

水銀整流器式交流電気機関車の粘着性能改善のための電圧制御装置

Automatic Voltage Regulator for Mercury Arc Rectifier Locomotives

小野田 芳 光*
Yoshimitsu Onoda

杉 本 光 昭**
Mitsuaki Sugimoto

伊 沢 省 二***
Shōji Izawa

五 島 正 巳***
Masami Gotō

浅 野 弘****
Hiroshi Asano

内 容 梗 概

機関車にとって重要な性能の一つである粘着性能を向上させるため、ED-71 形機関車には電動機の電機子電圧を一定に制御する電圧制御装置が装備されている。

日立製作所では、日本国有鉄道のご指導ご援助のもとに、この制御装置に必要な総合増幅度などを理論的に求め、次にそれらの条件を使用状態で安定に満足する装置の研究を行ない所要の性能のものを開発し、製作納入した。

1. 結 言

粘着性能は機関車にとって最も重要な性能の一つである。水銀整流器式交流電気機関車は粘着性能がほかの機関車に比べすぐれているが⁽¹⁾、この性能をさらに向上させるため、東化本線に使用されている ED-71 形水銀整流器式交流電気機関車には電動機の端子電圧を一定にする電圧制御装置が施されている。

ここでは、この装置の設計のために行なった理論的な考察と実験結果の二、三について報告する。

2. 電圧制御による粘着性能改善の原理

2.1 機関車の粘着性能

よく知られているように、機関車が負荷を引張るには動輪と軌条の間に摩擦、すなわち粘着が必要で、粘着がなければ動輪は空転するのみである。

この粘着によって生ずる粘着力は動輪と軌条の間の粘着係数が大きいほど大きく、また動輪軸上の重量が大きいほど大きい。いま、粘着力を F 、粘着係数を μ 、軸重を W とすれば次の式が成立する。

$$F = \mu W \quad \dots\dots\dots (1)$$

引張力 f がこの粘着力よりも小さければ機関車は負荷を引張って走行しうる。

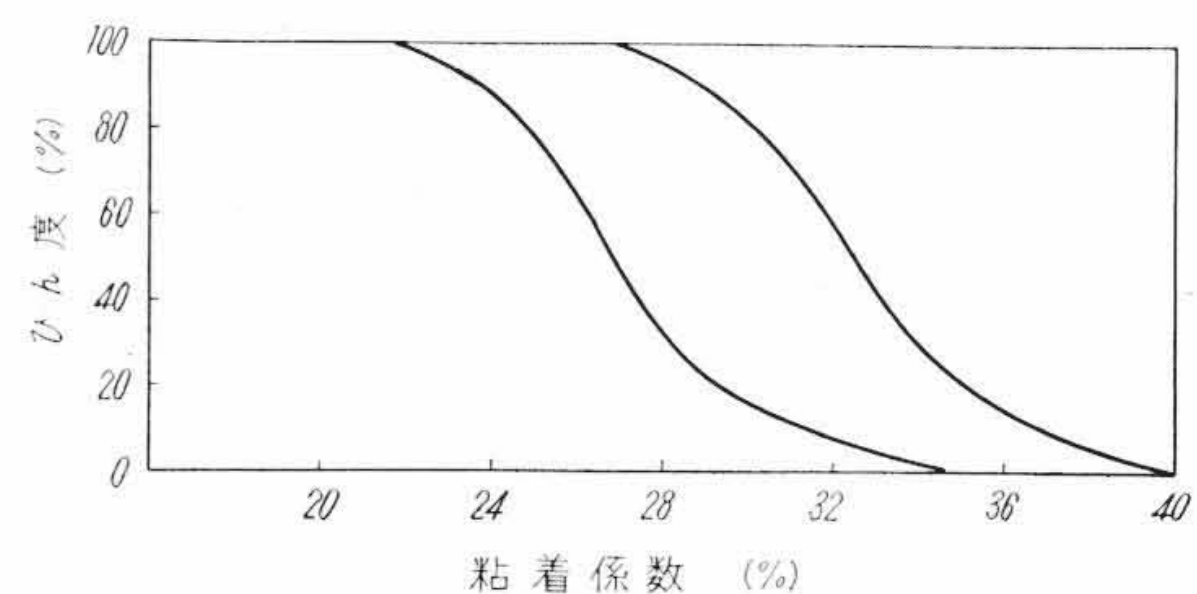
しかし、その際も動輪は全く空転しない訳でなく、微小であるがすべりながら回転している。すなわち、機関車の動輪は力行中絶えず微小空転しているものであるといわれている⁽³⁾。

動輪の引張力が粘着力以内であると、この微小空転は大きくなることはないが、動輪の粘着力は絶えず変化しており、引張力を相当小さくしないとそのような条件を満足することが困難である。

第1図は粘着係数とその粘着係数が期待できるひん度の関係の一例で、ガウスの確率曲線にしたがった関係が得られる⁽³⁾。また、第2図は各種の状態における粘着係数の実測例である⁽⁴⁾。

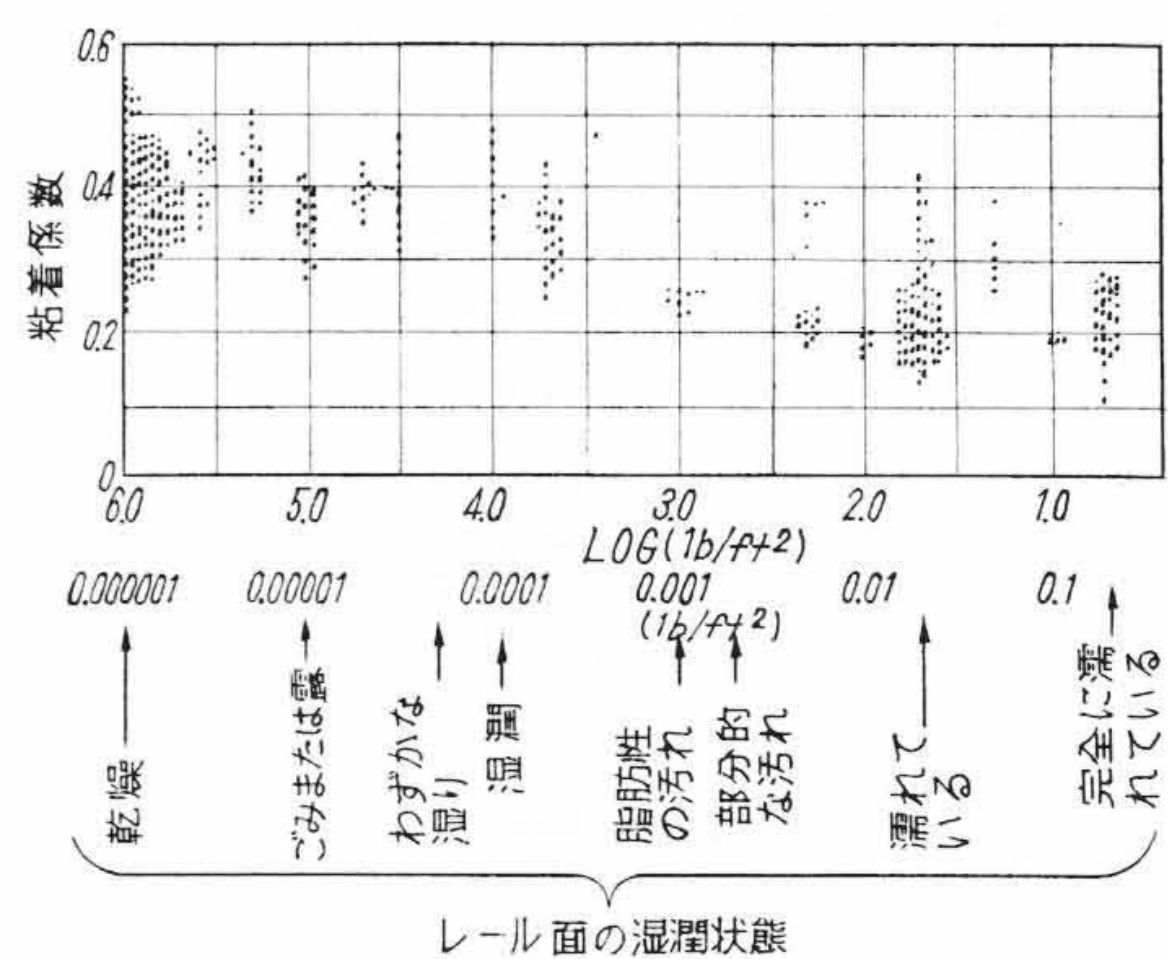
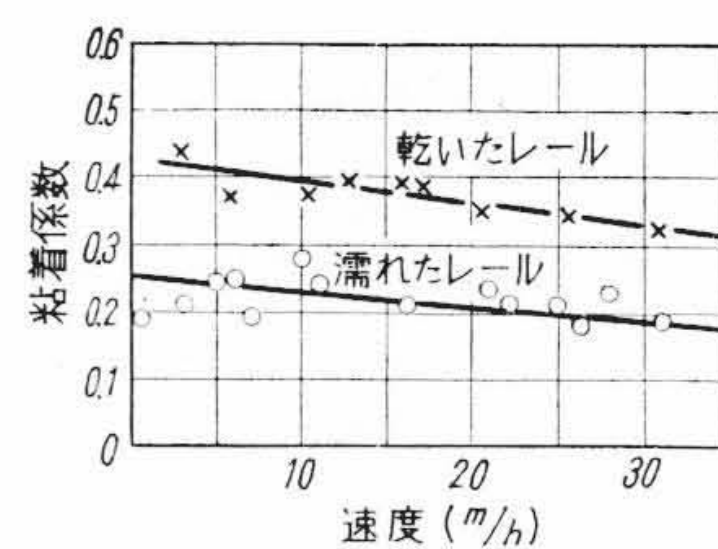
これらの図から、粘着力の大きな状態は少なく、大きな瞬間が生じても次の瞬間には小さくなっていることが知られる。

それゆえ、引張力を常に粘着力以内にするには粘着力の最大値の半分程度以内にしなければならない。しかし、そのような引張力では実際上不十分で、さらに大きな粘着力まで利用することが望ま



a, b 曲線の相異は状態および駆動装置の相異による

第1図 起動時の粘着係数ひん度曲線



レール面の湿潤状態

第2図 各種の状態における粘着係数の実測

い。

引張力が粘着力よりも大きくなると動輪の空転速度は増加する。そして、台車に上下振動が生じ第3図に示すように粘着力はいよいよ減少する。

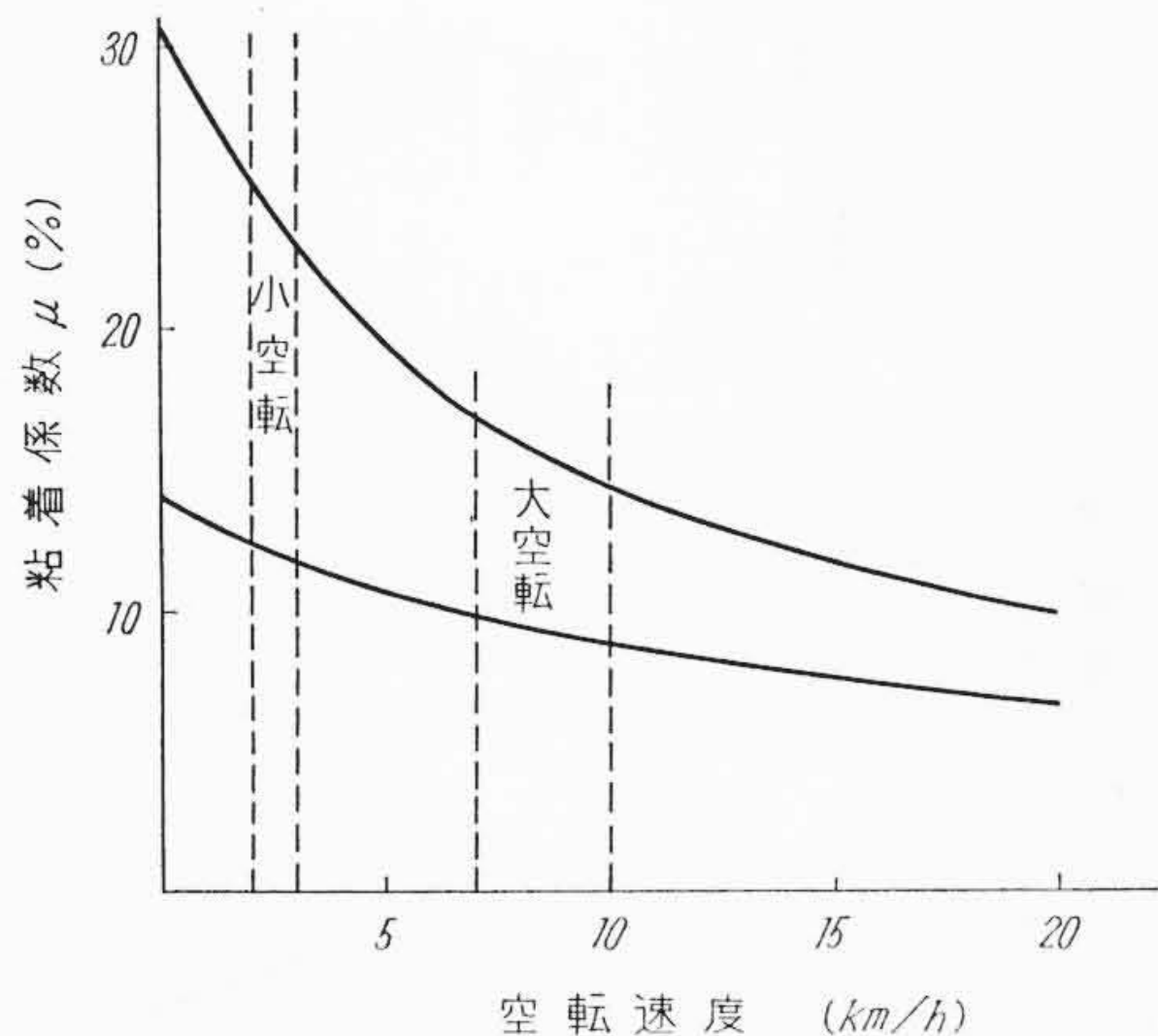
空転速度が 2~3 km/h 程度までは小空転と称し台車の振動もさほど大きくなく粘着係数もあまり減少しないが、7~10 km/h 程度の空転になると台車の振動が激しく粘着係数が大きく減少し、かつ機器を損傷するに至る。

* 日立製作所日立研究所水戸分室

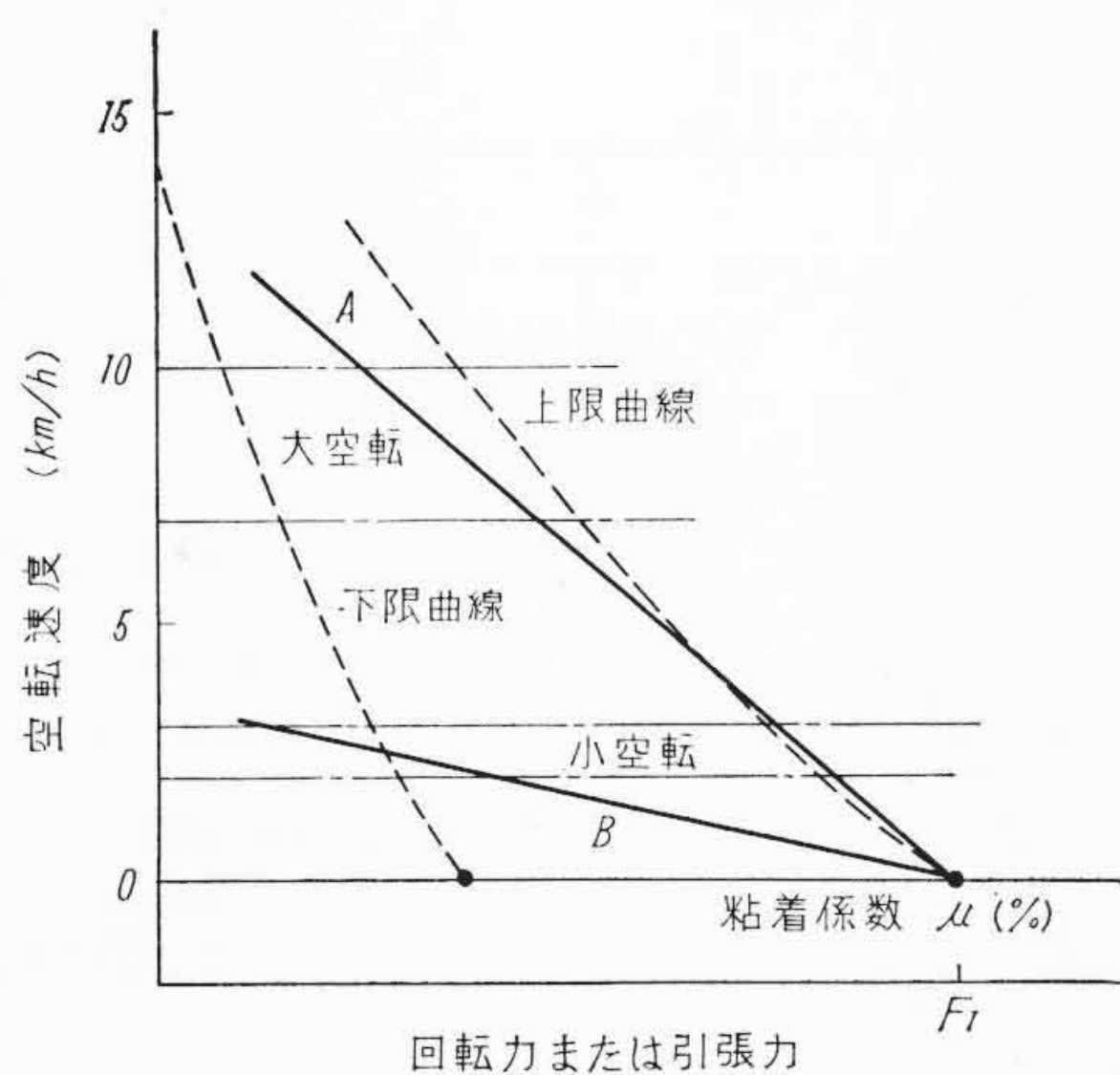
** 日立製作所国分工場

*** 日立製作所水戸工場

**** 日立製作所日立工場



第3図 空転速度と粘着係数の関係



第4図 電動機速度特性の粘着性能に及ぼす影響

したがって、引張力よりも粘着力が減少した場合、空転速度があまり増加せず小空転以内にとどまるような駆動装置を使用するならば、常に粘着力の付近まで引張力に利用することができ、このような駆動装置を使用した機関車は粘着性能がよいことになる。

次に、これを関氏らの方法により説明する⁽⁵⁾。

空転速度対粘着係数の上限と下限の曲線を描くと第4図点線のようにになる。上限以上の引張力をだすことは空転するのみで意味がないから動輪周引張力は F_t を限度とする。

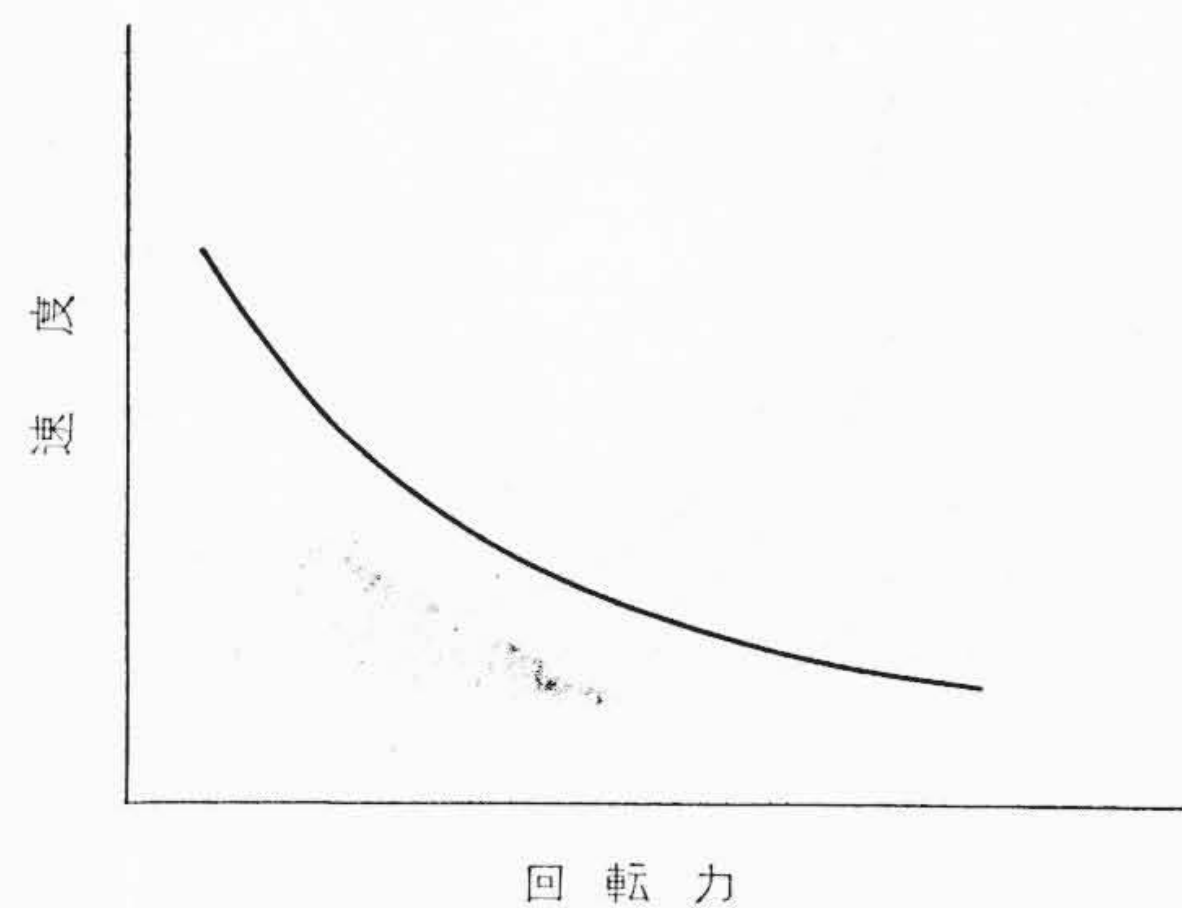
この上限の状態で行っているとき粘着係数が下限まで減少したとすれば、動輪の速度は電動機速度対回転力特性にしたがって増加し空転する。このとき、電動機速度対回転力特性が実線Aのようであれば空転速度は大きくなるが、Bのようであれば大きくなる。

もしも、その空転速度の増加が 3 km/h 以内の小空転の範囲であれば機器に影響を及ぼすことが少なく、粘着係数がふたたび上限の方へ移行するか、あるいは引張力が減少すると容易に再粘着力を行を続けることができる。

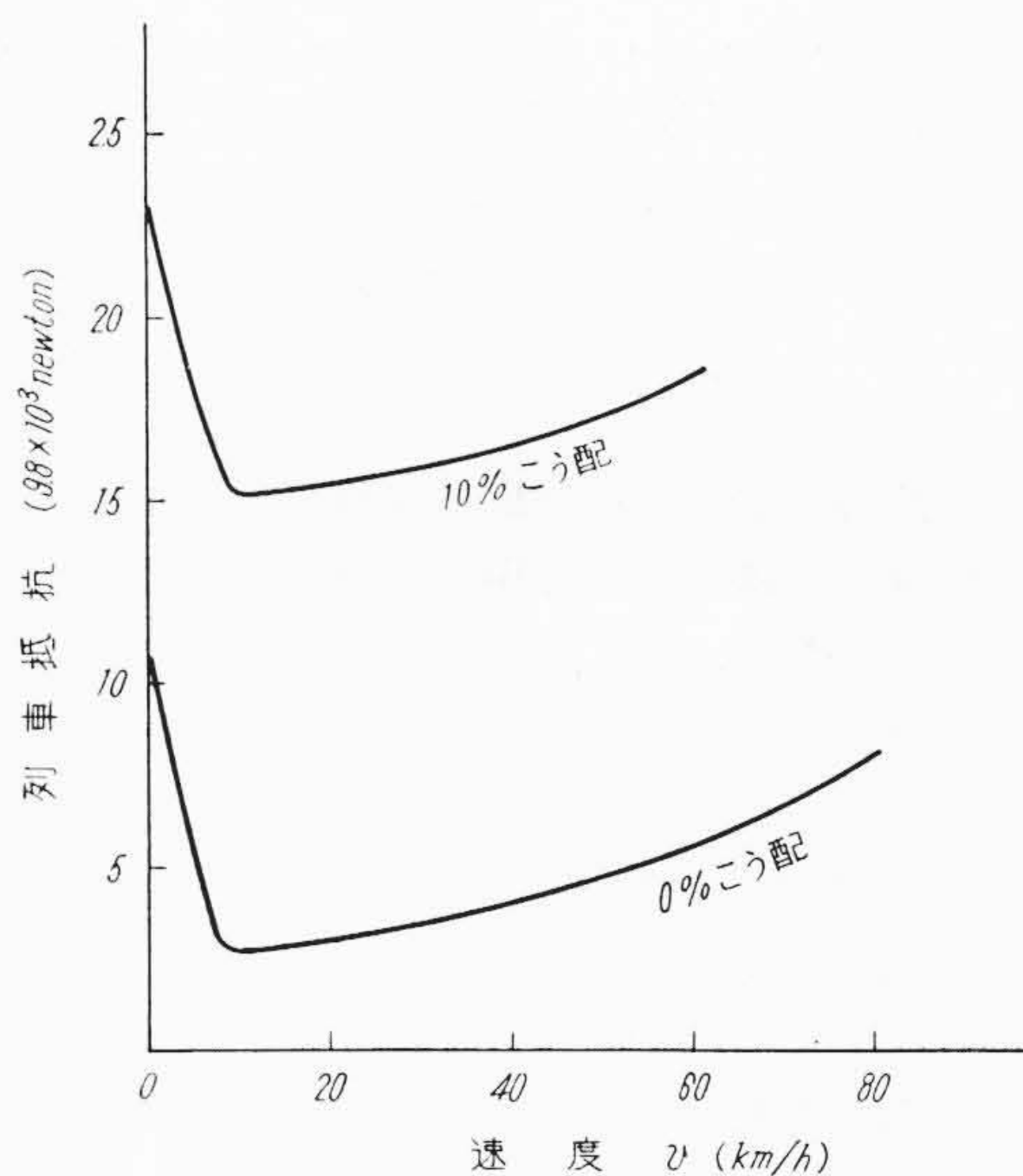
2.2 直流直巻電動機の電圧制御

水銀整流器式交流電気機関車では直流直巻電動機を使用しているが、直流直巻電動機はその速度対回転力特性が周知のように第5図のようになっている。粘着性能の方からは好ましいものではない。しかし、その特性から重負荷のときに必然的に速度が低下し大きな回転力を発生しうするため直流電気機関車の電動機として広く採用されており、水銀整流器式交流電気機関車にも採用されている。

ここではどのように制御すると直流直巻電動機の特長を生かし



第5図 直流直巻電動機速度対回転力特性



機関車 64 t, 荷重 1,200 t の場合 (ED-71 の例)

第6図 速度対列車抵抗の関係

て、しかも粘着性能を改善しうるか検討してみる。

列車抵抗は第6図に示すように起動のときに大きく、起動すると次第に減少し 10 km/h 程度の速度で最小になる。それからふたたび漸増するが、速度の大きなところでは粘着力が減少して空転しても慣性のため走行を続け、空転速度が増加する前に線路の条件などが変わって粘着力の大きな瞬間が生じ再粘着することが多い。

また、スリップがひん発したならば引張力を粘着力以下に減少して再粘着させ力行を続けることができる。

さらに、速度の大きいところでは粘着性能をよくしても、

$$\text{引張力} \times \text{速度} = \text{仕事} \dots \dots \dots (2)$$

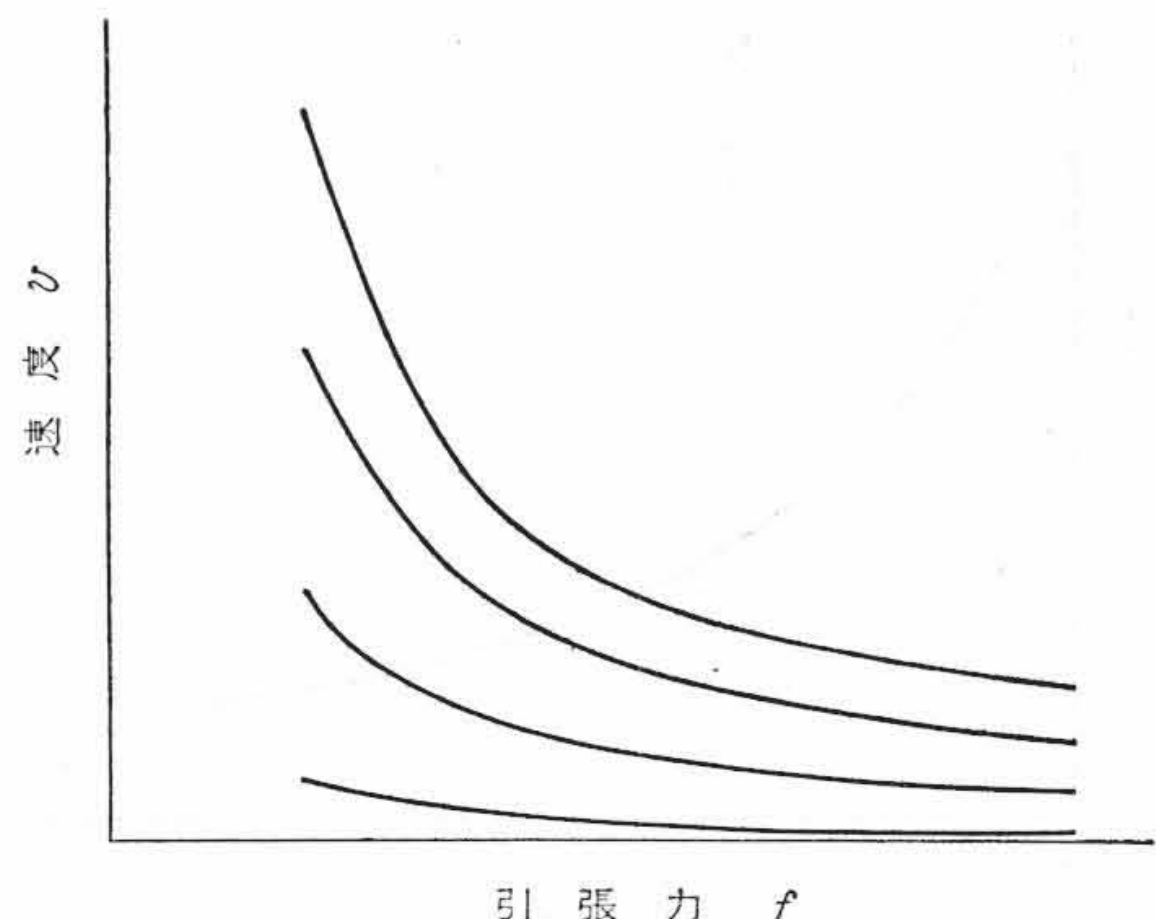
であるから、大きな出力が必要である。電動機の出力には限界があるので、速度の大きいところでは引張力を減少せねばならない。すなわち、粘着性能は起動のときがもっとも重要で、速度の大きいところではさほど重要でない。速度の大きなところでは、むしろ引張力が速度の増加とともに減少することが必要となってくる。

このような速度対引張力特性を図示すれば第7図のように速度の低いところで平坦、速度の高いところで双曲線的に傾斜をもつ多数の曲線群となる。そして、起動のときは下の曲線群より上の曲線群へなんらかの手段で移動させねばならない。

このことは、直流直巻電動機の電機子回路抵抗を 0 にして、その直流電源電圧を起動のとき 0 からしだいに高くすることができるならば実現できる。

次に、これを証明する。

直流直巻電動機の逆起電力 E_M (volt) は単位回転磁束を $\zeta\phi$ (volt・s), 回転速度を n (rad/s) とすれば、



第 7 図 電気機関車用電動機として理想的と考えられる特性

$$E_M = \zeta \phi \cdot n \dots\dots\dots (3)$$

電機子電流を I_M とすれば,

$$\zeta \phi = k(I_M) \cdot I_M \dots\dots\dots (4)$$

ここに, $k(I_M)$ は I_M の変化によって変化する定数である。

したがって, (3) 式は,

$$E_M = k(I_M) \cdot I_M \cdot n \dots\dots\dots (5)$$

一方, 直流電源電圧, すなわち水銀整流器の等価誘起電圧を E_R , 電機子回路等価全抵抗を R とすれば, 定常状態において,

$$E_R - E_M = R I_M \dots\dots\dots (6)$$

(5) (6) 式から定常状態で次の関係式が得られる。

$$n = \frac{E_R}{k(I_M) \cdot I_M} - \frac{R}{k(I_M)} \dots\dots\dots (7)$$

また, 回転力 τ_M には,

$$\begin{aligned} \tau_M &= \zeta \phi \cdot I_M \\ &= k(I_M) \cdot I_M^2 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

なる関係があり, 回転力 τ_M と引張力 f の間には,

$$f = \eta \cdot S \cdot \tau_M / r \dots\dots\dots (9)$$

なる関係があるので, (7) 式は次のようになる。

$$n = \sqrt{\frac{\eta \cdot S}{k(I_M) \cdot r \cdot f}} \cdot E_R - \frac{R}{k(I_M)} \dots\dots\dots (10)$$

ここに, η : 回転力の伝達効率

S : 歯 車 比

r : 動 輪 半 径

ここで, R を 0 として n と f の関係を考えれば第 7 図に示した理想とする特性と同様の傾向になることは明らかである。

しかし, 実際には R が 0 ということはあり得ないから, n と f の関係が第 8 図のようになり空転しやすくなる (直流電気機関車では直流電源電圧 E_R が架線電圧そのもので一定の高い値であるから, 起動のときは R を大きくしなければならないのでさらに空転しやすくなる)。

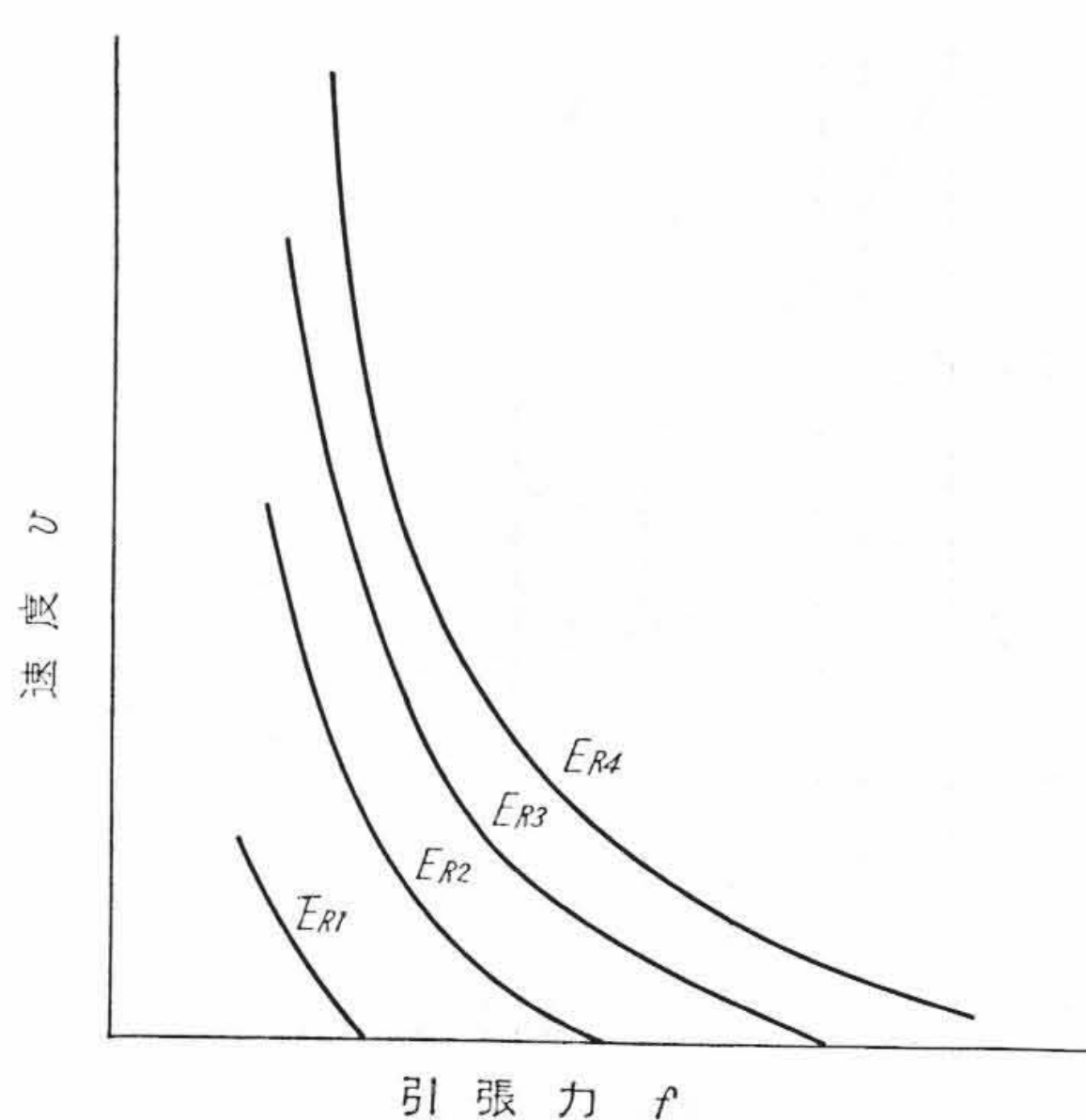
ところで, R を 0 にすることは不可能であるが, 電動機の電機子抵抗はほかの電機子回路抵抗に比べて十分小さいから, 電動機の電機子電圧を一定にする電圧制御を行ない, 起動のときその制御系の基準値を 0 から漸次大きくすることにより理想特性にほぼ近い特性を得ることができる。すなわち, 電機子回路抵抗 R を電動機の内部抵抗 R_M と電源側の抵抗 R_1 にわけて考えれば, 端子電圧 E_1 は次のようになる。

$$\begin{aligned} E_1 &= E_R - I_M R_1 \\ &= E_M + I_M R_M \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

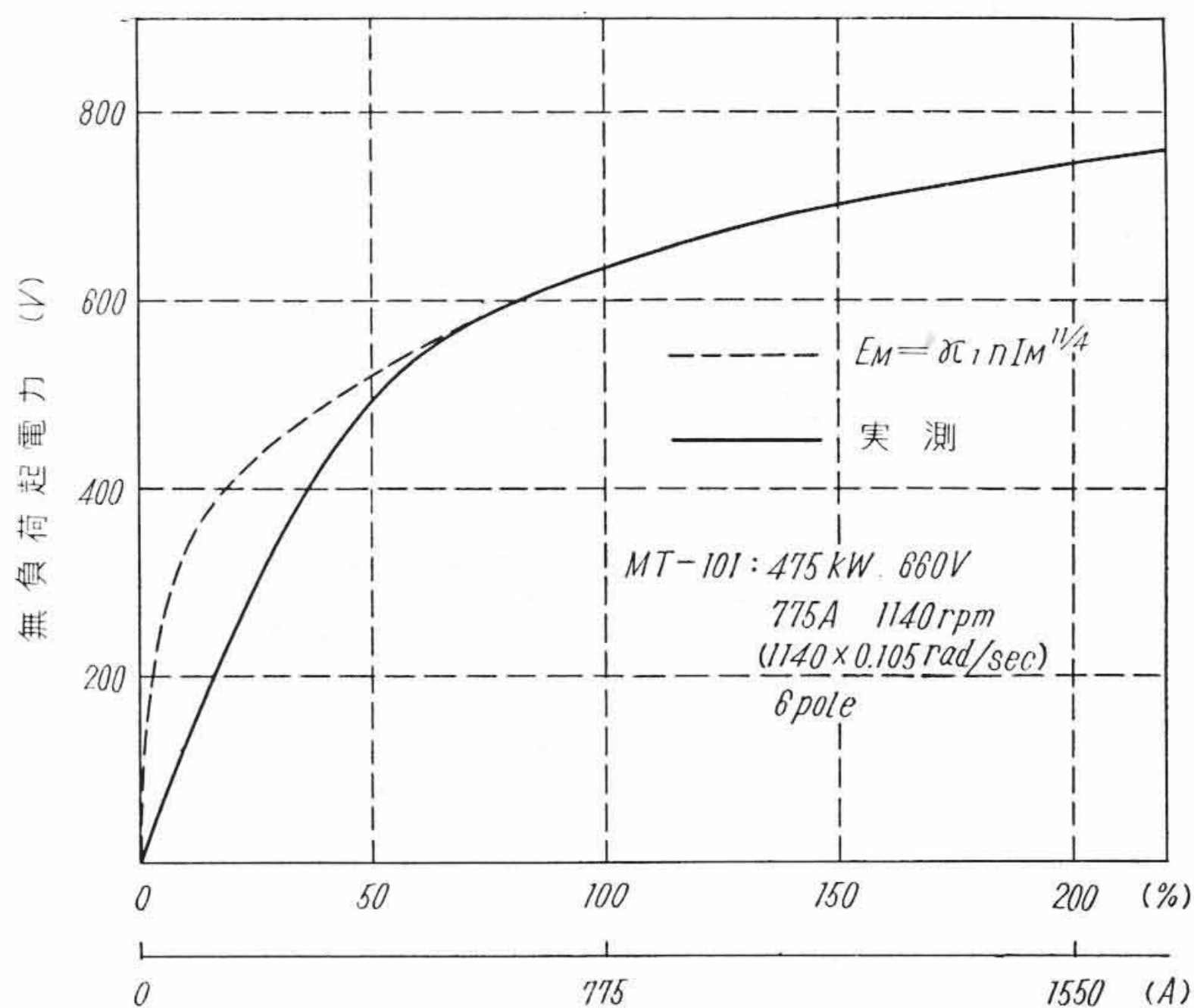
電動機電流 I_M が I_{M0} の状態から 0 になると端子電圧は

$$\Delta E_1 = I_{M0} R_1 \dots\dots\dots (12)$$

だけ増加するが, 端子電圧を一定に制御する電圧制御系があり, その総合増幅度が A であると端子電圧の増加は



第 8 図 電機子回路抵抗 R が 0 でないときの直流直巻電動機の特 性



第 9 図 MT-101 の無負荷飽和曲線

$$\Delta E_1' = I_{M0} R_1 / (1 + A) \dots\dots\dots (13)$$

に押えられ, 電源側の抵抗が見かけ上,

$$R_1 / (1 + A)$$

となり, 電機子回路の抵抗が見かけ上,

$$R_M + R_1 / (1 + A)$$

となる。

3. ED-71 形交流電気機関車の電圧制御装置

3.1 所要総合増幅度の計算

ED-71 形交流電気機関車で電動機に MT-101 を用いた場合の電圧制御系の所要総合増幅度を計算する。

MT-101 の無負荷飽和曲線は第 9 図に示すものである。これから, 電流が定格値の 50% (388A) から 200% (1,550A) の間で成立する $\zeta \phi$ と I_M の近似式を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} \zeta \phi &= E_M / n = k(I_M) \cdot I_M \\ &\doteq (630 / 1,140 \times 0.105) (I_M / 775)^{1/4} \text{ (volt} \cdot \text{s)} \\ &\doteq \kappa_1 I_M^{1/4} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ここに, $\kappa_1 = 1 \text{ (volt} \cdot \text{s amp}^{-1/4})$

したがって, 回転力の伝達効率を 95%, 歯車比 S を 5.47, 動輪半径 r を 0.54 m とすれば電動機台数は 4 台であるから機関車の全引張力 f_t は,

$$\begin{aligned}
 f_t &= 4f \\
 &= 4 \cdot \gamma S \zeta \phi I_M / r \\
 &= 38.3 \kappa_2 I_M^{5/4} \text{ (newton)} \dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

ここに、 $\kappa_2 = 1$ (newton amp^{-5/4})

重力単位系に換算すると f_t は次のようになる。

$$f_t \doteq 3.9 \kappa_3 I_M^{5/4} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $\kappa_3 = 1$ (kg amp^{-5/4})

(16) 式を図示すれば第 10 図となる。

粘着力は上述のように一定のものでないが、これまでの報告などから粘着係数 μ が 50% 以上になることはほとんど期待できない。すなわち、 $\mu = 50\%$ は粘着係数のほぼ最大限で、偶然このような値が得られてもただちに μ が小さくなり空転するものと考えられる。

空転速度が大きくなると第 13 図のように μ は低下するが、2~3 km/h 以内に押えることができるならば、いろいろな条件を考えても 50% であったものが 15% 以下にならないであろう。

ED-71 形機関車の全重量は 64 ton 程度であるから、 $\mu = 50\%$ のときの全粘着力 F_t は 32 ton となり、 $\mu = 15\%$ のとき 9.6 ton となる。

したがって、起動時において引張力が 32 ton から 9.6 ton へ減少しても動輪周速度が 2~3 km/h 以内にとどまるならば大空転に至ることはなく、スリップしても容易に再粘着しうるものと考えられる。

ところで、電圧制御を行わないとき、この空転速度がどの程度になるか計算してみる。

(16) 式もしくは第 10 図より、

$$f_t = 32 \text{ ton のとき } I_M = 1,350 \text{ A}$$

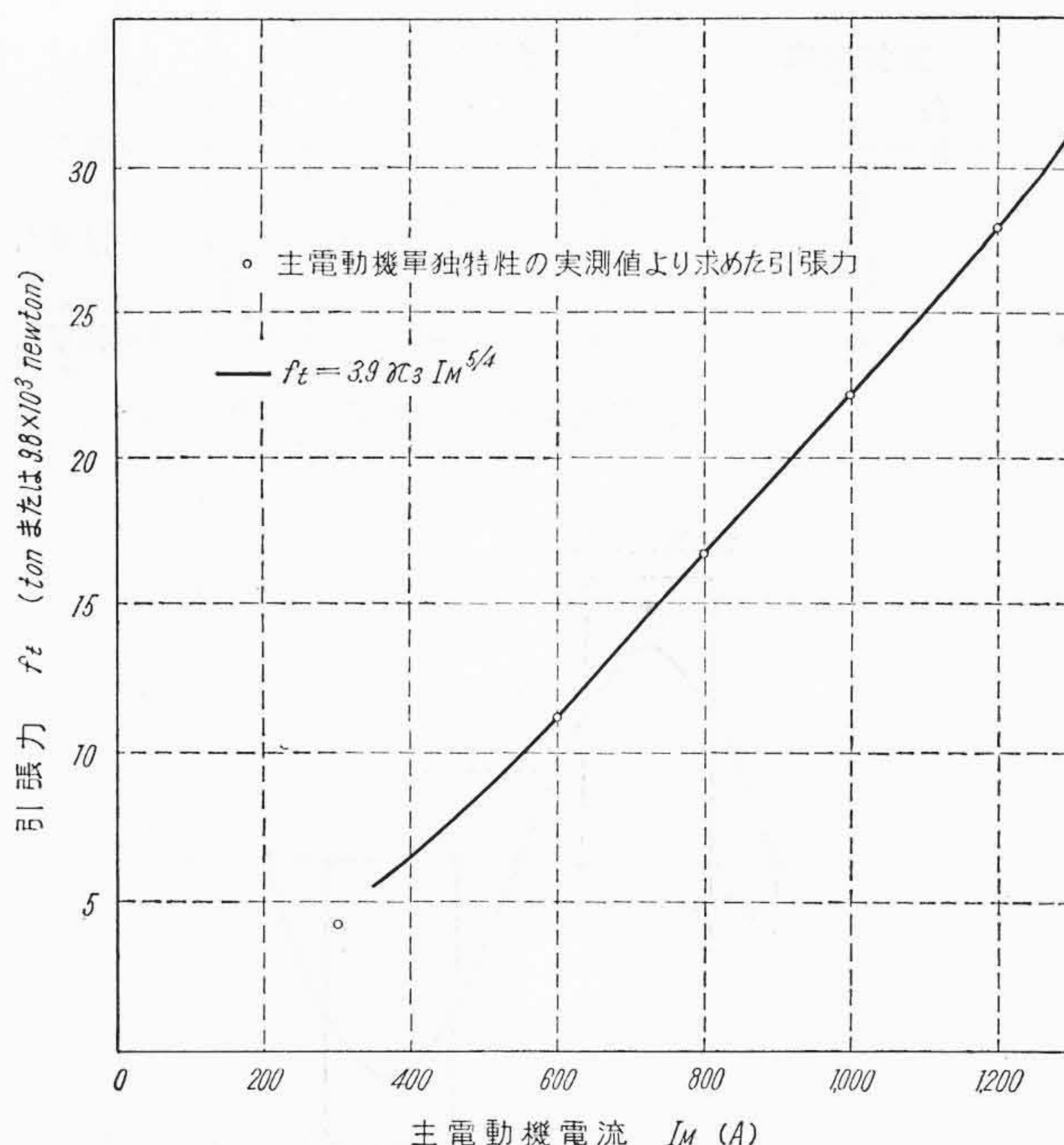
$$f_t = 9.6 \text{ ton のとき } I_M = 500 \text{ A}$$

である。

電機子回路の等価全抵抗 R を 0.2Ω (計算値) とすれば、(7)(14) 式から、

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{E_R}{k(I_M) \cdot I_M} - \frac{R}{k(I_M)} \\
 &= \frac{E_R}{\kappa_1 I_M^{1/4}} - \frac{0.2}{\kappa_1 I_M^{-3/4}} \dots\dots\dots (17)
 \end{aligned}$$

$I_M = 1,350 \text{ A}$ で $n = 0$ であるから、



第 10 図 ED-71 の主電動機電流対引張力の関係

$$\begin{aligned}
 E_R &= 0.2 \times 1,350 \\
 &= 270 \text{ V} \dots\dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

したがって、 $I_M = 500 \text{ A}$ では、

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{270}{500^{1/4}} - 0.2 \times 500^{3/4} \\
 &= 36.5 \text{ rad/s} \dots\dots\dots (19)
 \end{aligned}$$

歯車比 5.47、動輪半径 0.54 m であるから、 $n = 36.5 \text{ rad/s}$ のときの速度 v は、

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{36.5 \times 0.54 \times 3,600}{5.47} \\
 &= 13 \text{ km/h} \dots\dots\dots (20)
 \end{aligned}$$

となる。空転速度が 13 km/h では粘着係数 μ はさらに小さくなり、空転速度はさらに増大する。

次に、電動機の電機子電圧が一定になるように電圧制御を行ない、制御系の総合増幅度を 4 にした場合について検討する。

電動機の電機子抵抗は 0.01Ω であり、この抵抗を除く電機子回路等価全抵抗は約 0.19Ω であるので、総合増幅度を 4 にすると電機子回路の等価全抵抗はみかけ上、

$$\frac{0.19}{1+4} + 0.01 = 0.048 (\Omega) \dots\dots\dots (21)$$

となる。

このとき、引張力が 32 ton から 9.6 ton へ減少したものとして動輪周速度を求めると、

$$v = 3 \text{ km/h} \dots\dots\dots (22)$$

となって、小空転の範囲にとどまることが知られる。

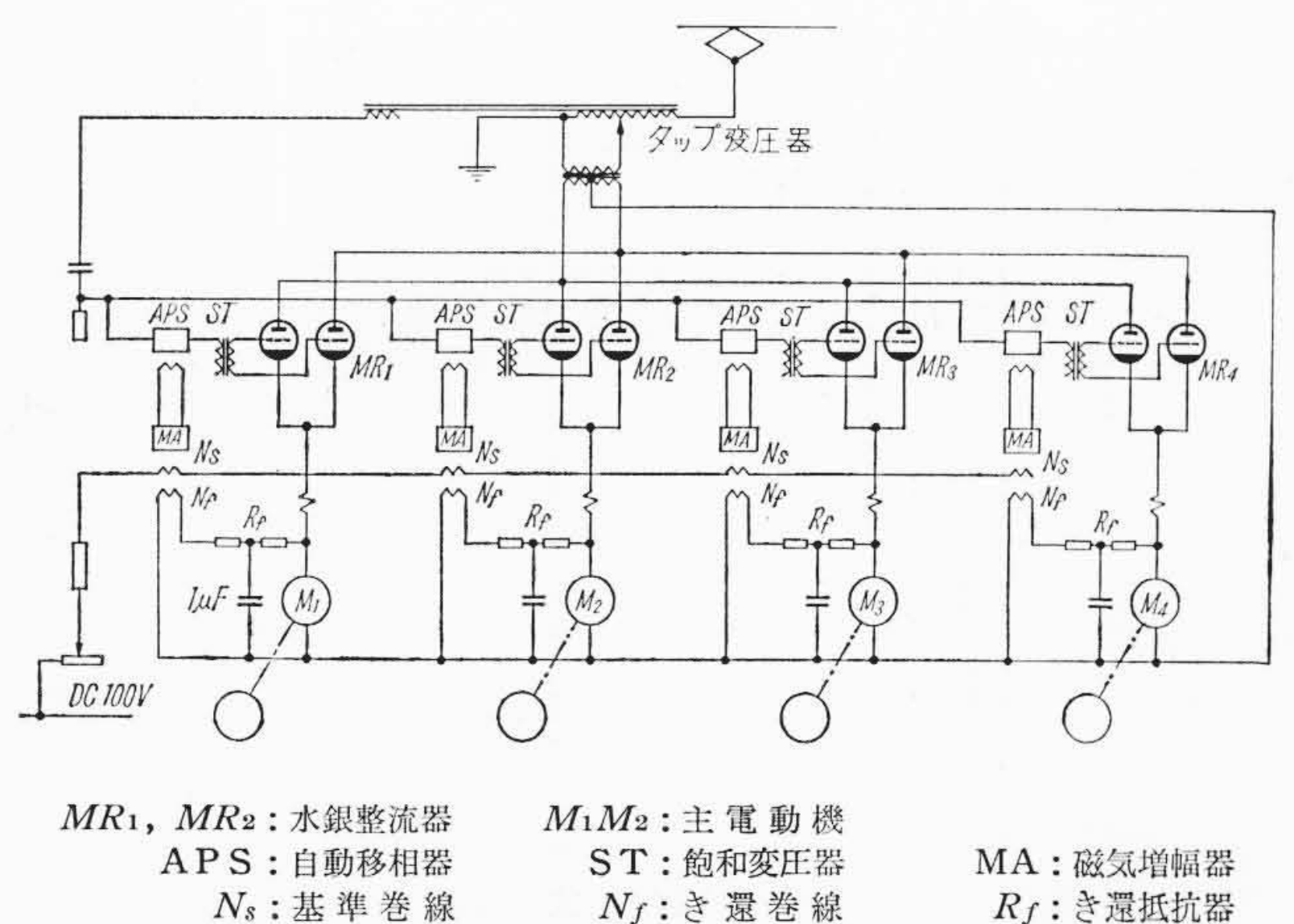
このため、起動時に空転速度を小空転の範囲に押えるには、このように主電動機の電機子電圧を一定にするような電圧制御装置を施し、その総合増幅度を少なくとも 4 以上にしなければならない。

3.2 制御回路とその問題点

上記の計算に基づき総合増幅度が 4~20 の間で調整しうるようにした ED-71 形機関車の主電動機電機子電圧制御装置の原理図を第 11 図に示す。次に、この図について説明する。

ED-71 形機関車は 4 軸で、各動輪の駆動回路はそれぞれ独立している。したがって、制御回路はそれぞれ独立させて 4 組になっているが、磁気増幅器の基準電流は同時に変化するように基準巻線はすべて直列になっている。

この基準巻線によって作られる基準起磁力と電動機の電機子電圧によって起巻線に作られる起磁力の差によって磁気増幅器は出力をだし、自動移相器の制御巻線を励磁し、その出力電圧の位相を



MR₁, MR₂: 水銀整流器 M₁M₂: 主電動機
APS: 自動移相器 ST: 飽和変圧器 MA: 磁気増幅器
Ns: 基準巻線 Nf: き還巻線 Rf: き還抵抗器

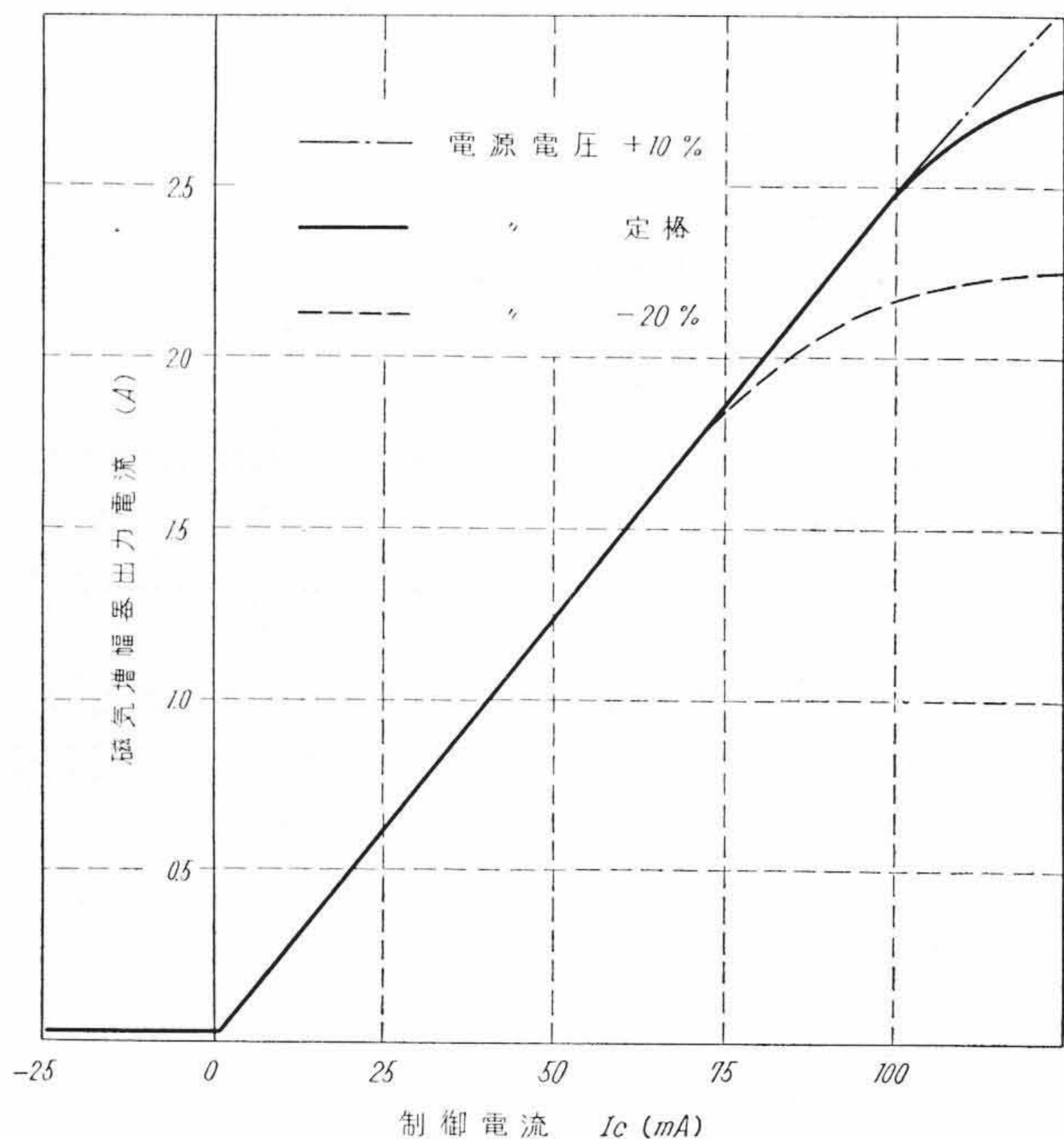
第 11 図 ED-71 形機関車電圧制御装置

調整する⁽⁶⁾。自動移相器の出力電圧は飽和変圧器を介して水銀整流器の格子に与えられ、水銀整流器の出力電圧、したがって電動機電機子電圧を調整し、基準起磁力とき還起磁力がほぼ等しくなるように制御する。

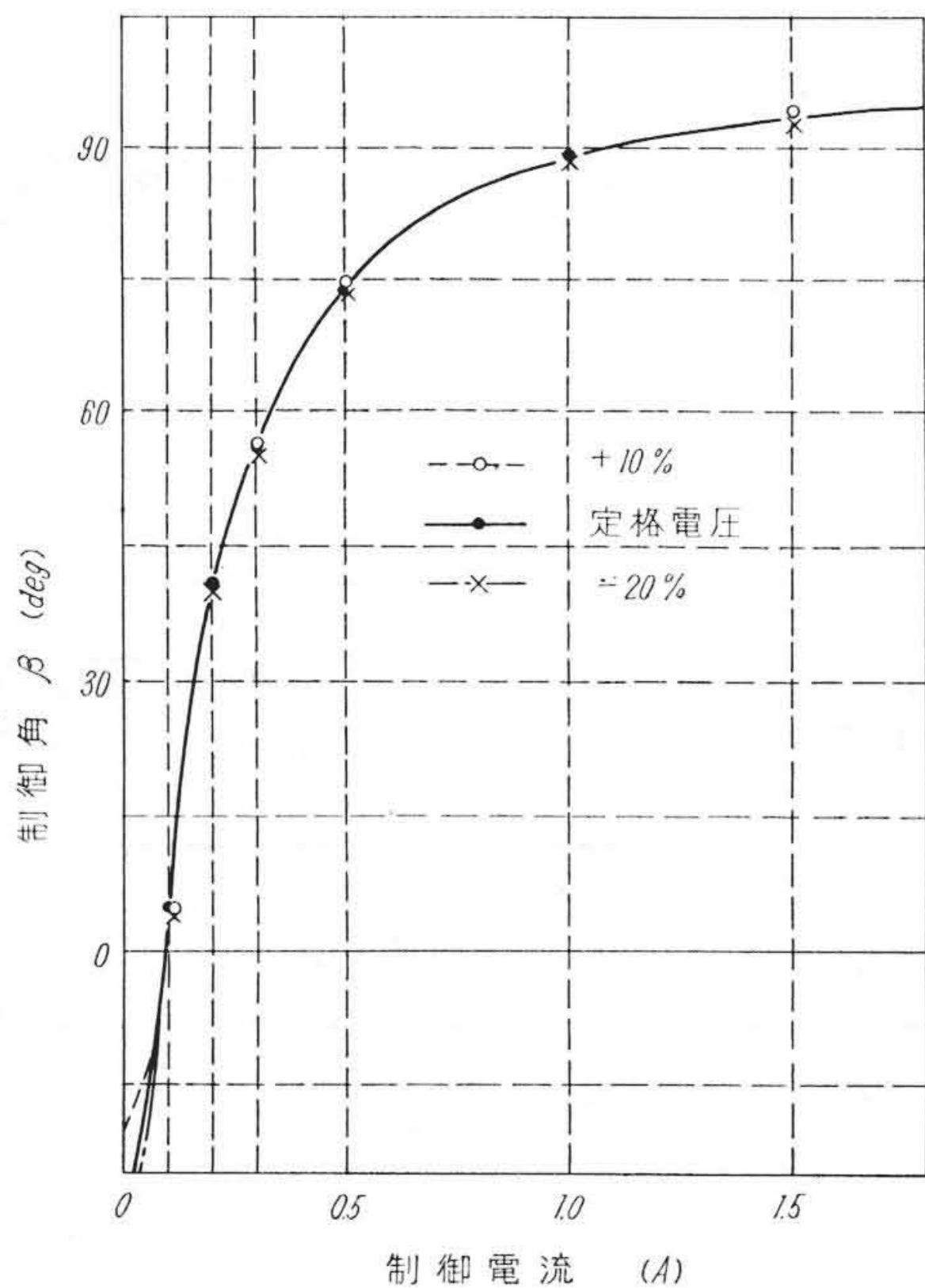
き還回路中に入っている $1\mu F$ のコンデンサはき還信号中に含まれている脈動分を洩波し、また水銀整流器により発生される急しゅんな電圧により磁気増幅器の絶縁が破れるのを防ぐためのものである。

これに用いた機器の静特性が第 12 図および第 13 図で、これから高圧タップ切換器が標準位置（変圧器 2 次電圧が 720 V）にあるとき、き還回路の抵抗 R_f を $10\text{ k}\Omega$ にすると総合増幅度が約 6, $4\text{ k}\Omega$ にすると約 15 になることが知られる。

総合増幅度の調整はき還回路の抵抗値変化のほかに、磁気増幅器の正き還率調整抵抗 R_p の変化と高圧タップ切換器のタップ調整の



第12図 磁気増幅器静特性



第13図 移相回路特性

三つの方法で行ないうる。

この制御回路における大きな問題は電流電圧の変化によりうける制御装置、特に自動移相器の外乱である。

すなわち、自動移相器の電源は必ず水銀整流器と同一の電源、すなわちき電線の電圧を降圧したものを使用しなければならないが、き電線の電圧は $+10\%$ から -20% 程度までひん繁に変動しており、この電圧変動の影響をほとんどうけないようにすることは容易でない。

さらに、電源が単相であるため自動移相器の動作点の調整に必要な回転磁界を利用した移相器が使用できず、そのうえ電源波形がひずんでいるのでこれらの条件のもとで安定な動作を行なう位相制御回路を得ることははなはだ困難であるが、日立製作所ではこの目的のため新たに設計製作した可飽和相互誘導形自動移相器 (APS) を使用し、第 14 図に示すような回路の構成によりほぼ満足すべきものを開発した。

すなわち、自動移相器は上記の電圧変動に耐えるよう交流磁束密度を小さくとり、交流巻線のリアクタンスが交流電圧の変化によってほとんど変化しないようにした。

このようにすると、自動移相器は交流に対して線形のリアクタンスとなり、これが飽和変圧器とコンデンサの共振回路の一次側に入っているので、洩波および定電圧作用を行なうことができる。

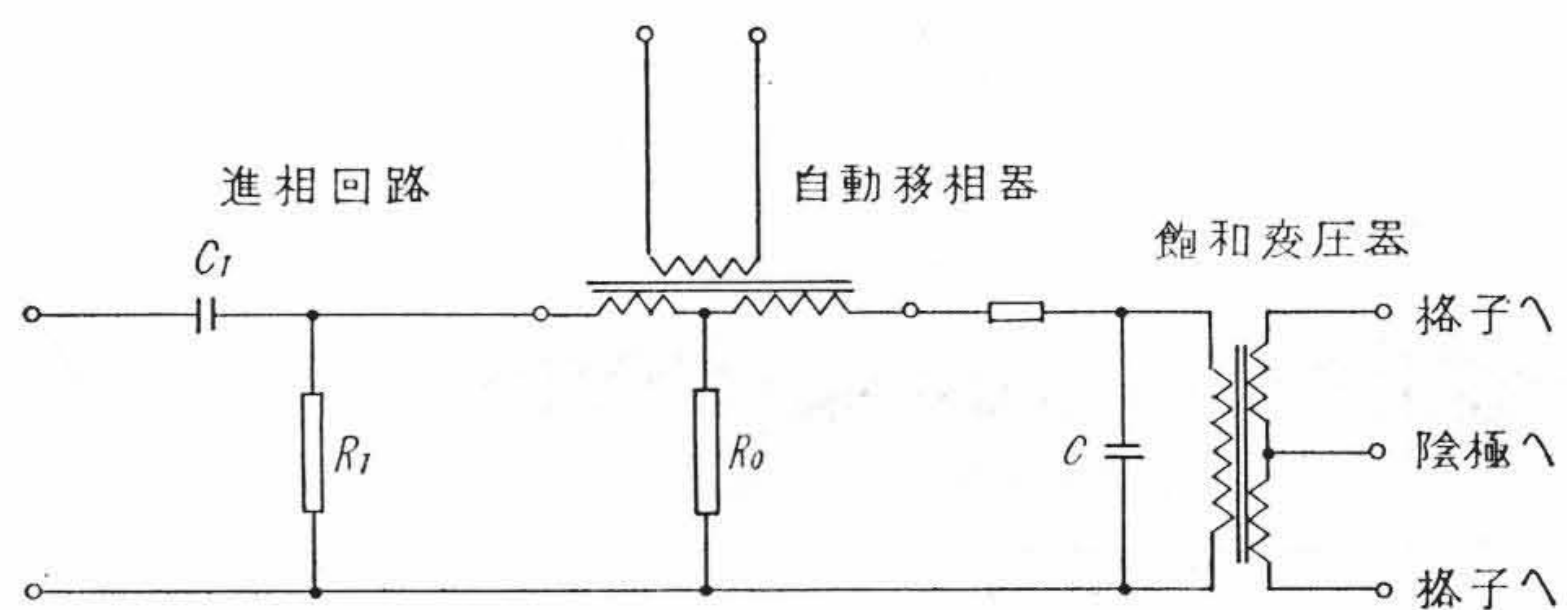
C_1R_1 の進相回路を使用したのは、自動移相器の制御電流が最大になっても鉄心が完全に飽和しないため 20 度程度の遅れが残り、さらに飽和変圧器のせん頭波電圧は第 15 図に示すように入力電圧よりも 40 度程度遅れるので、これを補償するためのものである。

この回路の移相特性が先にあげた第 13 図で、制御電流が $0\sim 1.6\text{ A}$ で移相範囲が約 110° 以上あり、制御角 β が $0\sim 90^\circ$ の範囲では $+10\%$ $\sim -20\%$ の電源電圧の変化に対して移相角の変化は ± 1 度程度となっている。

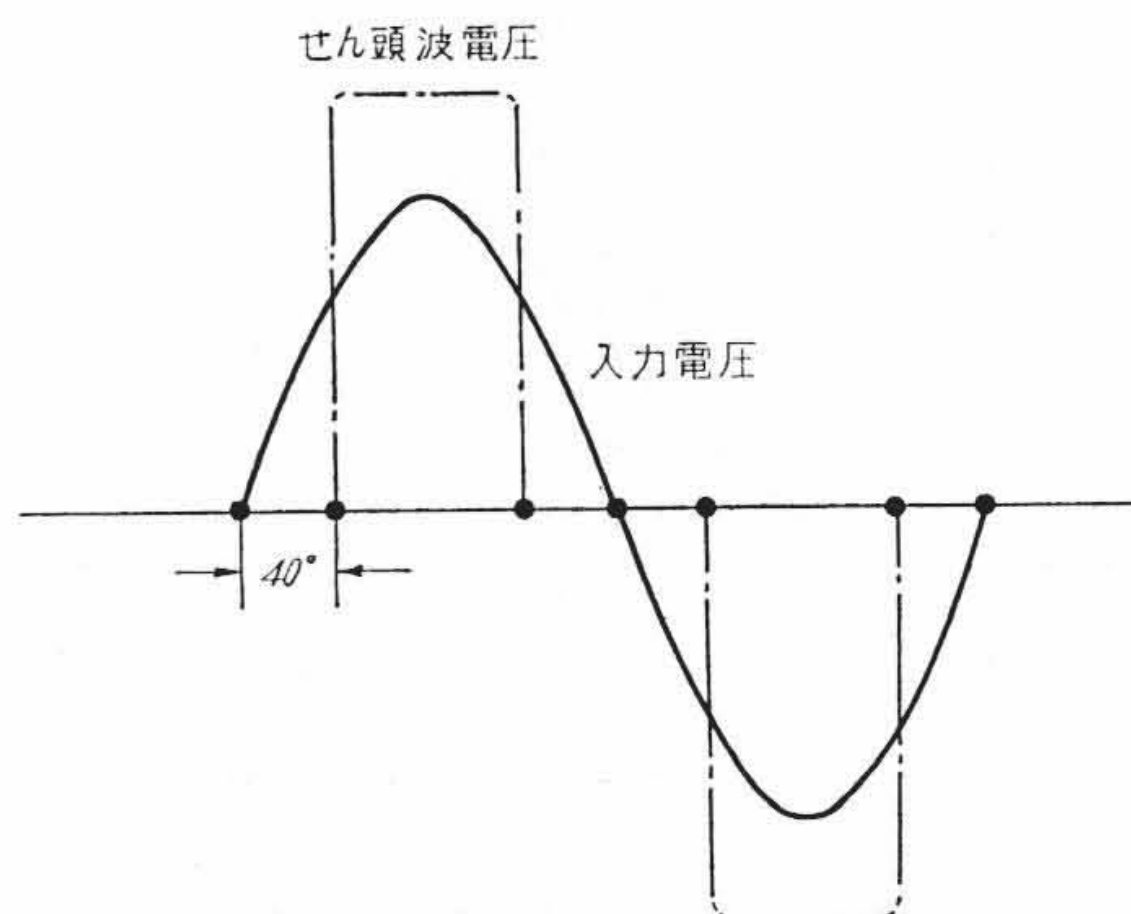
$\beta < 0$ では電圧影響は大きくなるが、そこには断続電流しか流れないので問題がない。

3.3 こう配起動試験

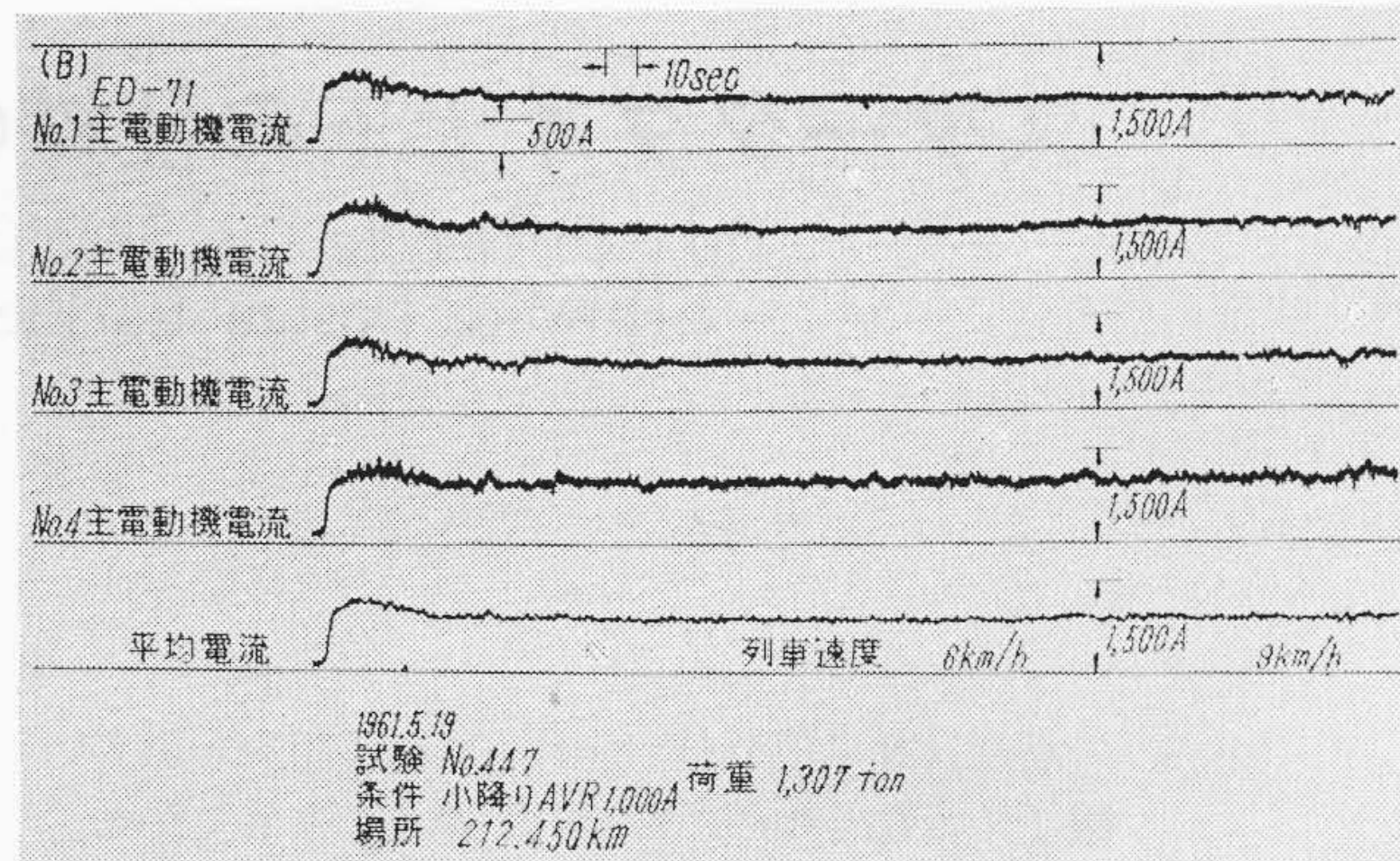
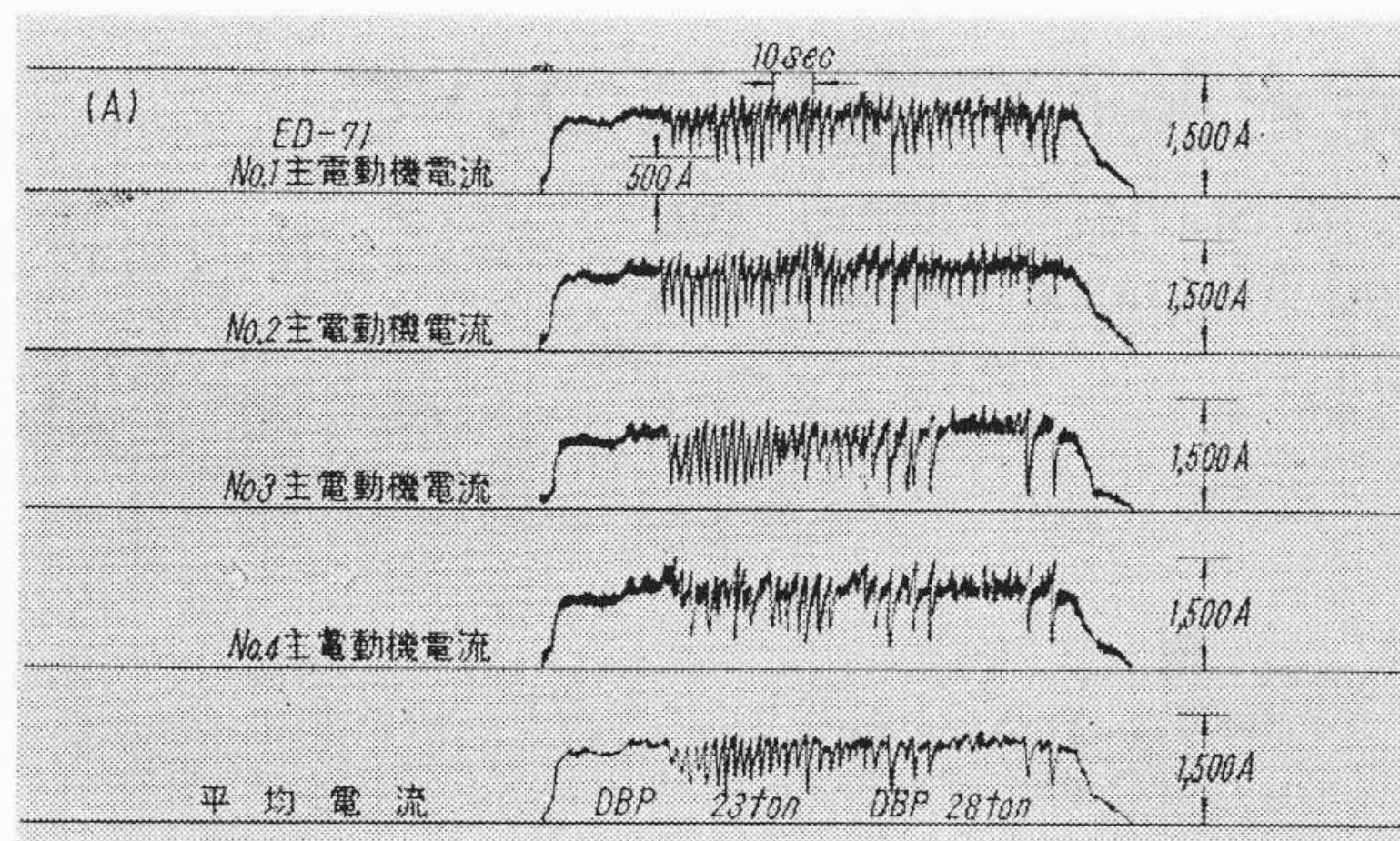
以上のような検討により電圧制御装置が設計製作され、ED-71 形



第14図 電気機関車用位相制御回路



第15図 飽和変圧器波形



第16図 こう配起動試験中の電流記録

機関車 41 両に納入装備された。この機関車を使用した
こう配起動試験が東北本線において数回にわたり実施さ
れた。この試験における主電動機入力電流のオシログラ
ムの一例が第16図である。この図の(A)からこの試験
では電動機入力電流が1,400 A 程度の値から500 A 程度
の値までしばしば急変していることが知られる。

このときの空転は大体小空転の範囲であったので、こ
の電圧制御装置は所要の性能を満足しているものと考え
られる。

同図(B)は荷重が1,307 ton の状態で10% のこう配を
雨天で起動加速した場合のオシログラムの一例である。

4. 結 言

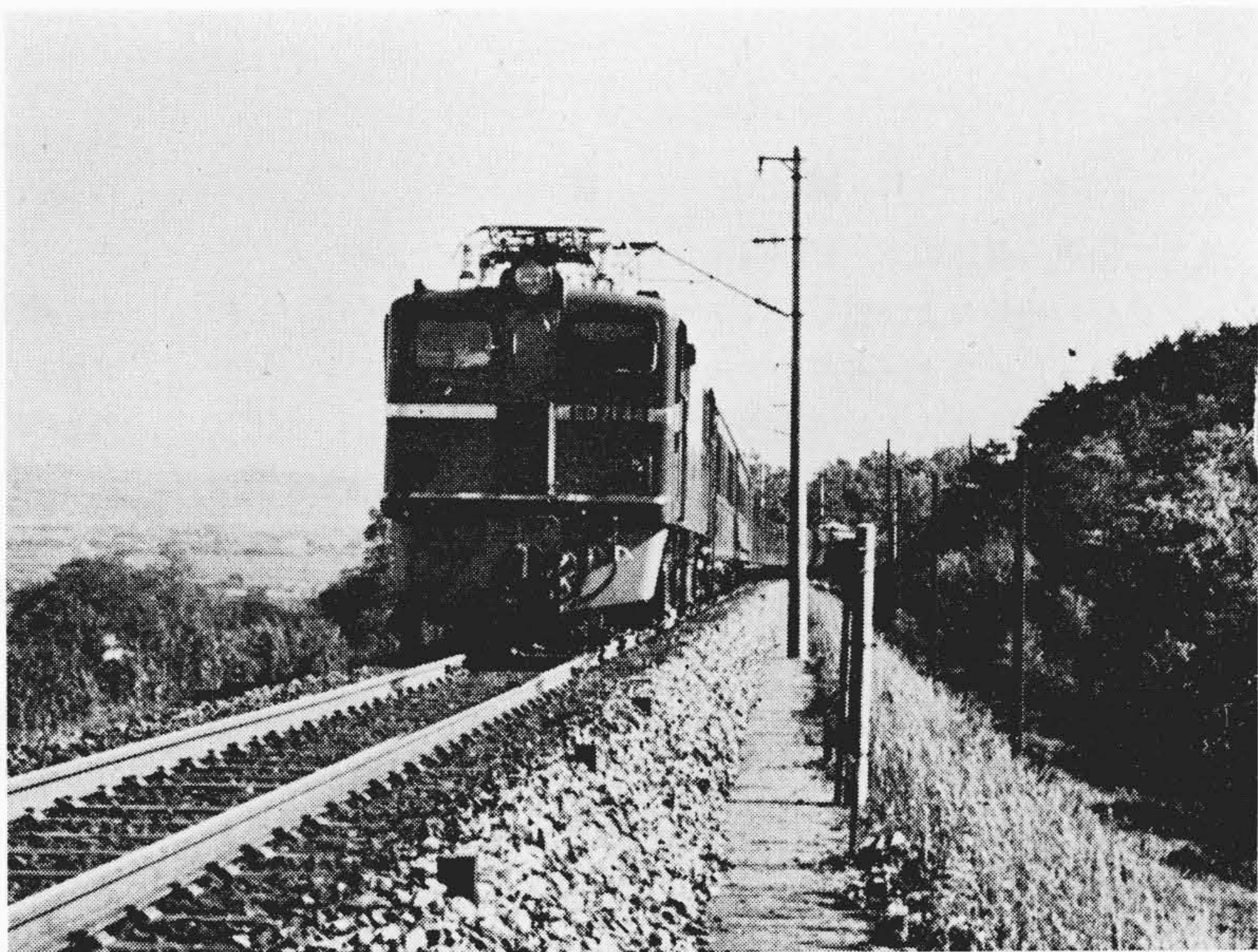
以上、ED-71 形水銀整流器式交流電気機関車の電圧制
御装置の設計のために行った理論的な考察と実験結果の
二、三について報告した。

本文にも述べたように、この装置は従来の整流器応用
装置の自動制御装置に比べ、電源電圧の変動と波形ひず
みが大きく、さらに全位相制御範囲を自動移相器で制御
しなければならないなどいくつかのきわめて困難な点があつたが、
日本国有鉄道のご指導、ご激励、ご援助と社内関係各位の協力により
満足すべき性能のものを開発することができた。ここに厚くお礼
を申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 沢野：電学誌 79, 4 (昭34)

第17図 ED-71 形機関車こう配起動試験状況



- (2) 伊沢, 浅野, 河井：日立評論別冊40号(昭36)
(3) 国鉄交流電化調査委員会編：粘着限界と粘着特性(昭31)
(4) H. I. Andrews: P. I. E. E. 102 Pt A (785-808) (1955)
(5) 関, 関川, 古河：電学誌 80, 5 (昭35)
(6) 小野田：日立評論 43, 6 (昭36)



特 許 の 紹 介



特許第270768号

森山昌和

単相全波整流回路の電圧調整装置

直列変圧器は極性を逆にして鉄心上に巻いた2つの直列巻線A、
Bを有し、誘導電圧調整器または負荷時電圧調整器の所要調整電圧
により励磁巻線Cを励磁される。陽極電流は両半波とも変圧器から
整流器に向って流れるも、直列巻線A、Bはそれぞれ180度の位相
差をもち、かつ極性が逆であるため、直列変圧器の鉄心は交番アン
ペーターンにより励磁され、直流励磁とはならない。したがって励
磁巻線Cの電流も同様に正逆転する交番電流となるので、誘導電圧
調整器も同様に直流励磁をさけることができる。

このように、この装置によれば誘導電圧調整器および直列変圧器
が、ともに直流励磁をまぬがれうるから、直流励磁に伴う過熱、騒
音の発生などをさけることができ、したがって直流励磁を受ける場
合を考慮して余裕ある鉄心を使用したり、また2倍の台数を使用し
たりする従来の電圧調整装置に比べ、全体を小形とし廉価に製作す
ることができる。ゆえに本装置はたとえば交流電気機関車用の単相全
波整流回路の電圧調整装置のように、小形軽量であることを要請さ
れる場合に適用して効果顕著である。(滑川)

