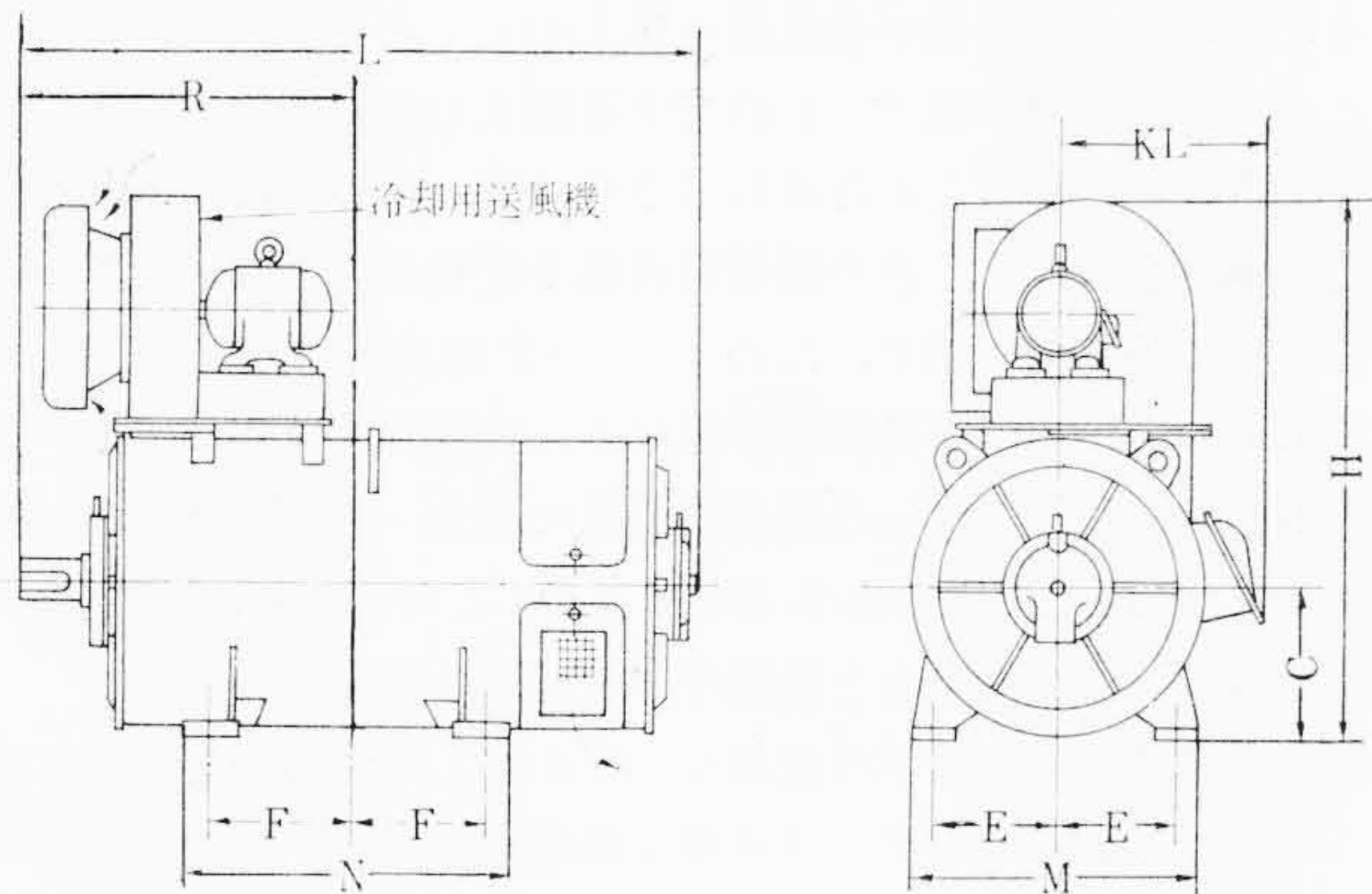
プレーナにおける電動機軸に換算した GD^2 の構成は次のとおりである。

* 日立製作所日立工場

第1表 日立プレーナテーブル駆動用
直流電動機標準仕様

定格出力	定格回転数	定格電圧	わく番
15 kW	650/900 rpm	300/410 V	PMA-2540
19	650/900 rpm	300/410 V	PMA-2545
22	650/900 rpm	300/410 V	PMA-2545
26	650/900 rpm	300/410 V	PMA-2550
30	650/900 rpm	300/410 V	PMA-2945
11	450/900 rpm	220/410 V	PMA-2540
15	450/900 rpm	220/410 V	PMA-2545
19	450/900 rpm	220/410 V	PMA-2550
22	450/900 rpm	220/410 V	PMA-2940
30	450/900 rpm	220/410 V	PMA-2960
37	450/900 rpm	220/410 V	PMA-3260
19	280/900 rpm	145/410 V	PMA-2960
22	280/900 rpm	145/410 V	PMA-3260
30	280/900 rpm	145/410 V	PMA-3265
*40	280/900 rpm	145/410 V	PMA-3760
*50	280/900 rpm	145/410 V	PMA-3770
60	280/900 rpm	145/410 V	PMA-3780

* 印は2台タンデムに接続しそれぞれ定格出力 80 kW, 100 kW にも使用可能



わく番	寸				法					GD ² (kg-m ²)
	R	H	C	KL	E	F	M	N	L	
PMA-2540	430	825	250	345	185	200	460	460	860	2.5
PMA-2545	455	825	250	345	185	225	460	510	920	2.7
PMA-2550	490	825	250	345	185	250	460	560	1,010	3.2
PMA-2945	520	965	290	420	225	225	540	510	1,000	4.5
PMA-2960	580	965	290	420	225	300	540	660	1,160	5.8
PMA-3260	625	1,105	320	445	245	300	600	680	1,250	8.5
PMA-3265	650	1,105	320	445	245	325	600	730	1,330	9.5
PMA-3760	705	1,260	370	520	290	300	700	680	1,425	17.0
PMA-3770	755	1,260	370	520	290	350	700	780	1,565	19.5
PMA-3780	790	1,260	370	520	290	400	700	880	1,630	21.5

第3図 日立プレーナテーブル駆動用直流電動機外形寸法図

加工品の GD².....0.1 v² W_L/N²可変
 テーブルの GD².....0.1 v² W_T/N² }
 ギヤリングの GD².....GD_G² n²/N² }一定
 モータの GD².....GD_M² }

ここに, v: テーブル速度 (m/min)

N: 電動機回転数 (rpm)

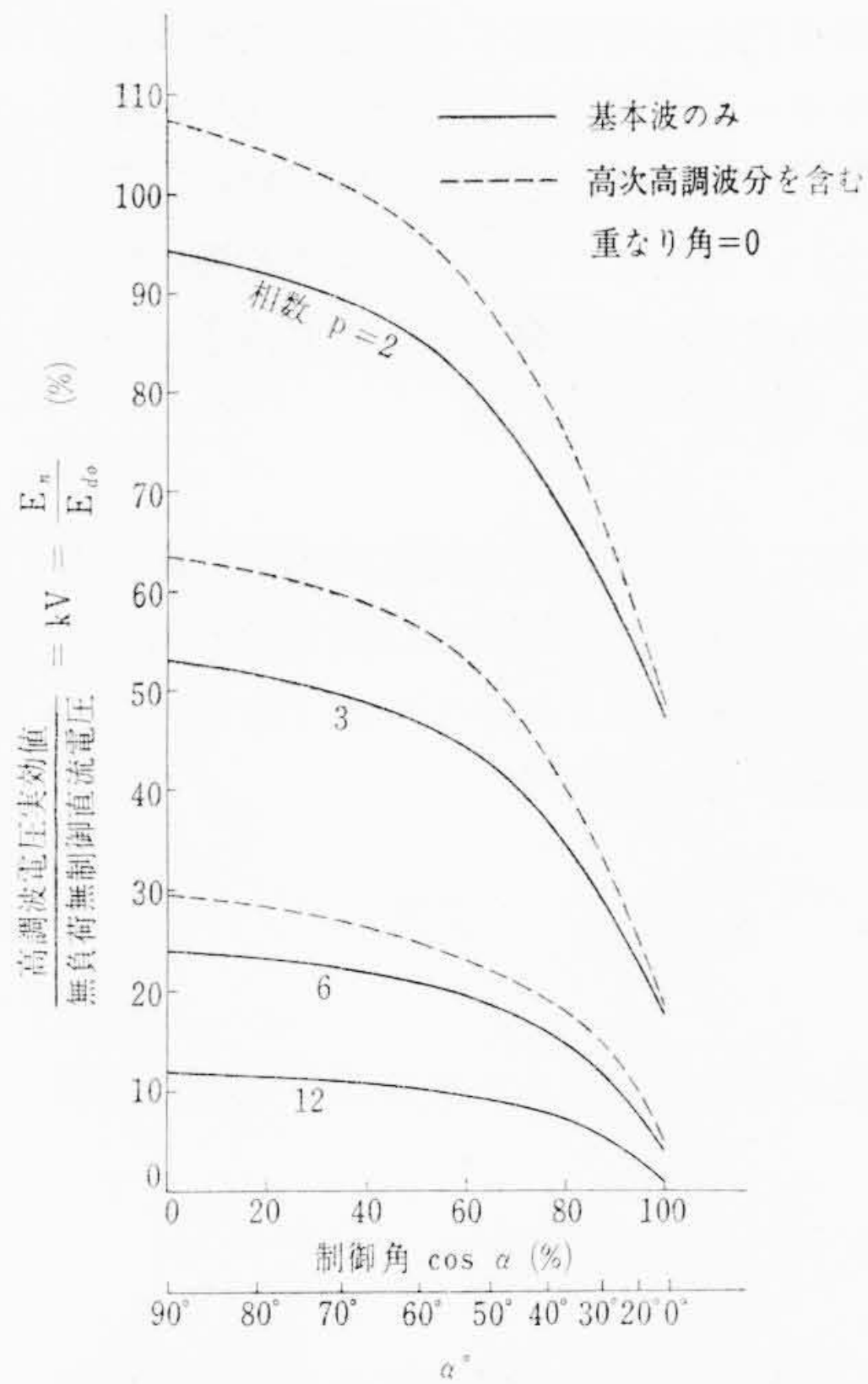
n: ギヤ回転数 (rpm)

W_L, W_T: 加工品およびテーブル重量 (kg)

以上の GD² のうち電動機 GD² の占める割合は大きく, 通常全体の 55%~70% を占める。すなわちさきに述べた切替えに要するトルクの 55%~70% はモータ自体の切替えに用いられていることになり, GD² の小さい電動機が望まれる。

2.3 電動機の制御方式と標準仕様

2.2 で述べたようにプレーナ本来の仕事である削る仕事, 摩擦の仕事に対しては低速から中速に対しては, トルク一定, 中速から高速に対しては大略 kW 一定の電動機であれば良い。この点からのみ



第4図 制御角 α と直流電圧に含まれる
高調波分の関係

由より, 日立製作所では高性能プレーナとしてもっとも望ましい全回転数範囲にわたり電圧制御方式を標準方式として採用している。

以上によりプレーナのテーブル駆動用直流電動機はレオナード電源の電圧制御による kW 一定の回転数制御範囲を 280~900 rpm, 450~900 rpm, 650~900 rpm の 3 系列として第1表の出力を標準としている。第3図は電動機の主要寸法を示したものである。

2.4 SCR 電源で駆動される直流電動機の問題点

SCR 電源または一般に脈流電源で駆動される直流電動機の電機子電流には脈動電流が含まれており, 脈動のない直流電源で駆動される場合と多少様相を異にする。以下二, 三の問題点について簡単に説明する。

(1) 脈流率

定格電流における脈流率を定格脈流率とよび次式で定義する。

$$\mu_0 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{d0}} \quad (4)$$

$I_{\max}$: 直流電流最大値 (A)

$I_{\min}$: 直流電流最小値 (A)

I_{d0} : 直流電動機定格電流値 (A)

定格脈流率の計算には直流回路の抵抗分および整流回路の重なり角を無視し, かつ基本波だけについて計算すれば十分と考えられる。すなわち直流電流が連続である場合には,

$$\mu_0 \doteq \frac{\sqrt{2} K_v E_{d0}}{\pi f p L_d I_{d0}} \quad (5)$$

ただし, f: 電源周波数 c/s

p: 相数

K_v : 第4図に示す係数

E_{d0} : 無負荷無制御直流電圧 (V)

L_d : 直流回路インダクタンス (H)

で示される。

(2) 脈動電流と整流

脈流による残留リアクタンス電圧(火花電圧)は電機子電流の脈動分によるリアクタンス電圧と補極の脈動磁束による速度起電力のベクトル和として求められるが, 磁気回路に渦流を生ずる部分があるので解析は非常に困難である。しかし直流運転で無火花整流帯の測定した類似の電動機があればこの無火花整流帯の幅と,

脈流率とから脈流運転時の火花を大略類推することができる。なお脈流運転時の火花エネルギーは直流運転時のそれに比して小さいので、火花号数が多くなっても、整流子荒損や刷子摩耗に及ぼす影響はそれほど大きくない。たとえば電気車用主電動機に関する国鉄規格では脈流運転時の整流火花号数の限度は直流運転時のそれより 2 号緩和した値となっている。

(3) 電動機速度特性

直流電動機速度変動率は、電動機固有の速度変動率と脈流電源の電圧変動率からなり、負荷電流が連続ならば後者の変動率は数%であるが、電流が断続する場合はきわめて大きくなる。

電動機電流が断続から連続になる条件は

$$\frac{IX}{E_{d0}} = \sin \alpha \left(1 - \frac{\pi}{p} \cot \frac{\pi}{p} \right) \dots\dots\dots (6)$$

で示される。

ここで、 I : 電流が断続から連続になるときの臨界電流平均値 (A)

X : 直流側インピーダンス $= 2\pi f L_d$ (Ω)

α : 制 御 角

特に低速のクリーピング速度で、軽負荷で運転する場合は問題で、電動機と並列に抵抗器をそう入して脈流電源電流を臨界電流以下にならぬよう注意が必要である。また適当な値の直流リアクトルを使用して臨界電流を起りうる運転電流の最小値以下に押えるよう努めるべきである。また断続電流が流れると、整流も急激に悪化するので十分注意を要する。

(4) 直流リアクトル

脈流電源駆動の直流電動機の直流回路には一般に直流リアクトルがそう入されるが、次の事項を考慮のうえ決定する必要がある。

- (イ) 直流電動機整流上の見地から、脈動電流を許容値以下におさえること。
- (ロ) 制御上および整流上から軽負荷において電機子電流が断続することを防ぐこと。
- (ハ) 電動機の機械的時定数 T_M と電氣的時定数 T_E の比がある一定値以上になるようにして電動機速度の振動をおさえること。

$$T_E > \frac{T_M}{4} \dots\dots\dots (7)$$

(5) 温度上昇その他。

脈流運転時は、次のような損失増加により、直流運転にくらべて温度上昇が高くなる。

- (イ) 電流脈動分による銅損の増加
- (ロ) 脈流分の表皮効果による損失
- (ハ) 磁気回路の渦流損およびヒステリシス損
- (ニ) 電機子反作用の脈動分による主極および補極端部に生ずる鉄損など、漂遊負荷損の増大

整流その他の関係から脈流率は多くても 10~15% 程度に押えられるから、温度上昇も直流運転時より数度上がる程度であまり問題にならない。

直流発電機の界磁を SCR で励磁する場合は、界磁コイルのインダクタンスのため、界磁電流はほとんど平滑されるので、界磁電流の脈流分による変圧器起電力の整流に及ぼす影響は無視して差しつかえない。

3. 制 御 装 置

3.1 SCR による制御方式について

SCR によるプレーナ用直流電動機の制御方式には次の 2 通りがある。

(1) SCR 静止レオナード方式

SCR による静止レオナード方式で電動機の界磁制御は行なわない。

(2) SCR 静止励磁方式

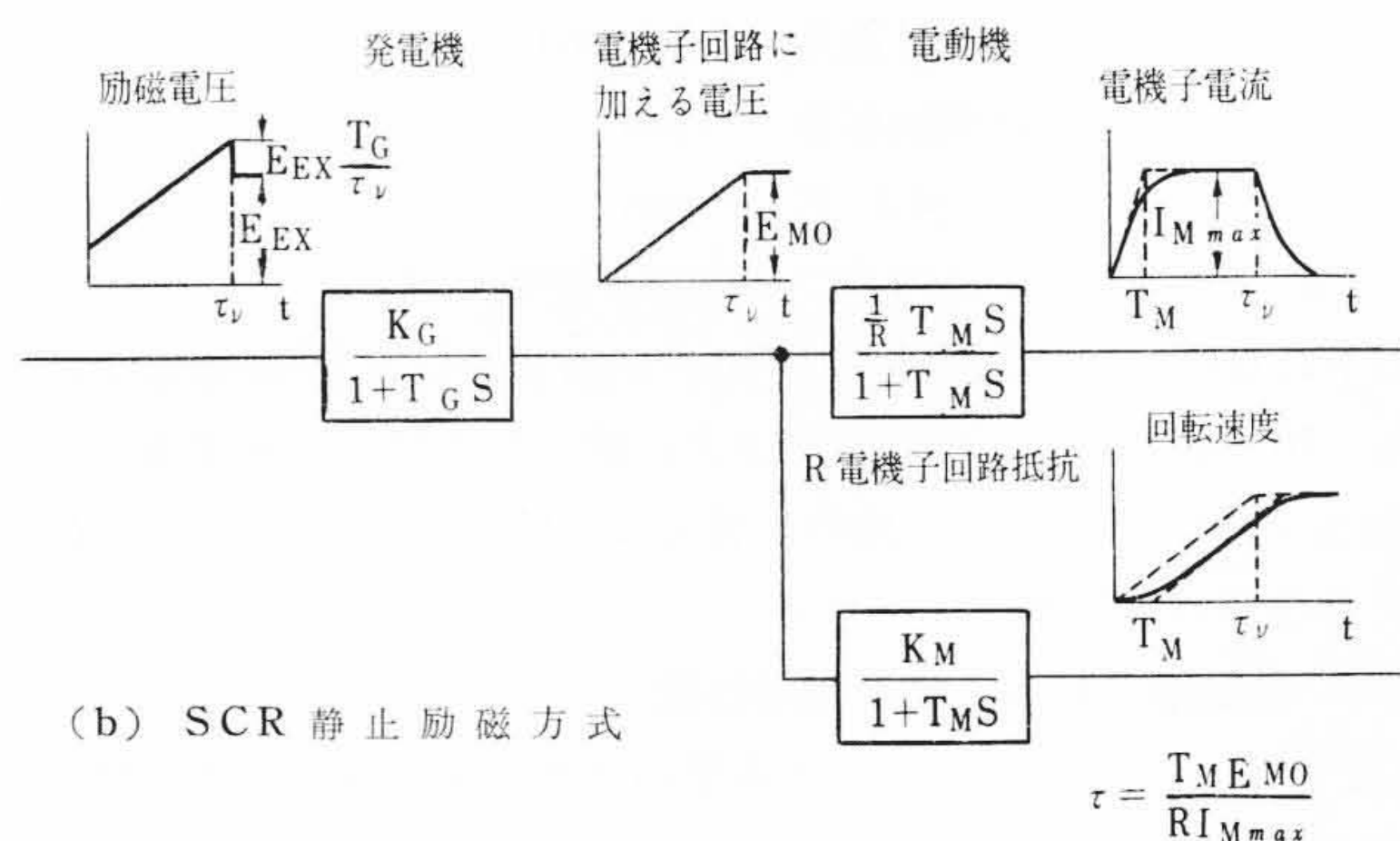
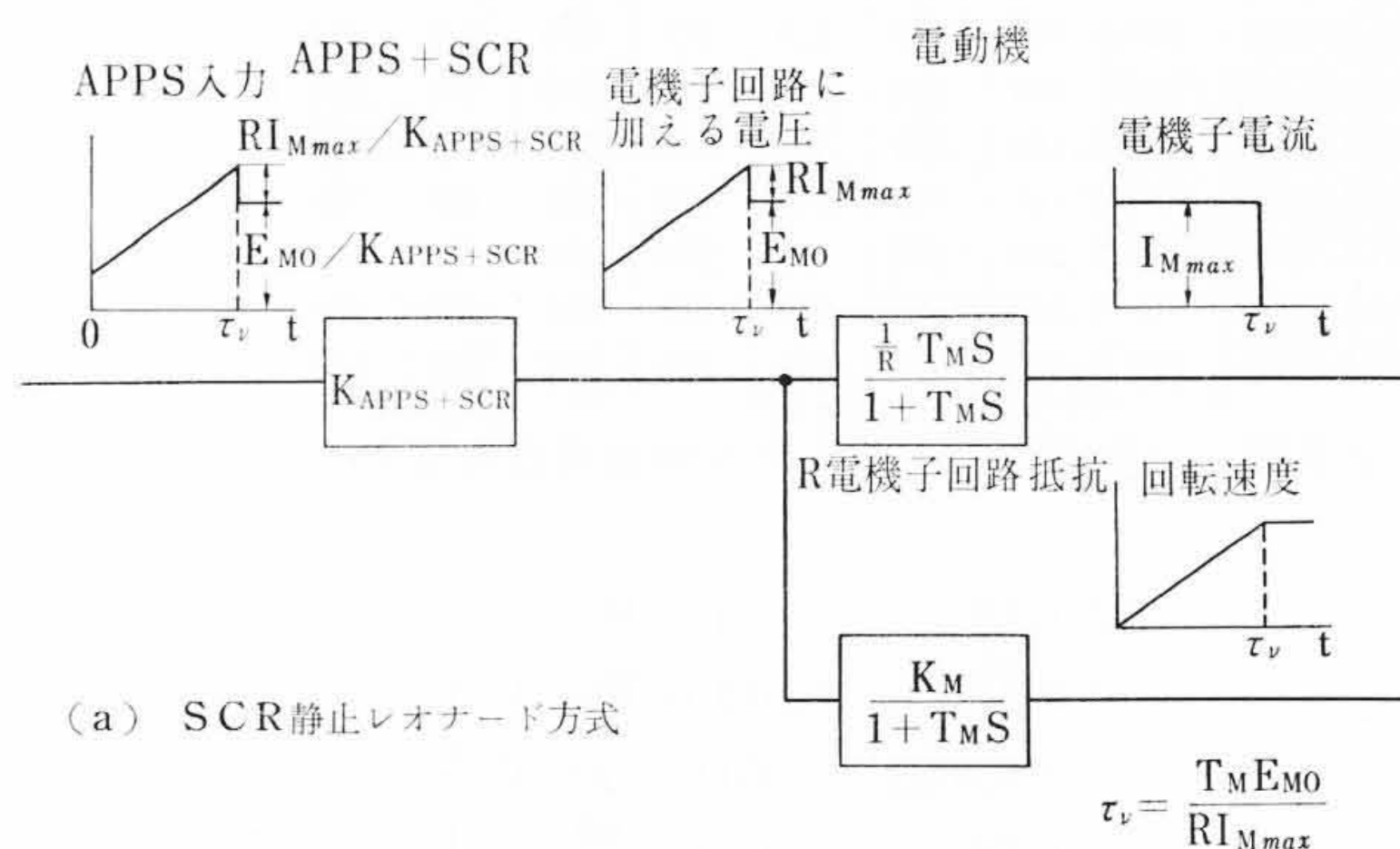
ワードレオナード方式で直流発電機および電動機の界磁を SCR で制御する。速度制御範囲は、電圧制御 1:10 以下、界磁制御 1:3 以下にするのが経済的である。

制御性能の点で前者がすぐれていることは後述するが、上述 2 通りの方法のうちのいずれを採用するかは、電動機の容量や用途に応じ制御性と経済性とから決定しなければならない。SCR 素子の高耐圧大容量化の進展、量産により SCR 素子の価格がやすくなること、SCR 制御技術の進歩などによって、すべてのプレーナ用直流電動機が SCR 静止レオナード方式によって制御されるようになるのは近い将来ではないと思われる。

プレーナ用として必要な急速加減速という立場から、直流電動機に対して種々の要求がなされることは前述のとおりである。このような考慮をはらって製作された電動機を、最も速く加速し、かつ減速するには、その電動機が与え得る最大のトルクを使って、言いかえると、その電動機が流すことのできる最大の電機子電流を流して、加速または減速を行なわなければならない。このいわゆる加速電流一定の制御を行なうときの制御系各部の変化のもようを文献(1)から引用して第 5 図に示す。ただしこの文献を引用するにあたっては、SCR の応答速度が発電機界磁などに比較してきわめて速いことを考慮した。たとえば、3 相全波整流の場合、電源周波数を 50 サイクルとすると SCR の応答速度は 7 ms と考えられ、発電機界磁の時定数 T_G に比較すると無視できるほど小さい。

制御系各部の変化を示す波形を、いかにしてこの理想の形に近づけるかが、制御上解決すべき主要な問題点となるが、われわれはこれをビルドアップレート帰還制御を行なうことによって解決している⁽²⁾。これについては後で触れることにして、ここでは第 5 図に示した制御系各部の変化を示す波形を数値的に検討することにする。

まず、電動機の流し得る最大の電機子電流 I_{Mmax} は、他の応用に



第 5 図 理想的な急速加減速

用いる電動機の場合に比較してかなり大きく、定格電流 I_M の 250～300% になっているのが普通である。したがって、この電動機に電力を供給する発電機もこの電流を流し得ることが要求される。電動機を駆動するのに SCR を用いる静止レオナードの場合には、SCR は電動機定格電流 I_M の 250～300% の定格電流のものを用意しなければならない。SCR のような半導体整流器は、変圧器や電動機のような電気機器に比較して熱容量が小さく、商用周波数の 1 サイクルの間でも接合部温度が変化するため、過電流や過電圧に耐え得る時間はきわめて短い。

次に、電機子回路に加えなければならない電圧は、 $RI_{M\max}$ だけのオーバシュートをするのが理想である。 RI_M は電動機定格電圧の数%であるから、 $I_{M\max}$ を I_M の 300% とすると、必要なオーバシュートは電動機定格電圧の 20% 見当である。電動機に電力を供給する発電機または SCR の出力は、電圧がこの値になるまで飽和しないように考慮しなければならない。

次に、発電機界磁に与えるべき電圧は、 $(T_G/\tau_v) \times 100\%$ のオーバシュートをしなければならない。加速時間 τ_v が短く、発電機界磁回路の時定数 T_G が大きくなればなるほど、大きいオーバシュート量を必要とする。たとえば、 $\tau_v = 0.4 \text{ s}$ 、 $T_G = 0.4 \text{ s}$ とすれば、 $(T_G/\tau_v) \times 100 = (0.4/0.4) \times 100 = 100\%$ のオーバシュートが必要である。すなわち、発電機励磁電圧の定格を 50V とすると、発電機界磁励磁する SCR の出力は、電圧が 100V になるまで飽和しないように考慮されなければならない。前述のように SCR が過電圧に耐え得る時間はきわめて短いから、発電機励磁電圧の定格の 2 倍以上の値を定格とする SCR 装置を用意しなければならないことになる。

SCR を使用した制御は、SCR 素子の高耐圧大容量化によって実用性を増したが、上述のような制御性の必要性のほか、耐圧、電流容量、位相制御範囲、周囲条件などを考慮して直列および並列に接続して使用される。電源の質が悪いところでは変動率をカバーするために十分の余裕を必要とするし、制御性をよくするために電圧マージンを大にするとそれだけ高い耐圧が必要になる。さらに、素子のバラツキによる電圧および電流分担の不均衡や、種々の原因によって SCR に加わる可能性のある過渡電圧などを考慮したりすると、結局、必要以上の耐圧、電流容量を SCR セットに持たせているかのように見えるが、信頼性の点でそれだけ必要となるのである。

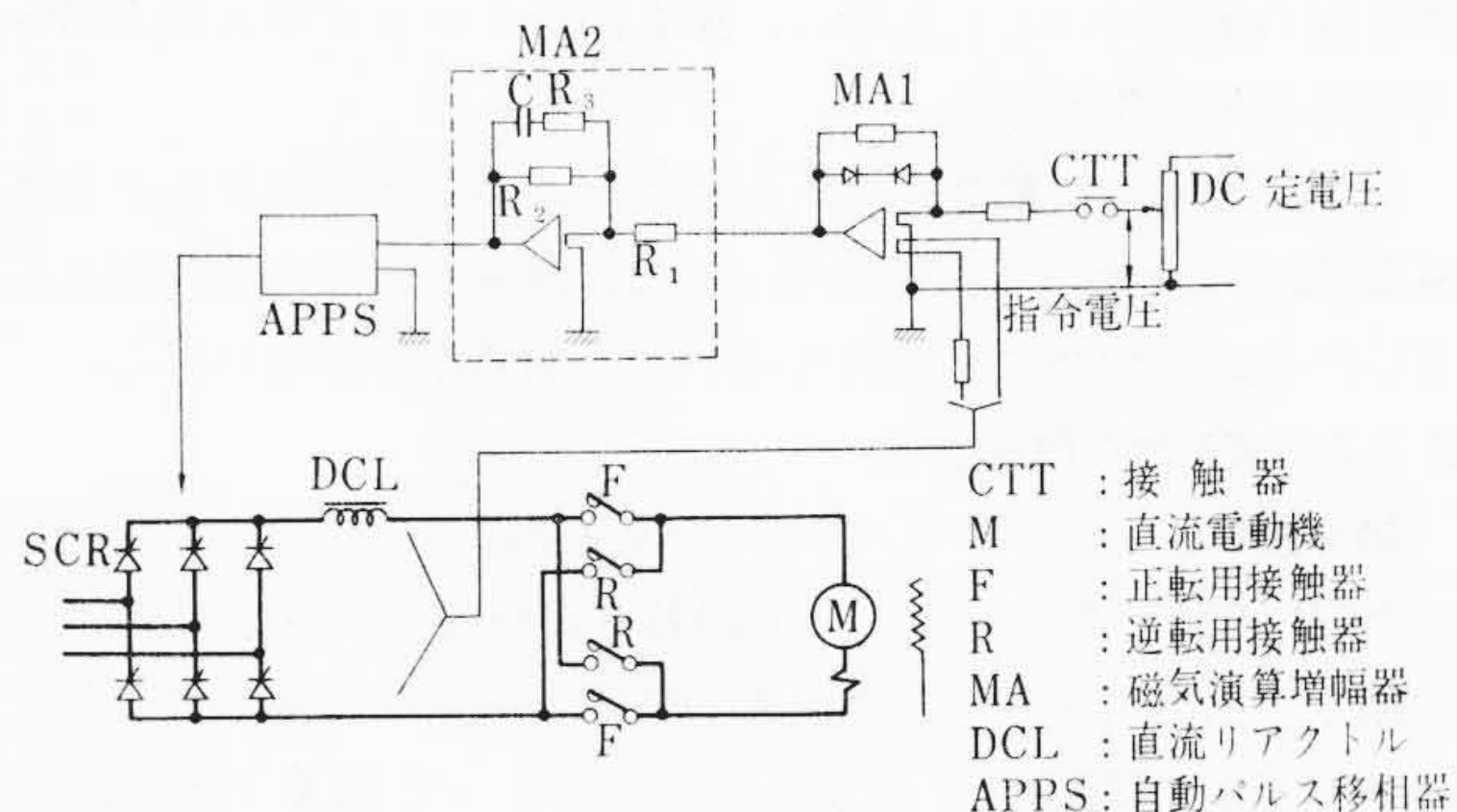
3.2 SCR による急速加減速方式

第 5 図に示したような理想的な形にできるだけ近い波形を有する電圧を電機子回路または発電機界磁に与えるために、種々の方法が使用されてきたが、われわれは最も能率がよくて合理的なビルドアッププレート帰還制御を採用している。SCR 静止レオナード方式、SCR 静止励磁方式それぞれの場合にビルドアッププレート帰還制御をいかに適用するかは、すでに別の論文で⁽²⁾詳細に述べてあるので、ここでは多少重複するところもあるが異なる立場から簡単に論ずることにする。

3.2.1 SCR 静止レオナード方式

可逆運転の可能な SCR 静止レオナード方式には、SCR セットを正転用逆転用の 2 組用いる交差接続方式と、単基切換方式とがある。前者は後者に比べて制御性能の点ですぐれているといえるが、設備がすべて二重になり経済的に不利であるため、現状においてはプレーナ用直流電動機の制御への使用は考えられない。

第 6 図は、ビルドアッププレート帰還制御を施した単基切換 SCR 静止レオナード方式の概略回路である。この回路は、指令電圧と電動機電圧との差を増幅して自動パルス移相器 (APPS) に加えることによって SCR の点弧位相を制御し、電動機電圧を指令電圧に比例した一定値に維持せしめる自動電圧制御 (AVR) 系を構成している。



第 6 図 SCR 静止レオナード

ビルドアッププレート帰還制御をこの SCR レオナード制御方式に適用するために

- (1) 初段磁気演算増幅器 MA_1 に飽和特性をもたせ
- (2) APPS への制御入力電圧を時間微分して第 2 段磁気演算増幅器 MA_2 の入力に負帰還している。

ビルドアッププレート帰還制御は、2 段階に分けて説明される。

その第 1 段階は MA_1 の飽和の作用である。 MA_1 の動作時間を制御系の他の部分の動作時間に比べて無視できるほど小さくしておく、CTT を閉じて加速指令を与えてから電動機速度が設定速度に十分近い速度になるまで MA_1 の出力は設定速度によらない一定の値に維持される。

第 2 段階は、APPS への制御入力電圧の時間微分を MA_2 の入力に負帰還した部分の作用である。第 6 図で示した制御系の中で、点線で囲まれた部分の伝達関数は

$$K \left[\frac{1}{1+Ts} + \frac{K'Ts}{1+Ts} \right]$$

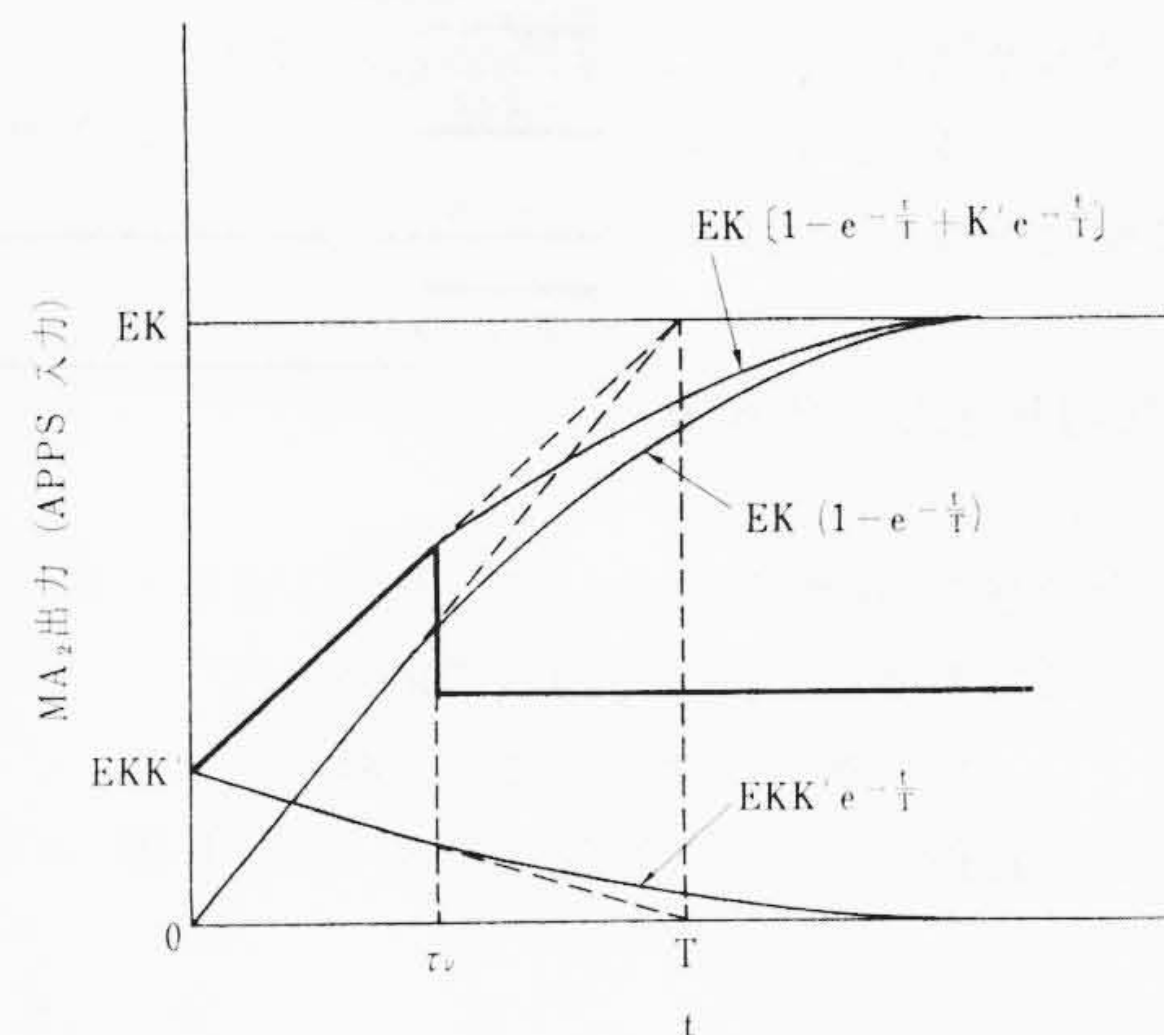
ただし、

$$K = \frac{R_2}{R_1}, \quad K' = \frac{R_3}{R_2+R_3}, \quad T = (R_2+R_3)C$$

である。この部分に MA_1 の飽和により設定速度によらない一定の高さにされたステップ状の入力が加えられることになる。上の伝達関数に高さ E のステップ状の入力が加えられたときの応答は

$$EK \left[1 - e^{-\frac{t}{T}} + K' e^{-\frac{t}{T}} \right]$$

であり、これを図示すると第 7 図のようになる。時刻 τ_v において MA_1 は飽和から解除されるから、ビルドアッププレート帰還制御はこの応答の太線部分を使用するものであるということが出来る。 MA_1 の飽和の高さ、ビルドアッププレート帰還回路の R_3, C を適当に選定することにより、 E, K', T の値を第 5 図に示した理想的な波形の電圧が APPS に加えられるようにすることができる。



第 7 図 ビルドアッププレート帰還制御の原理

第5図の太線で示した波形は、第8図のオシログラムのAPPS入力電圧波形に相当する。

以上の説明や、第8図のオシログラムから理解できるように、SCR静止レオナード方式の場合には、制御系各部の時間遅れが小さいために、理想にきわめて近い形で加減速が行なわれる。

3.2.2 SCR静止励磁方式

第9図は、ビルドアッププレート帰還制御を施した、発電機界磁をSCRで制御するレオナード制御方式の概略回路である。この回路も、指令電圧と電動機両端の電圧との差を増幅して磁気式パルス移相器(MAPPS)に加えることによってSCRの点弧位相を制御し、発電機電圧したがって電動機電圧を指令電圧に比例した一定値に維持せしめるAVR系である。

ビルドアッププレート帰還制御は

- (1) 磁気増幅器MAに飽和特性をもたせ
- (2) 発電機電圧 V_g の時間微分をMAPPSに負帰還することによって行なわれている。この場合も、前述SCR静止レオナードの場合とまったく同様に説明することができる。

SCR静止励磁方式の単相全波整流回路は、片側の分枝だけにSCRを使用し、他の側の分枝をシリコン整流素子SRにすることができる。このようにすると、高価なSCRの使用個数が1/2になり、点弧制御回路も簡単になって経済的であるが、今の場合のように負荷にインダクタンス分がある場合には、点弧パルスが $\alpha=180^\circ$ を越える位相でSCRに与えられたり、なんらかの原因により点弧制御装置から点弧パルスが出なかったりすることにより、点弧失敗が起こることは禁物であるうえに、必要な位相制御範囲が広がるから、すべての分枝にSCRを使用する場合よりも巧妙な制御を行なわなければならない。

SCR静止レオナード方式の場合でも、可逆運転を行なわない場合や、可逆運転を行なっても急速な加減速を必要とせず、インバータ運転を行なわない場合には、三相全波整流回路の片側の分枝だけにSCRを使用し、他の側の分枝をSRにすることができる。

第10図はSCR静止励磁方式の制御系各部の動作を示すオシログラムである。

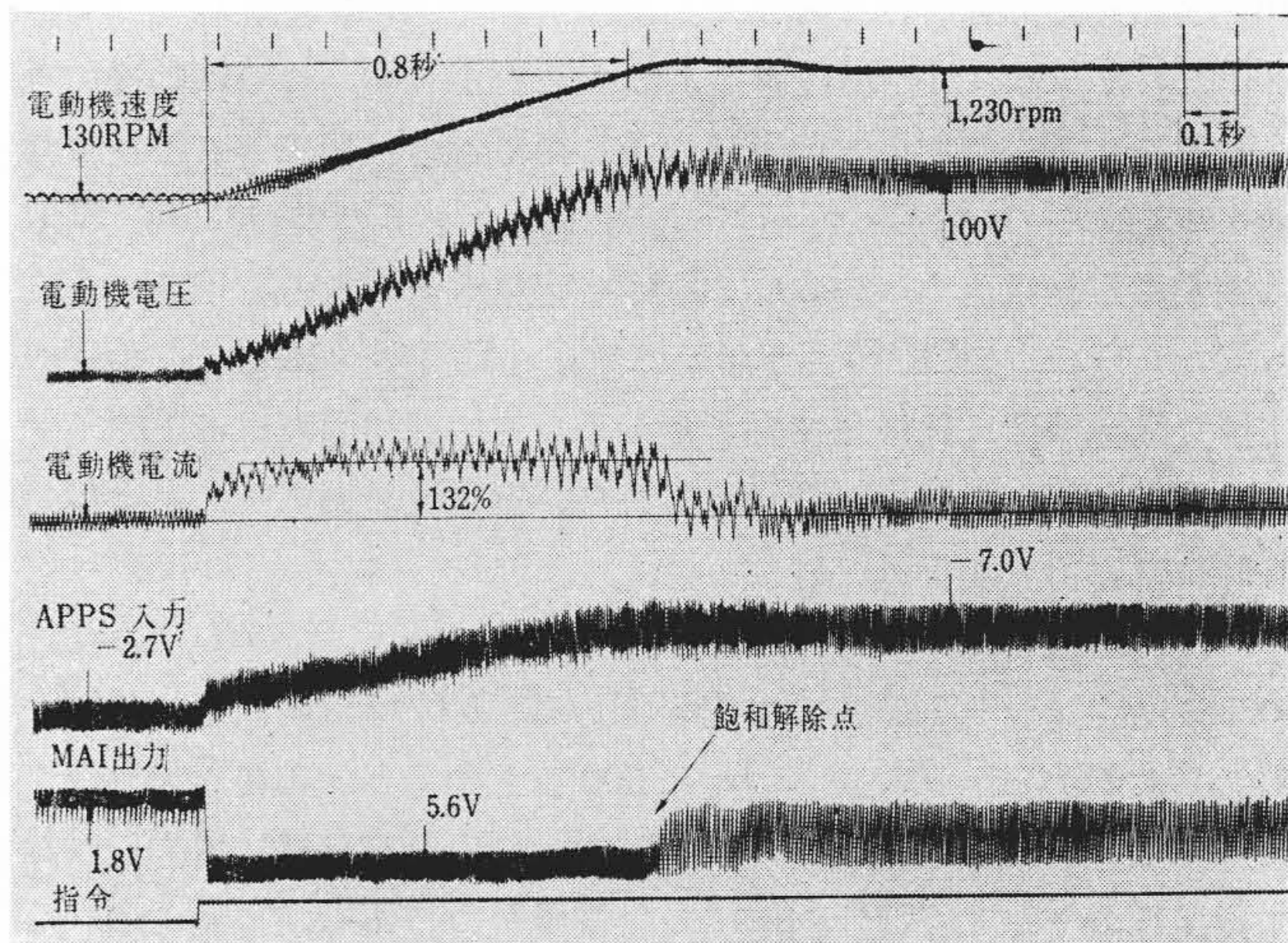
4. 結 言

以上、SCRを用いたプレーナのレオナード設備について概観した。プレーナの制御についてはこのほか、刃物送り計数制御、テーブル自動可逆無接点制御など論ずべき問題は多いがこれらについては機会を改めて述べたい。

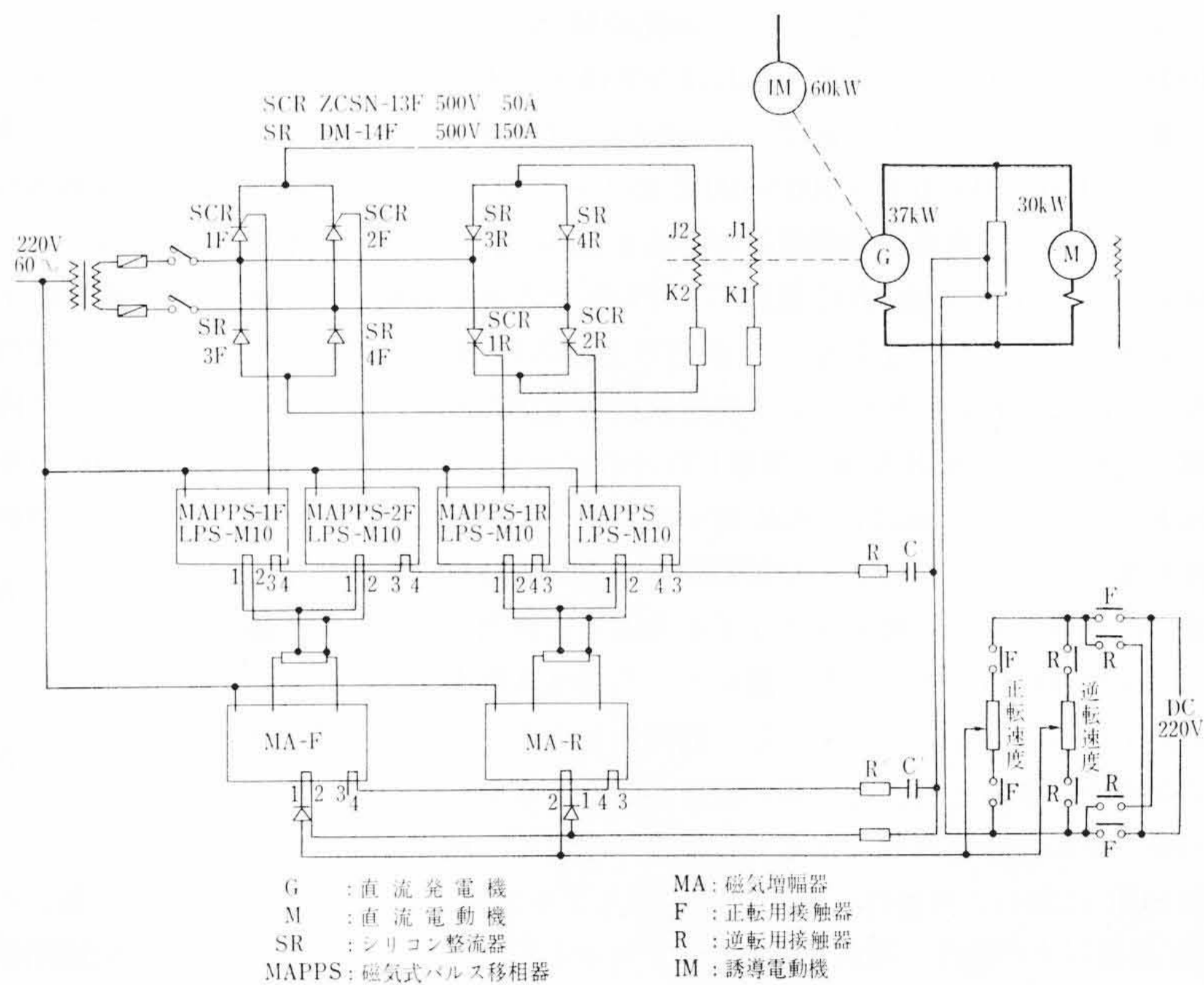
また、単基切換方式のSCR静止レオナードについては接触器の開閉や指令の与え方の順序について言及する必要があるが、この点については参考文献を掲げるのみに止める⁽³⁾⁽⁴⁾。

参 考 文 献

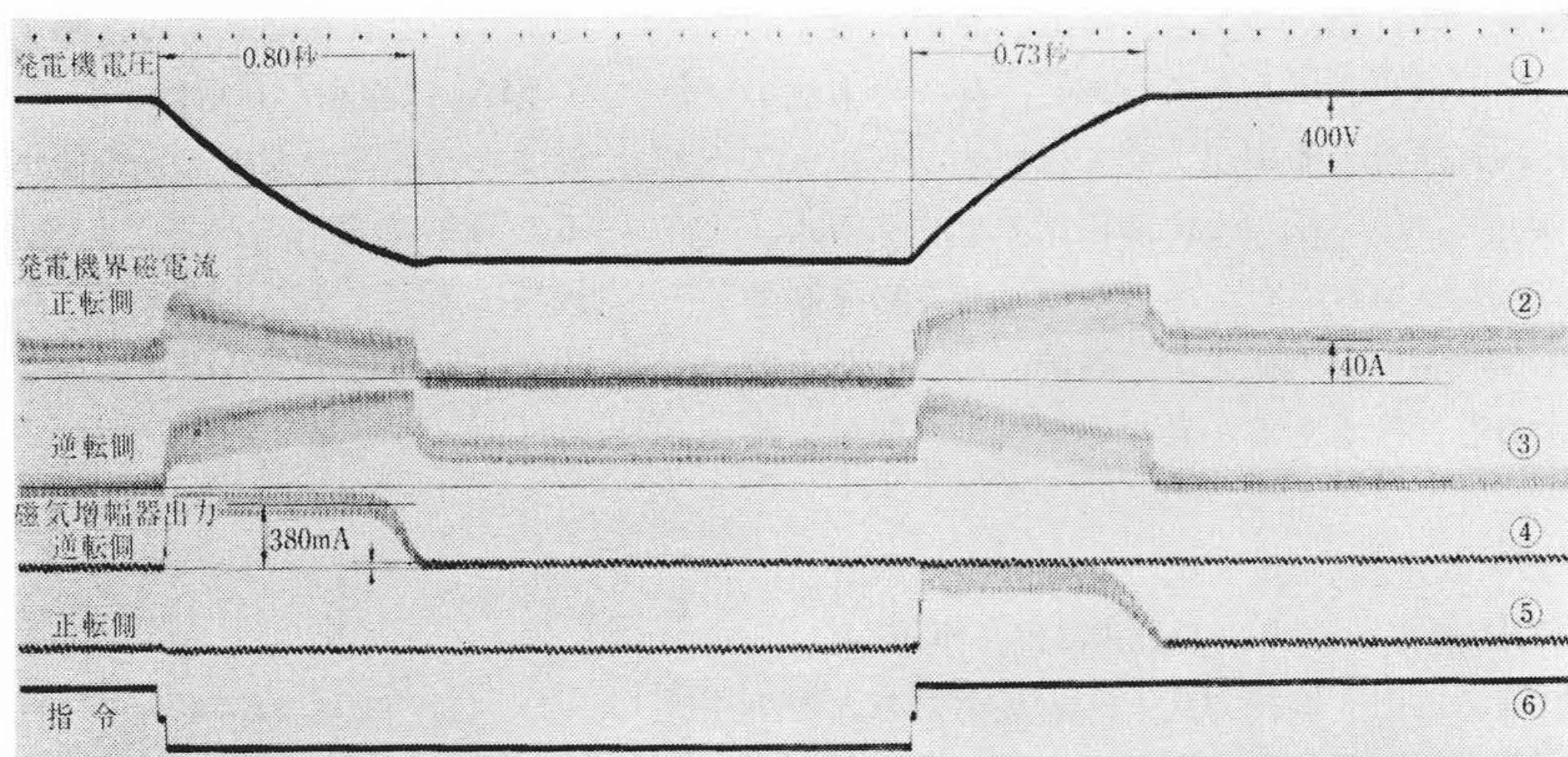
- (1) 前川、小野田：日立評論 38, 1,131 (昭31-9)



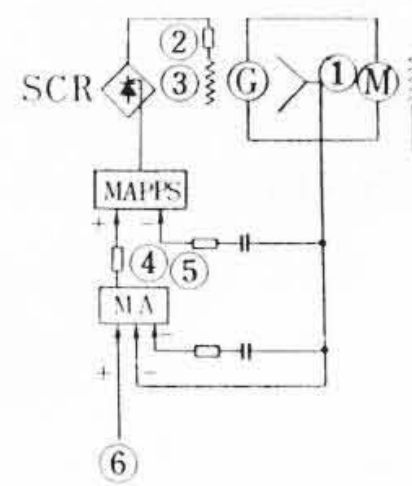
第8図 SCR静止レオナード方式の加速特性



第9図 SCR静止励磁方式



第10図 SCR静止励磁方式の加減速特性



- (2) 斎藤、川上ほか：日立評論 46, 531 (昭39-3)
- (3) 小野田、守田、西：日立評論 別冊 32, 58 (昭34)
- (4) 前川：日立評論 44, 1,460 (昭37-9)