

巻取り張力の自動制御

沢井善三郎・稲葉 博

1. まえがき

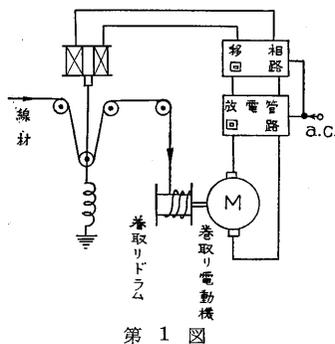
巻取り機は鋼帯圧延機、伸線機等の各種製造機械の主要部として工業的に大きな役割を果たしている。これら巻取り装置においては製品の均一化のため従来から張力制御が行なわれているが、最近になって生産のスピードアップにとともに、ますますその要求が大きくなってきている現状である。

一般に巻取り制御系においては、巻取りの進行にともなう巻太りに対して張力を一定とするばかりでなく、起動、停止を含む加減速時ならびに線速度の広い範囲にわたる変化に対しても張力を設定値に一致させることが望ましい。従来から用いられている制御方式では、以上の要求に対して必ずしも十分な制御が行なわれておらず、安定で精度の高い制御装置の開発が要望されている。

筆者らは直流電動機を主操作機とする巻取り装置において、巻取り張力と線速度の積、すなわち巻取り動力を検出し、これを設定張力と線速度の積である設定動力に一致させる新しい制御方式を考案し、これにつき理論的検討を行なった。またこの場合に必要特殊な掛算回路を利用した巻取り動力測定装置を試作し、これと速度制御可能な送り出し機構を含む電線用小型巻取り装置により実験を行ない、その結果、従来の制御方式に比較して安定性、速応性、精度の点ですぐれていることが認められた。以下、従来の張力制御方式と筆者らの考案になる制御方式との理論的な比較検討を行ない、また実験装置の概要を報告する次第である。

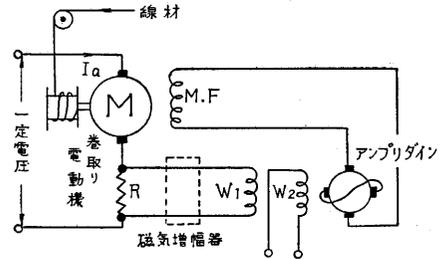
2. 従来の制御方式に対する検討

代表的な張力制御方式として従来から用いられているものに、(イ)張力をダンサーロールによって直接検出し、これを一定とするように操作用電動機を速度を制御する方法(第1図)。(ロ)電機子電圧一定のもとで運転される操作用直流電動機の電機子電流を検出し、これを一定に保つように界磁電流を制御する方法がある(第2図)。



第1図

(イ)は主として伸線機等における比較的小型の巻取り機として用いられており、定常状態ではダンサーロールのスプリング定数により張力は長さの変位として検出



第2図

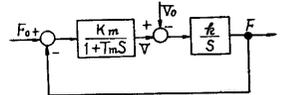
される。この場合、速度制御はワードレオナード方式または放電管等を使用した、いわゆる静止レオナード方式が使用できる。

また(ロ)は圧延機等の比較的大形の巻取り機として実用され、通常ワードレオナード方式等により操作用直流電動機の電機子電圧を一定に保ちつつ、電機子回路に挿入された直列低抵抗によって電機子電流を検出し、これが一定になるように電動機の界磁電流を制御し、電動機を速度を調整するものである。これは電動機の電機子電圧ならびに電機子電流を一定とするので、その積である電機子入力が入力一定となるわけで、結局巻取り動力をほぼ一定とする間接的な張力制御方式と考えられる。

これらの方式は通常、送り出し線速度を一定として考えているので、比較的速い巻取り機においては、外乱のため制御量である張力の過渡的変動が大きくなるという欠点がある。線速度の変化による制御系の応答は巻取り機の張力制御を実施するにあたって、極めて重要な問題点であるので、以下これを主とした検討を行なう。

(イ) 張力をダンサーロールで直接検出する制御方式

本方式は制御の目的である張力を直接検出するもっとも考えやすい方式で、第3図はその原理を説明するため、単純化したブロック線図である。すなわち送り出し線速度と巻取り線速度に差があると、これが積分されて張力変化 F を与えることになるが、この場合張力を検出するダンサーロール



第3図

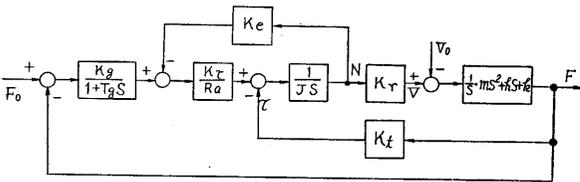
系を単にスプリング定数 k で代表しうるものと考え、この部分の質量、ダンピング係数は、十分小さいものと仮定している。また短時間内を考慮のものとし、巻取りドラムの半径 r は変化しないものとする。ここで送り出し線速度の変化が制御量である張力にどのような影響をおよぼすかを検討してみる。いま第3図で設定張力一定 ($F_0=0$) とし、送り出し線速度の変化 V_0 に対して、張

力の変化 F がどうなるかを求めると

$$F(s) = \frac{\frac{k}{S}}{1 + \frac{Km}{1+T_mS} \frac{k}{S}} V_0(s) = \frac{k(T_mS+1)}{T_mS^2+S+K_mk} V_0(s) \dots\dots\dots (1)$$

となり F は当然 V_0 に比例する。

一般に同一の巻取り装置では、送り出し線速度が大きければ、外乱として現われる線速度の変化もこれに比例して大きくなると考えられる。したがって線速度の小さい巻取り装置では、実際に現われる張力の変化も小さく、このような制御方式でも十分実用になるが、線速度の大きいものになると、張力の過渡的変動が大きくなり問題を生じてくる。すなわちこのような大きな張力の過渡的変動に対しては、必然的にストロークの大きいダンサーロールを使用する必要があり、このようなダンサーロールを使用した場合は単にスプリング定数 k のみで表すことができず、質量 m 、ダンピング係数 h を含む



第 4 図

二次系となるので、制御系はすこぶる振動的になりやすい。第 4 図はワードレオナード方式を採用した場合のブロック線図を示し、これを整理すれば、設定張力 F_0 に対する制御量 F と、送り出し線速度 V_0 に対する張力 F の閉ループ伝達函数として次式をうる。

閉ループ伝達函数

$$F(s) = \frac{K_g K_r K_r (mS^2 + hS + k)}{b_3 S^3 + b_2 S^2 + b_1 S + b_0} F_0 - \frac{K_r K_r (1 + T_g S) (1 + T_m S) (mS^2 + hS + k)}{b_3 S^3 + b_2 S^2 + b_1 S + b_0} V_0 \dots\dots\dots (2)$$

ただし $b_3 = T_g (R_a J + K_r K_f R_a m)$

$b_2 = R_a J + K_r m (K_f R_a + K_g K_r) + T_g (K_r K_r + K_r K_f R_a h)$

$b_1 = K_r K_g + K_r h (K_f R_a + K_g K_r) + K_r K_r R_a k T_g$

$b_0 = K_r k (K_f R_a + K_g K_r), \quad T_m = \frac{R_a J}{K_r K_g}$

一巡伝達函数

$$G(s) = \frac{K_g K_r K_r (mS^2 + hS + k)}{(1 + T_g S) (c_2 S^2 + c_1 S + c_0)} \dots\dots\dots (3)$$

ただし $c_2 = R_a J + K_r K_f R_a m$

$c_1 = K_r K_g + K_r K_f R_a h$

$c_0 = K_r K_r R_a k$

(2) 式からダンサーロール ($mS^2 + hS + k$) により送り出し線速度 V_0 に対して張力 F は特に不安定になりやすいことが明らかで、線速度の大きい場合には使用不能になる。

(ロ) 電機子電流を検出値とする制御方式

以上のべたように前記の方式では、線速度の速い巻取り機では張力の過渡的変動が大きく、制御が困難となることが明らかにされた。これに対し本方式は張力と線速度との積である巻取り動力を一定に保とうとするものであるが、この場合は巻取り用直流電動機の電機子入力が見出されるものと考えることができ、この方式によれば、張力を直接検出するのでないため、前記のようなダンサーロールを必要とせず、したがって比較的高速度の巻取りにもこの方式を採用することができるのである。

しかし一方、この方式も実際の使用にあたり、次のような欠点があげられ、このため制御対象によっては十分満足な制御を行なうことがむずかしくなってくる。

(a) 本方式では巻取り中は電機子電圧を一定とし、界磁制御方式を採用しているので、ワードレオナード方式または静止レオナード方式が利用できず、制御範囲が制限される。とくに界磁制御に共通する欠点として低速度における制御が困難となる、また高速度においてはヒステリシスの影響が大きい。

(b) 電機子電流を一定に保つので電氣的損失は一定であるが、主操作機を含む巻取り機構の機械的損失が回転速度によって異なるので、これが制御精度に影響を与える。

(c) 送り出し線速度に不慮の外乱があった場合には、直接張力に誤差を生ずることになる。

(d) 大型巻取り機では主操作機の入力電圧を一定に保つため、別に定電圧の制御装置を必要とする。

3. 巻取り動力を直接検出し、これを設定動力と一致させる張力制御方式 (第 10 図の試作装置はこの 1 例)

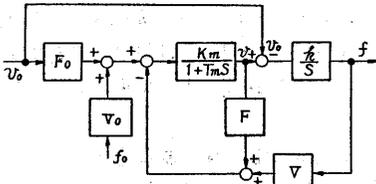
一般に巻取り制御系においては、巻取り張力を F 、線速度を V とすれば巻取りについてやされる動力 P は次式で示される。

$$P = FV = Fr\omega = \tau\omega \dots\dots\dots (4)$$

ここで ω ; 巻取りドラム角速度 r ; 巻取り半径

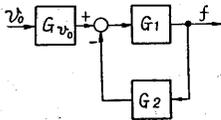
τ ; 巻取り駆動トルク

いま線速度 V を一定とすれば、張力 F は巻取り動力 P に比例し、 P を一定に保つ制御を行なえば、もちろん張力を一定とすることができる。この場合 V が一定であるから、定常的には巻取り半径 r の変化は F に影響しないことがわかる。また送り出し線速度が変化する場合には、これに比例して P の設定値を変更してやることにより、操作用電動機による巻取り速度は、送り出し線速度に追従して変化する。すなわち線速度に対して追値制御の形式となり、定常的には張力が一定に保た



第 5 図

れることになる。第5図はこの方式のもっとも原理的なブロック線図である。動力の設定と検出を行なうため、掛算を行なう部分があるが、ここでは微小変化を考慮することとして、加え算として取り扱っている。いま送り出し線速度を v_0 だけ階段状に変化したときの制御系の応答を考察してみると、変化分 v_0 は一つの設定値変更となり、 $F_0 v_0$ (ここでは F_0 は一定とする) の信号となって、これが制御装置をへて巻取り線速度 v を変化させる。ここで線速度の加え合せ点に直接入ってくる変化分 v_0 と差引きが行なわれる。いま制御装置の時間遅れが十分小さいものとすれば、送り出し線速度の変化分 v_0 に対する巻取り線速度の誤差は張力の変動としての検出をまたず、そのほとんどが修正されてしまう。したがって単に線速度の変化を外乱とみる前記の制御系に比較して、張力の過渡的変動を十分小さくすることが可能である。ただし実際には制御装置の時間遅れを無視することができないので、これに対する補償が必要となってくる。



第 6 図

以上の問題をさらに詳細に説明するため、設定張力を一定 ($f_0=0$) として第5図のブロック線図を整理すれば第6図が得られる。

ここで

$$G_1(s) = \frac{K_m k}{S(1+T_m S + K_m F) + K_m k V} \dots\dots (5)$$

$$G_2(s) = V \dots\dots (6)$$

$$G v_0(s) = F_0 - \frac{1+T_m S + K_m F}{K_m} \dots\dots (7)$$

(5), (6), (7) 式から $f/v_0(s)$ の閉ループ伝達関数を求めると、

$$f/v_0(s) = \frac{F_0/V - F/V - 1/K_m V(1+T_m S)}{a_2 S^2 + a_1 S + 1} \dots\dots (8)$$

$$\text{ただし } a_2 = \frac{T_m}{K_m k V}, \quad a_1 = \frac{1+K_m F}{K_m k V}$$

(8) 式で $S=0$ の定常状態では

$$f/v_0(s=0) = 1/V \{ (F_0 - F) - 1/K_m \} \dots\dots (9)$$

ここで張力の定常値 $F=F_0$ とおけば、(9) 式から $K_m \gg 1$ ならば定常状態における線速度の変化分 v_0 による張力 f の変化を十分小さくすることができる。なお過渡状態においても設定回路に補償要素を加えることにより変化分 v_0 の f への影響を十分小さくすることができるが、実際の制御では動力を検出値としているか

らこの点については加減速動力の補償の項で説明する。

4. 実験装置の説明

(イ) 巻取り動力測定装置

一般に直流電動機を巻取りに用いた場合、界磁電流を一定としたときの発生動力 P_m は次式で示される。

$$P_m = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \tau l \omega + \tau \omega = \frac{1}{r^2} J V \frac{dV}{dt} + \frac{1}{r} \tau_e V + F V \dots\dots (10)$$

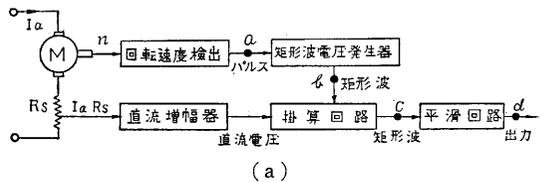
ここで

$J\omega \frac{d\omega}{dt}$; 加減速に必要な動力 $\tau l \omega$; 機械的動力損失 $\tau \omega$; 負荷動力 (巻取り動力)

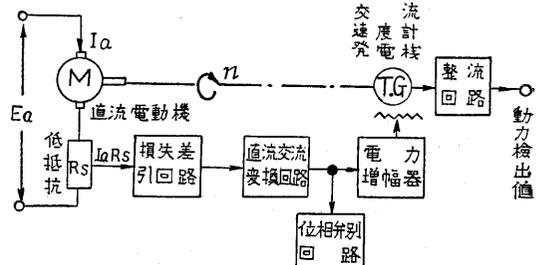
(10) 式から明らかなように巻取りに付やされる動力 FV は、加減速動力および機械的損失動力の補償ならびに差引きが十分な精度で行なうことができれば、電動機の発生動力 P_m から測定することができる。さて電動機動力はトルクと角速度の積で表わされ、トルクは電機子電流 I_a に比例し、角速度は電動機回転速度 n に比例するから結局、 $I_a n$ の積から巻取り動力を求めることができる。

次に電機子電流 I_a と電動機回転速度 n の積を求める実際的な方法について説明する。この場合 I_a に比例した電圧と n に比例した電圧とをそれぞれ別個に得ることは特に困難ではないが、これらの積を作ろうとすると工業的に安心して使用できる計算装置を実現することがなかなかむずかしい。筆者らは積の一方の量が回転速度であるという特殊性を利用して、次のような方法を考案、試作した。

- (a) 双3極管による差働増幅器を掛算素子とする方法⁽¹⁾。
 - (b) 交流速度計発電機を掛算素子とする方法⁽²⁾。
- いずれも工業用測定装置として実用に供しようのものと



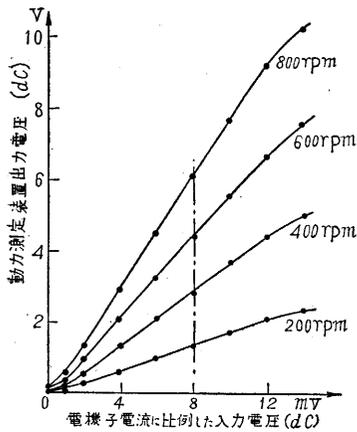
(a)



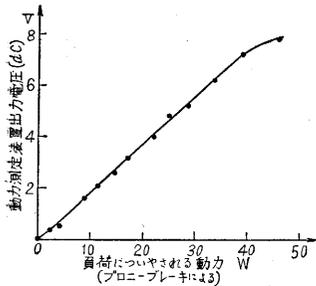
(b)

第 7 図 動力測定装置系統図

考えられるが、実験装置では (b) の方法による試作装置を採用している。この方式は第 7 図 (b) に示すとおり、取扱いが比較的簡単で、時定数 (0.04 sec) も小さいという利点がある。しかしながら (a) の方法と比較して直線性および出力電圧において多少劣っている。



(a) 改良型動力測定装置総合特性 (rpm : 電動機回転速度)



(b) 直流電動機電力と測定装置出力電圧の関係

第 8 図

遅れのために張力の過渡的変動を生ずる。一般に直流電動機を含む制御装置における時間遅れ要素として、もっとも大きいと考えられるものは巻取り電動機を含む巻取り機構の慣性モーメントによるいわゆる、機械的な時定数である本制御方式は動力を検出値としているので(10)式で示す加減速動力 $J\omega \frac{d\omega}{dt}$ を考えなければならない。ここでは (11) 式の第 1 項を設定回路に加えることにより近似的な補償を行なっている。

$$P_i = KV_0 \frac{dV_0}{dt} + F_0 V_0 \dots (11)$$

ここで

P_i ; 設定動力 F_0 ; 設定張力 V_0 ; 送り出し線速度
 そこで、実際の制御装置において、 $KV_0 \frac{dV_0}{dt}$ に比例した信号電圧を作る必要がある。ここでは 2 台の直流速度計発電機を送り出しキャプスタンロールまたは送り出し電動機に連結し (第 10 図参照)、一方の発電機で送り出し線速度 V_0 に比例した電圧を作り、この電圧を他方の発電機の界磁巻線に供給する。したがってこの発電機の出電圧は V_0 の 2 乗に比例し、この電圧を微分回路

に加えれば加減速補償動力に比例した信号電圧を得ることができる。さて実際の制御系においては、機械的な時定数のほかに、電気的な時定数が存在するし、また直流速度計発電機の界磁電流を変化させるので、当然ヒステリシスの影響をうけるから補償を完全に行なうことは困難であるが、実験の結果では十分な補償効果のあることが認められた。

なお、制御系の回路的な吟味により、急激的な加減速に対しても正しい補償を行ないうる見込みであるので、目下検討中である。
 次に機械的損失動力 $\tau_l \omega$ の差引きについて説明を行なう。機械的損失動力は近似的に回転速度に比例すると考えられるので損失トルク τ_l に比例した一定の係数と回転速度の積を動力測定装置の中で差引きを行なっている。第 9 図は 0.5kw 直流電動機の機械的損失を実測した結果であり、広い範囲にわたりこれが回転速度に比例していることがわかる。

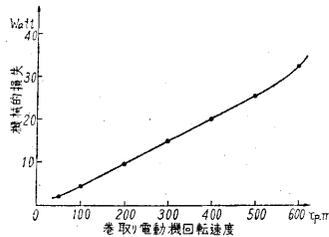
(ロ) 加減速動力および機械的損失動力の補償

本方式においても (8) 式に示したように線速度が加速的に変化した場合、制御装置の時間

遅れのために張力の過渡的変動を生ずる。一般に直流電動機を含む制御装置における時間遅れ要素として、もっとも大きいと考えられるものは巻取り電動機を含む巻取り機構の慣性モーメントによるいわゆる、機械的な時定数である本制御方式は動力を検出値としているので(10)式で示す加減速動力 $J\omega \frac{d\omega}{dt}$ を考えなければならない。ここでは (11) 式の第 1 項を設定回路に加えることにより近似的な補償を行なっている。

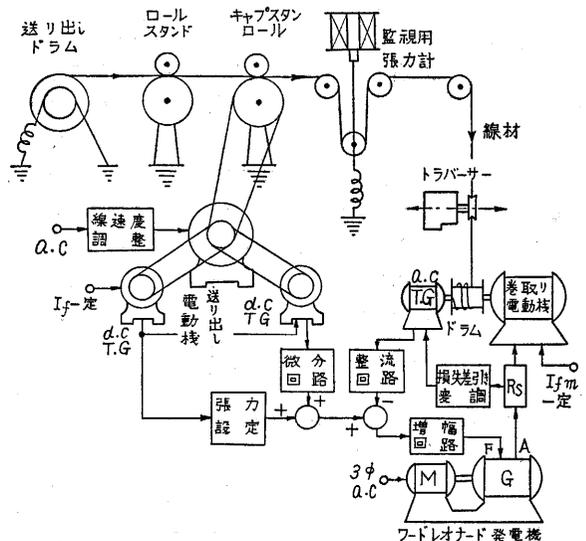
なお、制御系の回路的な吟味により、急激的な加減速に対しても正しい補償を行ないうる見込みであるので、目下検討中である。

次に機械的損失動力 $\tau_l \omega$ の差引きについて説明を行なう。機械的損失動力は近似的に回転速度に比例すると考えられるので損失トルク τ_l に比例した一定の係数と回転速度の積を動力測定装置の中で差引きを行なっている。



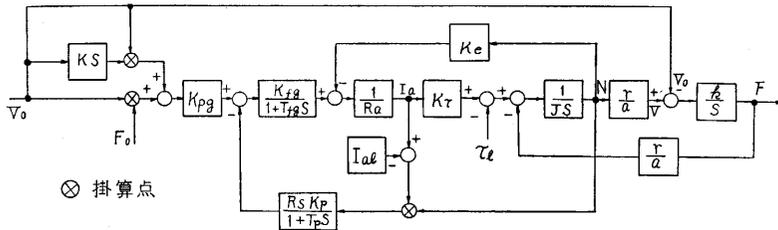
第 9 図

第 10 図は筆者らの試作になる電線用小型巻取り装置の系統図である。この装置は速度制御可能な送り出し機構とワードレオナード方式による制御装置、および直流電動機を主操作機とした巻取り装置で構成されている。線速度下降の際、線材が勝手に放出されることを防止するため、送り出しドラムをバンドブレーキによって制動し、また 2 段のロールスタンドに線材を挿入する際にも、なるべくすべりがないうよう、必要な注意がはらわれ



第 10 図

ている、また図に示すダンサーロール系は張力を監視するために挿入したもので、スプリング定数に比して、質量およびダンピング係数が小さく、制御系に対して振動的な影響のないように考えられている。実験として主に使用した線材は裸硬銅線 0.65%φである。張力の設定範囲は 0~4 kg, 送り出し線速度は 0~2 m/s まで行なうことができる。巻太りによる張力の偏差は今のところ巻取りドラム 1:2 で約 5% である。



第 11 図 動力を検出値とする張力制御方式ブロック線図

次に第 10 図をブロック線図で示すと第 11 図を得る。ここで線形化のため微小変動域をとって整理した結果、一巡伝達関数 $G(s)$ および設定張力 f_0 , 送り出し線速度 v_0 に対する張力 f の関係が求まる。

$$G(s) = K_C \frac{(A_2 S^2 + B_1 S + 1)}{(1 + T_{fs} S)(1 + T_p S)(A_2 S^2 + A_1 S + 1)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで

$$K_C = K_{f_0} K_p R_s N / R_a$$

$$A_2 = \frac{J}{k} \cdot \frac{a^2}{r^2}, \quad A_1 = \frac{K_r K_e}{k R_a} \cdot \frac{a^2}{r^2}$$

$$B_1 = \frac{60 K_r (I_a - I_{a1})}{2\pi k N} \cdot \frac{a^2}{r^2}$$

また

$$f(s) = K_F \frac{(1 + T_p S)}{C_4 S^4 + C_3 S^3 + C_2 S^2 + C_1 S + C_0} f_0$$

$$+ K_V \frac{D_3 S^3 + D_2 S^2 + D_1 S + D_0}{C_4 S^4 + C_3 S^3 + C_2 S^2 + C_1 S + C_0} v_0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

(12) 式について数値を入れて検討した結果、制御系は安定であることが確かめられたが (12), (13) 式による制御系の解析はある程度の判断はできるとしても、正確な動特性を知ることは、かなり困難である、このような制御系においては掛算回路をもつアナログ計算機によって解析するのが有利であろう。またさらに高速度の巻取り装置としての実用化試験も計画しているので、これらについてはいずれ次の機会に報告したいと考えている。

以上、動力を検出値とする制御装置の概要を報告したが、この方式の特徴としては、

- (a) 巻取り動力を直接検出しているのでワードレオナード方式または静止レオナード方式の採用が可能である。さらに従来の方式は送り出し線速度の変化を外乱として考えていたが、これに対し追値制御の形式をとっているので広い範囲にわたり制御を円滑に行なう

ことができる。

- (b) 加減速動力および機械的損失動力の補償ならびに差引きを行なうことにより、制御系の速応性が増大し、また制御精度の向上が認められた。

- (c) ストロークの大なるダンサーロール系を必要としないので比較的高速度において制御系を安定にすることができる。

- (d) 実用面では動力測定装置の簡単化により大型にも小型にも使用することができ、とくに高速度の巻取り機として優れた性質をもっている。

しかし現在のところ次のような問題がまだ残っている。

- a) 動力測定装置が制御用検出器として、やや取扱いに不便な点がある。

- b) 加減速動力の補償および機械的損失動力の差引きが正確でないのでこれによる張力誤差がある。

- c) 掛算回路を含むため制御系の解析が困難である。

これらについては実施例がふえれば、次第に解決の道が見出されていくことであろう。

5. 結 言

以上、巻取り制御系において、従来から用いられている制御方式で、もっとも制御に悪い影響をおよぼすと考えられる送り出し線速度に対する系の応答を主とした理論的な検討の結果と、筆者らによって考案された動力を検出値とする制御方式の紹介ならびに実験装置の概要について報告した。従来巻取り機の制御については実用を主とし、基礎的研究が欠けていた点が少なくない。本報告はその意味で一歩ふみ込んだつもりであるが、巻取り機の制御に関心をもつ方々に、多少なり参考になれば幸いである。

なお本研究を行なうにあたり鈴木幹二（現在新三菱重工勤務）、鄭炳漢（大学院学生）両君の熱心な協力を得た。また実験装置の試作に対しては藤倉電線株式会社の援助によるところが大きい。ともに心から感謝の意を表する次第である。

本研究は昭和 32, 33 年度科学研究費によったことを付記する。
(1960. 2. 20)

参考文献

- (1) 沢井, 稲葉, 鈴木: 直流電動機の機械的出力測定 (生産研究 昭 33. 9)
- (2) 沢井, 稲葉: 直流電動機の改良型動力測定装置 (生産研究 昭 34. 9)
- (3) 沢井, 稲葉, 鈴木: 電動巻取り機の制御 (自動制御連合講演会 昭 34. 11)