

速度制御装置

樋口登志男

1. はしがき

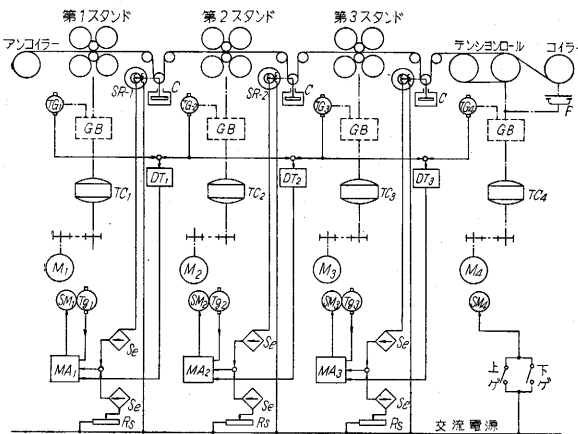
圧延機に三相巻整流子電動機を駆動電動機として用いて連続圧延を行なう場合高速圧延については、応答性の点で問題となる場合があるが、比較的低速圧延機の場合はほとんど直流機と変わらない制御を行なうことができる。

しかも三相巻整流子電動機を使用した場合設備費および電力量の点で大きな節減ができ、電源の力率はほとんど 100% に近い状態で運転できる特徴がある。

本 3 段連続圧延機における速度制御は低速機制御の 1 例であって、各段間の板のタルミ量によって各圧延機の圧延速度を自動制御する形式で、十分満足できる制御を行なうことができた。

2. 制御概要

本圧延設備の速度制御方式は各段間のタルミ定値制御を行なうことにより速度の同調を行なうことを主眼としている。全系統の概略制御結線図は第 1 図のとおりである。張力制御は別系統の制御ループで行なわれており、本文では速度制御の詳細を記述する。



第 1 図 速度制御系統図

第 1 図において圧延機の第 1 スタンド～第 3 スタンドはトルクコンバータを介して三相整流子電動機 $M_1 \sim M_3$ で駆動され、 $M_1 \sim M_3$ の回転数を制御することにより圧延速度の自動制御を行なう。また巻取機はトルクコンバ

ータを介して三相整流子電動機 M_4 で駆動され M_4 は圧延速度を決める指導機でもあり、操作盤に取り付けた増減速スイッチおよび速度計の指示によって遠隔操作を行ない圧延速度の設定を行なう。

第 1 図に示すようにつぎの圧延機との間のタルミ量をダンサーロールと連動するレバーにより回転角度に換え、シンクロ式角度検出器でタルミ量にほぼ比例して変化する交流電圧を発生し、その電圧をセレン整流器で整流して、直流電圧とし、別にタルミ設定抵抗器で設定タルミに相当した直流電圧を出し、両電圧の差電圧を磁気増幅器で二段増幅して二相サーボモータを駆動し、三相巻整流子電動機の刷子角度を調整して圧延速度の自動制御を行なう。

制御動作を良くするためにトルクコンバータの出力軸の回転数を直流回転計発電機で検出し、微分変圧器で微分し磁気増幅器の初段にフィードバックして安定化を計り、また二相サーボモータの回転に比例動作を持たせている。圧延速度の増減等の特性を良くするため、つぎの圧延機のトルクコンバータ出力軸の回転計発電機との差電圧を微分変圧器に入れている。

3. 制御上の問題点

本制御系の重要な問題点は、起動時または材料通しの場合および運転時圧延速度の急増減を行なう場合、ダンサーロールが移動範囲の許容量を越え、そのため張力制御の範囲を逸脱することのないよう速度制御動作を考慮することである。

特に本装置では、駆動電動機がトルクコンバータを介して圧延機を駆動する構造であるため、起動時と材料通しの場合、駆動電動機の起動回転数に相当するトルクコンバータの入力回転数ではトルクコンバータの出力軸は回転せず、駆動電動機がある程度増速しないと圧延は行なわれない。駆動電動機の起動回転数は適当な値を選定して、850～950 r/m 位に設定してあるが、なお試験圧延時にサーボモータのむだ時間換算で 2～2.5 sec、回転数で 200 rpm 程度の差があり、しかもその数値は一定ではなく、圧延時の圧下量・張力・材料の機械的性質および寸法などの圧延条件により左右されるから、これらの数値は圧下量および張力などの圧延条件要素が、非常に狭い範囲に限定されない限りこれ以上に起動回転数を上げることは望まれない。しかも圧延トルクの起動・停止の場合のヒステリシスもあり、制御上から見ても起動位置は上げられない。そのため上のむだ時間に対しても良好な

第1表 三相分巻整流子電動機仕様一覧表

	スタンド	出力 (HP)	極数	電圧	周波数	回転数範囲	サーボモータ	制御
圧延 延動 機用	1	7.5	4P	200V	50 c/s	2,000~650 r/m	二相サーボモータ	タルミ位置制御
	2	7.5	4P	200V	50 c/s	2,000~650 r/m	二相サーボモータ	タルミ位置制御
	3	7.5	4P	200V	50 c/s	2,000~650 r/m	二相サーボモータ	タルミ位置制御
巻機 取用		2	4P	200V	50 c/s	2,000~650 r/m	三相誘導電動機	電気的遠隔操作式

る制御動作を行なう必要がある。

また運転時の速度の急増減に対してタルミ位置の安定性を良くしなければならないので制御系の減衰率を大きくする必要があります。

4. 電動機の特性

三相分巻整流子電動機は刷子角度をハンドルまたはサ

ーボモータで調整することにより簡単に回転速度を可変できるもので本装置では第1表の仕様と第3図、第4図の特性の電動機を使用している。

三相分巻整流子電動機は第1表の速度範囲でトルク一定の電動機であって最高回転数での馬力で称呼している。また起動は原則として最低速度位置で行なうが本圧延機では圧下量、張力、材質、寸法などの圧延条件の変化に応じて起動回転数を変えなければならないので最低速度位置を650~1,000 r/m 間任意に設定できるようにし、起動時の制御動作が良好になるように調整できるよう考えている。

第2図の(a)は7.5HP、(b)は2HPの外形寸法図で東洋電機製造KKの標準品である。第3図の(a)(b)はそれぞれ7.5HP、2HPの速度特性であって、直流分巻電動機と非常によく類似していることが分る。

第4図(a),(b)図はそれぞれの力率、効率曲線図であって最高力率の位置を調整することも可能である。

5. タルミ位置制御

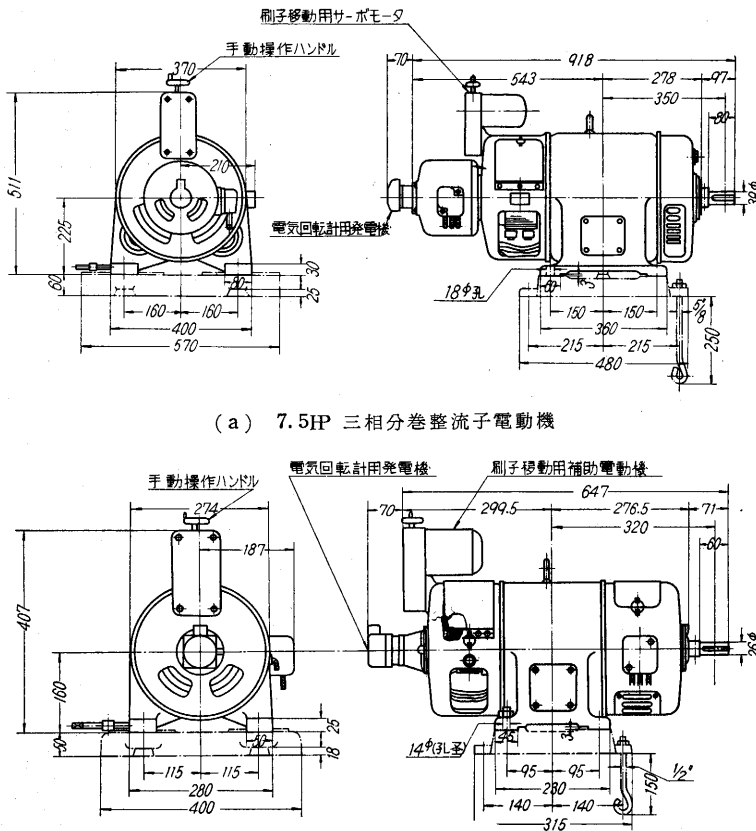
三相分巻整流子電動機はサーボモータによって刷子角度を調整しているため、タルミ制御の場合は制御ループに積分動作を二つ含むことになり、本質的に不安定となっている。そのため第1図に示すようにトルクコンバータの出力回転数を検出して微分変圧器を介して増幅器の入力側にフィードバックして安定化を計っている。また本装置の増幅器には磁気増幅器を使用し半永久的の使用にたえるようにした。

第5図は制御回路の詳細図を示す(24ページ)。

(1) 制御回路ブロック線図

シンクロ式角度検出器は一次電圧として一定交流電圧を加えれば回転角度により二次誘起電圧は正弦波状に変化するが、使用する回転角が電気角で0~60°のためほとんど直線的变化部分を使用できる。

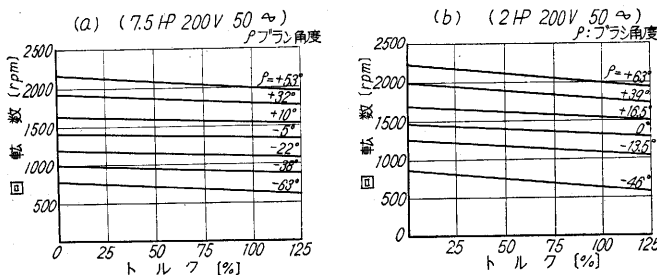
その伝達函数を Ks とする。磁気増幅器二段と二相サーボモータを含む伝達函数は実験の結果下記のようにおくことができる。



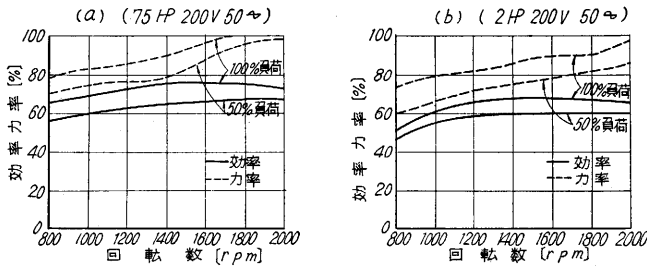
(a) 7.5HP 三相分巻整流子電動機

(b) 2HP 三相分巻整流子電動機

第2図



第3図



第 4 図

$$\frac{K_1}{1+T_1S} e^{-TdS} \left[\frac{\text{rpm}}{V} \right]$$

本装置の実際の数値は むだ時間 $Td=0.15\sim 0.2\text{sec}$, 時定数 $T_1=0.5\text{sec}$ である。

二相サーボモータに直結したフィードバック用直流発電機は直列抵抗によって比例帯を調整でき、伝達函数は

$$Kf \left[\frac{V}{\text{rpm}} \right] \text{ となる。}$$

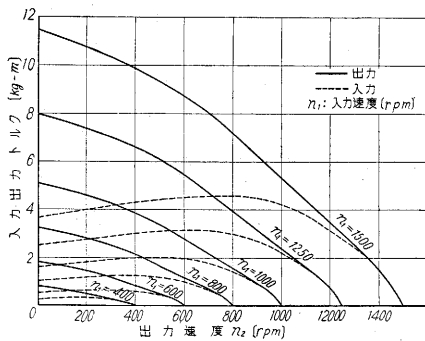
三相巻整流子電動機の刷子角度は二相サーボモータによって調整され第 3 図の特性のように駆動トルクが大幅に制御される。

そのため刷子角度の変化は直接駆動トルクの変化となり駆動トルクまでの伝達函数を

$$\frac{K_2}{S} \left[\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{rpm}} \right]$$

とおくことができる。

三相整流子電動機の駆動トルクによって圧延速度は下記のように考えられる。第 6 図はトルクコンバータのトルク速度特性を示す。

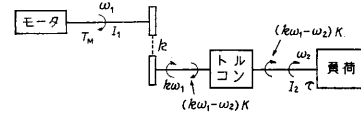


第 6 図 トルク変換機等性曲線

図に示すように圧延トルクの小さい時、すなわち入力軸と出力軸の回転数差が小さく、20%位まではほぼ入出力トルク曲線は一致して入出力のトルクの相互干渉が大きいことを示している。このことは入出力回転数が $k\omega_1, \omega_2$ として決まると全く等しい入出力トルク T_{12} が一義的に決まることで、入出力トルク的一方だけが異なった値のトルクにはなりえない。今この回転数範囲内で第 6 図の特性曲線はほぼ $k\omega_1=\omega_2$ の点を通る直線と考えられるの

$$T_{12}=(k\omega_1-\omega_2)K$$

での関係が成立する。ただし K は比例常数であって、 T_{12} は出力軸では、負荷の駆動トルクとなり入力軸では駆動電動機の負荷トルクとして考えられる。すなわち上式を満足するいわゆるトルクのコンバータであると考えられる。速度の変化が狭い範囲内では(1)~(2)式が成立する。



第 7 図

$$T_M - T_i = T = I_1 \frac{d\omega_1}{dt} + K_1\omega_1 + (k\omega_1 - \omega_2)Kk \dots (1)$$

$$(k\omega_1 - \omega_2)K = I_2 \frac{d\omega_2}{dt} + K_2\omega_2 + \tau \dots (2)$$

上式で T_M は電動機駆動力、 T_i はその他の損失トルク ω_1, ω_2 は電動機軸およびトルクコンバータ出力軸回転数、 I_1 を電動機軸回りおよびトルクコンバータ入力軸の全慣性の電動機軸への換算値、 I_2 をトルクコンバータ出力軸回りの全慣性、 K_1, K_2 はそれぞれの軸回りの制動係数で K_1 はほとんど電動機の垂下特性によって決まる。 k をプーリー比、 K をトルクコンバータ内の入出力軸のトルク干渉係数、 τ はトルクコンバータ出力軸損失トルクとする。

第 7 図はこれらの関係図を示す。

(1), (2)式より $K_2\omega_2 \approx 0$ としてほとんど差支えないので

$$T - \frac{\tau(K_1 + Kk^2)}{Kk} = \frac{I_1 I_2}{Kk} \frac{d^2\omega_2}{dt^2} + \left(\frac{K_1 + Kk^2}{Kk} I_2 + \frac{I_1}{k} \right) \times \frac{d\omega_2}{dt} + \frac{K_1}{k} \omega_2 \dots (3)$$

変化分だけを考えれば定常項を無視して伝達函数は

$$\frac{\omega_2}{\tau_M} = \frac{\frac{K_1}{k}}{\frac{I_1 I_2}{Kk} S^2 + \left(\frac{K_1 + Kk^2}{Kk} I_2 + \frac{I_1}{k} \right) S + 1} \dots (4)$$

となり二次系となる。ただし τ_M は T_M の変化分である。

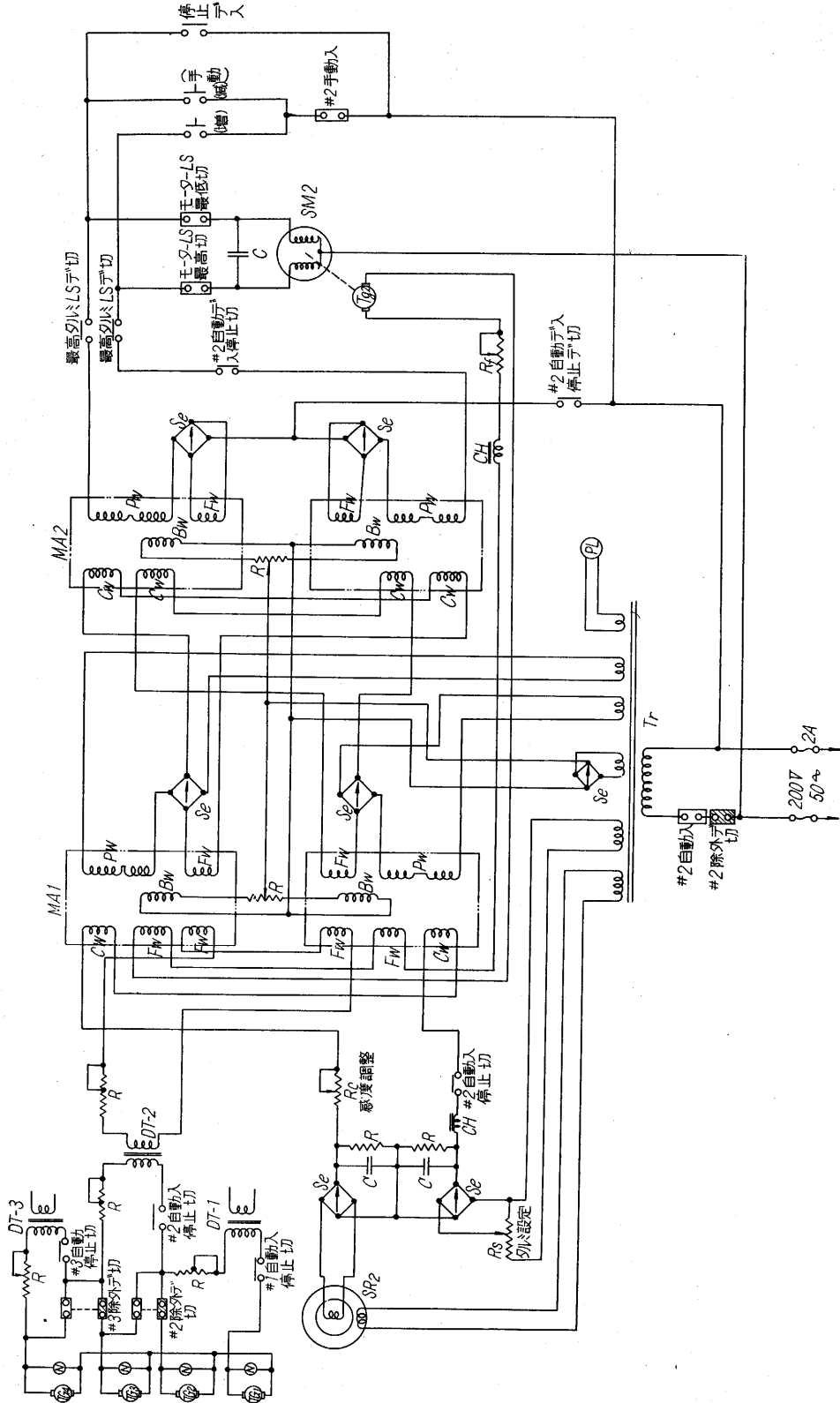
しかしトルクコンバータの入出力軸の回転数差が 40% 以上となると出力軸から入力側へのトルクの相互干渉がほとんどなくなり、入力トルクはほとんど出力軸回転に対して無関係となり、しかも入力軸回転数にほぼ比例するものとなり、出力軸トルクが変化し出力軸回転数が変化しても入力トルクは変化しない特性となり(1)式右辺の第 3 項の ω_2 の項はほとんど無視できることになる。

そのため(1), (2)式は $K_2\omega_2 \approx 0$ として

$$T = I_1 \frac{d\omega_1}{dt} + (K_1 + k^2K)\omega_1 \dots (5)$$

$$kK\omega_1 = I_2 \frac{d\omega_2}{dt} + K\omega_2 + \tau \dots (6)$$

となり変化分を考えれば伝達函数は(6)式右辺の定常項を無視して



MA₁, MA₂=磁気増幅器 Tr=電源変圧器 TGI~4=直流回転計発電機 N=回転指示計 DT1~3=ダンピングトランス
 SR₁, SR₂=2号機サーボモータ角度検出器 C=コンデンサ R=抵抗 Se=セレン整流器 CH=チョーク LS=リミットスイッチ
 SM₁, SM₂=2号機ワイードバック用直流回転計発電機 Tg₁, Tg₂=2号機ワイードバック用直流回転計発電機 Rs=タルミ設定抵抗器
 Rc=感度調整抵抗器 Rf=ワイードバック調整抵抗

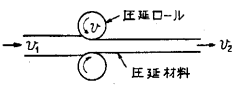
第 5 図

$$\frac{\omega_1}{\tau M'} = \frac{1/K_1 + k^2 K}{\frac{I_1}{K_1 + k^2 K} \cdot S + 1} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{k}{\frac{I_2}{K} S + 1} \dots\dots\dots (8)$$

と考えられる。

トルクコンバータ出力軸回転数がロールに伝達され、
 圧延ロールの周速 v は第 8 図に示す入口および出口の線
 速に対して、 $v_1 < v < v_2$ の関係にあるが、圧延材料の速度



第 8 図 圧延速度関係図

とロールの周速との比率に大
 きな変動を生じない時は v_2/v
 のギヤ比で等価的に考えて差
 支えないので、トルクコンバ

ータ出力軸回転から v_2 までの伝達函数は

$$KG = \left[\frac{m/s}{rpm} \right] \text{ となる。}$$

線速 v_2 とタルミ量との関係は積分動作となり

$$\frac{1}{2S} \left[\frac{m}{m/s} \right] \text{ の伝達函数となる。}$$

またトルクコンバータ出力軸から磁気増幅器初段にフ
 イードバックしてある微分変圧器の伝達函数は

$$\frac{K_F S}{1 + T_F S} \left[\frac{V}{rpm} \right] \dots\dots\dots (9)$$

となる。

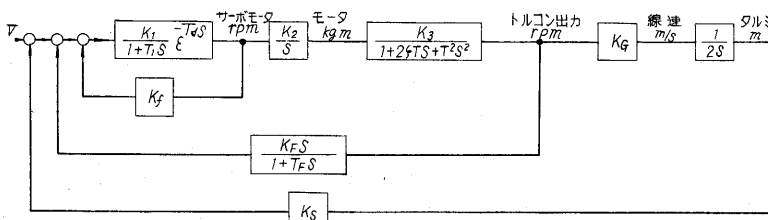
今(4)式を

$$\frac{\omega_2}{\tau M} = \frac{K_3}{T^2 S^2 + 2\zeta T S + 1} \dots\dots\dots (10)$$

とおき、(7)、(8)式を

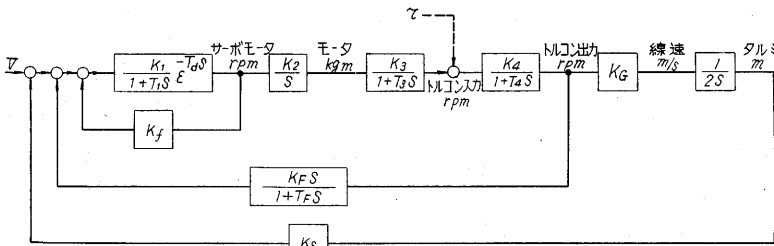
$$\frac{\omega_1}{\tau M'} = \frac{K_3}{T_3 S + 1} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{K_4}{T_4 S + 1} \dots\dots\dots (12)$$



(圧延トルク小なる場合)

第 9 図 ブロック線図



(圧延トルク大なる場合)

第 10 図 ブロック線図

として全制御回路のブロック線図は第 9 図と第 10 図と考
 えられ、二つの場合を検討する必要がある。

しかも第 3 図の電動機および第 6 図のトルクコンバータ
 のそれぞれの速度特性に見られるように、各速度位置で
 (1)、(2) 式中の T 、 K_1 および K の数値に大きな変化が
 あるので安定度の決定は各点で検討が必要である。

(2) 試験結果

運転時の静特性および過渡特性 不感帯はシンクロ式
 角度検出器の回転角に換算して 6° 、タルミ量で 30mm 程
 度であって過渡特性の周期は 1 段当り圧延率が 8~10%
 の時 8 秒前後となっており、減衰係数はほぼ 0.5~0.6 程
 度に調整しているので起動の応答速度の点では増幅器の
 比例ゲインは多少低くなっている。 M_4 のサーボモタ
 を作動させて巻取速度を 7m/min から 20m/min まで増
 速するために 25 秒要するが、その速度変化では各段の
 タルミの追従状態は非常に良く振動状態はほとんど現わ
 れないで一斉に増減している。

起動時特性 第 3 節に述べたように、圧延トルクが大
 きいときには、モータを起動して後トルクコンバータ出
 力軸が回転するまでの遅れが大きくなり、しかも各スタ
 ンドの圧延負荷が平均していない場合には、各スタンド
 の圧延開始時期に相当の差を生じ、本制御装置が作動し
 て、実用上の目的にはダンサーロールの許容変位 ± 150
 mm を超過する場合は少ない。起動特性は実際の運転上
 は各種条件により大幅に変化すると考えられるが、一応
 満足な結果を得ることができた。

6. 結 論

本制御は安定度の点では問題はなかったが、圧延トル
 クが作業条件により広範囲に変化し、しかも、各スタ
 ンドの圧延荷重はかならずしも等
 しくないで、起動時の過渡特性は
 非常に難かしいものとなってい
 る。

特に本装置のように厳密な張力
 の安定が条件となっているもの
 では、ダンサーロールの動きの加
 速度の大きさも制限が加えられ、
 制御装置の問題もほとんど起動
 特性のみに終始した観があった。

三相巻整流子電動機を使用し
 での制御は多少応答が遅くなる傾
 向にあるが、関係者の非常な熱意
 とご助力によって、これらの問題
 点を解決して満足な結果を得る
 ことができた。(1959.9.18)