

連続線材圧延設備用静止レオナードの自動制御

Automatic Control for the Static Leonard System Continuous Wire Rod Mill

泉 千吉郎* 毛利 銓 一*

Senkichiro Izumi

Sen'ichi Mori

田 附 修* 小 野 田 芳 光**

Osamu Tatsuki

Yoshimitsu Onoda

内 容 梗 概

連続線材圧延設備では圧延素材が噛み込まれたときの速度降下、すなわちインパクト降下を小さく抑えかつすみやかに回復せしめることが必要で、そのため応答速度の早い静止レオナードによる速度制御が採用される。

日立製作所ではこの制御系について研究し、インパクト降下の最大値と回復時間が制御系の応答速度と電動機の回転部分に貯えられるエネルギーに関係することを求めた。そして、最近、住友金属工業株式会社小倉工場に納入した世界的高速度の装置にこの結果を適用し、信頼度の大きい日立標準型の磁気的自動移相器や磁気増幅器を用いて要求性能を十分上回る結果を得ることができた。

1. 緒 言

水銀整流器の位相制御を応用した装置として、連続線材圧延設備用静止レオナードは欧州では数年前より、また米国では2～3年前より使用されている。またわが国においても二、三設備されてきた。

その理由は、製鋼設備の合理化に伴い、連続線材圧延設備は圧延速度の高速化、製品の精度の高いこと、電力所要量の少ないことが要求されるようになり、その駆動装置として静止レオナードが、上記の要求を満たすために最も適した特性をもっているためである。

日立製作所では最近、住友金属工業株式会社に世界最高速度級に属する 30m/s (6,000 feet/min) の圧延速度の総合出力 7,320 kW の静止レオナード制御の連続線材圧延設備を納入した。

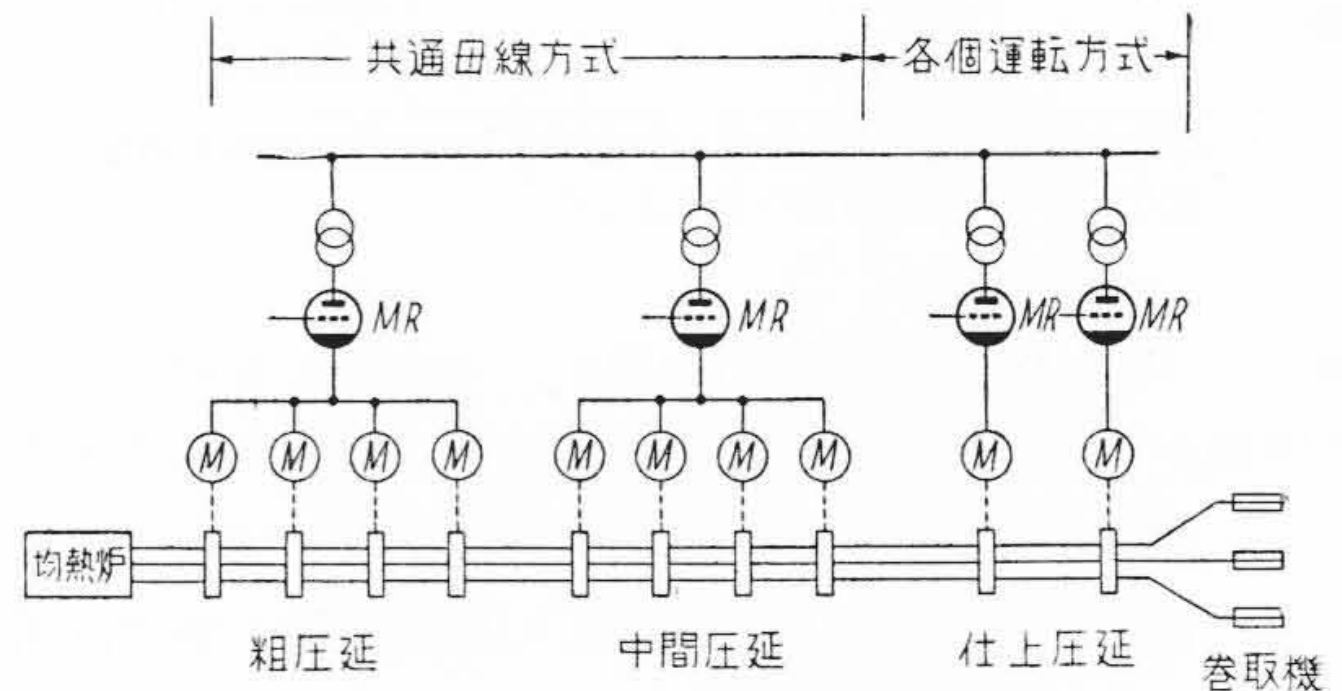
このような直線配列の連続圧延設備では圧延されている素材に張力を与えてはならず、また許される弛みの量も非常に小さいので精密な速度制御が必要である。

さらに、素材の圧延列が数列になつていたので、その中の一つの素材が圧延機に噛み込まれると速度が降下し、他の素材に張力および弛みを与えることになる。

このときの速度降下はインパクト降下といわれているが、この設備ではこれを小さく抑え、かつすみやかに回復させることが必要である。

ところで、連続線材圧延設備は第1図に示すように、まず、初段の粗圧延機群で圧延し、次に中間圧延機群で圧延し、さらに仕上圧延機群で仕上げするのであるから、初段の粗圧延機群ではインパクト降下に対する要求が終段の仕上圧延機群ほど強くない。

それで、一般に、効率、保守、設備費の点から前段の



第1図 連続線材圧延設備概略図

圧延機群に対しては図に示すように1台～数台の水銀整流器で多数の電動機を運転し、水銀整流器は一定の電圧を電動機に供給するのみで速度制御は行わないか、あるいは行つても電動機の界磁制御によつて行う共通母線方式が採用されている。

終段の仕上圧延機では精度が要求されるばかりでなく、圧延速度も大きいのでインパクト降下に対する要求が強いから、図のように電動機1台ごとに水銀整流器1台を接続し、急速な制御の可能な位相制御によつて速度を制御する各個運転方式が採用される。

このような制御の実例はこれまで二、三報告されているが、理論的な解析を行つたものはほとんどない。

ここでは、この制御に関して行つた理論的な解析と住友金属工業株式会社納装置の試験結果などについて報告する。

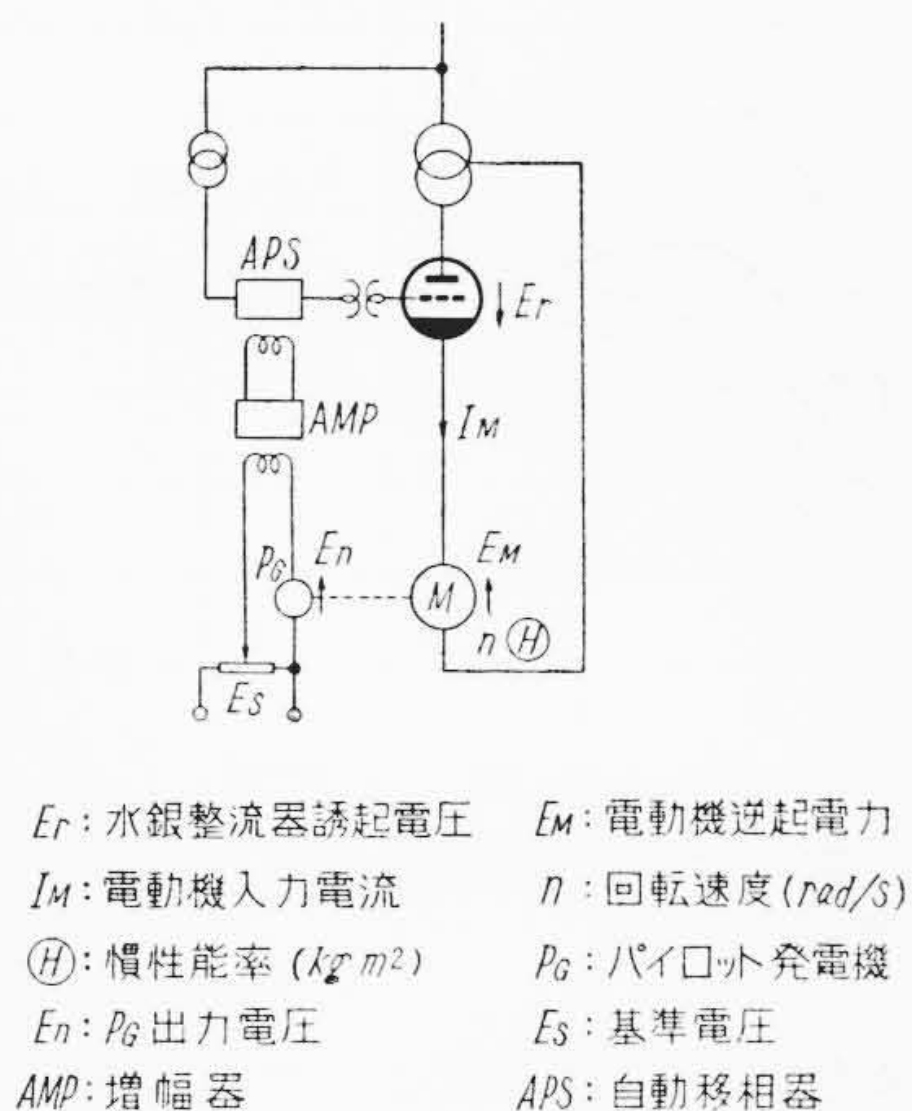
2. 各個運転方式インパクト降下補償制御の理論

2.1 基本ブロック線図

この装置の原理図は一般に第2図のようになつてゐる。図において電動機に負荷がかかり、その速度

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所



第2図 各個運転方式インパクト降下補償制御装置原理図

$n(t)$ (rad/s) が減少すれば、パイロット発電機電圧 $E_n(t)$ が減少し、基準電圧 E_s との間に電圧差が生ずる。この電圧差を増幅器で増幅し自動移相器に与え水銀整流器の内部誘起電圧 $E_r(t)$ を増加せしめ、電動機速度 n をほぼもとの値の近くにまで回復せしめる。

ここで、電動機の逆起電力を $E_M(t)$ 、水銀整流器の電圧変動率をも考慮した電機子回路等価全抵抗を R 、電機子回路のインダクタンスを L_E 、電動機の入力電流を $I_M(t)$ とすれば、次の式が成立する。

$$L_E(dI_M/dt) + RI_M = E_r(t) - E_M(t) \quad \dots\dots (1)$$

また、電動機の逆起電力と回転速度の比を $\zeta\phi$ (volt•s/rad), 電動機回転子に生ずる回転力を $\tau(t)$ (newton•m) とすれば

$$E_M(t) = \zeta\phi \cdot n(t) \quad \dots\dots (2)$$

$$\tau(t) = \zeta\phi \cdot I_M(t) \quad \dots\dots (3)$$

となり、電動機の慣性能率を Θ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), 負荷を駆動するのに必要な回転力を $\tau_i(t)$ とすれば

$$\Theta(dn/dt) = \tau(t) - \tau_i(t) \quad \dots\dots (4)$$

となる。

さらに、パイロット発電機電圧 $E_n(t)$ と電動機速度 $n(t)$ の間の比例係数を A_n (volt•s/rad) とすれば、

$$E_n(t) = A_n \cdot n(t) \quad \dots\dots (5)$$

水銀整流器内部誘起電圧 $E_r(t)$ と差電圧 $E_s - E_n(t)$ の間の伝達函数を $F(p)$ とすれば

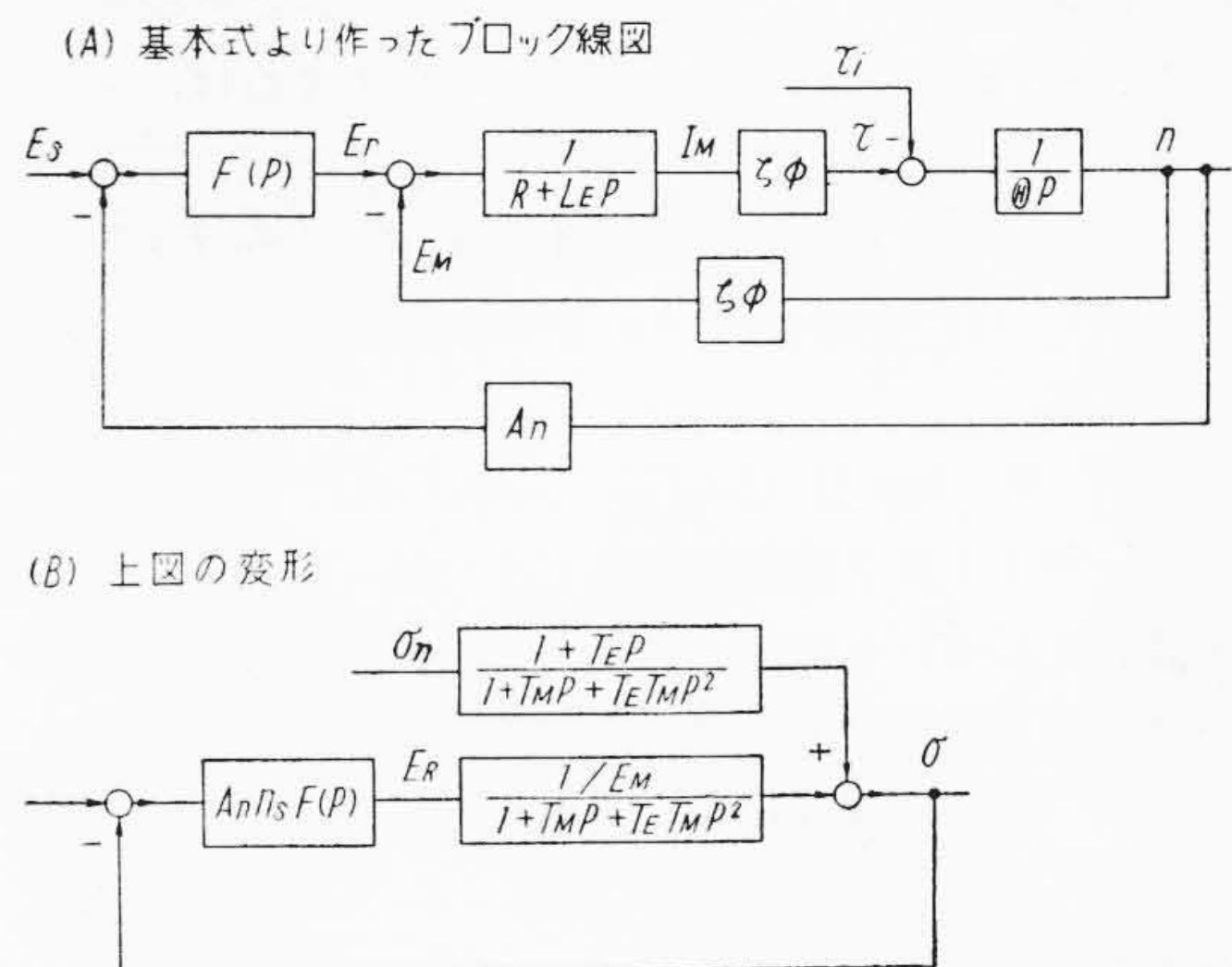
$$L\{E_r/(E_s - E_n)\} = F(p) \quad \dots\dots (6)$$

以上がこの制御系の基本式で、これをブロック線図にかけば第3図(A)となるが多少変形すると(B)となる。

2.2 電動機の機械的時定数が電機子回路の電気的時定数を無視しうるほど大きい場合

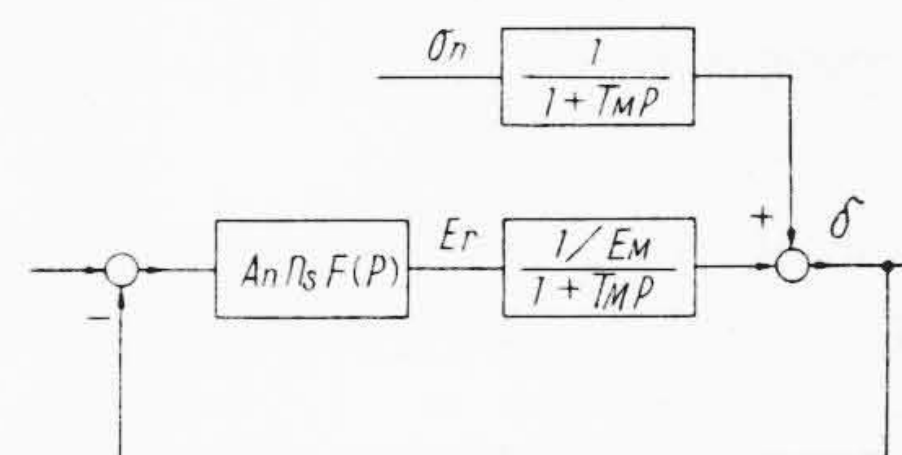
この場合のブロック線図は第4図のようになる。

この制御系の外乱はインパクト負荷 τ_i による速度外



$T_E = L_E/R$ で電気的時定数 (s)
 $T_M = R\Theta/(\zeta\phi)^2$ で機械的時定数 (s)
 $\Delta n = \tau_i R/(\zeta\phi)^2$ で τ_i なる負荷により生ずる速度外乱の大きさ (rad/s)
 $\sigma_n = \Delta n/n_s$ で速度外乱の大きさを速度変化率 (設定速度との比) に換算したもの
 n_s : 設定速度 (rad/s)

第3図 各個運転の場合の基本ブロック線図



第4図 電気的時定数 T_E を無視しうる場合のブロック線図

乱で、もしも、その外乱が単位函数的であるならばインパクト降下の最大値 σ_i は外乱の大きさ σ_n に等しくなる。

しかし、この場合は、負荷が単位函数的に与えられるが、そのために生ずる速度外乱は Fly-wheel 効果のため単位函数的とならず、 σ_i は σ_n より小さくなる。

この場合の電動機速度変動 $\sigma(t)$ は次のようにして求めることができる⁽¹⁾。

$$\sigma(t) = K(o)\sigma_0(t) + \int_0^t \frac{dK(\xi)}{d\xi} \sigma_0(t-\xi) d\xi \quad \dots\dots (7)$$

ここに、 $K(t)$ は実際に与えられる速度外乱で、第4図のブロック線図より次のようになる。

$$K(t) = L^{-1} \frac{\sigma_n}{1+T_M p} = \sigma_n (1 - e^{-t/T_M}) \quad \dots\dots (8)$$

また、 $\sigma_0(t)$ は単位函数速度外乱が与えられたときに起る速度変動を变化率、すなわち、設定速度 n_s の比であらわしたもので、系が二次系以上の振動系で、かつその減衰係数の小さなときは、普通、次の式で近似することができる。

$$\sigma_0(t) = e^{-t/T_0} \cos \omega_0 t \quad \dots\dots (9)$$

ここに、 T_0 , ω_0 はこの系の減衰時定数と自由振動角速

度で、Bode 線図より容易に求めることができる⁽²⁾。

これら(8)式と(9)式を(7)式に代入すれば、

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_n}{T_M \omega_0} \sqrt{\frac{1 + (1/\omega_0 T_0)^2}{1 + \{(1/\omega_0 T_0)^2 - (1/\omega_0 T_M)^2\}}} \{ \varepsilon - t/T_M \cos \Psi - \varepsilon - t/T_0 \cos(\omega_0 t - \Psi) \} \dots (10)$$

ここに、

$$\Psi = \tan^{-1} \{ (1/\omega_0 T_0) - (1/\omega_0 T_M) \}^{-1} \dots (11)$$

インパクト降下補償制御系では一般に T_M , ω_0 が大きく設計されているので、上式にこの条件を入れて、インパクト降下の最大値 σ_i と回復時間 T_i を求めれば、

$$\sigma_i \doteq \sigma_n / T_M \omega_0 \quad (T_M \omega_0 > 1) \dots (12)$$

$$T_i \doteq 4/\omega_0 \dots (13)$$

なる簡単な関係が得られる。

これより、 ω_0 を大きくすると σ_i と T_i の両者が小さくなることから知られる。

静止レオナードでは ω_0 がワードレオナードに比べ相当大きく、このことがインパクト降下補償制御に用いて有利な理由の一つである。

しかし、水銀整流器はその出力電圧に脈動分を含み、また、通流期間中は位相制御ができないことから ω_0 を大きくすることには限度がある。

それで、 σ_n を小さくし T_M を大きくすること、すなわち σ_n/T_M を小さくすることが考えられる⁽³⁾。

ところで、第3図より

$$T_M = R\theta/(\zeta\phi)^2 \dots (14)$$

$$\sigma_n = R\tau_i/n_s(\zeta\phi)^2 \dots (15)$$

であるので、

$$\sigma_n/T_M = W_i/\theta n_s^2 \dots (16)$$

ここに、

$$W_i = \tau_i n_s \text{ でインパクト負荷 (watt) } \dots (17)$$

となる。

インパクト負荷 W_i は与えられたもので一定であるから、 σ_n/T_M を小さくするには θn_s^2 を大きくすること、換言すれば回転部分にたくわえられる回転エネルギーを大きくすることが必要である。

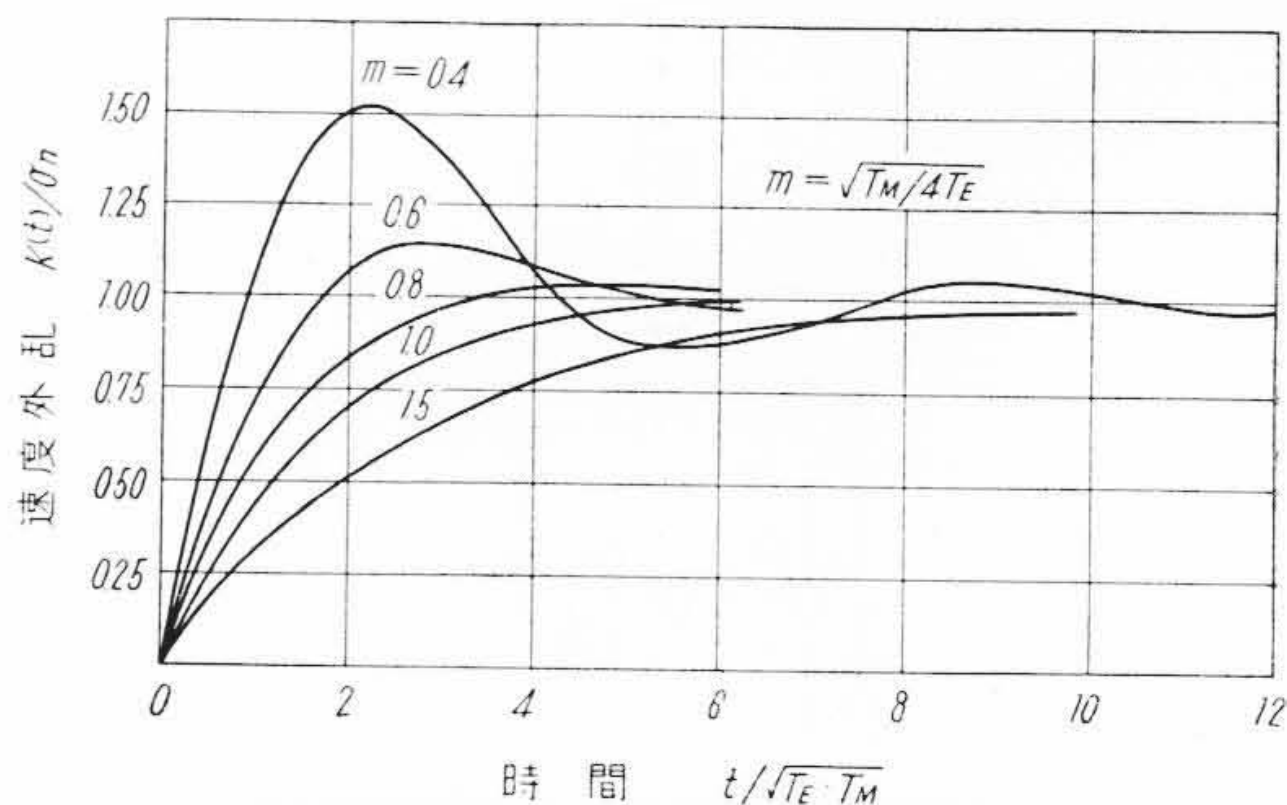
2.3 電機子回路の電氣的時定数が無視できない場合

この場合のブロック線図は第3図になる。この図よりインパクト負荷が与えられたときの速度外乱 $K(t)$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} K(t) &= L^{-1} \frac{\sigma_n(1+T_E p)}{(1+T_M p+T_E T_M p^2)p} \\ &= \sigma_n - \frac{(\alpha^2 + \omega_{in}^2)\sigma_n}{2\alpha\omega_{in}} \varepsilon - \alpha t \sin(\omega_{in} t + 2\Psi_{in}) \dots (18) \end{aligned}$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1/2T_E \\ \omega_{in}^2 &= (1/T_E T_M) - \alpha^2 \\ \Psi_{in} &= 2\tan^{-1}(\omega_{in}/\alpha) \end{aligned} \right\} \dots (19)$$



第5図 電氣的時定数が無視できない場合の速度外乱の様相

この速度外乱の様相を図にかいたのが第5図である。これより明らかなように、

$$T_E > T_M/4 \dots (20)$$

になると、 $K(t)$ は過渡的に振動し、その最大値が終局値 σ_n よりも大きくなる。

そして、この外乱の振動角速度よりも制御系の振動角速度 ω_0 が小さければ、当然この外乱の最大値を補償することが困難になるので、 T_M を T_E に比べて十分大きくすることが必要である。

3. 共通母線方式インパクト降下補償制御の理論

3.1 基本ブロック線図

この装置の原理図は一般に第6図のようになっている。水銀整流器はその出力電圧が一定になるように制御されるので、電動機 M の速度は界磁制御によつて制御される。

すなわち、図において電動機 M に負荷がかかり、その速度 n が降下すれば、パイロット発電機の電圧 E_n が降下して基準電圧 E_s との間に電圧差を生ずる。

この電圧差により増幅器 AMP はその出力を減少し、したがつて励磁機 EX の出力が減少して電動機の界磁が弱まり速度が元の値の近くにまで回復する。

水銀整流器の出力端子電圧 E_t は電流の増加のため降下し、電圧制御系の基準電圧 E_{sv} との間に電圧差を生ずる。

これを増幅器で増幅し、自動移相器 APS に与え格子制御を行つて E_t をほぼ元の値の近くにまで回復せしめる。

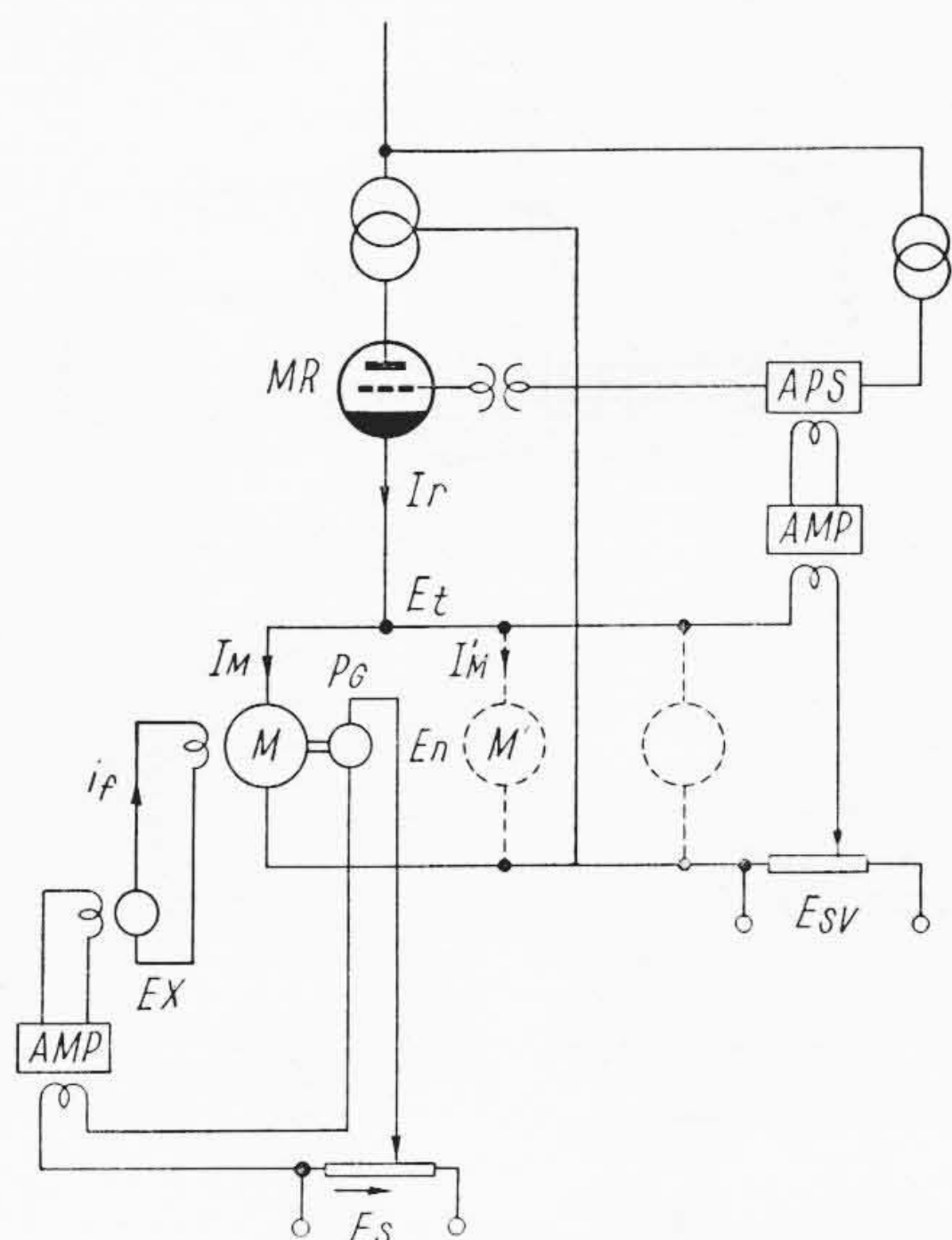
ここで、各個運転方式の場合と同様な記号を用いれば次の諸式が得られる。

$$L_M(dI_M/dt) + R_M I_M = E_t - E_M \dots (21)$$

ここに、

L_M : 電動機電機子回路のインダクタンス (H)

R_M : 同じく抵抗 (Ω)



第6図 共通母線方式インパクト降下補償制御装置
原理図

 I_M, I_M' : 電動機 MM' に流れ込む電流
$$I_r = I_M + I_M' + \dots \dots \dots \text{で水銀整流器出力電流}$$

$$\begin{aligned}\zeta\phi(t) &= E_M(t)/n(t) \\ &= K(i_r) \cdot i_r(t) \dots\dots\dots (22)\end{aligned}$$

ここに,

 i_f : 電動機界磁電流 (A)

$K(i_f)$: 界磁の飽和に関する定数 (web/A)

$$\begin{aligned} \zeta \dot{\phi}(t) I_M(t) &= \tau(t) \\ &= \Theta(dn/dt) - \tau_i(t) \quad \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

$n(t)$ とパイロット発電機電圧 E_n の間の増幅率を A_n とすれば,

$$E_n(t) = A_n \bullet n(t) \dots\dots\dots (24)$$

となり, $E_n - E_s$ と界磁電流 i_f との間の伝達函数を $F(p)$ とすれば

$$Li_f = F(p)L(E_n - E_s) \dots\dots\dots (25)$$

また、 $E_{sv}-E_t$ と水銀整流器の誘起電圧 E_r の間の伝達関数を $F_v(p)$ とすれば、

$$LE_r = F_v(p)L(E_{sv} - E_t) \dots\dots\dots (26)$$

となる。そして、 E_t と E_r の間には

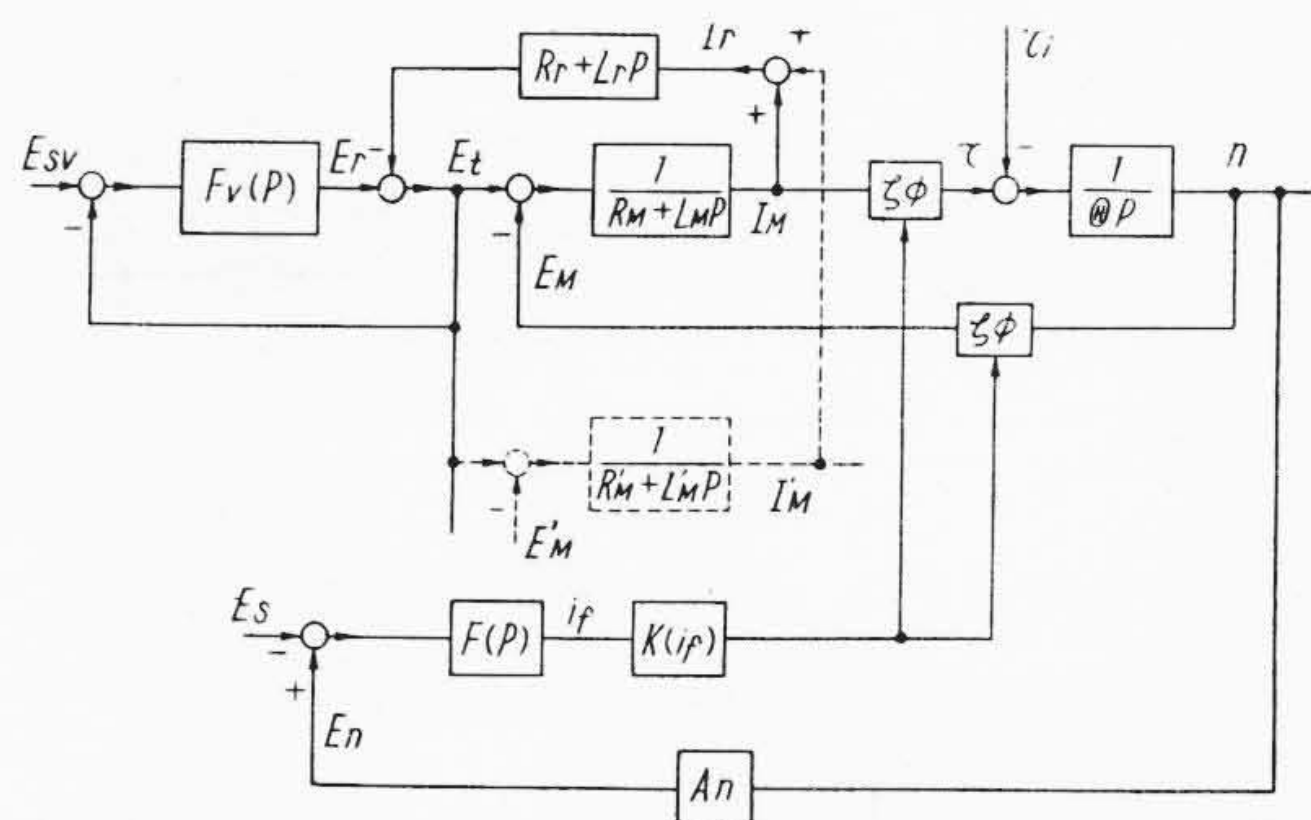
$$L_r(dI_r/dt) + R_r I_r = E_r - E_t \dots\dots\dots (27)$$

ここに,

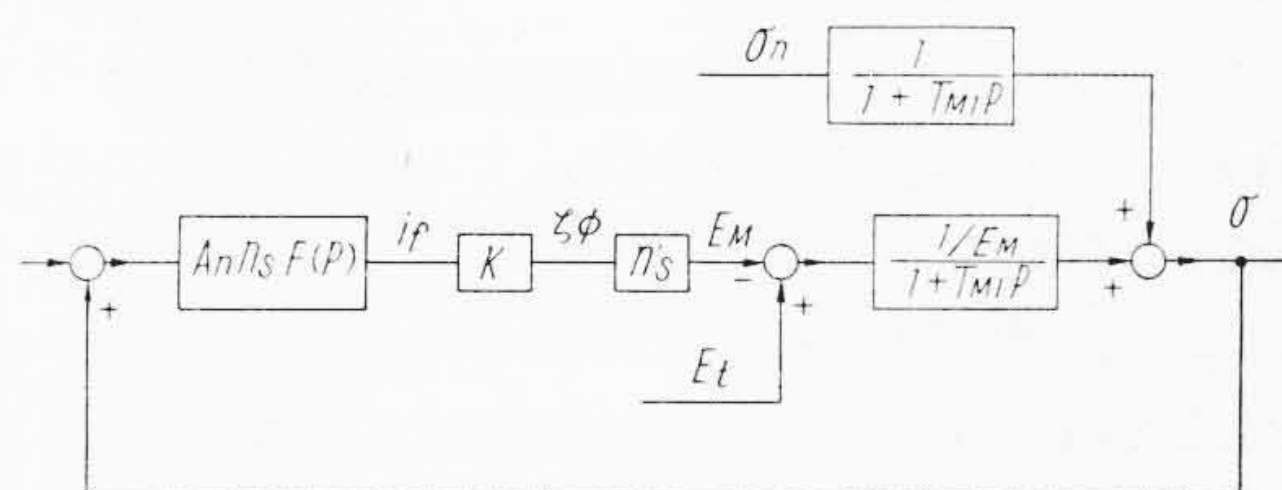
$$I_r = I_M + I_M' \dots\dots \text{で水銀整流器の出力電流 (A)}$$
 $I_M, I_{M'}, \dots$: 電動機 $M, M', \dots$ の入力電流 (A) L_r : 水銀整流器の等価直流インダクタンス (H) R_r : 同じく等価直流抵抗 (Ω)

なる関係が成立する。

以上より，この制御系のブロック線図第7図が得られる。



第7図 共通母線方式インパクト降下補償制御系の基本ブロック線図



第8図 界磁制御系を考察するためのブロック線図

3.2 界磁制御系

第7図から明らかなように、この制御系は二つの系が掛算の形で結合されているので、そのままでは理論的解析が困難である。

ところで、水銀整流器の容量は電動機1台当りの容量に比べて大きく、しかも、その電圧制御装置の応答は界磁制御装置に比べて十分速いから、界磁制御系を考察するときは端子電圧 E_t がほぼ一定と考えてよく、また、インパクト降下の際の電動機界磁束の変化はさほど大きくないから、その間、電動機界磁束をほぼ一定と考えることができよう。しかし、電動機の逆起電力までも一定であるとすれば電動機へ電流が流れ込まないことになるので電動機の逆起電力は変化するものとする。

さらに、電動機のインダクタンス L_M が十分小さいものと考えて省略し、第7図のブロック線図を簡単にして多少変形すれば第8図のブロック線図が得られる。

このブロック線図は各個運転の場合のブロック線図と同様の形をしているので、そこで述べた理論が同様に適用できる。

すなわち、インパクト降下の最大値 σ_i は

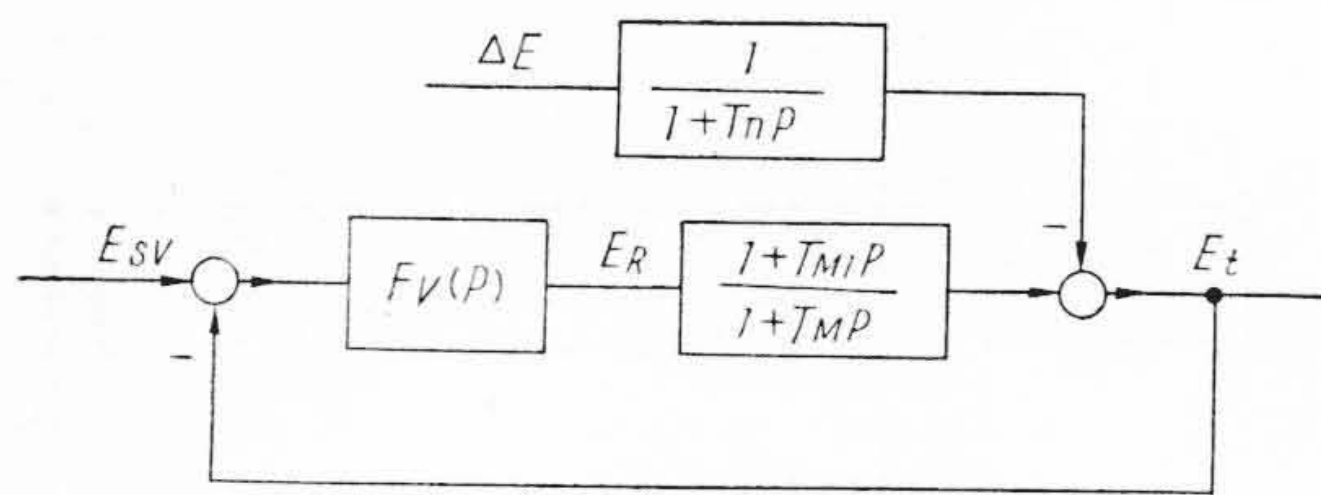
$$\begin{aligned} \sigma_i &\doteq \sigma_n / T_{M_1} \omega_0 \\ &= W_i / \Theta n^2 s \omega_0 \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

ここに、

$$T_{M_1} = R_M \Theta / (\zeta \phi)^2 \text{ (s)} \dots\dots\dots (29)$$

回復時間 T_i は

$$T_i \doteq 4/\omega_0 \dots\dots\dots (30)$$



ΔE : 外乱の大きさ (V) T_n : 外乱の時定数 (s)

$TM_1 = R_M \theta / (\xi \phi)^2$ $TM = (R_r + R_M) \theta / (\xi \phi)^2$

第 9 図 電圧制御系を考察するためのブロック線図

3.3 電圧制御系

共通母線方式のときの速度制御は界磁制御系によつて行われるので、電圧制御系がなくても差しつかえないように考えられる。

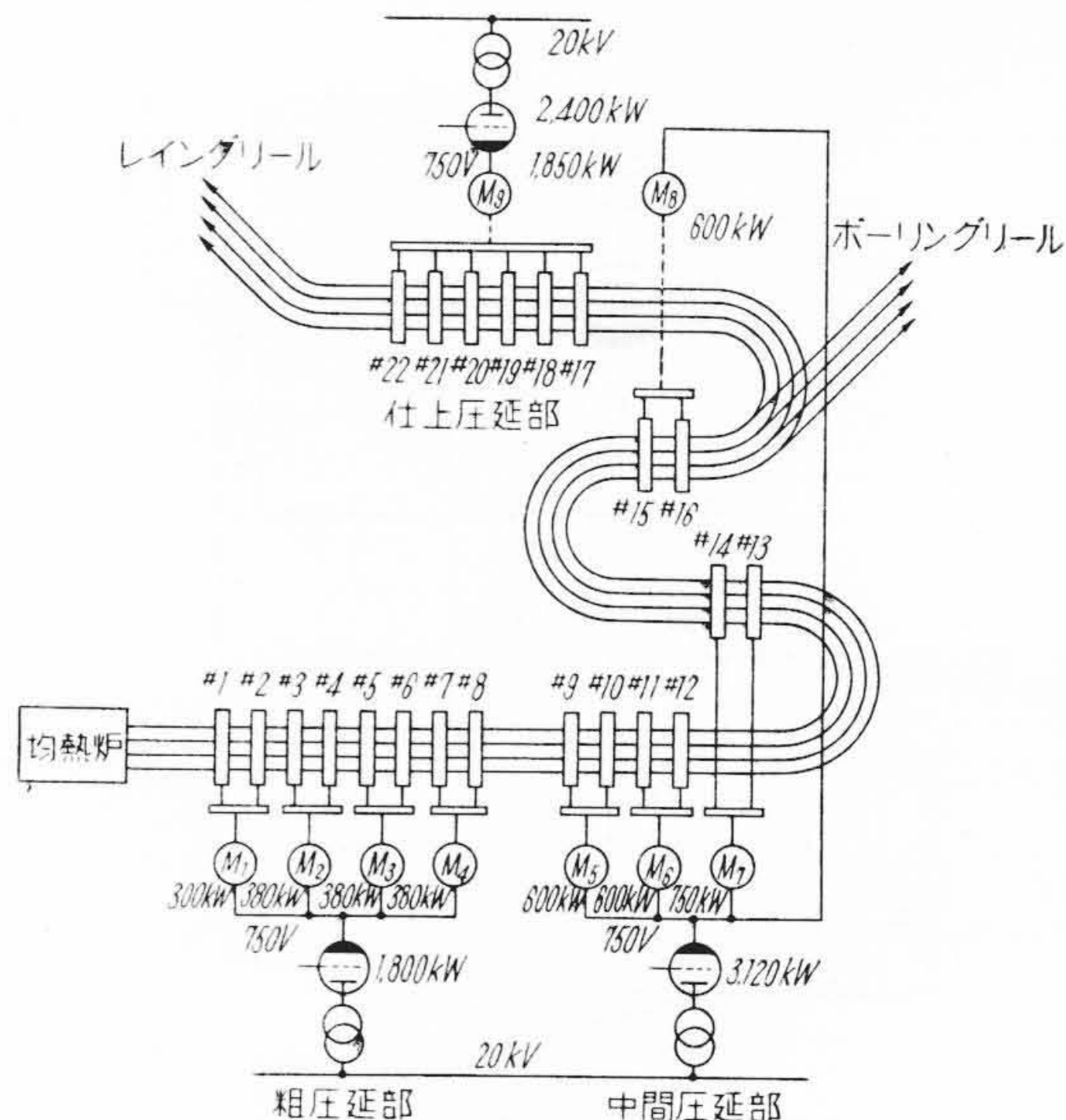
しかし、界磁制御系はその非線型性から界磁電流が変化すると増幅率、時定数などが変化するので、あまり大きな外乱を界磁制御系に与えることは好ましくない。

電圧制御系は負荷電流および電源変動による出力電圧の変化を急速に小さく押えるので、それだけ界磁制御系に与えられる外乱が小さくなり、重要なものである。

この系は界磁制御系に比べ、その応答が十分速いからこの系を考えるとときは界磁が一定であると考えて差しつかえない。さらに、インダクタンス L_r と L_M を省略し、電動機 1 台が接続されている状態について、第 7 図のブロック線図を単純化すれば第 9 図が得られ、各個運転の場合のブロック線図と似た形になる。外乱の時定数はインパクト負荷のときは電動機の機械的時定数となる。

4. 住友金属工業株式会社小倉工場納装置

日立製作所で最近、住友金属工業株式会社小倉工場に納入した連続線材圧延設備用静止レオナードの配置図を第 10 図に示す。



第 10 図 住友金属工業株式会社小倉工場納連続線材圧延設備配置図

圧延機は日立および米国 BLAW, KNOX 社製であり、21½ in 角ビレットより 5 mmφ の線材を最高速度 30 m/s (6,000 fpm) で圧延するもので、素材の圧延列は 4 列までできる。

粗圧延部と中間圧延部に対しては共通母線方式を、仕上圧延部に対しては各個運転方式をとつた。

水銀整流器には封じ切りエキサイトロンの日立標準タンク CF 型を用いた。また、制御装置には信頼性の点から日立標準型の磁氣的広角度自動移相器、磁気増幅器などを用いた。

この装置に要求された主なる性能が第 1 表である。

設計に際しては精度の必要な後段の方で要求性能を十分上回る性能をだすことを目標とし、前記の理論を用いてどのような装置にすべきかを計算した。

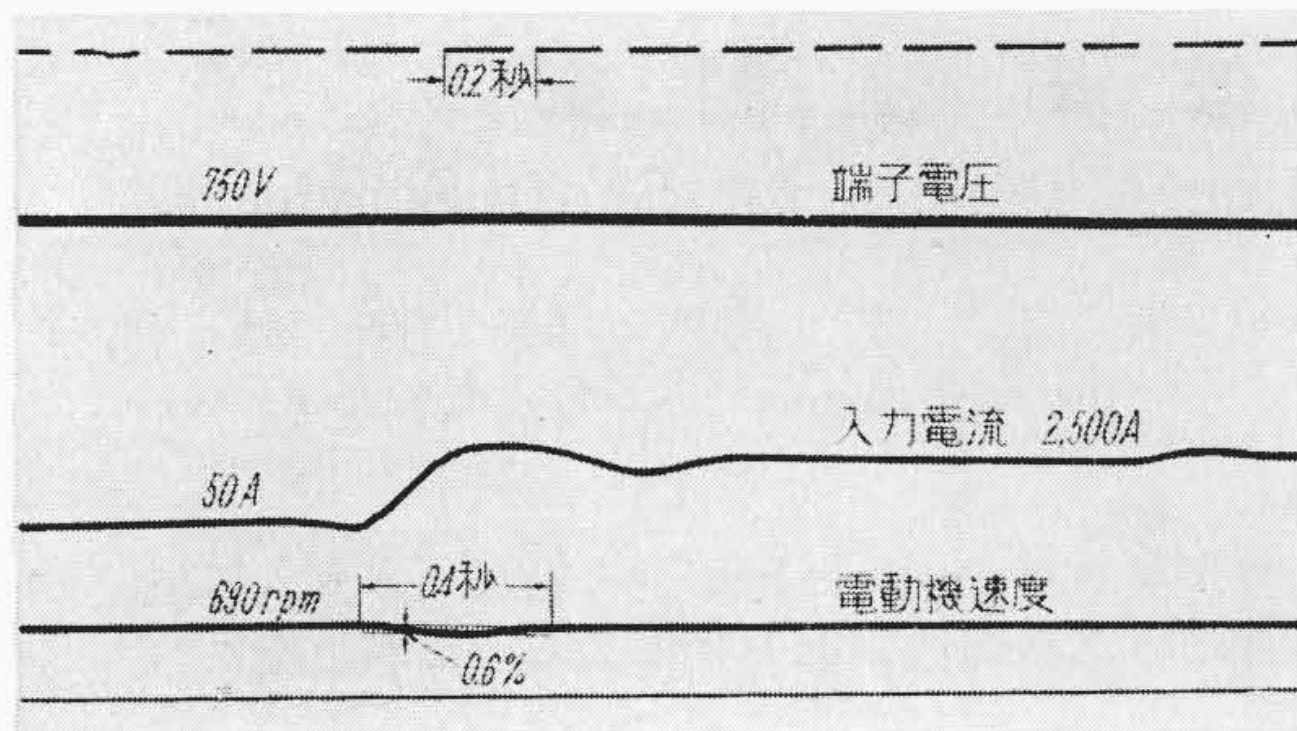
たとえば、1,850 kW 電動機の場合について要求され

第 1 表 要求性能と試験結果の比較

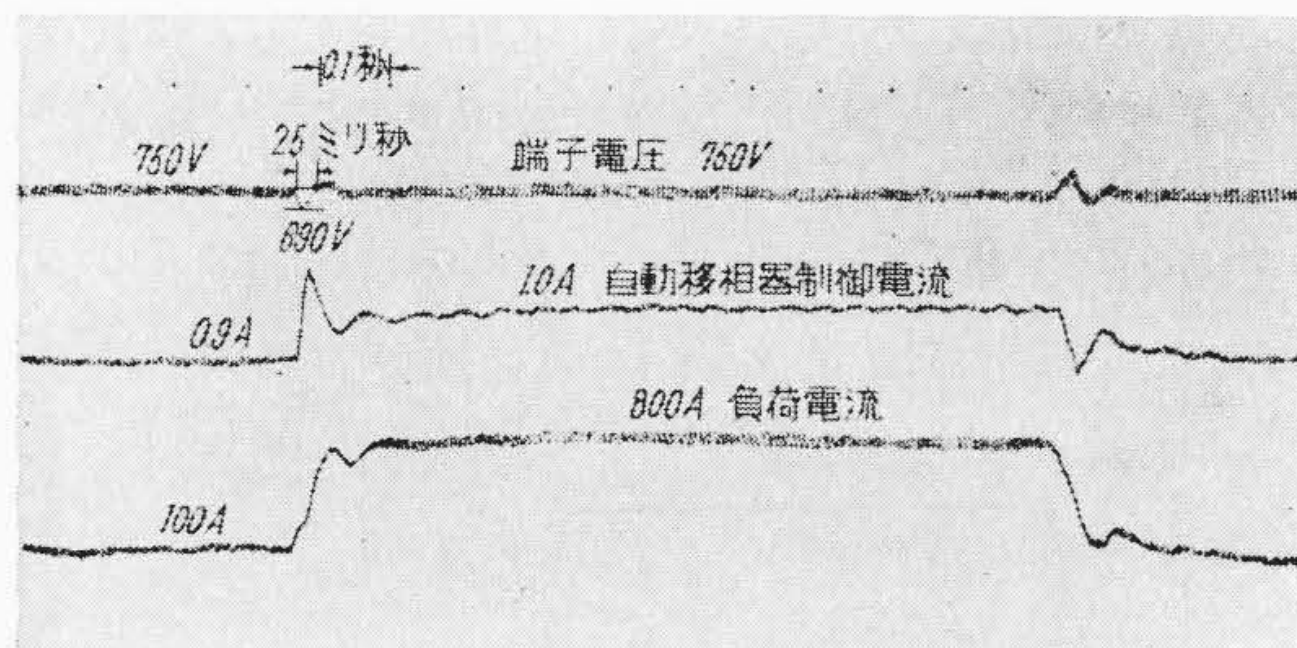
区 別	外 乱	要 求 性 能			試 験 結 果			
		回復時間 (s)	最大降下 (%)	残留偏差 (%)	回復時間 (s)	最大降下 (%)	残留偏差	
AVR	粗 圧 延 部 } 中 間 圧 延 部 }	10% 変 化				0.025		認められず
ASR	330kW 電 動 機 (粗 圧 延 部)	100% 負 荷	1.3	4	0.2	1.3	4	認められず
		33% 負 荷	1.3	1.3	0.2	1.3	1.3	認められず
	600kW 電 動 機 (中 間 圧 延 部)	100% 負 荷	1.3	4	0.2	1.3	2	認められず
		33% 負 荷	1.3	1.3	0.2	1.3	0.7	認められず
	1,850kW 電 動 機 (仕 上 圧 延 部)	100% 負 荷	0.5	2.4	0.2	0.4	0.6	認められず
		33% 負 荷	0.5	0.8	0.2	0.4	0.2	認められず

AVR : 電圧制御系

ASR : 速度制御系



第11図 住友金属工業納線材圧延設備用静止レオナード 1,850 kW 電動機インパクト降下試験オシログラム



第12図 住友金属工業納線材圧延設備用静止レオナード粗圧延部電圧制御系オシログラム

た性能は回転速度 690rpm (73 rad/s) のとき、1,850kW の負荷に対しインパクト降下の最大値 2.4%, 回復時間 0.5 秒以内であるから、これを満足するには (12), (13) および (16) 式より制御系の速度 ω_0 と回転部分の慣性能率 Θ をそれぞれ

$$\omega_0 \geq 4/T_i \geq 8 \text{ rad/s}$$

$$\Theta = W_i/\omega_0 n^2 s \sigma i \geq 1,800 \text{ kgm}^2$$

にすべきことが計算される。

それで余裕をみて、

$$\omega_0 \geq 10 \text{ rad/s}$$

$$\Theta \geq 5,300 \text{ kgm}^2$$

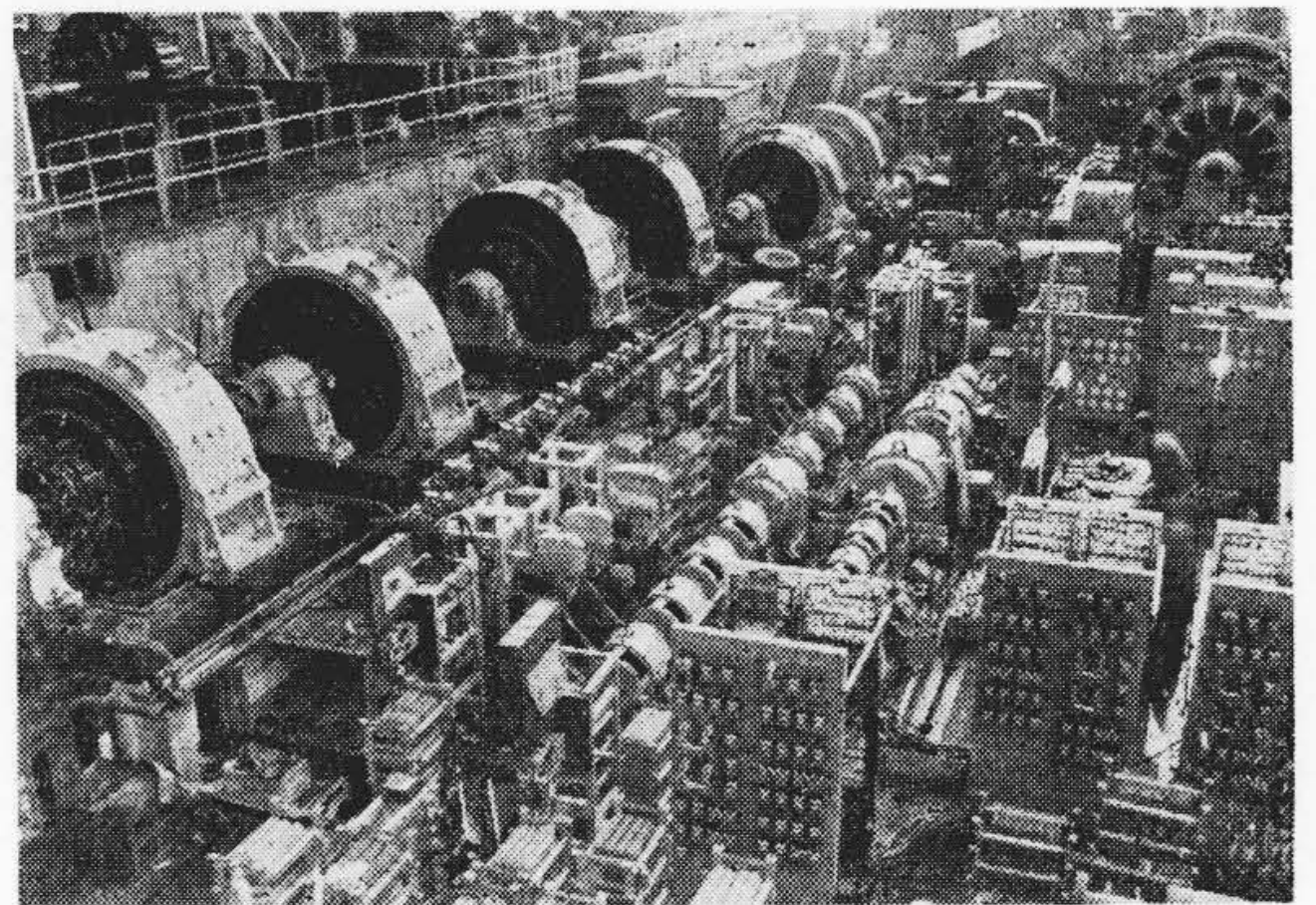
とし、インパクト降下の最大値 0.6%, 回復時間 0.4 秒とすることを計画した (かかる慣性能率は直流機の設計上からみて容易に実現できる値である)。

かかる制御回路をアナログ電気計算機を用いて検討し、さらに日立研究所電動応用実験室で相似実験を行い、この計画が実現可能であることを確めた。

このようにして製作した製品の試験結果が同表右側の欄に記した値で、計画値によく一致した値が得られた。

なお、この試験のオシログラムが第11図である。

また、各個運転の場合の電圧制御系の結果は従来発表



第13図 住友金属工業納連続線材圧延設備用静止レオナード組合せ試験状況

されている回復時間 0.1~0.25 秒に対し、0.025 秒となり残留偏差もほとんど認められないというすぐれた値を示した。

第12図がこの試験のオシログラムで、第13図が本装置の組合せ試験中の写真である。

5. 結 言

以上、連続線材圧延設備用静止レオナードの自動制御の理論および日立製作所において最近納入した住友金属工業株式会社小倉工場納装置の試験結果について紹介した。

すなわち、まず、この装置で最も重要な制御系であるインパクト降下補償制御系について理論的に解析し、その回復時間とインパクト降下の最大値が制御系の速度と回転部分に貯えられるエネルギーに関係することを述べ、次に、住友金属工業株式会社小倉工場納装置にこの理論を適用して計画し、予期どおり要求性能を十分満足する試験結果が得られたことを述べた。

この圧延装置は圧延速度が 30 m/s でわが国で最高であるばかりでなく、世界においても最高速度級に属するもので、このような装置の制御が信頼性の大きい磁気増幅器や磁氣的自動移相器を用いて満足に行われたことは意義のあることと思う。

この制御系の研究ならびに住友金属工業納装置の製作に当り、種々御指導をいただいた住友金属工業株式会社の各位、日立製作所日立工場、日立研究所の関係者の方々に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 小野田：昭30年電気学会東京支部大会予稿
- (2) 小野田，今尾：日立評論本特集号
- (3) 小野田，前川，斎藤：昭32年電気学会連大(184)