

クレーン制御の無接点化

Non Contact Control for Induction Motor

田中 侃* Tsuyoshi Tanaka

従来、有接点操作が主体であったクレーン制御装置も、用途によっては操作頻度が極めて過酷なため、メンテナンスにかなりの費用を必要としている場合が少なくない。この解決方策として近年メンテナンスフリーをねらって採用されつつある制御装置の無接点化は、経済的制約のため従来まだ一般的とはいえない。

そこで、経済的にも成り立ち、特性も従来最も一般的に使用されている抵抗制御方式と同様な方式としてサイリスタ一次電圧制御方式を実現した。

このとき問題となるトルクと電流との関係につき理論的解析上の問題点と、これを補正する実験的手法により一般化を行ない、実用に供する形とした。また、制御器(コントローラ)の無接点化も合わせて実施した。

このようなクレーン制御の簡便な無接点化制御装置の完成は、今後のメンテナンスフリー化に対し、一つの方向を与えるものと言える。

1 緒 言

最近の人件費の上昇は保守人員の削減を余儀なくさせ、クレーン制御に対してもメンテナンスフリー化を進める傾向が顕著である。クレーンはその用途によっては操作頻度が極めて高く、有接点による制御では、電磁接触器の接点の保守、及びコントローラの接点の保守などに多大の経費を費やしている。この部分のメンテナンスフリー化が急務とされている。しかし、従来の方式ではイニシャルコストが高く、全面採用されるまでには至っていないのが現状である。

そこで一般的クレーンの制御内容を見直した場合、多くは経済的で二次抵抗制御方式並みの性能を満たす程度でよいものが、実用的という意味で必要なことが分かる。

このニーズに応じて今回交流クレーンモータルの位相制御と、二次抵抗制御の組合せにより、簡便なオープンループ制御装置と、その周辺機器の無接点化を実現した。以下、その概要について述べる。

2 クレーン速度制御の現状と無接点化の範囲

クレーンに対する各種速度制御方式の主なものをまとめて表1に示す。

このうち基礎となるものは二次抵抗制御であり、この方式は一般の制御のほとんどに使われており、横行、走行をはじめとする正負荷の制御に使われる。巻下の制御のように負負荷に対する制御は全速時は回生制動であるが、中間速度はそれぞれの制御方式により異なり、二次抵抗制御ではできない。ここでは、負負荷の中間速度制御を除いた制御(二次抵抗制御と同様)に焦点をあて報告する。

3 制御方式の検討とその結果

図1に、二次抵抗制御の代表例を示す。同図の特性を接点回路で行なえば、図2に示す回路となるが、これを単にサイリスタに置き換えると図3に示すとおりとなり、このままではサイリスタの数が多すぎて実用的でない。一方、トルクと電圧との関係に注目すると(1)式となり、

$$T = kE^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 T ：トルク (kg・m)

E ：電圧 (V)

k ：比例定数

すなわち、トルクは電圧の二乗に比例する。

また、二次抵抗とトルクの関係は、

$$T = \frac{m_1 V_1^2 \frac{r_2'}{S}}{9.8 \omega_0 \{ (r_1 + \frac{r_2'}{S})^2 + (x_1 + x_2')^2 \}} \dots\dots\dots(2)$$

m_1 ：一次相数

V_1 ：一次電圧

ω_0 ：同期角速度

S ：すべり

r_1 ：一次抵抗

r_2' ：一次換算二次抵抗

x_1 ：一次リアクタンス

x_2' ：一次換算二次リアクタンス

となり、二次抵抗により比例推移する。これが図1であるが、(1)式と(2)式を組み合わせると、図4となる。(a)は基本トルクカーブであり、(b)は(a)を比例推移によりずらせたもので、(c)～(e)は(b)に減電圧を加えたものである。

図4をサイリスタ回路で組むと、図5に示すように二つの方法があるが、今回行なった方式では経済的理由を第一とし、適用モータルの容量からみてアンバランス電流もあまり問題とならないので、図5(a)の二相制御を採用した。

3.1 二相制御とトルク、電流との関係

直流電動機に対するサイリスタ制御は、資料も既に多数発行されており実用化も完成している。これは直流電動機の電流、及びトルクの関係がサイリスタの点弧移相による直流出力の平均値で論ずることができることにあるものと考えられる。しかし、誘導電動機の理論的解析は、多くの人々によって行なわれているがいまひとつの決定を欠いているきらいがある。多くはトルク方程式に対して、各点弧位相角による電圧波形をフーリエ展開して解くことを考えるが、この方法は

* 日立製作所習志野工場

表1 各種制御法とその特性 クレーンで一般的に使われているものについて、その特長を示したものであり、制限容量は実用性と経済性の両面を考慮して決定した。

制御方式	二次抵抗制御	CFブレーキ制御	うず電流ブレーキ自動制御	DCダイナミック制御	リアクトル制御	サイリスタ制御
適用用途	プラス負荷 (横行・走行・旋回など)	マイナス負荷 (巻上げ・引込など)	いずれの負荷でもよい (巻上げ・引込・横行・位置停止など)	マイナス負荷 (巻上げなど)	いずれの負荷でもよい (巻上げ・引込・横行など)	いずれの負荷でもよい (巻上げ・引込・横行など)
速度・トルク特性						
	100% 5ノッチ 3ノッチ 2ノッチ 1ノッチ トルク	100% 上3ノッチ 上2ノッチ 上1ノッチ トルク 下1ノッチ 下2ノッチ 下3ノッチ	100% 上5ノッチ 上3ノッチ 上2ノッチ トルク 下1ノッチ 下2ノッチ 下3ノッチ 下4ノッチ 下5ノッチ	100% 上5ノッチ 上3ノッチ 上2ノッチ トルク 下1ノッチ 下2ノッチ 下3ノッチ 下4ノッチ 下5ノッチ	100% 上5ノッチ 上3ノッチ 上2ノッチ トルク 下1ノッチ 下2ノッチ 下3ノッチ 下4ノッチ 下5ノッチ	100% 上5ノッチ 上3ノッチ 上2ノッチ トルク 下1ノッチ 下2ノッチ 下3ノッチ 下4ノッチ 下5ノッチ
特長	30~100%	-20~-50%	+40~-50%	-15~-50%	+95~-100%	+95~-100%
	低速にて極めて大	約20%	2~3%	高速にて極めて大	2~3%	2~3%
その他	回路が簡単、保守容易。	静止時は停止ブレーキとなりより安定性増す。	負荷変動にかかわらず速度一定	GD^2 の増大によるトラブルがない。	主回路無接点化ができる。	主回路無接点化ができる。
注意事項	軽負荷時の低速制御が困難。 特に速いクレーンは電気制動を併用。	ブレーキライニングの摩擦に要注意 特に使用率(%ED)の高い用途には不向き。	特に使用率(%ED)の高い用途には不向き。	軽負荷時の巻下げ制御が困難である。	所要出力の計算に注意	所要出力の計算に注意
制限容量	なし	75kW (90kW)	200kW	なし	なし	なし

注：F=正 R=逆 IM=誘導電動機 SB=サーボリフタ ブレーキ PG=速度発電機 CF=CFブレーキ Tr=変圧器 IB=IBブレーキ RX=整流器

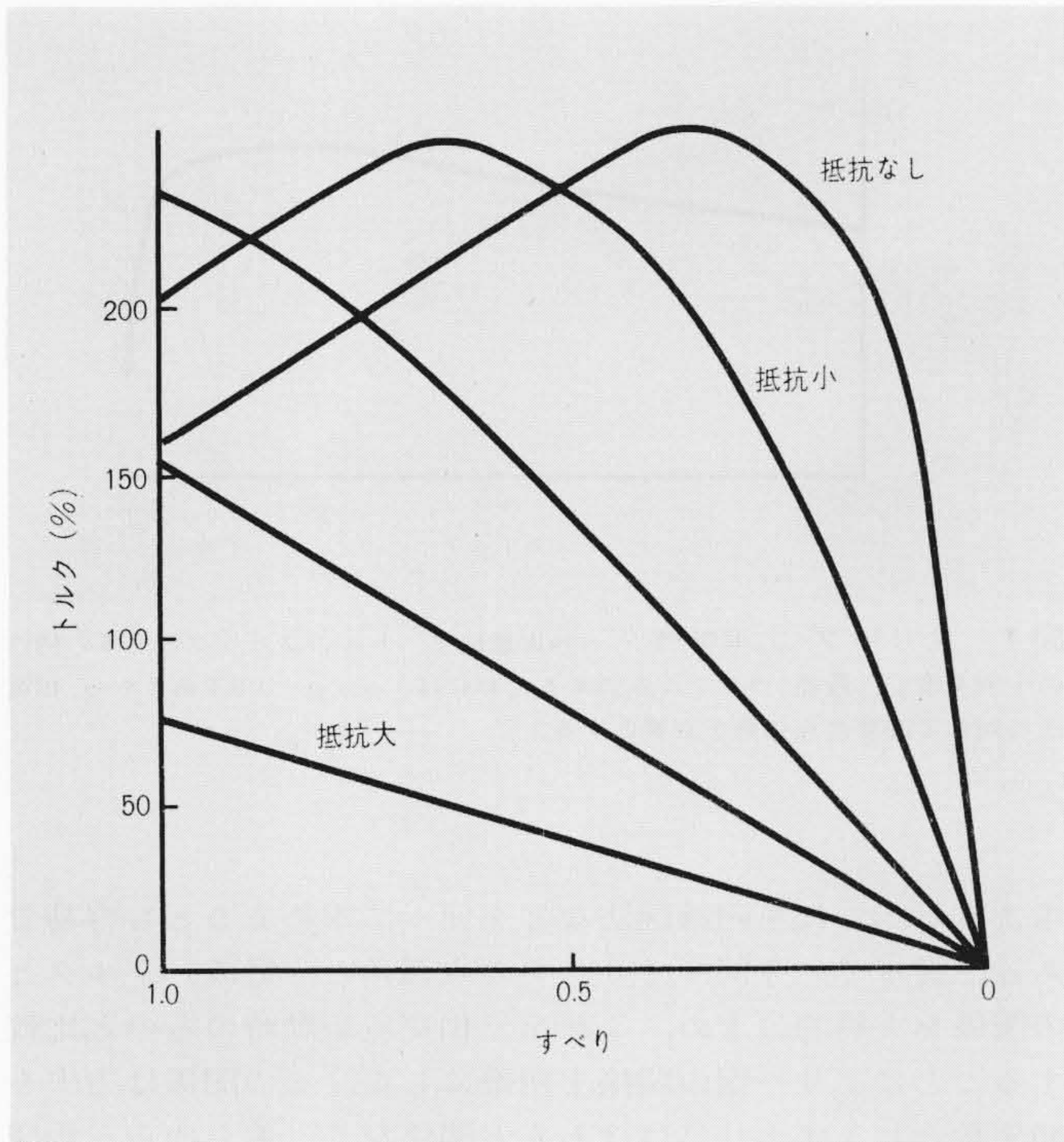


図1 二次抵抗制御のすべり-トルク特性 11kW巻線形モータの二次抵抗を変えたときのすべり-トルク特性(平衡制御)を示す。

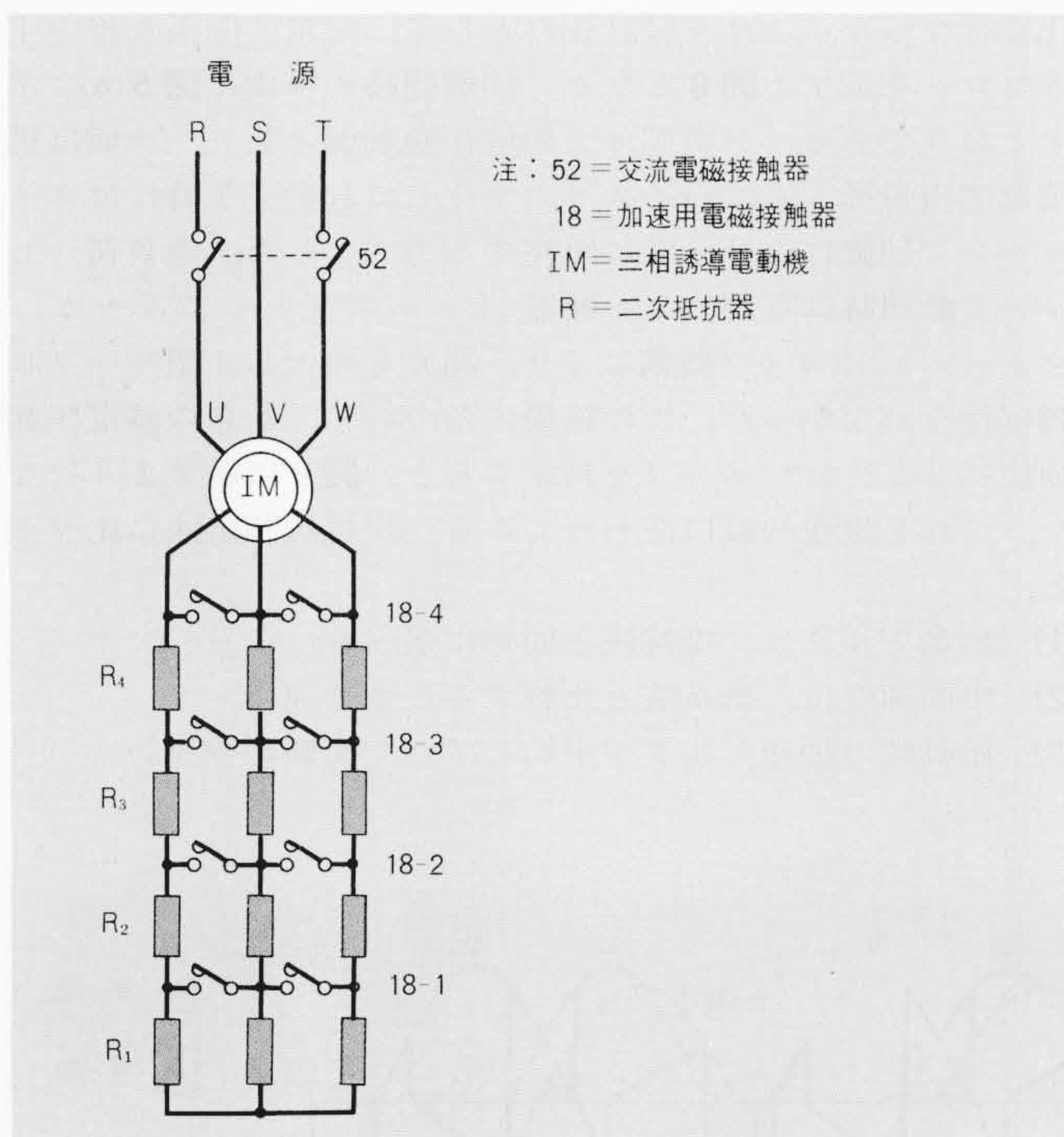


図2 二次抵抗制御の主回路 4段短絡時の有接点主回路の一例(逆転側は省略)を示す。

誤差が大きく実用的ではない。その理由について簡単に述べる。図6は点弧角 $\frac{1}{3}\pi$, $\frac{\pi}{2}$ のときの電圧波形である。同図(b)におけるW相電流は、 0π から $\frac{1}{2}\pi$ では単相であり、 $\frac{1}{2}\pi$ から $\frac{\pi}{3}\pi$ では三相となる。すなわち、位相制御中の電動機電圧は、過渡現象の連続して続いた状態となり、フーリエ級数で解析することは、実用的にはなんの意味ももたないからである。

また、誘導電動機の場合のもう一つの変数は、回転数による力率の変化である。図7は、誘導電動機の力率変化の一例

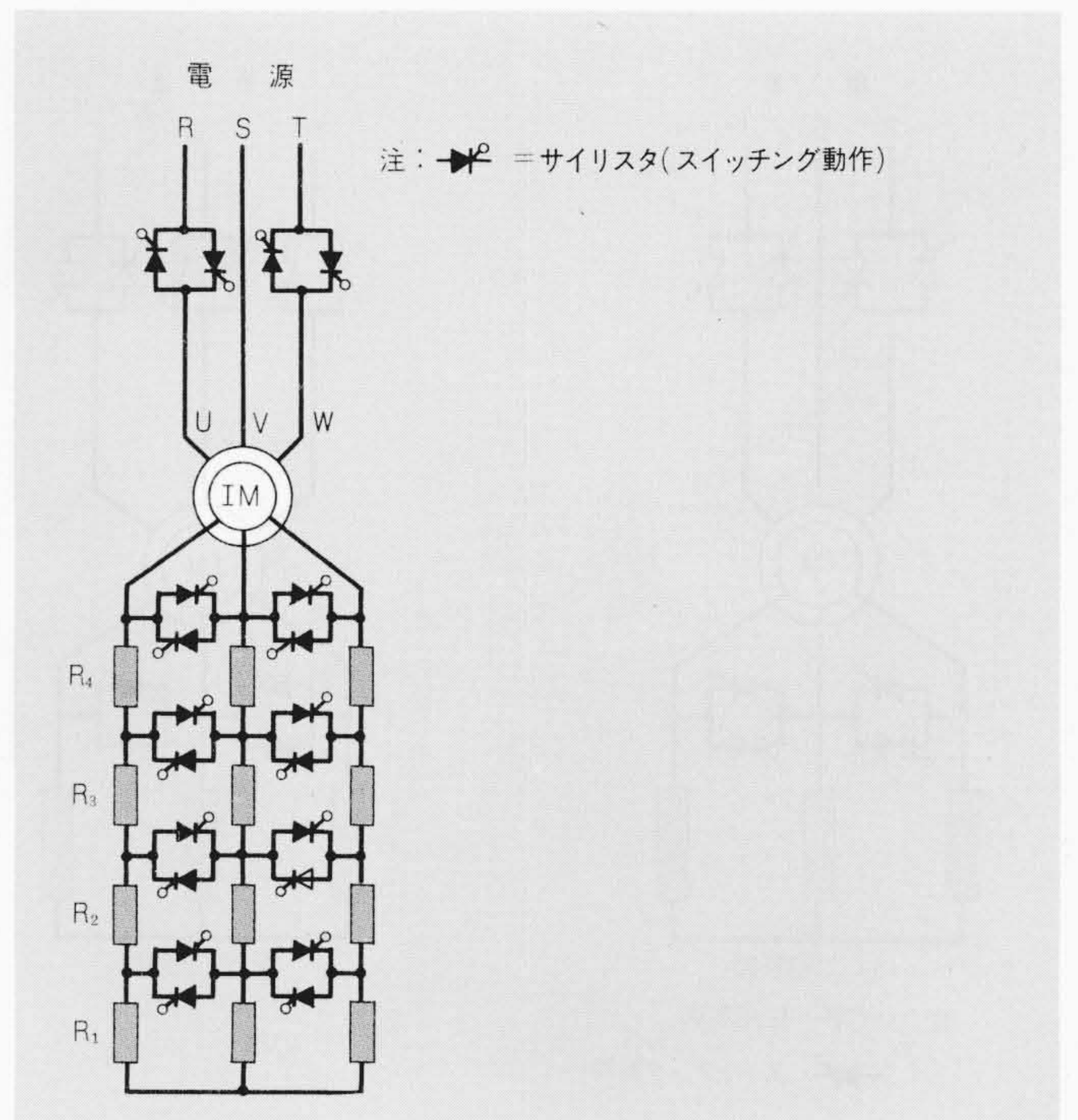


図3 無接点主回路 図2の二次抵抗制御を、単純にサイリスタのスイッチングにより無接点化したものを示し、20個のサイリスタが必要である。

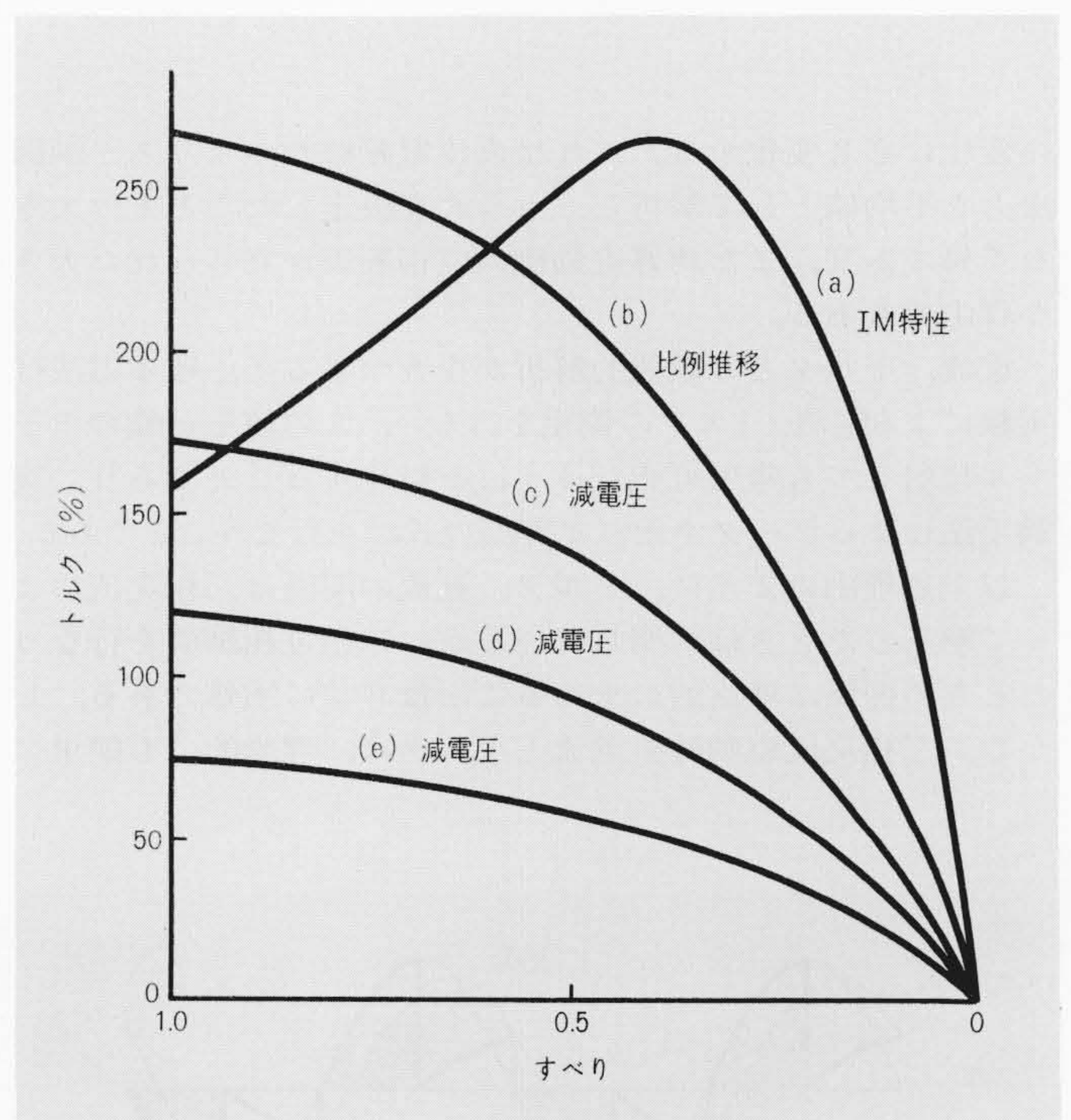


図4 すべり-トルク特性 二次抵抗制御に減電圧始動を組み合わせたときのトルク特性を示し、二次抵抗制御とほぼ同様の特性が得られる。

を示したものであるが、 $S=0$ においては励磁電流だけとなり、最もわるくなる。従って、ゲート電圧をどのように処理するかということに重大な意味があるのであるが、その詳細については、ここでは省略する。この論文では、誘導電動機の力率を加味した、適当な制御電圧を加えて制御を行なったときの結果につき述べることにする。

電流が力率により変化するということは、電流を点弧角による関数として数値化することを困難にし、その波形も力率

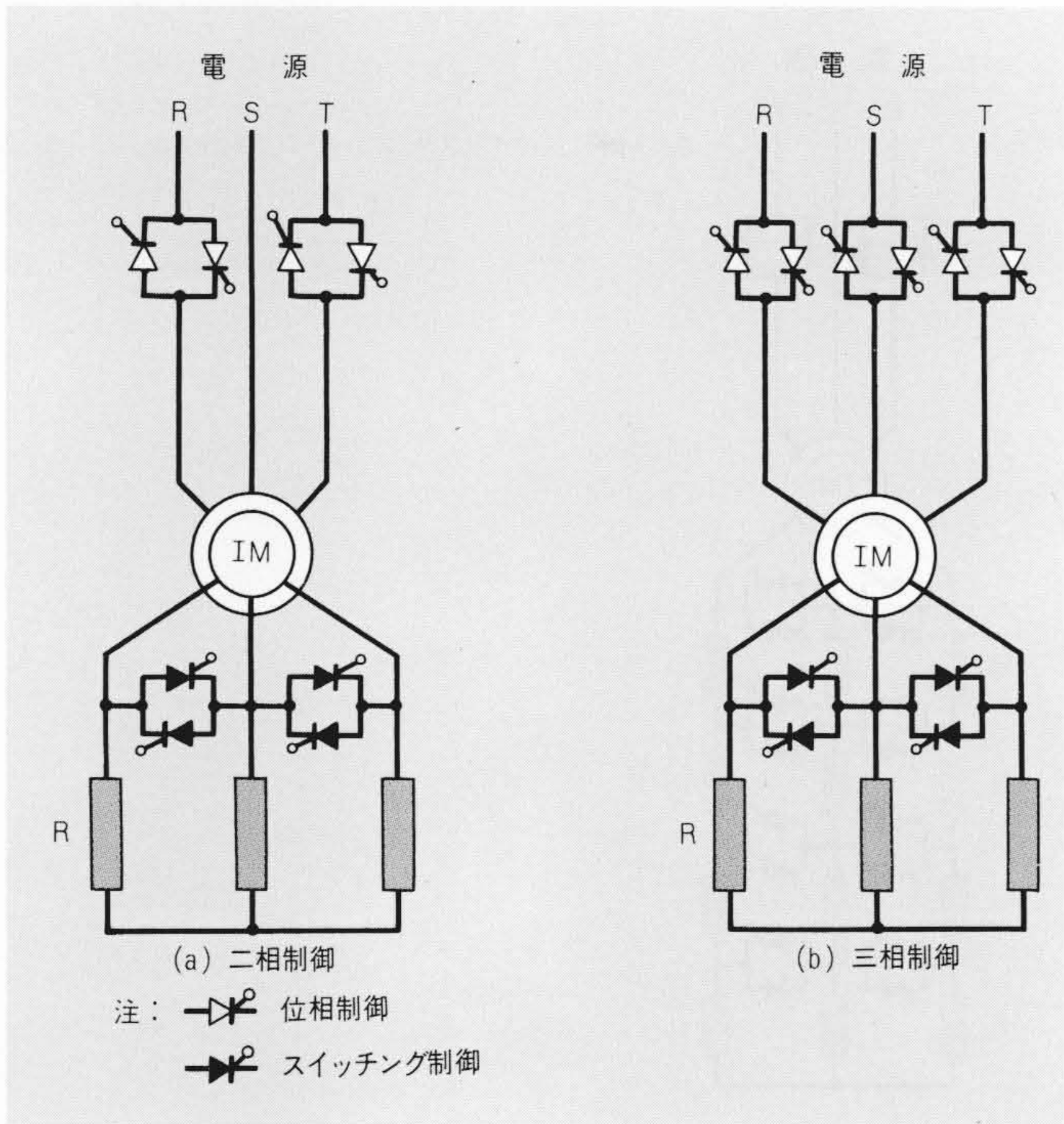


図5 減電圧起動と組み合わせた主回路 二次側サイリスタに位相制御を行ない、減電圧起動を行なうようにした回路で、サイリスタは8～10個でよい。

の変化に応じ変化する。これは直流電動機がサイリスタ制御出力を平均値として解析し、トルクを決定したこととの大きな差異であり、また誘導電動機の位相制御が立ち遅れた大きな理由でもある。

電流、トルクとも数値的解析がゆきづまると、残る方法は実験による電流、トルクの測定を行ない、この値を一般のモートルに対しても適用可能なように一般化することであり、実験手法によるデータを使って実際の設計を行なうことである。

以上の理由のように、トルク、電流の関係は三相交流によって駆動したときは判明しているが、二相位相制御を行なったときの関係は理論的に求めることは非常に困難である。しかし、三相交流駆動時の電流とトルクは、理論的にも簡単に

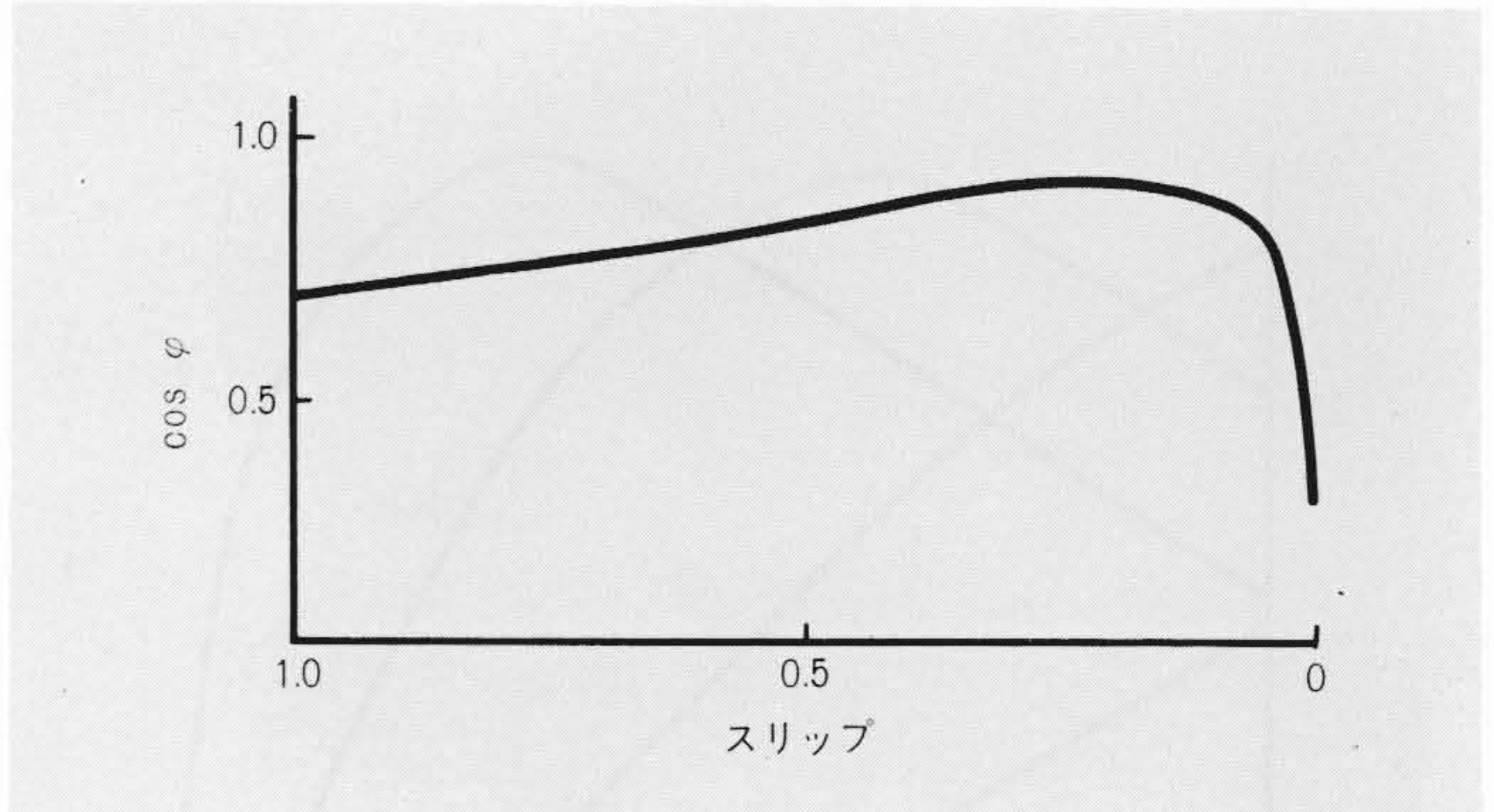


図7 スリップ-力率特性 11kW巻線モートルのスリップと力率の特性の一例を示し、最高0.9をフル点弧するためには、 $\cos \varphi = 0.9$ であるから、相電圧に対して25度の点弧角を必要とする。

求まるし、これを円線図法などを使って求めることも容易である。従って、今回サイリスタの点弧角と、電流、トルクとの関係を実験的に求め、これを三相交流駆動時のものと比較することにより一定の関係を明確にした。この関係は力率を助変数とし、すべりにはほとんど関係なく、あらゆる三相誘導電動機に対して成立した。

3.2 図表による設計法とその結果

3.1において、二相制御における電流、トルク関係の一般化を行なった。これを設計資料として、定量的関係を推定するフローを示すと図8となる。制御回路の構成は図5(a)に示すとおりである。一次側は二相位相角制御とし、二次側は抵抗を適当量挿入してハイスリップ化して起動完了時にはスイッチング制御により一度に短絡する方式とした。過負荷、ヒューズ断線時は電源のしゃ断器(ヒューズフリーブレーカ)をシャントトリップ機構により、開くものとし、閉ループ制御は行なわなかった。この結果に基づいて、さきの減電圧起動法によるトルクカーブを補正すると、図9に示すようになり、これを現在一般に使われている二次抵抗制御法に比べると、

- (1) 始動トルクは、抵抗法と同一に選べる。
- (2) 中間速度は、抵抗法と比較するとやや速い。
- (3) 始動時の加速トルクが平均していて衝撃が少ない。

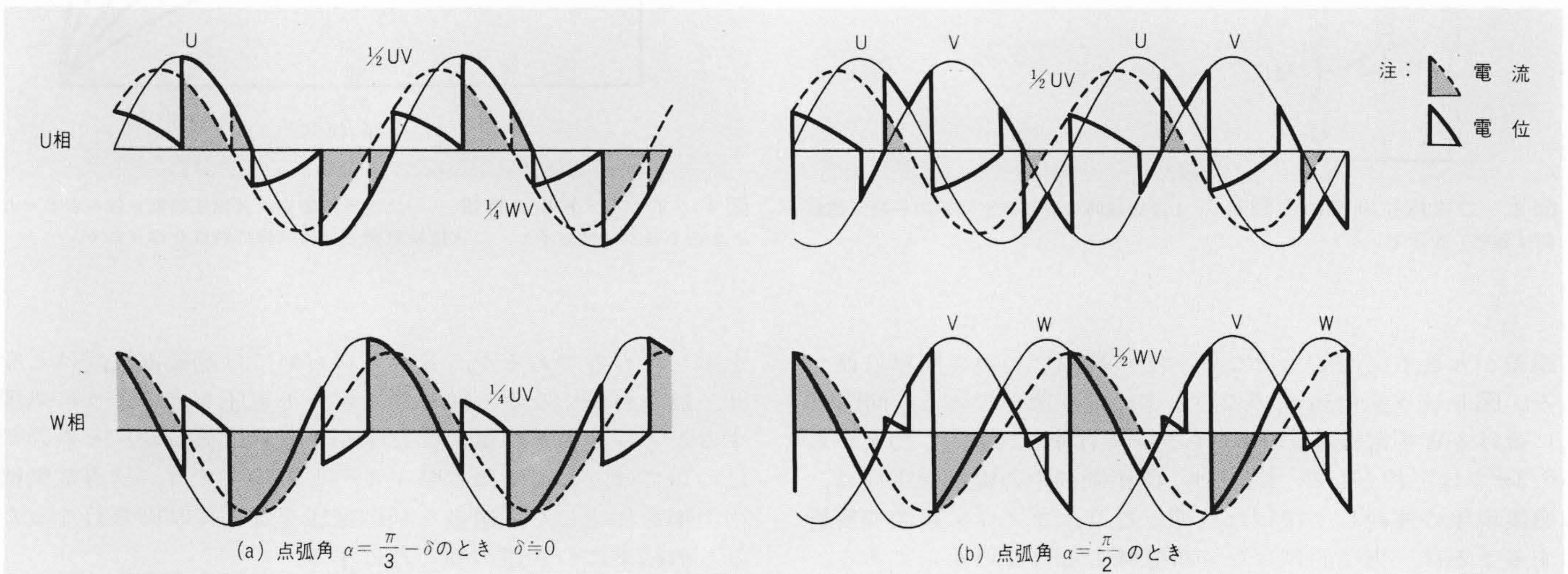


図6 位相制御波形 U相、W相を位相制御した場合のU相、W相の電位・電流波形を示し、点弧角により単相、及び三相の電流が混在していることが分かる。

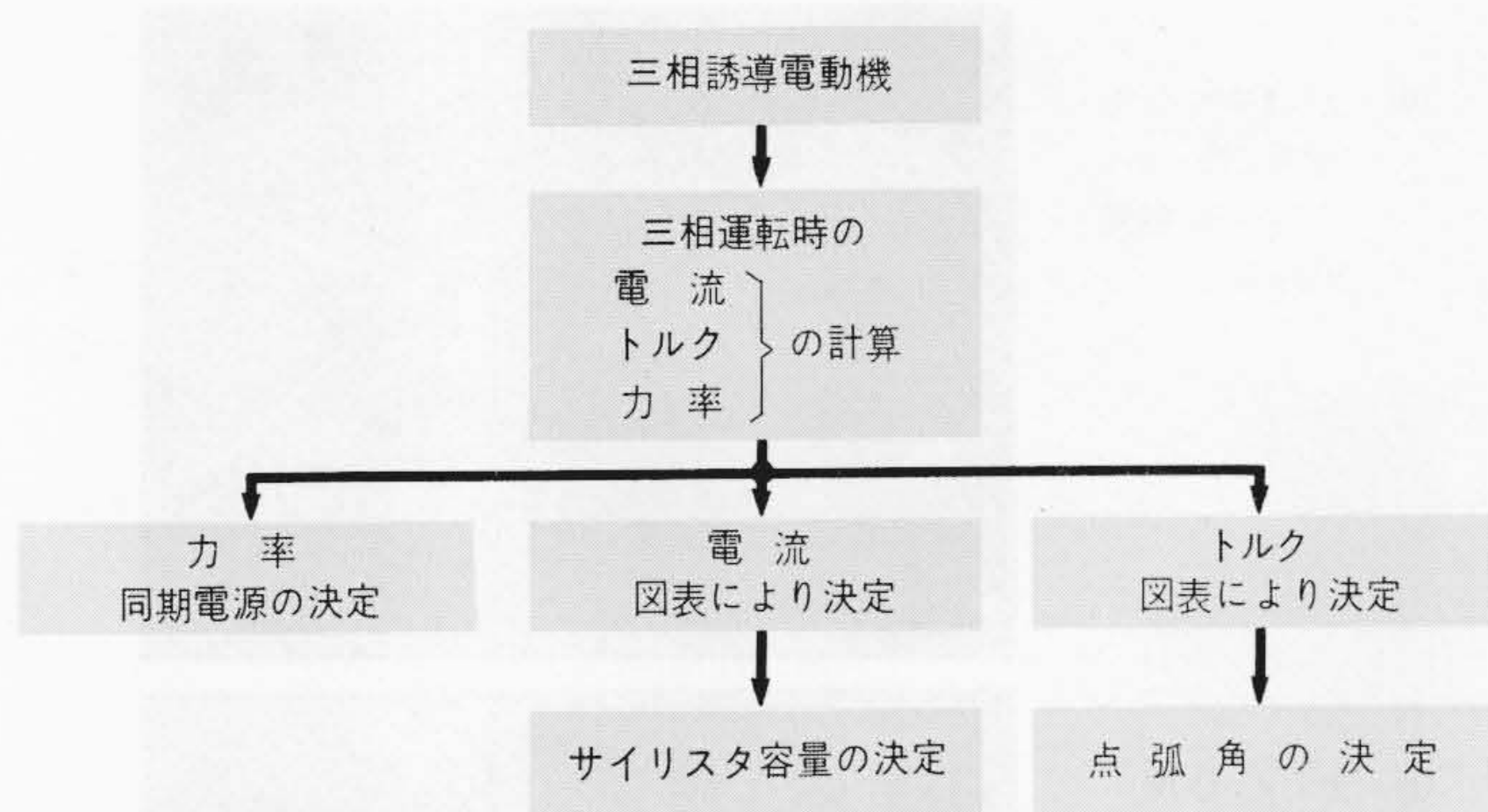


図 8 特性計算チャート 特性計算の手法を示し、電流、トルクの図表は設計資料として一般化したものを使う。

(4) 制御法によっては自由に中間速度が得られる(図10)。

などの長所をもつが、短所も全くないわけではない。

それは、非制御相の電流が、点弧角 $(\frac{7}{6}\pi - \varphi)/2 \sim \varphi$ の間で最大値で平衡三相時の20%増加することである。

しかし、制御相電流は50～75%であるので、モートル全体としての発熱量は少なく、モートルとしての温度上昇はほとんど問題とならない。問題は非制御相巻線がこの局部的温度上昇に対して耐え得るかどうかという点であるが、現在この点は実験などにより検討中である。

図11, 12に、制御波形(抵抗負荷)と電圧波形を、図13に製品の一例を示す。

また高調波を含んだ図6に示したような電圧を加えているので、振動によるうなり音が心配されるが、運転音は三相電源駆動時とそんなに変わらない。むしろ電磁接触器、制御器などとの音がないので静かである。

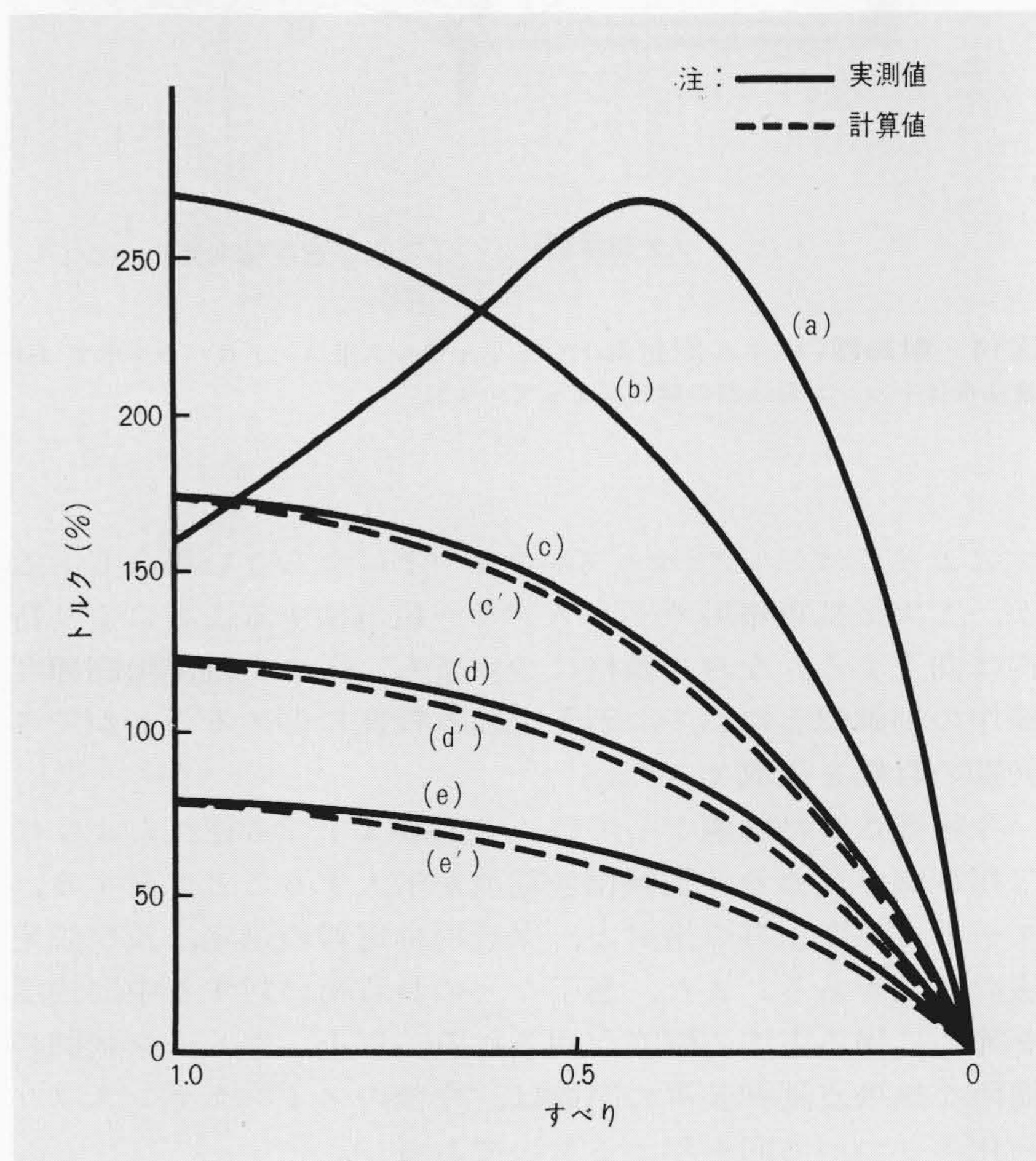


図9 スリップ・トルク特性 計算値と実測結果を示し、この値はあらゆるモートルに対してほぼ同一である。従って、誘導電動機の特Ⓐが分かれば、位相制御特性は正確につかめる。

4 制御器(コントローラ)

クレーンにおいてその操作性を決定するものは、制御器、制御盤、制動機である。なかでも制御器は、常時運転者と直接接し運転者の意志を各機器に伝える重要な役目をもっている。この無接点化に当たっては二通りの方式を標準化した。

4.1 ステップレス方式

この方式は、コントローラの回転角度を速度指令とし、無段階に中間速度が得られるようにしたもので、自動車のアクセル操作と同様である。図14はコントローラの外観を示すものであるが、指令源としてセルシン発振器を組み込んだものとし、ステップレスではあるが、各ノッチを設け一般のコントローラと同じ感覚でも操作可能のように考慮した。

図10に制御可能範囲とノッチ感覚による特性について示す。

4.2 ステップ方式

従来のコントローラカム接点を無接点化したものであるが、無接点化に当たっては、クレーンのガータ内配線の実体を考慮し、外部の電界、磁界にも誤操作のない低インピーダンスの小形の発振形近接スイッチを組み込んで、この指令をバイナリーで取り出し、制御盤内で速度指令のアナログ指令に変換するようにした。

なお、従来のコントローラ部だけを無接点化し、制御盤は有接点のままというときには、専用の補助リレー盤の増設により、応用範囲の自由度を増せるようにしている。

4.3 無接点コントローラの特長

主な特長は次のとおりである。

- (1) 操作力が軽く疲労が少ない。
- (2) メインテナンスが全く不要である。
- (3) 安全性向上のためのスプリング リターン方式も簡単に採用可能である。

(2) メインテナンスが全く不要である。

(3) 安全性向上のためのスプリング リターン方式も簡単に採用可能である。

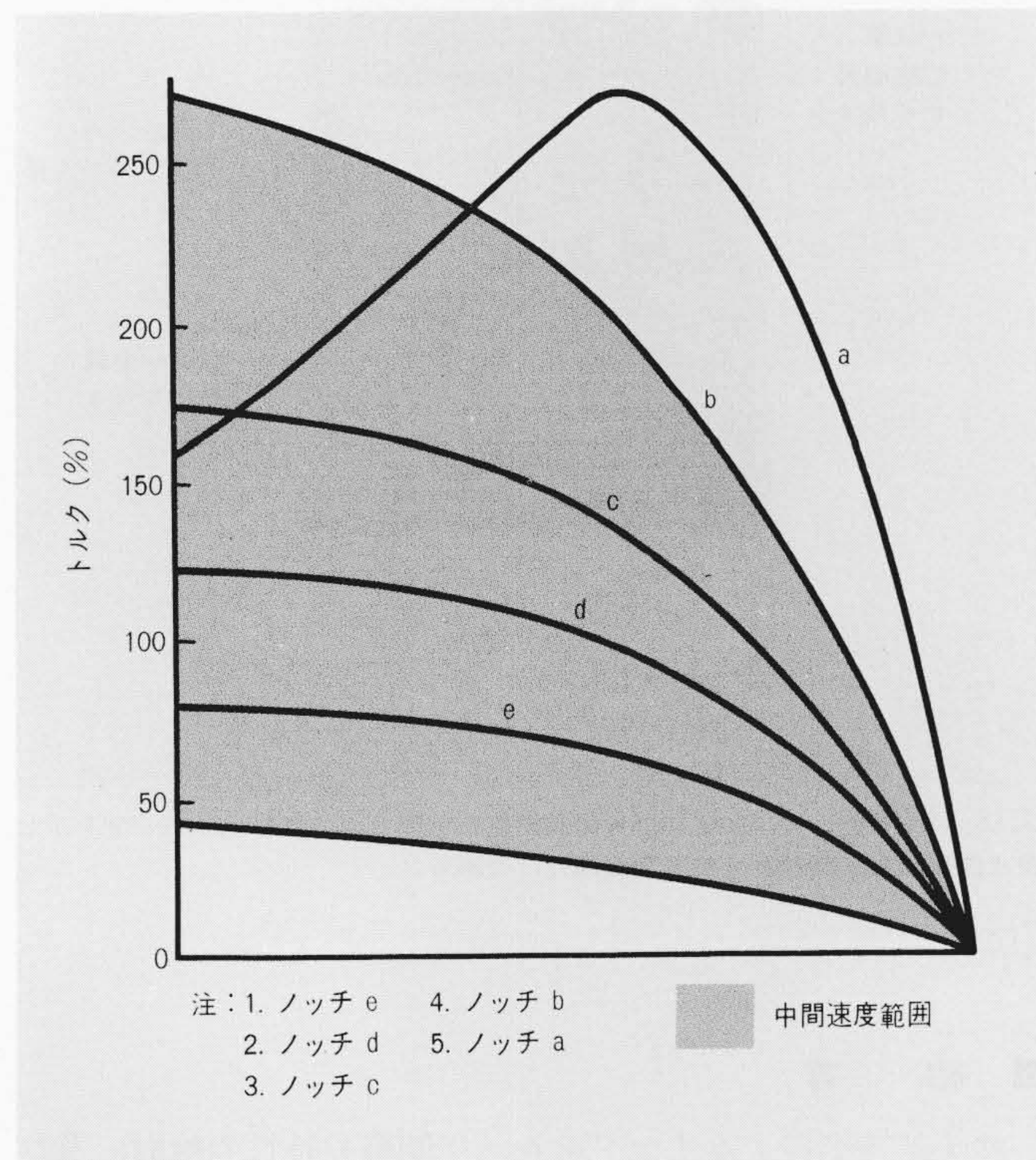


図10 ノッチレス制御の速度特性 45%の始動トルクより最高トルクまでを連続に出すことが可能であり、途中ノッチでも自由に制御できる。a～eはこれまでのノッチ付運転者用のノッチ感覚を与えたポイントである。

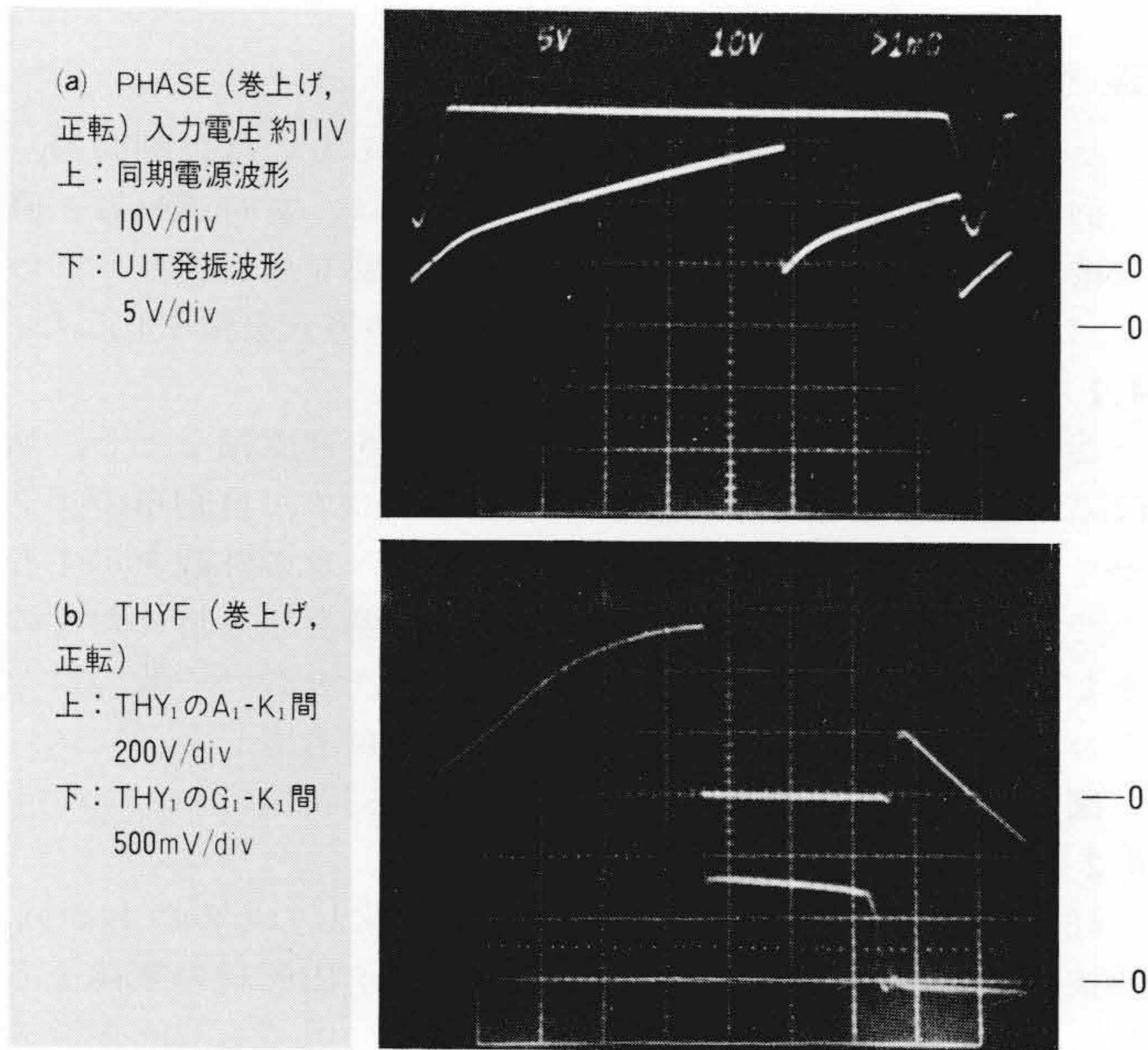


図11 制御波形 周期電源を各相のA-K, G-K間波形を示す。

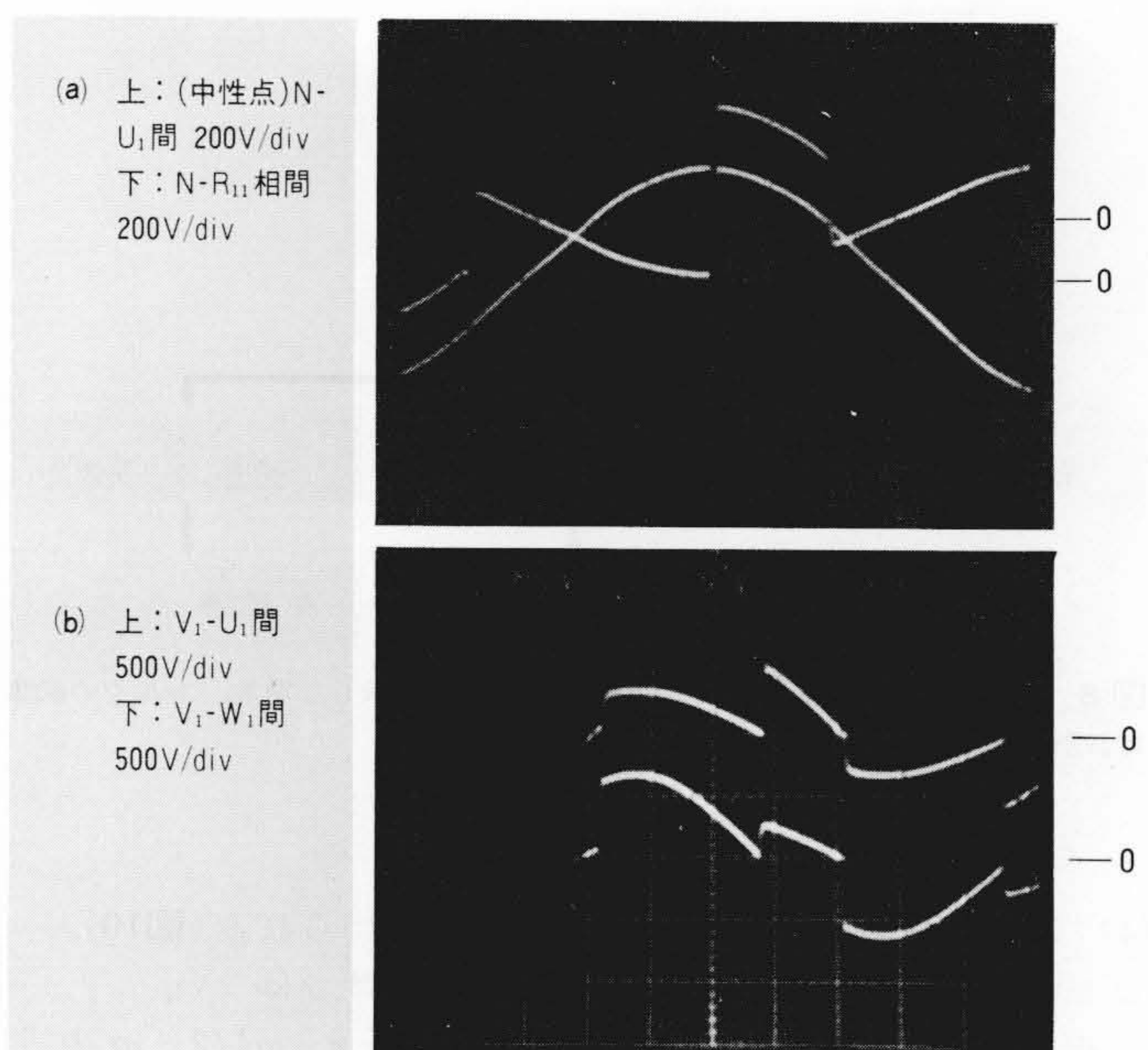


図12 電圧波形 各相の相電圧と線間電圧を示し、図6の解析を裏付ける波形となっている。

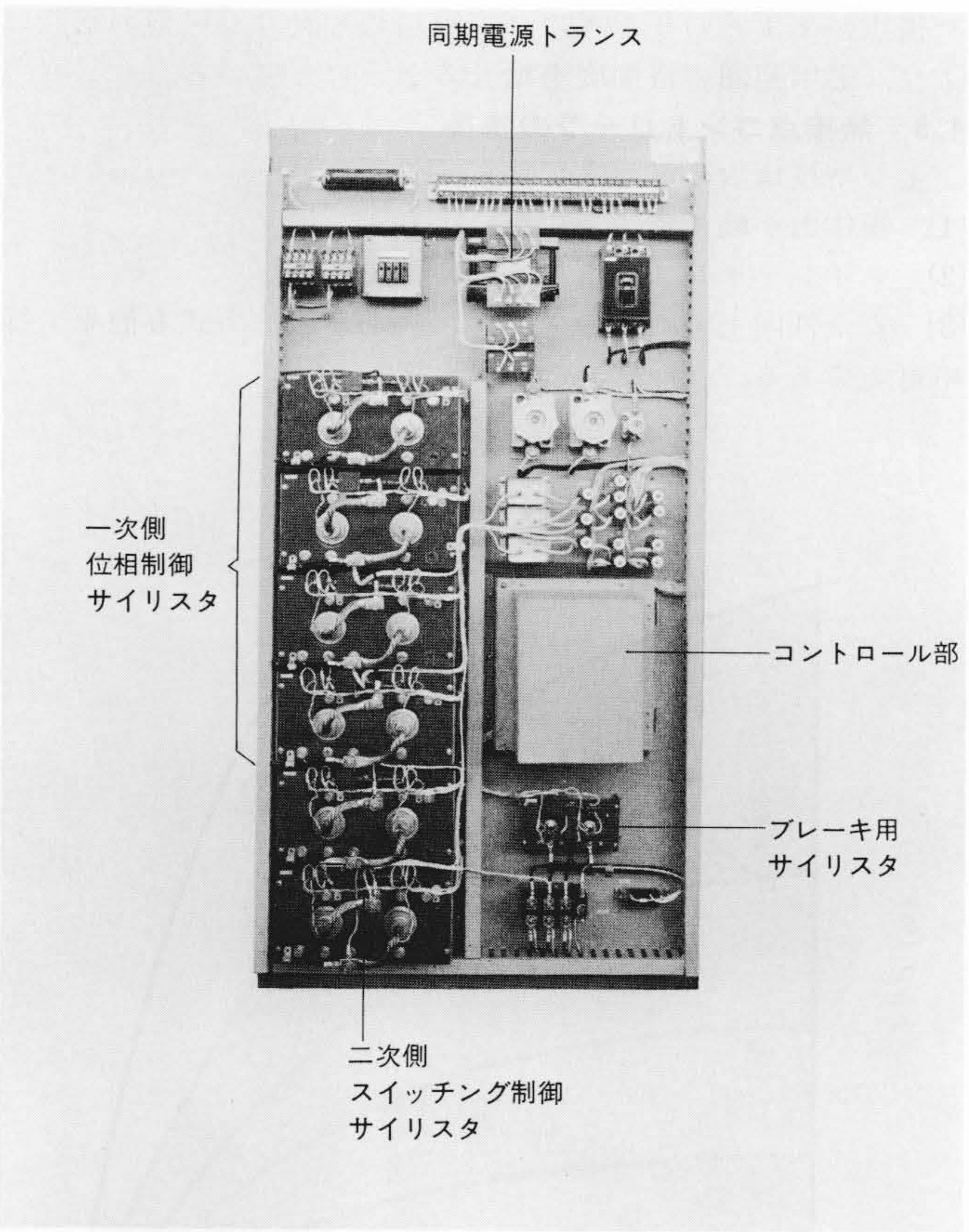


図13 制御盤 400V 30kW用制御盤を示すもので裸自立形の一例を示し、接点部は、しゃ断器と故障表示回路だけである。

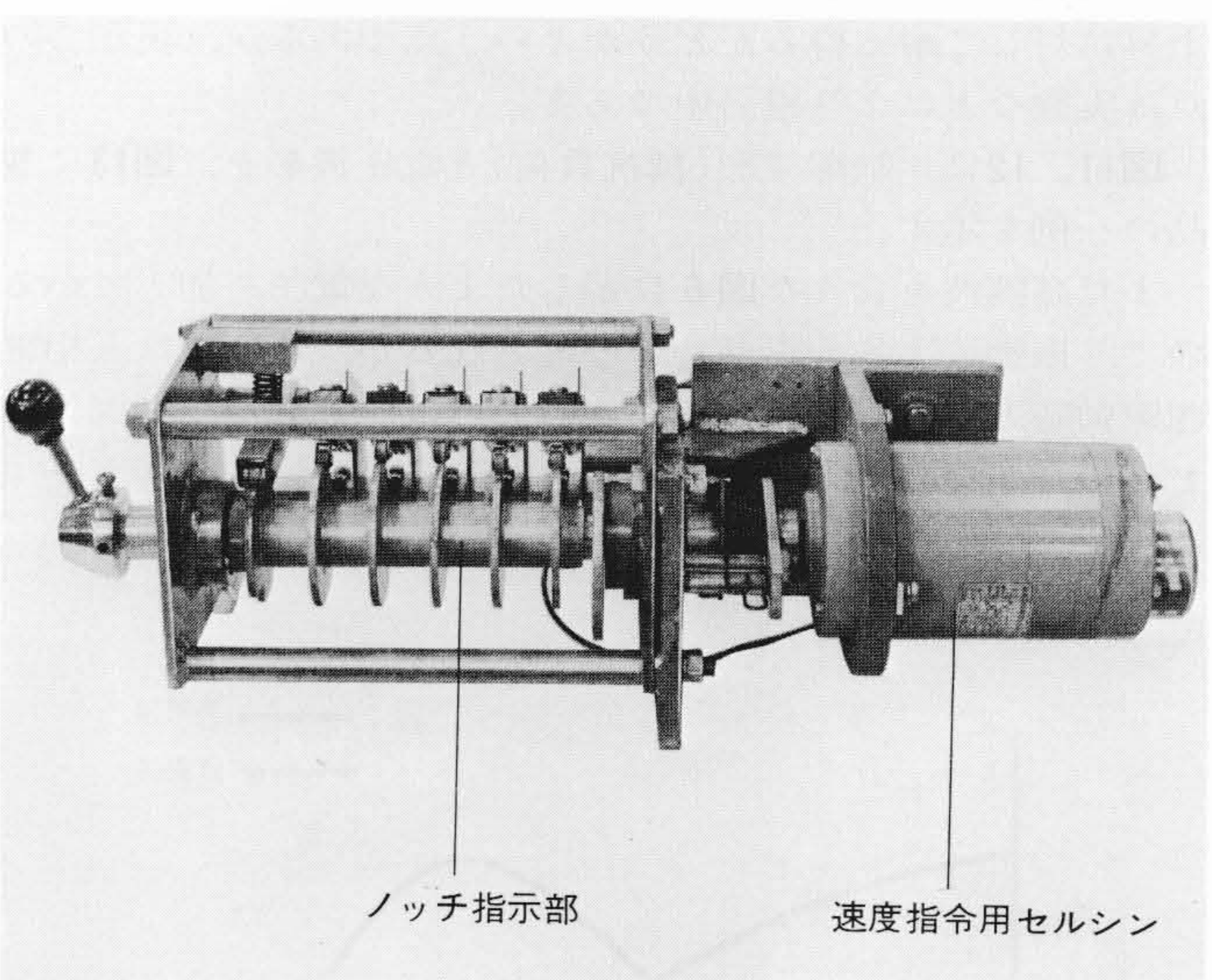


図14 制御器(パネル取付形) ノッチレス用コントローラを示す(速度指令はセルシン発振器の電圧によっている)。

5 結 言

サイリスタによるオープンループ制御の特性の検討、及び電流容量の決定とその結果について述べたが、これにより、一次電圧制御による抵抗起動法と同様の特性を得ることは可能となった。この論文では触れなかったが、モートルの特

性によってはトルクカーブがフラットにならない場合もあるが、二次抵抗短絡用サイリスタを一組追加することにより特性は向上する。なお、価格についても、従来の直流用高頻度操作の制御盤と比べて、若干上回る程度に抑えることができ初期の目標を達成できた。

今後残された課題としては、この論文でも述べたように二相制御のための非制御相の電流が増大することに対する、モートル温度上昇の検討と、保護用継電器の選定、及び設定法の確立がある。また、巻下などの負負荷に対する中間速度を簡便に得る方法の確立が残される。以上、クレーン制御の簡便な無接点制御装置の完成は、今後のメンテナンスフリー化の一つの方向を与えるものである。

参考文献

- (1) 電気学会通信教育会：誘導機 交流整流子機 p.32 (昭41-3財団法人電気学会)