

サイリスタモータによるリール制御

Reel Control by Thyristor Motor Drives

サイリスタモータは、今まで主に可変速制御用に実用化され、期待どおりの優れた制御性、信頼性、保守性などを発揮している。サイリスタモータがもつこれらの特長に対する評価から、定出力制御への適用検討が最近積極的に行なわれ、この技術開発が要望されていた。日立製作所は、サイリスタモータの技術開発に早くから着手し、今までに多数の可変速制御システムを完成してきたが、今般更に鉄鋼業のリール駆動用定出力制御システムを国内外で初めて実用化した。

この論文では、サイリスタモータをリール駆動用定出力制御に適用するに当たり、トルクリプルが材料に及ぼす影響の解析、及びトルクリプル低減対策を示し、次に応用例として冷間プロセスライン用リール制御方式について述べる。

堀北隆司* Horikita Takashi
川口忠雄** Kawaguchi Tadao
高橋潤一*** Takahashi Jun'ichi
長瀬 博**** Nagase Hiroshi
斉藤啓自***** Saito Keiji

1 緒 言

直流電動機と交流電動機の利点を合わせもつサイリスタモータは、現在各種の産業分野に適用され、制御性、信頼性、保守性などに関し、期待どおりの効果を発揮している。サイリスタモータ制御システムは、現在主として界磁制御を必要としない定トルク制御分野での可変速制御用に実用化されている。サイリスタモータ制御システムのもつ優れた制御性のため、界磁制御を必要とする定出力制御分野へのサイリスタモータの適用検討が最近積極的に行なわれている^{1),2)}。

各種のリール駆動用定出力制御分野には、現在直流電動機が独占的に使用されており、この分野へのサイリスタモータ制御システムの適用に当たっては、トルクリプルの製品に及ぼす影響の解明や制御方式の確立など、解決すべき技術的課題が多い。

以下、ここでは最も高度の制御特性が要求される鉄鋼業のリール駆動用サイリスタモータの定出力制御システムで、圧延に及ぼすトルクリプルの影響とその解析法、トルクリプルの低減対策、冷間プロセスライン用リール制御システムの構成などについて述べる。

2 リール駆動用へのサイリスタモータの適用

サイリスタモータの駆動方式には種々の方式があるが、一般に最高速度が1,000rpm程度となるリール用としては、高速回転に適した電流形が採用される場合が多い^{3),4)}。

ところで、リール駆動用電動機は材料を一定張力で巻き取ったり、巻き戻したりする必要があるため、この間電動機出力を一定に制御する必要がある。この様子を図1に示す。定出力制御を行なう範囲はコイル径比によって定まり、およそ1:3~5程度となる。従来の直流電動機では界磁制御により定出力制御を行なっていたが、サイリスタモータでは、界磁制御だけで定出力制御を行なうと、電動機重量、 GD^2 (回転体の慣性モーメント)が直流電動機と比較して大きくなる。しかし、界磁制御と制御進み角(β)制御を併用すれば電動機重量、 GD^2 などを最適にすることが可能になる。

サイリスタモータをリール駆動用として採用する場合、リール用であるがために検討を要する点は、

(1) 電動機寸法を最適にし、定出力制御を行なうための制御方式とその回路構成

(2) 電動機のトルクリプルが材料に及ぼす影響である。(1)については5章で述べることにし、ここでは(2)について以下詳細に述べる。

電流形サイリスタモータは方形波電流を流すため、トルクリプルが発生する。発生トルクは電流と磁束鎖交数(すなわち、誘起電圧)の積に比例するため、各相の(誘起電圧) $\times$ (電流)の総和としてトルク波形は求められる。図2(a)でA~B区間での発生トルク波形を求めると、同図(b)に示すようになる。すなわち、電流波形が方形波であるので多くの高調波成分が存在し、その結果としてトルクリプルが発生するといえる。また、図2(b)は重なり角 u が零の場合を示すが、実際には重なりを生ずるため同図(c)のような波形となる。トルクリプルの大きさは同図から分かるように、制御進み角 β と重なり角 u の関係から定まり、(1)式のように表わすことができる。また、その周波数は電動機の電氣的周波数の6倍となる。

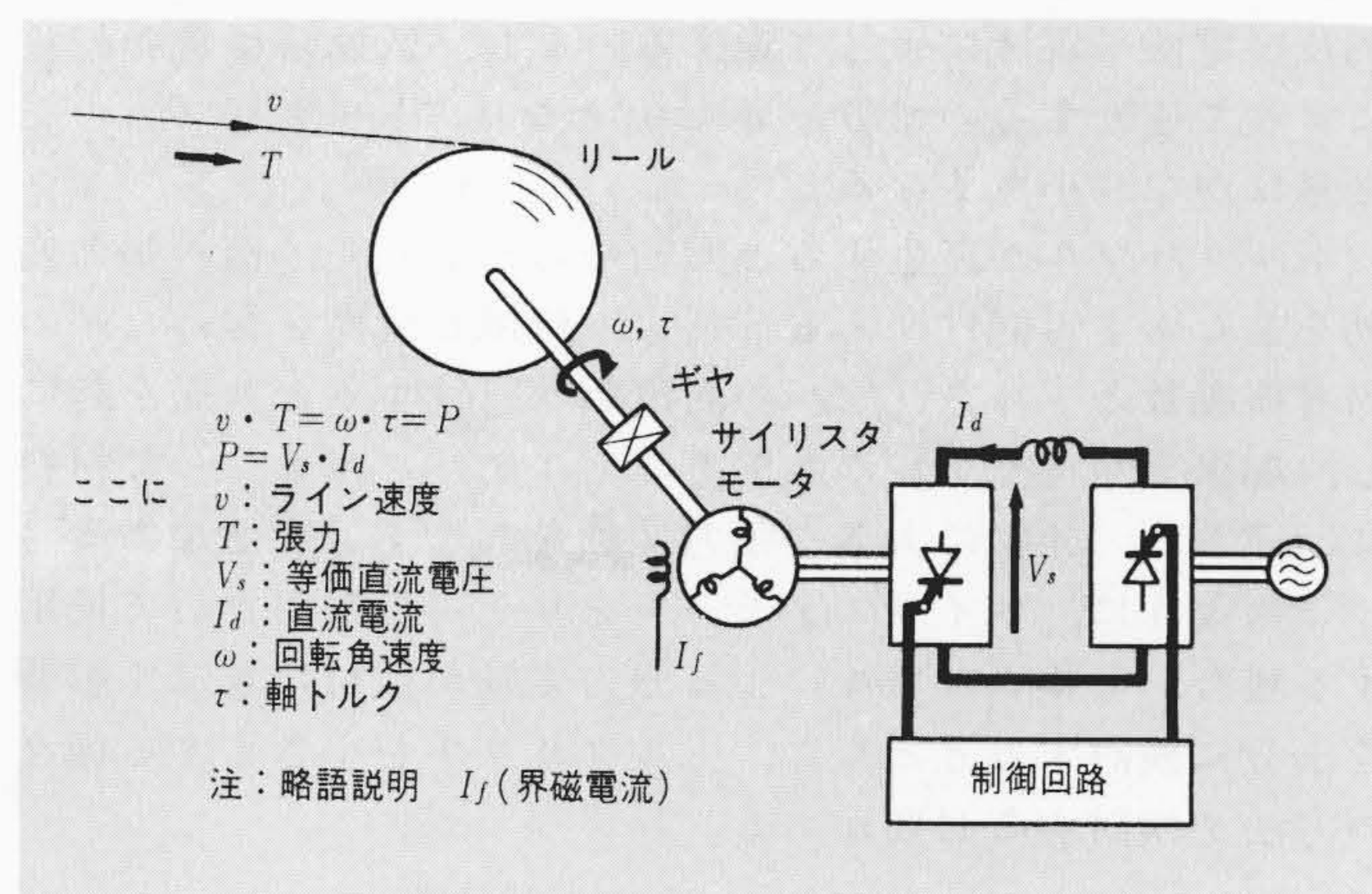


図1 定張力制御の原理説明 一定ライン速度のもとで張力を一定にするには、電動機出力($V_s \times I_d$)を一定に制御する必要がある。

* 新日本製鐵株式会社広畑製鐵所設備部設備技術室電気計装技術課

** 新日本製鐵株式会社設備技術本部電気計装技術部

*** 日立製作所大みか工場

**** 日立製作所日立研究所

***** 日立製作所日立工場

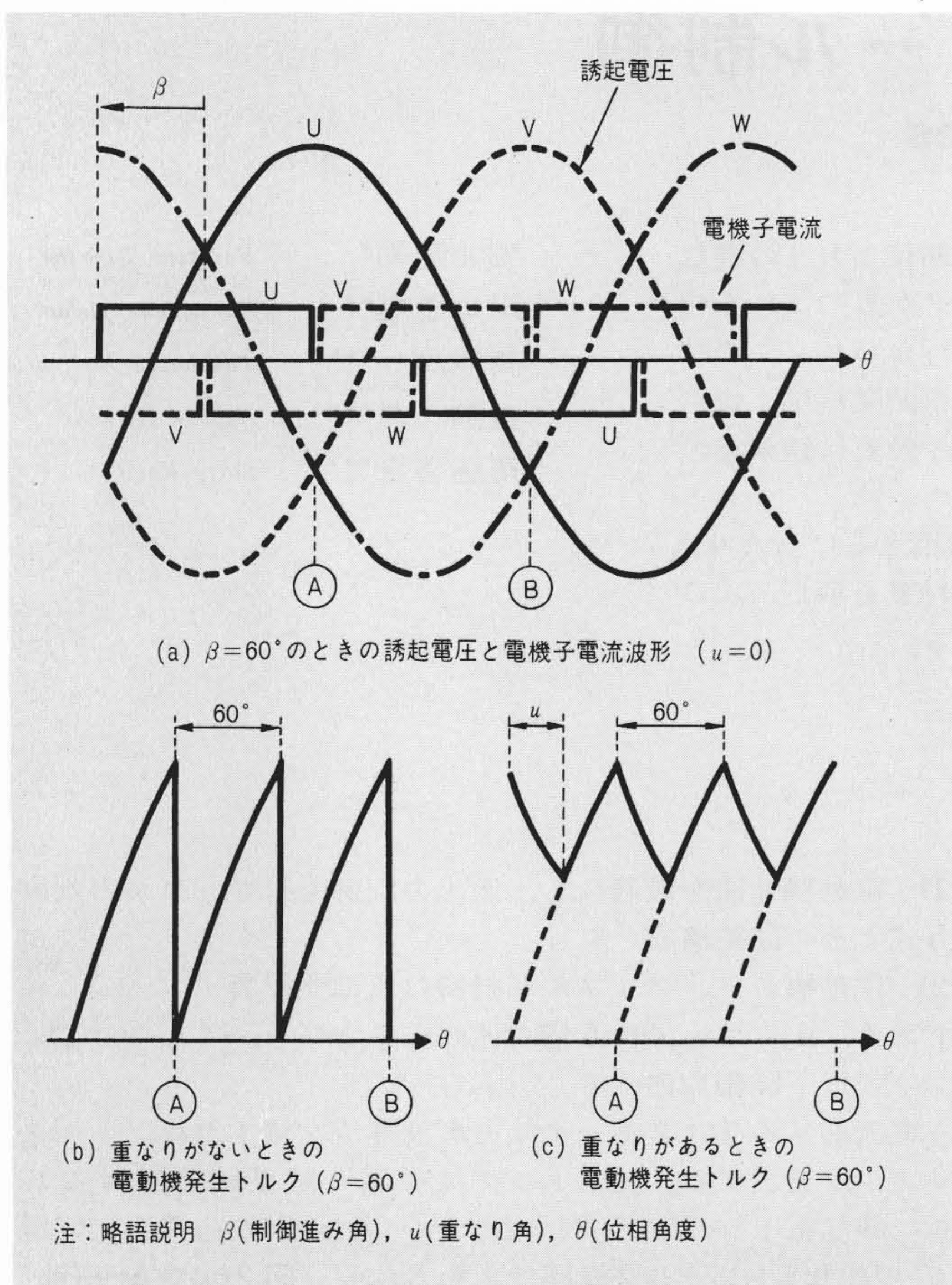


図2 電動機発生トルクの説明図 電機子電流が方形波であるため、トルクリプルが発生する。

$$\epsilon = \left. \begin{aligned} & \frac{\cos(\beta-30^\circ) - \cos(\beta+30^\circ-u)}{\cos(\beta-30^\circ) + \cos(\beta+30^\circ-u)} \quad \beta \geq 30^\circ \\ & \frac{1 - \cos(\beta+30^\circ-u)}{1 + \cos(\beta+30^\circ-u)} \quad 30^\circ > \beta \geq 0^\circ \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

$$\text{ここで } \epsilon = \frac{(\text{トルクの最大値}) - (\text{最小値})}{(\text{トルクの最大値}) + (\text{最小値})}$$

β 及び u は電動機の各種インピーダンスと設定制御進み角 β_0 及び電機子電流によって定まる。なお、低速時は電源転流によって運転するので $\beta \doteq u \doteq 0^\circ$ となり、トルクリプルの発生量はかなり小さくなる。

トルクリプルが発生すると回転むらを生じて、板の張力変動をもたらす可能性がある。特に、機械と負荷を含めた系の固有振動数とトルクリプルの周波数が一致すると共振を起こし、加振トルクリプルの数倍ものトルクリプルとなって材料に伝達され、非常に大きな張力変動を起こす可能性がある。

このように、サイリスタモータをリール駆動用として使用する場合、トルクリプルによる張力変動が板材に及ぼす影響を十分に検討するとともに、トルクリプルを小さくする種々の方法を検討する必要がある。

3 トルクリプルが圧延に及ぼす影響

3.1 検討方法

圧延ライン、特に高張力ラインへのサイリスタモータの適用という観点より、サイリスタモータのトルクリプルが圧延材の仕上り状態にどの程度の影響を及ぼすかを明らかにするため、可逆式冷間圧延機を例にとり、シミュレーションによ

る検討と実圧延ラインでの実験による検証とを行なった。

図3に、検討の対象とした可逆冷間圧延システムの構成を示す。圧延機駆動用電動機は、いずれも直流電動機であり、サイリスタモータと等価のトルクリプルを発生させるために、主回路電流にリプル分を重畳させる方法を用いた。

すなわち、電流指令値に次のリプル成分を加算する。

$$\Delta I_P = \Delta I_{P0} \sin(2\pi f r \cdot t) \dots\dots\dots(2)$$

ここで $f r$: サイリスタモータのリプル周波数 $= \frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{P}{2} \cdot 6$

ω : 電動機平均角速度

P : サイリスタモータの極数

投入リプル量は、下記条件で行なった。

- (1) 発生トルクリプルは、 β 制御なし、すなわち $\beta_0=60^\circ$ で発生する量を印加する。
- (2) 圧延材への直接影響要因は、電動機の角速度リプル $\Delta\omega/\omega$ と考えられる。したがって、直流電動機の電流リプルによる速度変動 $\Delta\omega/\omega$ が、サイリスタモータでのそれに等しくなるよう電流リプルを印加する。
- (3) 電動機と機械間は剛体で結合され、圧延材により結合される機械間の影響は直流電動機と同程度と考え、電動機の GD^2 の違いだけを考慮する。

3.2 シミュレーションによる検討

トルクリプルによる圧延材への影響を考えた場合、単に、機械ねじり振動系の解析だけでなく、圧延現象を含めた総合的な解析を行なうことが大切である。

図4にシミュレーションに使用した総合モデルの構成を示す。モデルは、各駆動装置を電気制御系と機械系とに分割し、更に、ミル両側のストリップの弾性挙動を張力関係式として解析し、主ロールでの圧延現象モデルと組み合わせている。

図5、6にシミュレーションの結果を示す。

図5はテンションリールにリプルを印加した場合のリプル周波数 $f r$ と、リプル振幅 ΔI_{P0} に対する板厚変動を示す。この結果によれば、3 Hz 付近に大きなピークが発生すること、ほぼ振幅に比例することが言える。

図6は、主ロールにリプルを印加した場合の板厚変動のリプル周波数依存性を示すものである。この場合、ピークは生

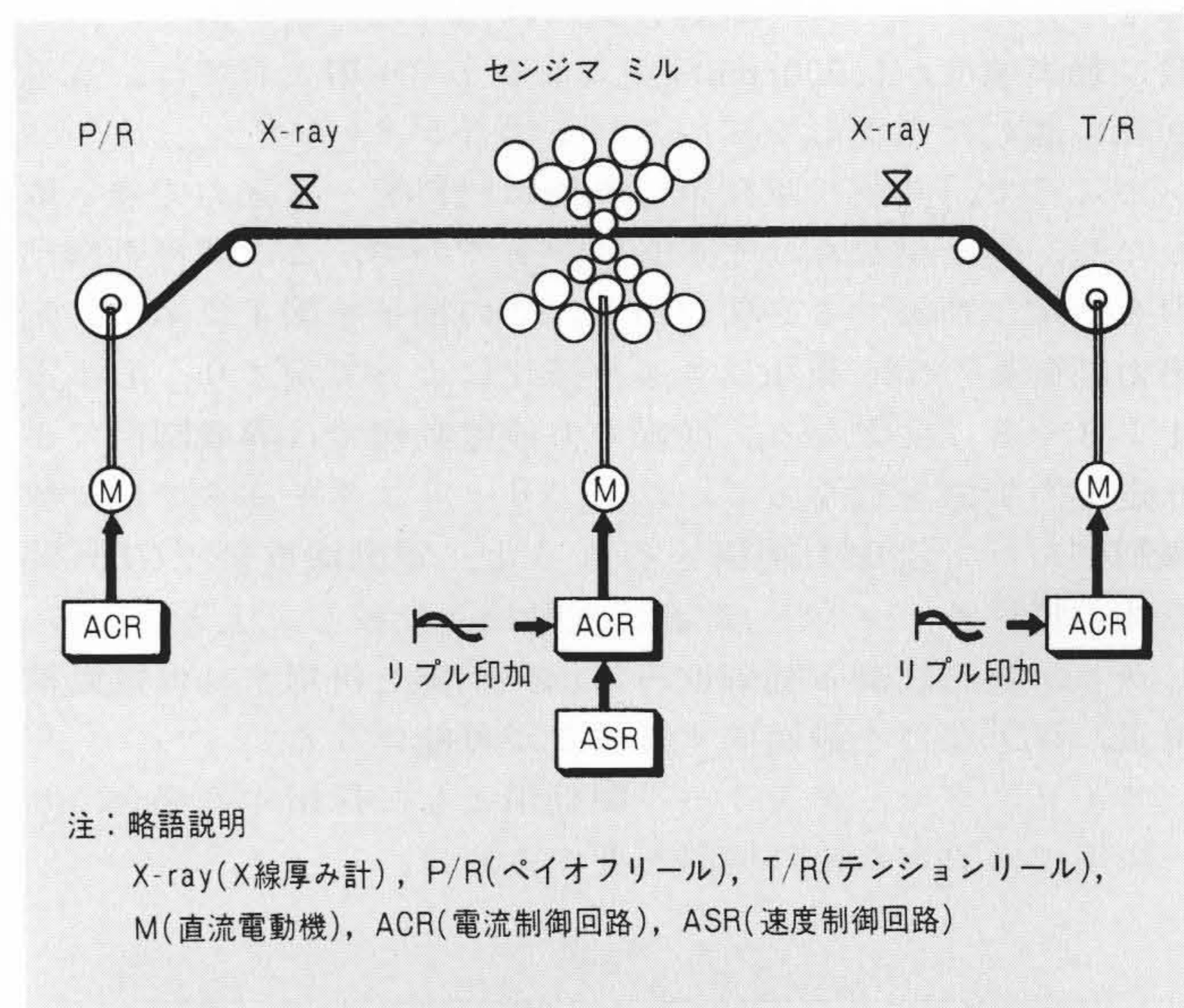


図3 可逆冷間圧延システム 解析及び実験の対象となった可逆冷間圧延システムの構成を示す。

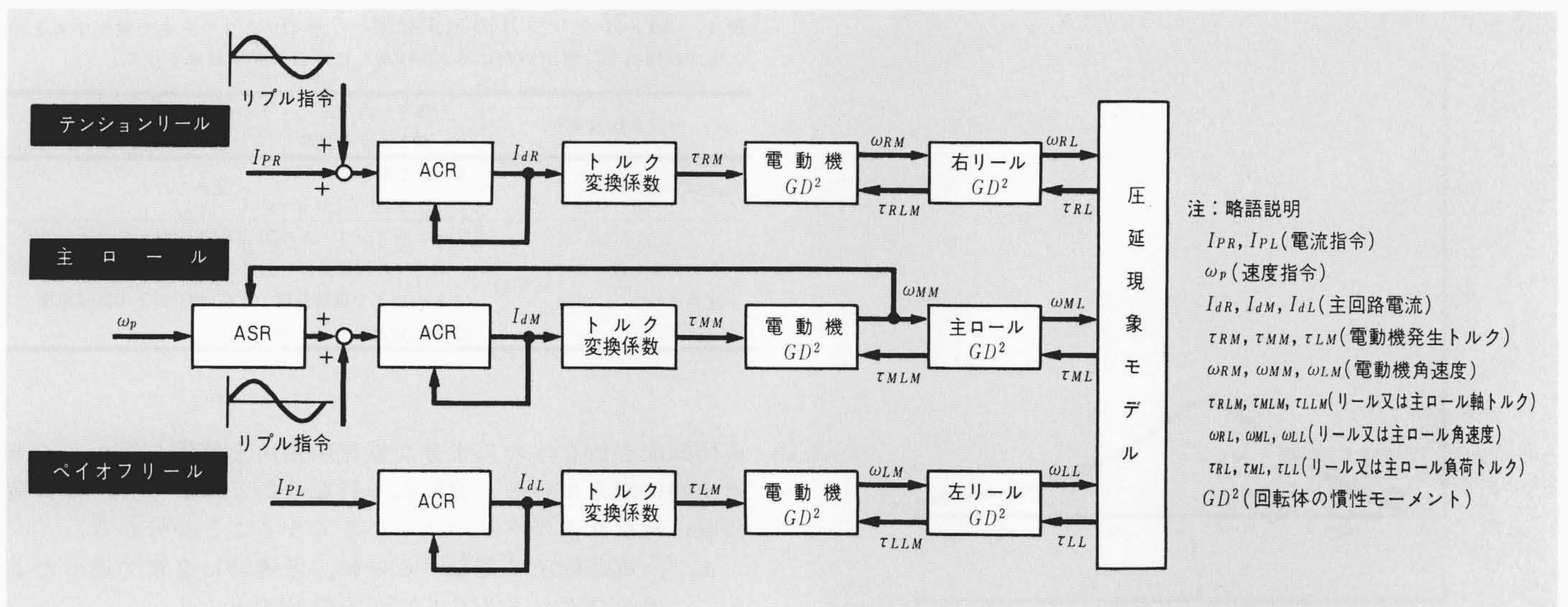


図4 センジマミルのシミュレーションブロック図 各駆動装置を電気系、機械系に分割するとともに、圧延現象まで含めた総合モデルとなっている。

ずるが、図5に比べかなり小さいことが分かる。

3.3 実験による検討

図3の実圧延ライン、センジマミルに試験的にリプルを印加させ、圧延材の影響を調査した。

表1に、主ロールとテンションリールにリプルを加えた場合の軸トルクの変化状況を示す。この結果から、テンションリールに印加したリプルが主ロール軸まで及んでいることが分かる。この傾向は、特に低周波域で著しい。

図7は、テンションリールにリプルを印加した場合の板厚変動の測定結果を示す。リプル周波数6 Hz以下で板厚変動が急増することが分かる。これは、軸トルクリプルの急増、すなわち張力の大幅変動と対応している。同図中の破線は図5のシミュレーション結果であり、実験値とよく一致している。

3.4 結果の検討

図7の結果から、板厚変動はあるリプル周波数で最大となるが、この現象は一種の共振現象として理解できる。

この共振現象は、リール電動機と負荷系(圧延材を介した張力変動による負荷変動も含めた系)で作られる閉ループが原因となって生じている。

この共振周波数は、通常低周波数領域にあると考えられるが、この周波数領域でのリプルが問題となる用途では、低周波リプルを発生する運転領域に関しての検討を行ない、例えば次に述べる対策をとることにより、サイリスタモータのリールへの適用は可能となる。

4 トクリプルの低減対策

一般にトルクリプルの影響を避けるには次の方法がある。

- (1) 電動機の定格周波数の選定
- (2) 高弾性継手の採用
- (3) 電動機自身が発生するトルクリプルの抑制

(1)は、3章で述べたように、トルクリプルは共振周波数で問題になるので、定常的な運転範囲を共振周波数よりも高く

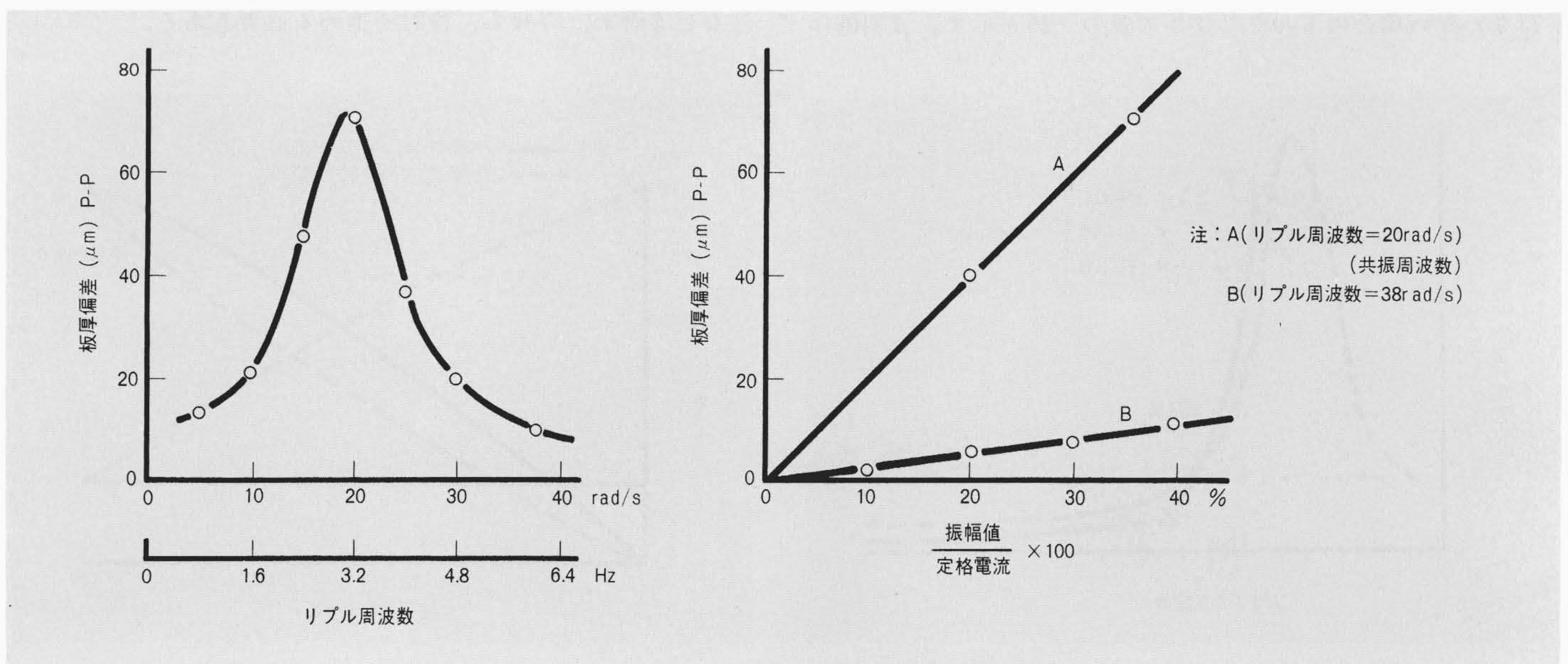


図5 T/R電流リプルによる板厚変動 テンションリールにリプルを加えた場合のシミュレーション結果を示す。

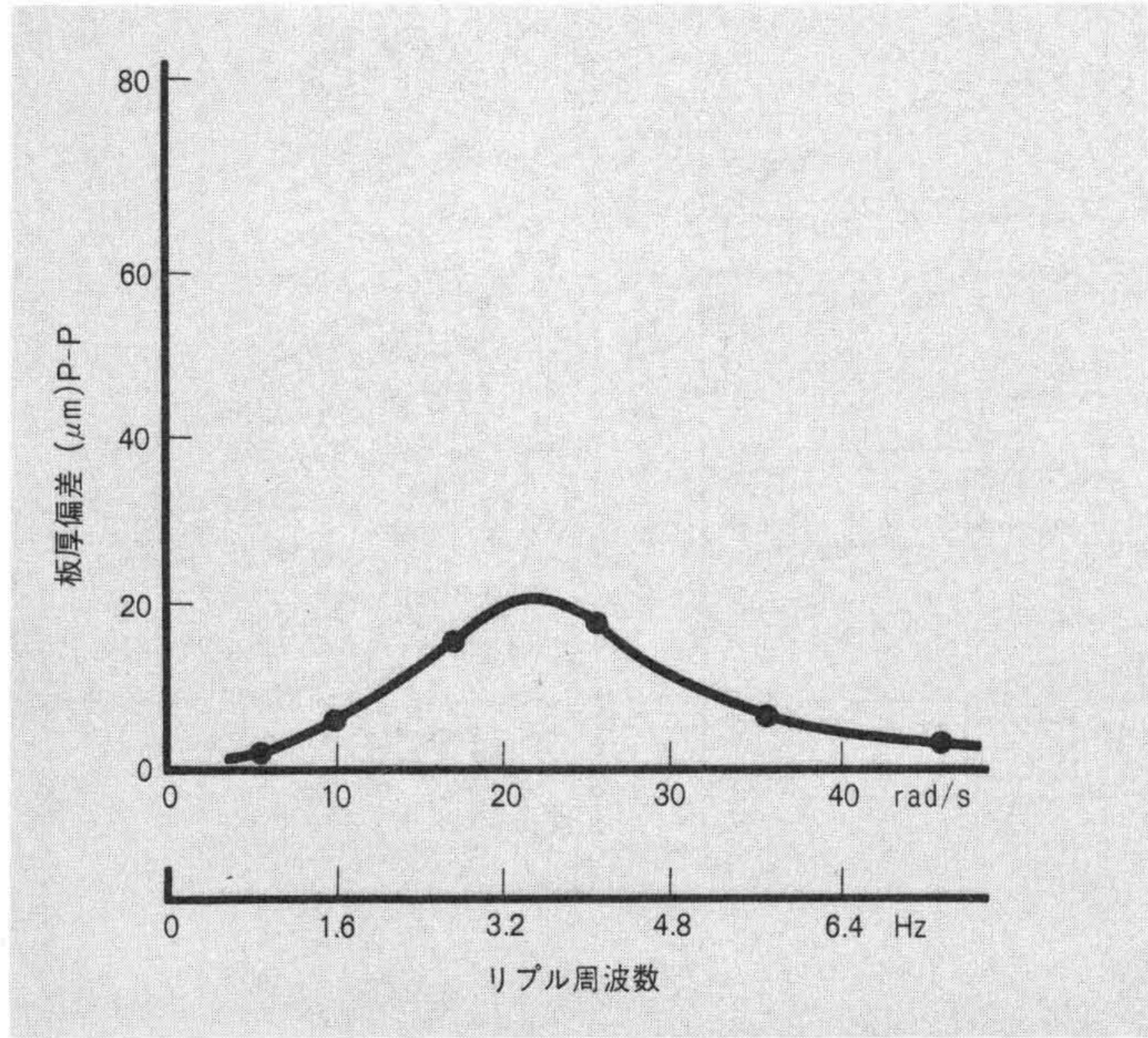


図6 主ロール電流リップルによる板厚変動 主ロールにリップルを加えた場合のシミュレーション結果を示す。

選定し、共振周波数を避けて運転する方法である。(2)は、高弾性継手によりトルクリプルを吸収し、駆動軸や材料にトルクリプルを伝えないようにする方法である。(3)の方法には、後述する制御進み角(β)制御や電流変調制御、あるいは比較的大容量電動機に採用される電機子を多相化する方法がある。

これらのうち、どの方法を採用するかは、リールの構成、機械仕様、共振周波数と共振発生箇所などを考慮して選定し、その効果を評価する必要がある。以下では(3)の方法のうち、通常採用される三相電動機に適用できる制御進み角(β)制御と電流変調制御について述べる。

4.1 制御進み角(β)制御

β 制御は電動機端子電圧に対する電機子電流の位相を制御する方法で、 β を最適に設定することによってトルクリプルが低減される。

図8に負荷転流を行なう高速域で、 β 制御を行なう場合と行なわない場合のトルクリプルの差の一例を示す。 β 制御は

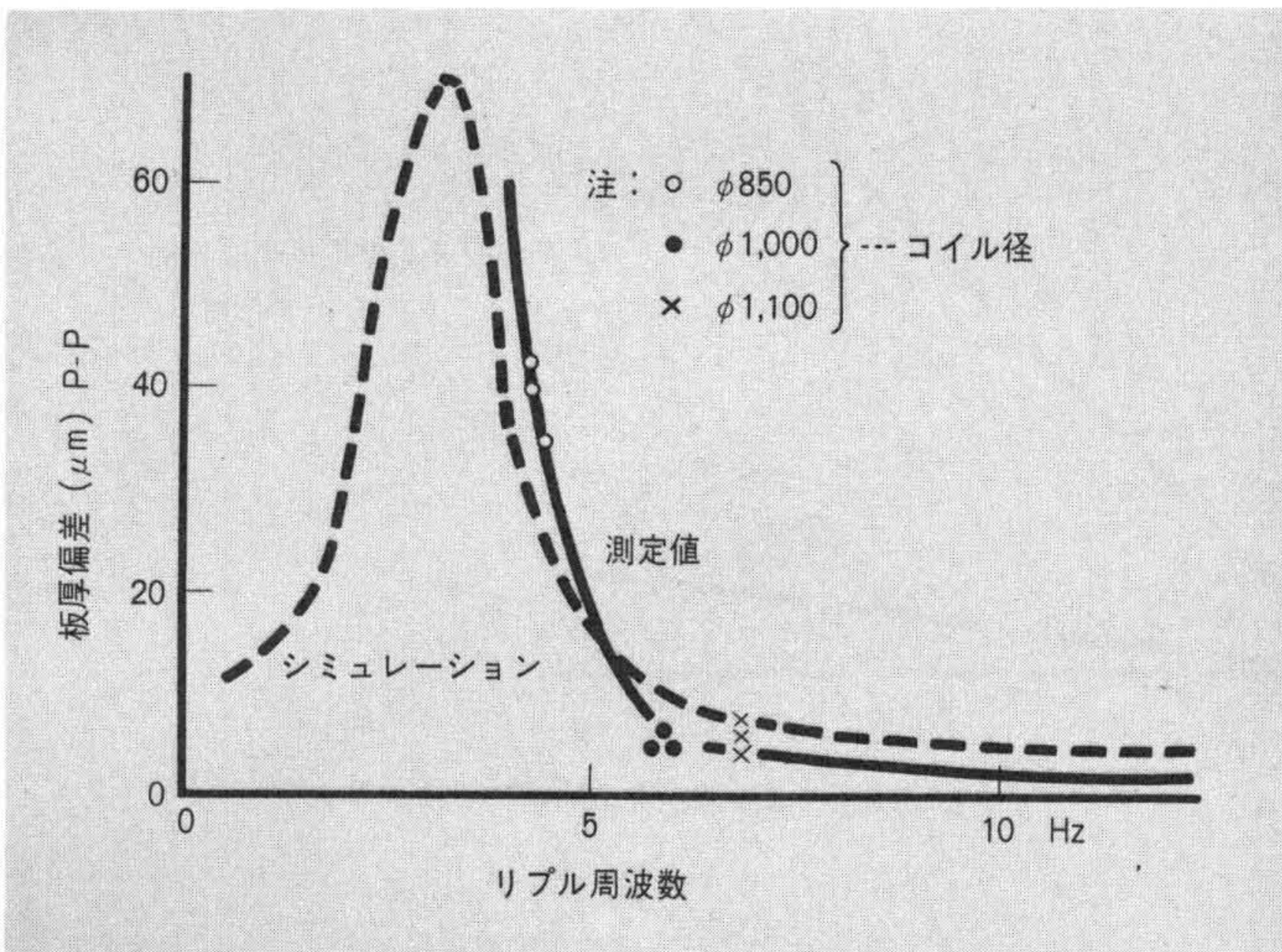


図7 板厚変動測定結果 テンションリールにリップルを加えた場合の実験結果を示すもので、シミュレーションとよく一致している。

表1 軸トルクリプルの測定結果 サイリスタモータで発生するトルクリプル相当を、電流指令にリップル印加した場合の実験結果を示す。

リップル印加場所	主ロール 軸トルクリプル	テンションリールの 軸トルクリプル
1.主ロールへ印加	軸トルクのリプル小 ただし、35Hz付近にピーク	認められず。
2.テンションリール 主ロール } へ印加	(1)テンションリールの印 加リップル周波数に一致 (2)6 Hz以下で振幅急増 (3)35Hz付近に小ピーク	(1)テンションリールの印 加リップル周波数に一致 (2)6 Hz以下で振幅急増

負荷転流を行なうのに十分な転流余裕角を確保しながら β を連続的に変えている。 β 制御を行なうことによって、全負荷領域にわたりトルクリプルが小さくなることが分かる。

また、電源転流で運転する始動、低速時は2章で述べたように、 $\beta \div 0$ としトルクリプルを低減する。

4.2 電流変調制御

トルクリプルは、変換器主回路に流れる直流電流(あるいは等価的直流電流)が一定のために発生すると考えられるので、逆にトルク一定となるように直流電流を制御すればトルクリプルは発生しない。この方法は、電流制御回路の応答の関係から15~20Hzまでの低周波数領域でのトルクリプル抑制に効果がある。

具体的には電動機の発生するトルクの瞬時値を演算、又は検出により知り、これが一定になるように電流を制御する方法や、トルクリプルによる電動機の回転速度変動を抑制するように電流を制御する方法がある。

図9は、後者の方法によりトルクリプルを抑制した場合、抑制回路付となしのときの駆動軸のトルクリプル抑制効果を示す。同図は共振周波数付近で電動機発生トルクリプルが小さくなるように制御回路を構成したときの例を示すが、共振周波数付近のリプル分を電流に重畳し、強制的にトルクリプルを発生させ、抑制回路の効果を確認した結果を示す。抑制回路を付けることにより、トルクリプルが低減されていることが分かる。

4章で述べたこれらの方法を採用すれば、トルクリプルはかなり小さな値に低減できる。更に、より大きな低減効果を得るには、前述の瞬時トルクを演算、又は検出し制御する方法などを含め、今後も、検討を進める必要がある。

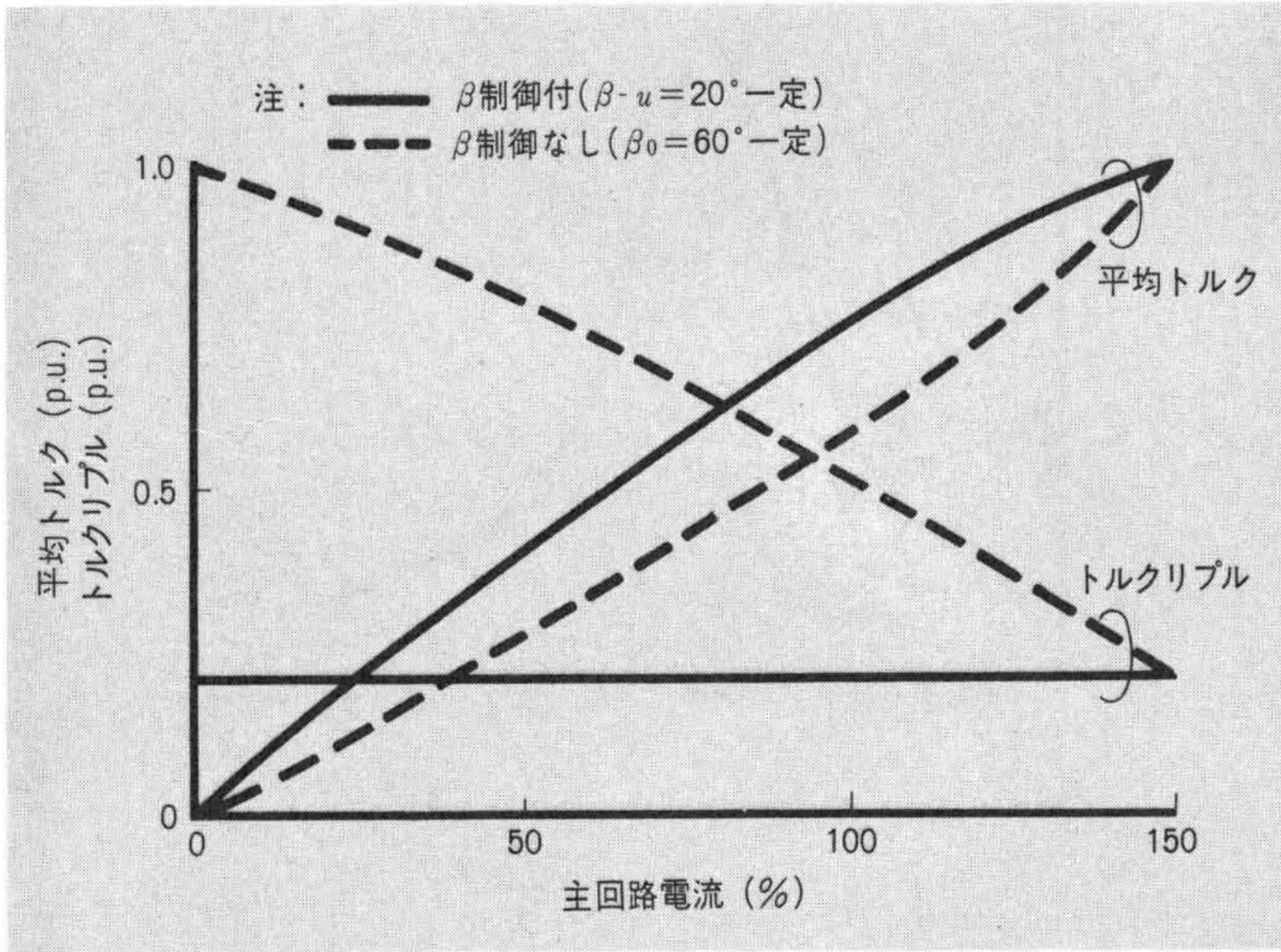


図8 制御進み角(β)制御によるトルクリプルの抑制 β 制御を採用すると、全負荷範囲にわたってトルクリプルが小さくなる。

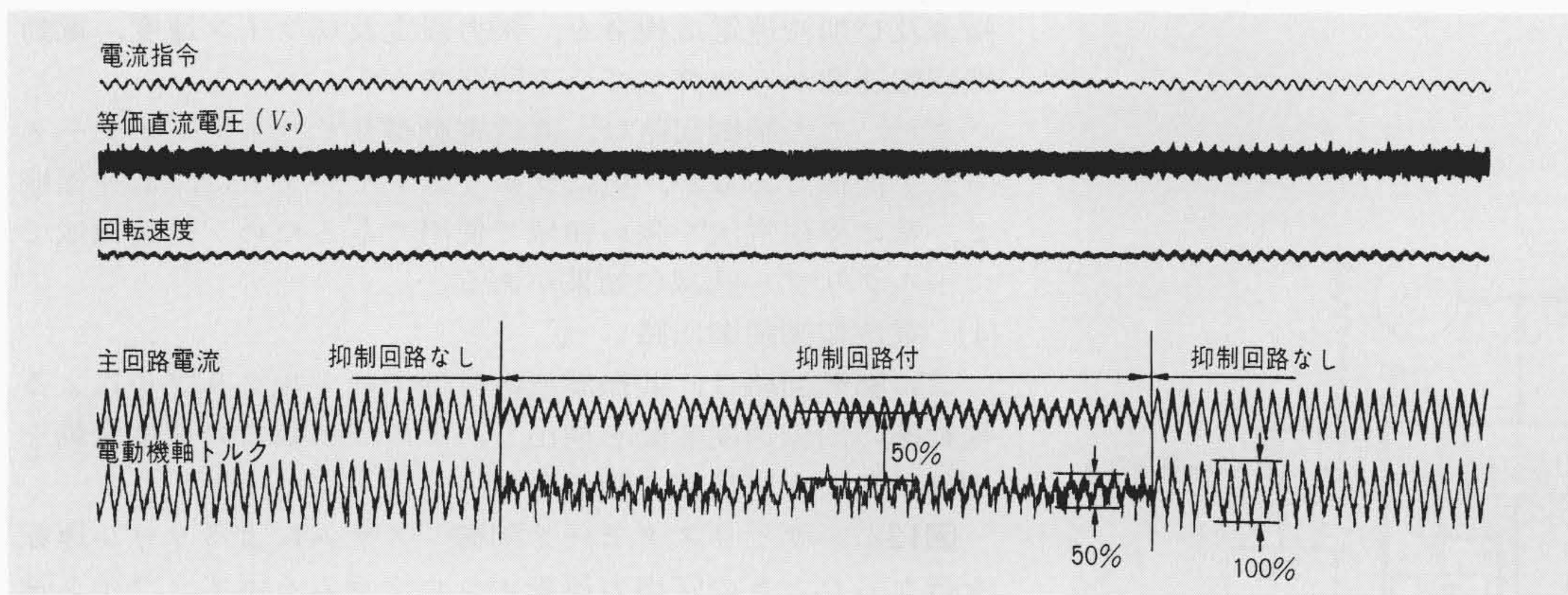


図9 回転速度変動を抑制する電流変調方式によるリプル抑制試験結果 共振周波数付近のリプル分を電流に重畳し、強制的にトルクリプルを発生させ、抑制回路の効果をみたものである。抑制回路を付けると、トルクリプルが低減されていることが分かる。

5 サイリスタモータのリールへの応用例

リールの制御は、巻太り、又は巻細り期間中、常に板材に加わる張力を一定に保つ必要がある。

この間の関係は、図1に示したように(3)式の関係となる。

$$v \cdot T = \omega \cdot \tau = P \quad \text{.....(3)}$$

サイリスタモータ内部の損失を無視すると、電動機出力は、(4)式と考えられる。

$$P = V_s \cdot I_d \quad \text{.....(4)}$$

したがって、サイリスタモータにより、この種の制御を行なうには、直流機のブラシ間電圧に相当する等価直流電圧(V_s)を検出し、この V_s と主回路直流電流(I_d)から、出力($P = V_s \cdot I_d$)が一定となるように制御すればよい。

V_s と端子電圧(E_t)とは次式のような関係がある。

$$V_s = 1.35 E_t \cos(\beta - \frac{u}{2}) \cos \frac{u}{2} \quad \text{.....(5)}$$

$$E_t = K_1(\beta, I_d) \omega I_f \quad \text{.....(6)}$$

ここで β : 実効制御進み角,
 u : 転流重なり角

$K_1(\beta, I_d)$: β, I_d の関数

ω : 回転角速度

I_f : 界磁電流

(5), (6)式から、 V_s を制御する要素としては、 I_f と β があるが、この両方を制御(併用制御方式)することにより、電動機寸法、 GD^2 を小さくできる。

この一例として、最近製作し順調に稼動している新日本製鐵株式会社広畑製鐵所冷間プロセスライン用サイリスタモータ駆動装置について以下に述べる。この装置は、リール駆動用として実圧延ラインに初めて適用したものである。

表2 リール用サイリスタモータ駆動装置の仕様 今回のサイリスタモータ駆動装置の電動機、変換器及び制御装置の仕様を示す。

項 目	仕 様	
	ベイオフリール	ブライムテンションリール
電 動 機	225kW 400/1,932rpm 4極 64.4Hz 三相 305/550V 590A 過負荷 150% 1分	270kW 400/1,932rpm 4極 64.4Hz 三相 300/543V 765A 過負荷 150% 1分
サイリスタ変換装置	259kW 18アーム 電流形交流方式 (サイクロコンバータ)	310kW 18アーム 電流形交流方式 (サイクロコンバータ)
制 御 装 置	主回路: ACR制御 界磁: 界磁ACR制御付 V_s 制御 制御進み角(β)制御 定出力制御	
制 御 範 囲	1 : 222	

5.1 装置の構成と特長

この装置は、リール駆動用として必要な過負荷耐量、定出力特性などの機能はもとより、電動機速度範囲が、1:222(ライン速度比1:46, コイル径比1:4.83)と非常に広範囲で、かつトルクリプル、電動機寸法などに厳しい制約があり、種々の新方式を開発・製品化し完成した。

表2に今回の装置の仕様を、図10に制御装置の外観を、図11に制御ブロック図をそれぞれ示す。その特長は次に述べる通りである。

- (1) 等価直流電圧(V_s)を検出し、 V_s 制御及び電流制御により、定出力制御を実現した。
- (2) 広範囲の定出力制御範囲に対して、 I_f 制御と β 制御の併用方式の採用により、電動機の重量、 GD^2 を小さくした。
- (3) トルクリプル低減を目的に、電動機軸には高弾性継手を使用し、制御的にも β 制御、最大トルク制御、電流変調制御などを採用している。

5.2 制御方式

図11に示した制御ブロック図をもとに、特長とする制御回路について以下に説明する。

(1) V_s 制御回路

この制御回路は、直流電動機サイリスタレオナード方式のEMF(Electro-Motive Force)制御に相当するものであり、

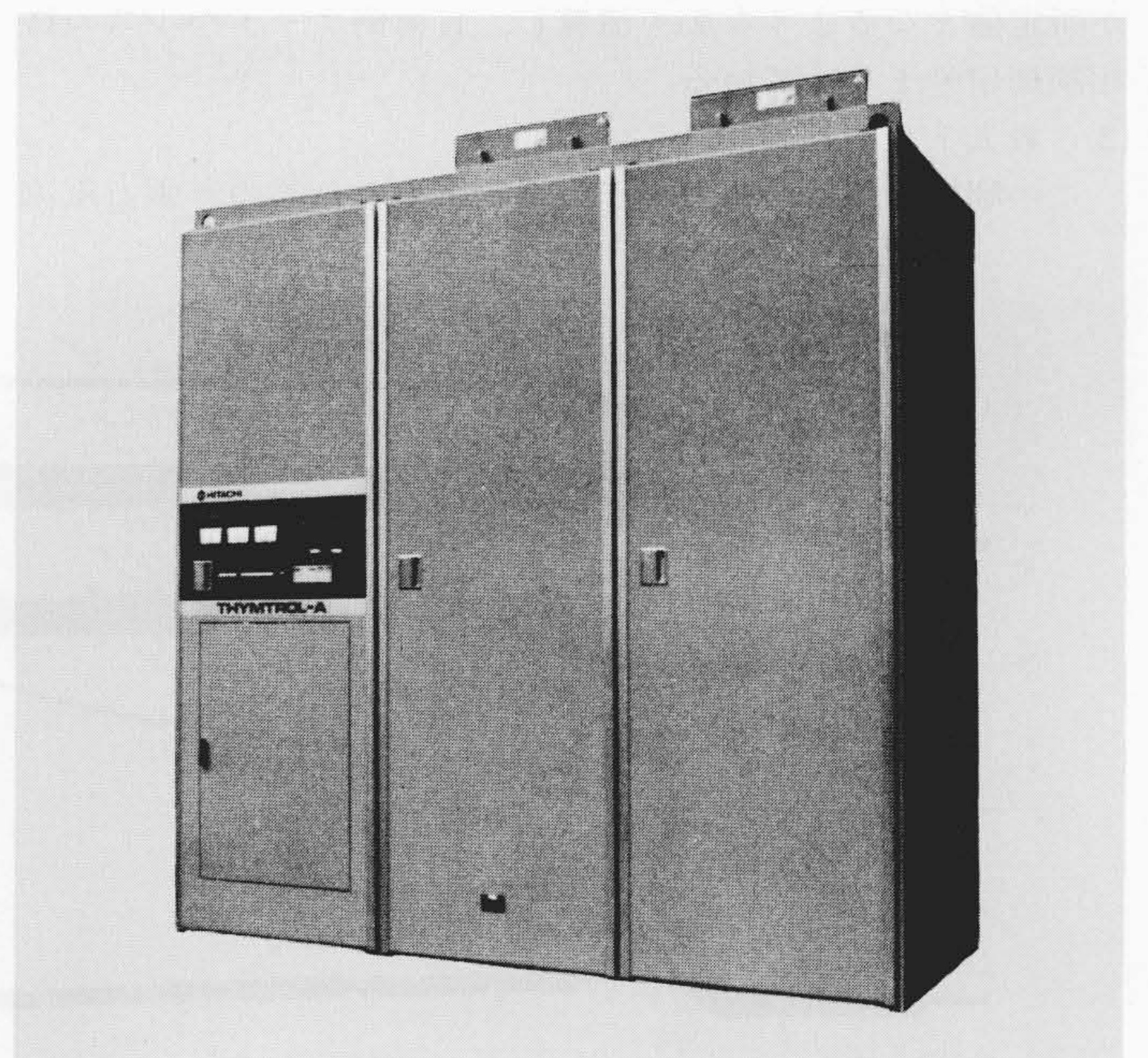


図10 制御装置の外観 サイリスタ変換器と制御回路を一体とした制御盤構成となっている。

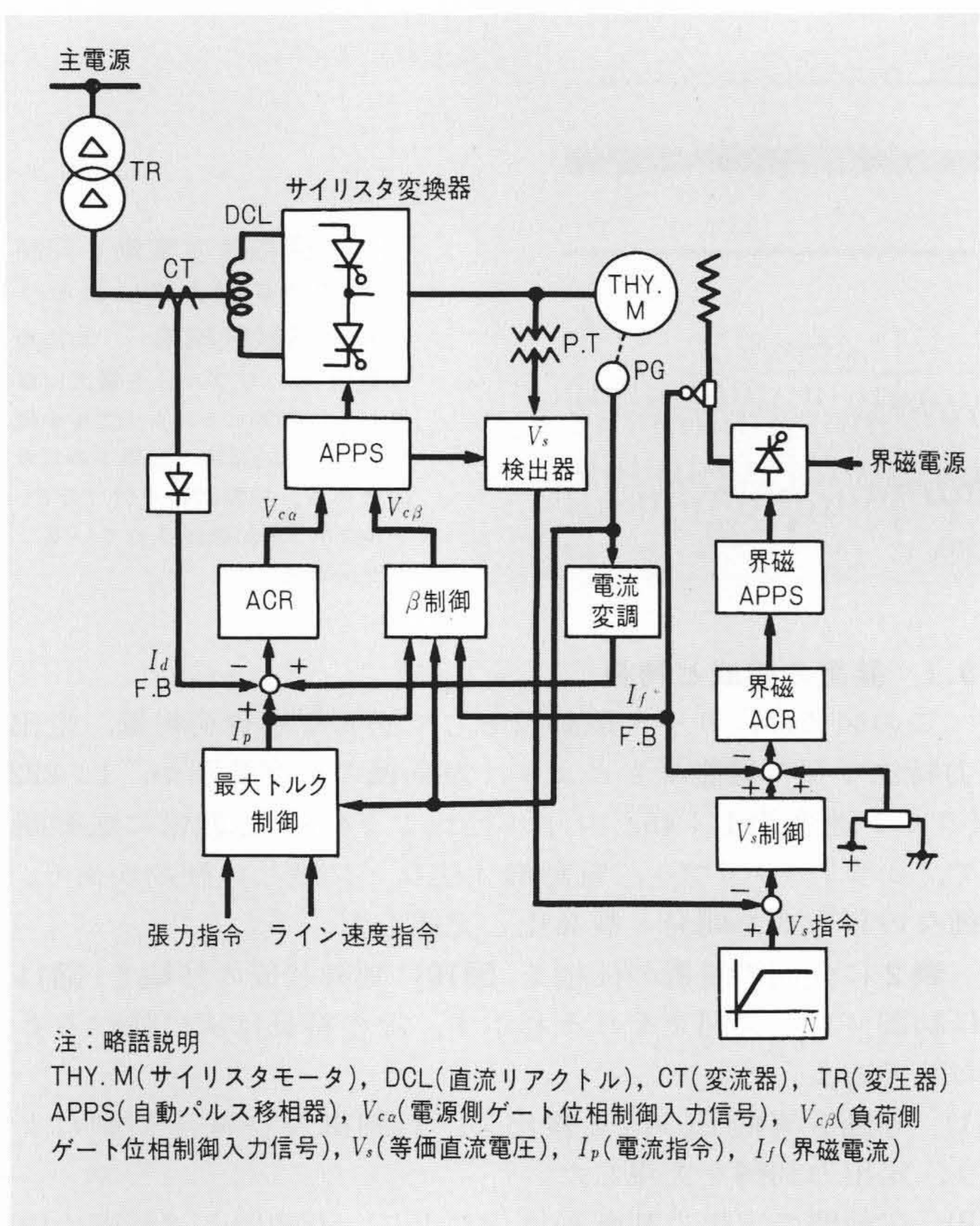


図11 リール駆動用サイリスタモータ制御のブロック図 定出力制御を行なうには、ACRによる定電流(I_d)制御と I_f と β の制御による等価直流電圧(V_s)一定制御により、 $I_d \times V_s = P$ (出力)が一定となるよう制御している。

電動機端子電圧と負荷側ゲートパルス信号から等価直流電圧(V_s)を検出し、この V_s が所定値となるよう I_f 及び β を制御している。

(2) β 制御回路

この制御回路は、負荷側ゲートパルス位相が、主回路電流、界磁電流の変化に対して、常に転流余裕角を確保し、かつ V_s が所定値となるような β_0 を演算し、負荷側ゲートパルスの移相制御信号を与えている。

(3) 最大トルク制御回路

この制御回路は、張力を一定に制御するための、張力電流

指令及び加減速電流指令を、張力設定及びライン速度、電動機回転速度から演算している回路である。

また、この制御回路は、直流電動機サイリスタレオナード方式と同様であるが、更にサイリスタモータでは、低速領域で、常に界磁電流を強め領域で使用できるため、低速領域でのトルクリプル低減の効果がある。

(4) 電流変調制御回路

この制御回路は、共振周波数付近でのトルクリプルによる電動機の回転速度変動を検出し、その周波数での速度変動を抑制するように電流を制御している。

図12に、サイリスタモータ制御システムによるリール運転を行なったときの定出力運転オシログラムを示す。ライン速度一定のとき、電動機回転速度が変化しても、等価直流電圧(V_s) $\times$ 主回路電流(I_d)が一定となり、定出力制御が行なわれていることが分かる。

6 結 言

以上、サイリスタモータのリール駆動用定出力制御システムの実用化に当たり、トルクリプルの板材に及ぼす影響の解明、制御進み角制御や電流変調制御によるトルクリプル低減対策、また応用例として、冷間プロセスライン用リール制御方式について述べた。

ここで述べた鉄鋼業の定出力制御システムは、弾性ストリップを介して各機器が互いに影響し合い、また制御システムの特性が製品に敏感に反映する、電動機制御上最も高度な応用例の一つである。これにより、サイリスタモータ制御システムの優れた制御性、信頼性と同時に、保守性をも大幅に簡単化されるものと思われる。今後、全製造プロセスへのサイリスタモータの適用拡大が大いに期待される。

参考文献

- 1) 長瀬, ほか4名: 無整流子電動機による定出力制御の検討, 昭和50年電気学会全国大会, No. 745(昭和50-4)
- 2) 川口, 片山, 高橋: サイリスタモータの鉄鋼製造プロセスラインへの適用, 電気学会研究会資料, 電力応用研究会 EPA-79-5(昭和54-3)
- 3) 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, No. 515(昭和54-4)
- 4) 森野, ほか3名: サイリスタモータの圧延主機への適用, 日立評論61, 649~654(昭和54-9)

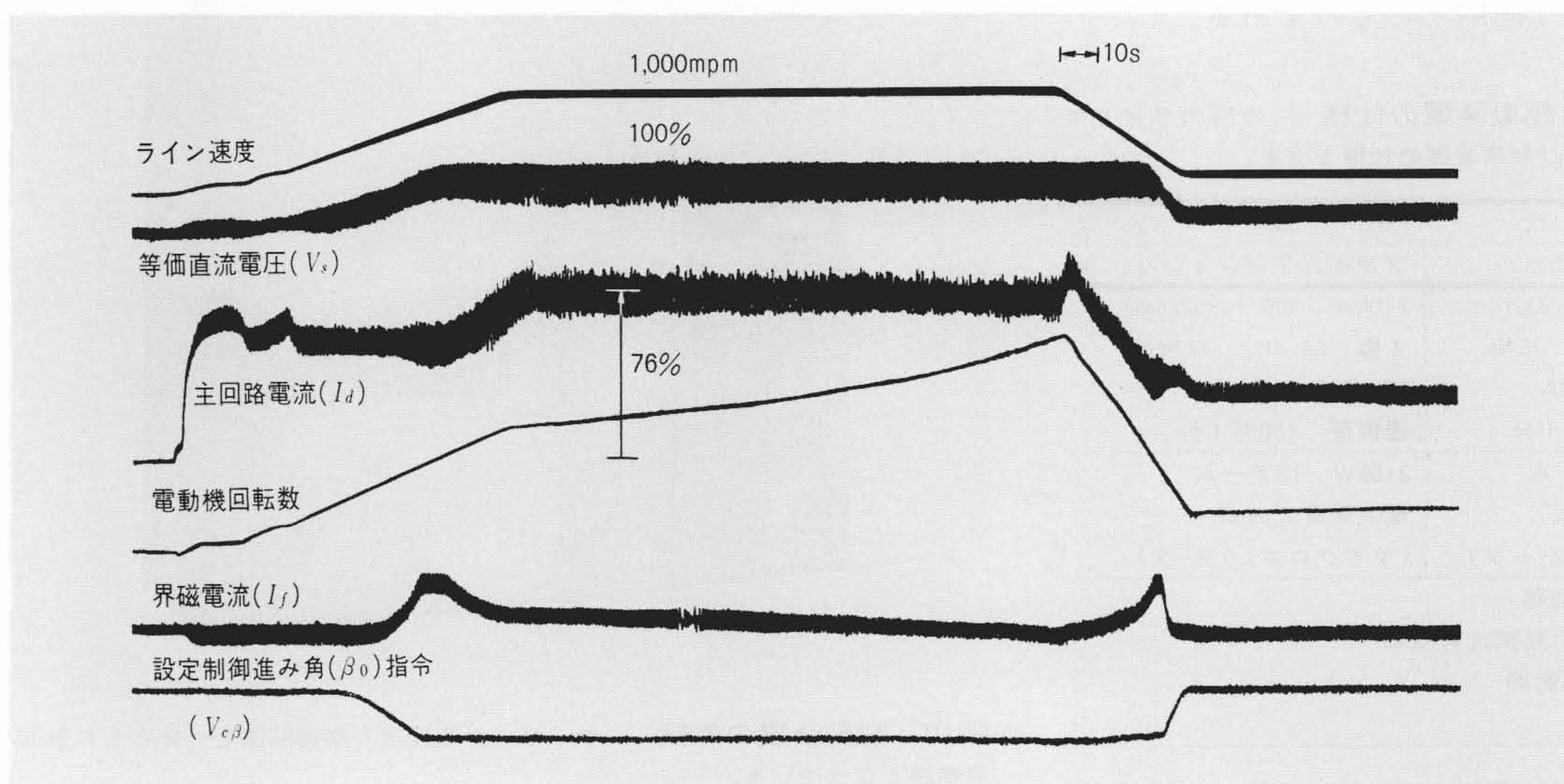


図12 定出力制御運転特性 ライン速度一定のとき、電動機回転数が変化しても、等価直流電圧(V_s) $\times$ 主回路電流(I_d)が一定となり、定出力制御が行なわれていることが分かる。