

# 電気車の微分差帰還方式再粘着制御装置“ADDF”の開発

Development of Automatic Differential Difference Feedback Re-adhesion Control Device “ADDF” for Electric Rolling Stock

弘津 哲二\* 園部 久雄\* 桑原 清輝\*\*  
Tetsuji Hirotsu Hisao Sonobe Kiyoteru Kuwabara

## 要 旨

主電動機印加電源電圧を連続的に制御しうるサイリスタ式などの電気車の最適再粘着制御方式について検討し、微分差帰還方式再粘着制御装置“ADDF”を開発した。本装置は再粘着させる方法として空転加速度により主電動機印加電源電圧を制御するもので、全速度域にわたり再粘着性を有し、かつ空転時その場所の粘着力の90%以上を利用することができる。

本装置をディーゼル電気機関車に適用し試験した結果、上記の性能が確認され、在来形の空転防止装置を使用した場合に比べて約20%の引張力の向上を期待しうることなどが明らかとなった。

## 1. 緒 言

電気車の高速化および高出力化の傾向は最近ますます強まっており、それに伴って中高速域での粘着性能向上の要求が高まってきている。

さきにわれわれは粘着性能に関する諸因子の期待粘着引張力に及ぼす影響を統計的に解析し、粘着性能を向上させるには、空転時に車輪レール間の粘着力をできるだけ有効に利用するように駆動力を再粘着制御することが効果的であることを定量的に明らかにした<sup>(1)</sup>。また、これを実現するために、空気ブレーキを用いた再粘着促進装置“HIRAD”を開発した<sup>(2)</sup>。

ところで、主電動機印加電源電圧（以後、電源電圧と略称する。）を連続的に制御しうるサイリスタ式などの電気車では、再粘着させるために電源電圧を微細に制御することが比較的容易である。そこで、そのような電気車を対象として、全速度域にわたり粘着力を有効に利用する再粘着制御方式について検討し、各種電気車用の微分差帰還方式再粘着制御装置“ADDF”（Automatic Differential Difference Feedback Re-adhesion Control Device）を開発した。

本報では“ADDF”の構成と特性、ディーゼル電気機関車への適用例などについて述べる。

## 2. 粘着力の有効利用性能

### 2.1 粘着利用率の定義

車輪レール間の粘着力の有効利用性能を表わす特性値として、次の(1)式で定義される粘着利用率 $\alpha$ を導入することができる。

$$\alpha = \frac{\text{空転再粘着の一周期間の車輪レール間粘着引張力の平均値}}{\text{車輪レール間限界摩擦力}} \dots\dots\dots(1)$$

図1は時間に対する空転速度 $v_s$ 、車輪レール間粘着引張力 $f$ 、車輪周駆動力 $F$ の変化の様態であり、周期を $\tau$ とすると(1)式は次の(2)式で表わされる。

$$\alpha = \frac{1}{\tau \mu_0 W} \int_0^{\tau} f dt \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\mu_0$ は車輪レール間限界摩擦係数、 $W$ は軸重である。

粘着利用率 $\alpha$ が大きいほど全期待粘着引張力が大きくなる。理想的再粘着制御は粘着力を100%利用するような制御であり、そのような場合は $\alpha=1$ となる。

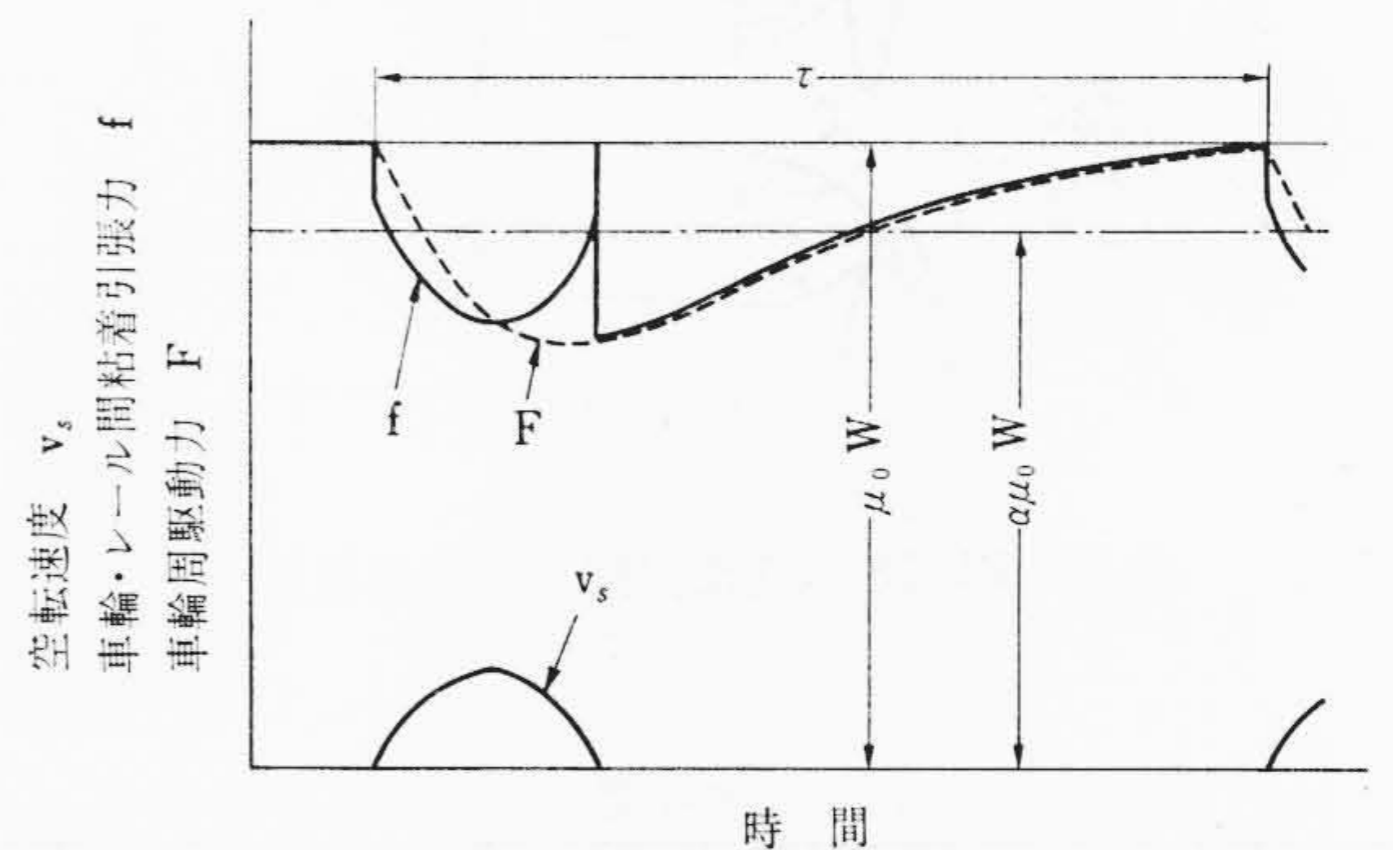


図1 粘着利用率 $\alpha$ の説明図

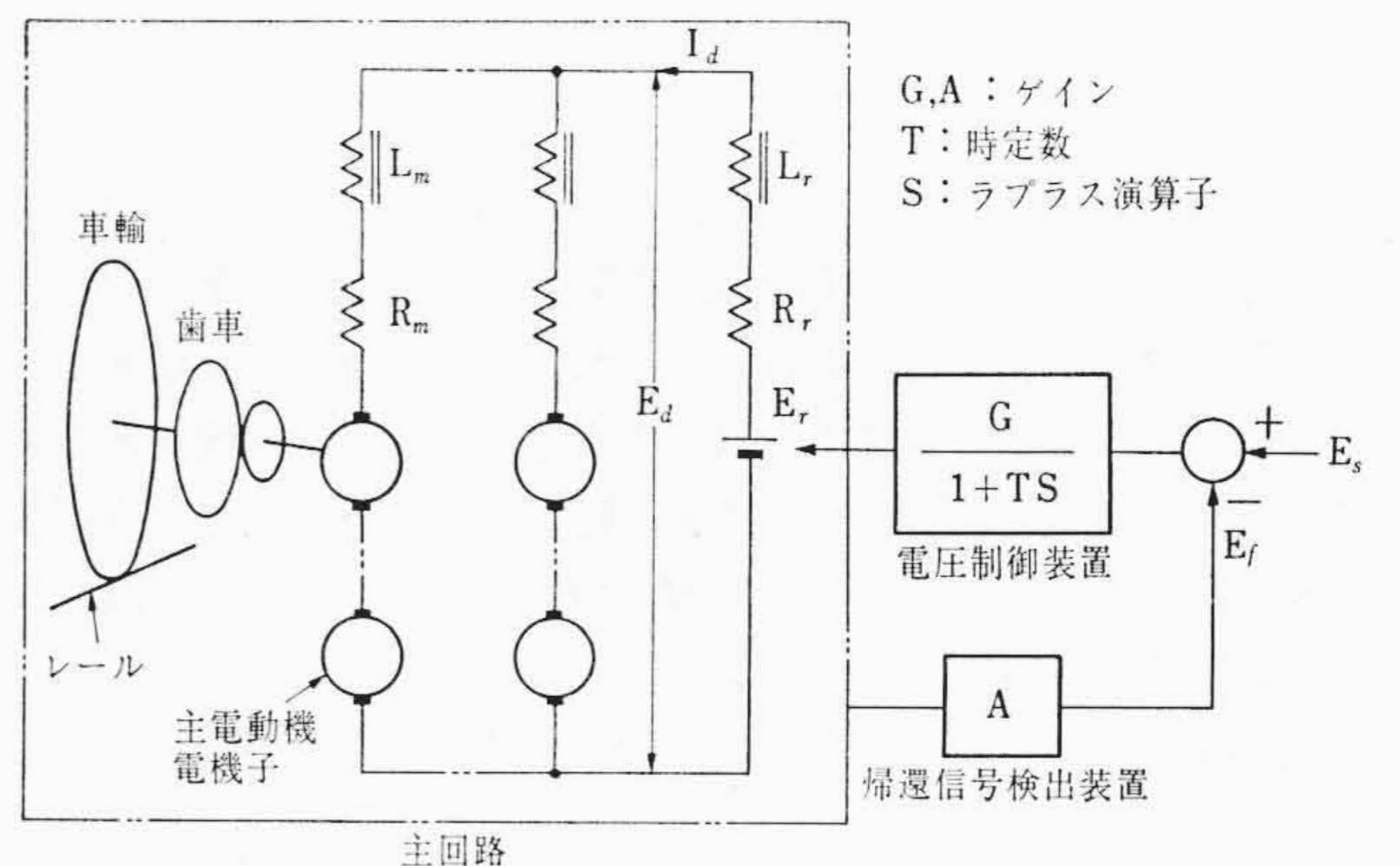


図2 駆動系の模型図示

### 2.2 代表的な場合の粘着利用率

直流直巻電動機を使用した一般の電気車の駆動系は図2のように模型的に表わされる。いま対象としている電気車のように電源電圧の連続制御が可能な電気車の場合、再粘着させる方法としては図のように指令値 $E_s$ と空転によってなんらかの変化を生ずる帰還信号 $E_f$ の差によって電源電圧 $E_r$ を制御するものが一般的である。ここでいう再粘着制御装置はこの帰還系の部分に相当する。

わが国の代表的サイリスタ式交流機関車であるED78形交流機関車は、主電動機を4個全部並列接続とし共通母線間電圧 $E_a$ を検出して帰還している（この制御を以後MVRと略称する）。共通母線間電圧 $E_a$ の帰還を行なわない場合には、任意の軸が空転すると主電動機全電流 $I_a$ が減少し共通母線間電圧 $E_a$ が増加し、空転主電動機に並列に接続されている粘着主電動機の電流が増加しその軸の空

\* 日立製作所日立研究所  
\*\* 日立製作所水戸工場



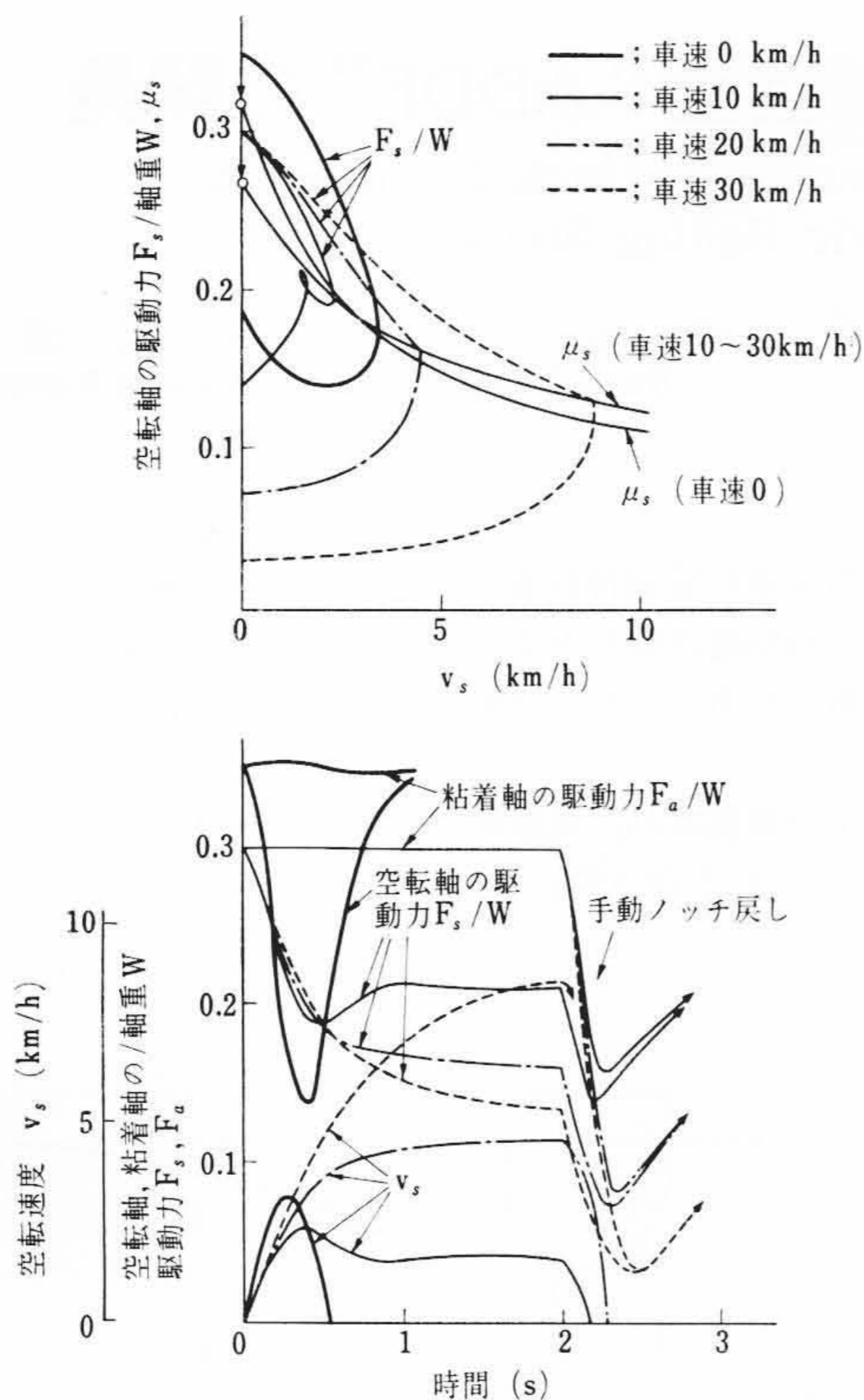


図3 ED 78 形交流機関車の空転現象のシミュレーション計算結果

表1 ED 78 形交流機関車の粘着利用率  $\alpha$

車速 (km/h)		0	10	20	30
$\alpha$	$\alpha_s$	0.733	0.779	0.692	0.632
	$\alpha_a$	1.00	0.893	0.832	0.774

転を誘発する場合が生ずる。電圧  $E_a$  を帰還することにより  $E_a$  が一定になるように電源電圧  $E_r$  が制御され、再粘着性が改善され、かつ空転誘発を防止する効果がある。ただし、このような効果は一般に低速域においてのみ認められ、中高速域では主電動機内部等価抵抗 (巻線抵抗  $R_m$  と主電動機界磁磁束の電流依存性による等価抵抗の和) が大きくなり電源側抵抗  $R_r$  の影響が無視しうる程度となるので、効果が認められなくなる。

再粘着性を持たない場合には手動ノッチ戻しにより空転を止めることが行なわれる。

図3はこの機関車の任意の1軸が空転したときの空転現象のシミュレーション計算結果であり、表1は粘着利用率の計算結果である。表で  $\alpha_s$  は空転軸の粘着利用率、 $\alpha_a$  は粘着軸の粘着利用率である。

空転現象の計算式についてはさきに報告しているので<sup>(3)</sup>省略するが、連立非線形常微分方程式で表わされるので、Runge-Kutta法による数値計算により解を求めた。粘着利用率  $\alpha$  は各計算時隔  $\Delta t$  秒ごとに求められる粘着引張力を周期  $\tau$  まで累計し、その結果に  $\Delta t / (\tau \mu_0 W)$  を乗じて求められる。周期  $\tau$  は空転軸の駆動力が空転前の97.5%まで回復する時間とし、時隔  $\Delta t$  は0.0005秒とした。また、手動ノッチ戻しは2秒のデッドタイムの後、空転が止まった時点で定数0.5秒の1次おくれ状に電源電圧  $E_r$  を減少し、空転が止まったら定数1秒で回復させることで模擬した。機関車の諸数値は先報<sup>(3)</sup>のED 75形機関車と同様であり、車輪レール間動摩擦係数も先報<sup>(3)</sup>と同様としている。また、MVRのループゲイン (図2で  $A \times G$ ) は30、時定数  $T$  は0.5秒である。

これらのシミュレーション計算結果は、さきに述べたMVRの特

長を示しており、この機関車の粘着性能に関して次のことが推定される。

- (1) 起動時および極低速時は再粘着性を有し、空転軸の粘着引張力のみ減少して再粘着する (このような場合を独立制御と称する)。空転軸の粘着利用率  $\alpha_s$  は0.7程度で比較的小さいが、独立制御であるから良好な粘着性能を期待することができる。
- (2) 車速が増加するにつれて再粘着性がなくなり空転速度が増加し、空転を止めるのに手動ノッチ戻しが必要となり、空転軸と粘着軸の粘着利用率  $\alpha_s, \alpha_a$  はともに減少する ( $\alpha_s \approx \alpha_a$  の場合を従属制御と称する)。したがって、粘着性能は車速とともに低下することが推定される。

これらは本線上での試験結果と傾向的に一致している。

最近の各種のサイリスタ式電気車では、経済的理由により主電動機を全部並列に接続できない場合も多く、かつ緒言で述べたように、しだいに中高速域まで良好な粘着性能が要求されるようになってきたので、このようなMVRでは要求される粘着性能を満足させることができない場合が生じてきている。

### 3. 微分差帰還方式再粘着制御装置 “ADDF”

#### 3.1 ADDFの基本的考え方

図2のような帰還を行ない中高速域まで再粘着性を持たせようとすると、一般に従属制御となる。従属制御となることは粘着性能上好ましいことではないが、粘着利用率をじゅうぶんに大きくすれば良好な粘着性能が期待できる<sup>(4)</sup>。このような観点から粘着利用率を最大にすることを目的としてADDFを開発した。同一電源で制御される軸数を減少することにより、このような制御でも独立制御に近づけることが可能である。

粘着利用率を向上する方法として、次のように駆動力の制御を行なうことが考えられる。

- (1) 空転速度ができるだけ小さいうちに空転を止め、駆動力を必要以上に減少させないため、空転速度が増加しているとき (空転加速度  $\dot{v}_s > 0$  のとき) は駆動力をすみやかに減少させ、空転速度が減少しているとき ( $\dot{v}_s < 0$ ) は駆動力を回復させる。
- (2) 駆動力の回復の形は、図4の(a)のように急速に回復させ

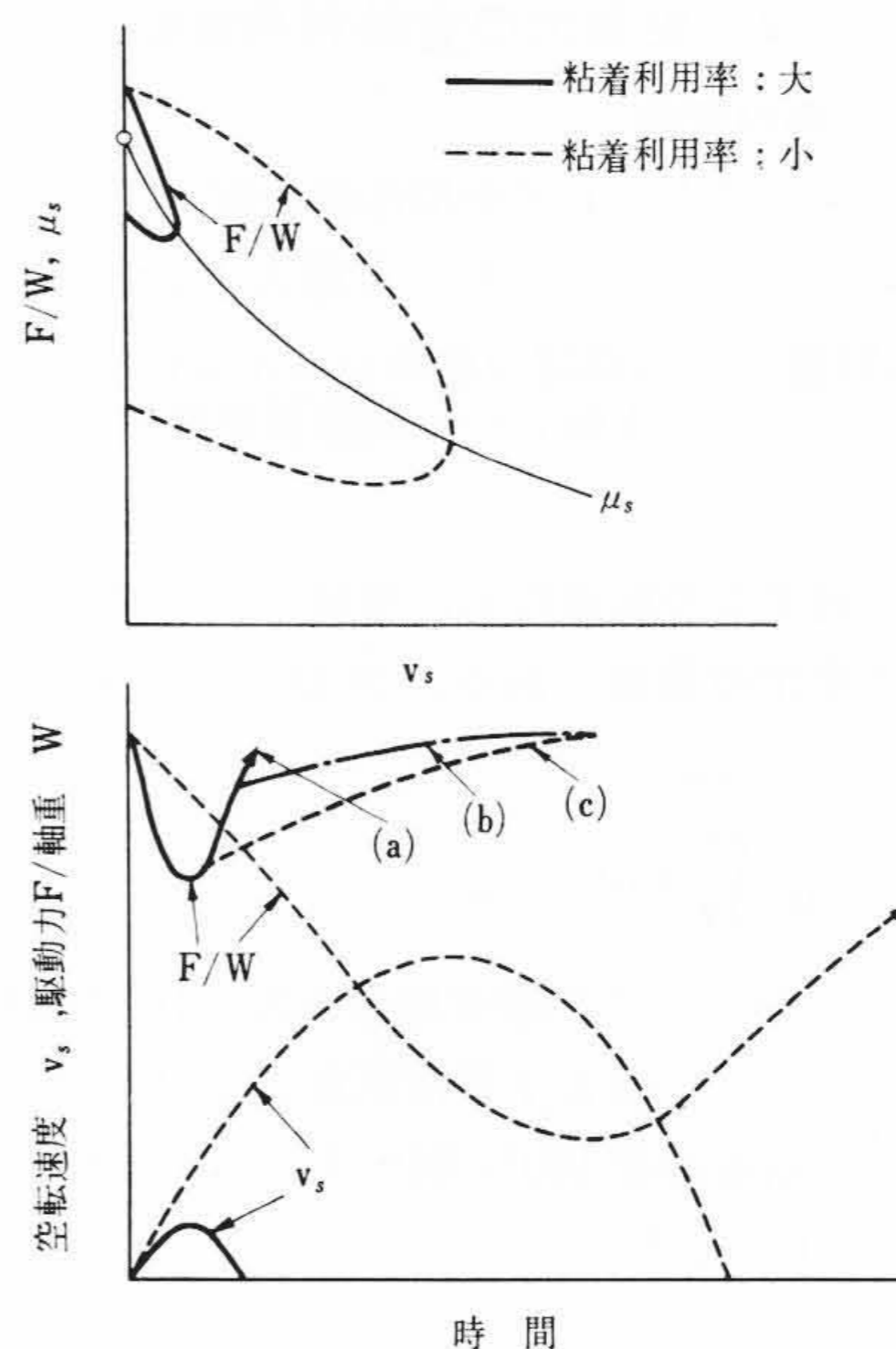


図4 粘着利用率を向上させるための駆動力制御の説明図



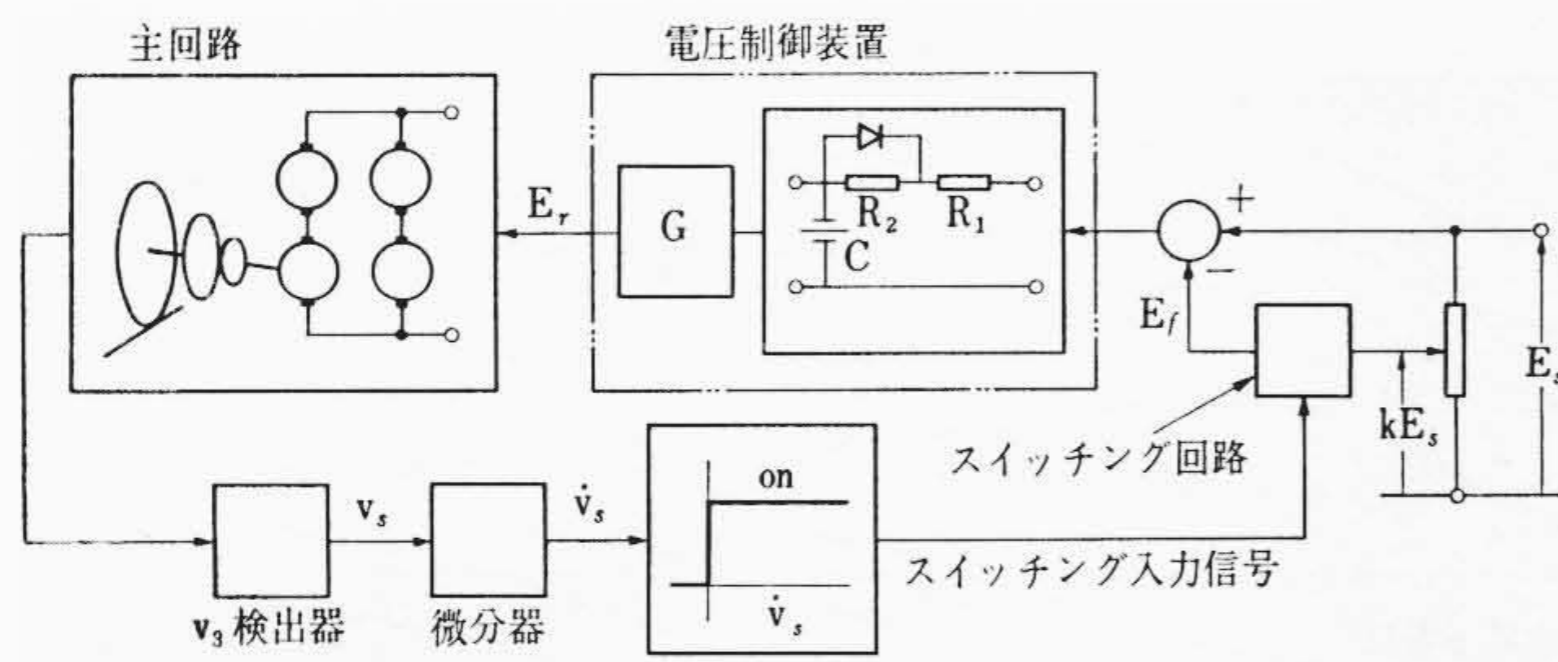


図5 ADDFのブロック図

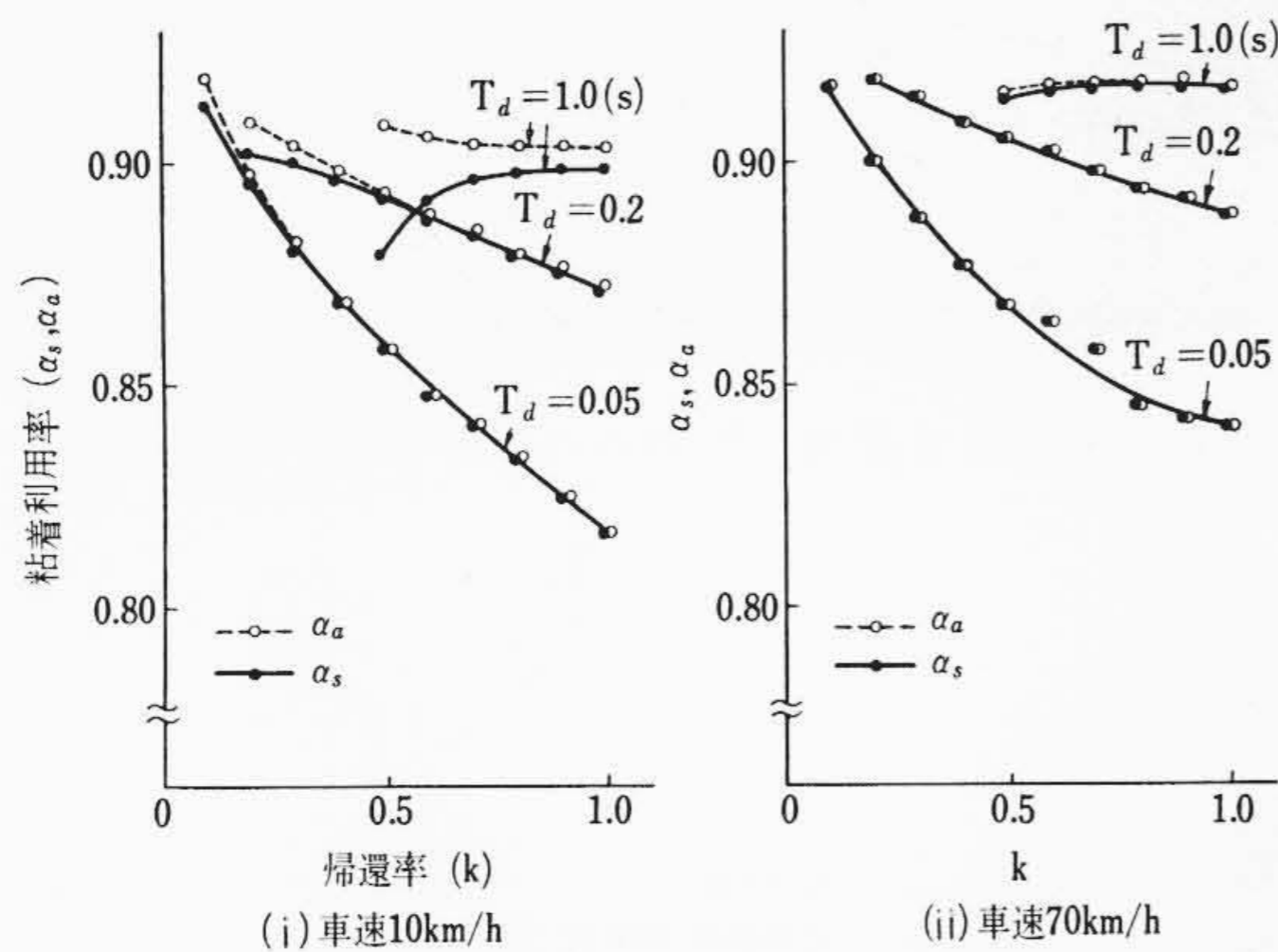


図6 図5のADDFの場合の帰還率kと粘着利用率

るよりも、(b)または(c)のように少なくとも空転前の値の近くでは徐々に回復させることが望ましい。

これらを実現するための再粘着制御系の一般的構成としては、図5のブロック図のようなものが考えられる。すなわち、空転加速度 $\dot{v}_s$ が正のときは指令値 $E_s$ を一定比率分 $kE_s$ （ここに、 $k$ は1以下の定数で以後帰還率と称する）だけ減少させ、 $\dot{v}_s < 0$ のときは指令値を元の値に戻す。また、入力減少時の時定数 $T_d (=R_1C)$ が小さく、入力増加時の時定数 $T_r (=R_1+R_2)C$ が十分に大きいくれ要素を介して帰還することにより、電源電圧 $E_r$ の減少がすみやかに、かつ回復が適当な速さになるように調整される。前述のように主電動機内部等価抵抗が車速とともに増加し、再粘着させるのに必要な最小帰還量が車速とともに増加するので、指令値の一定比率分を帰還しているものである。

空転加速度を検出する方法と空転加速度により作り出す帰還信号の最適な形は、制御対象の電気車の主回路方式、定数などにより異なる。われわれはこれまで各種の電気車に適した再粘着制御装置を開発したが、それらは共通して、各主電動機の電流あるいは電圧差の微分値により、最適な形の帰還信号を作っている。題記のように微分差帰還方式再粘着制御装置“ADDF”と称することにした。

### 3.2 ADDFを使用した場合の粘着利用率

図5に示した一般的構成の場合について粘着利用率をシミュレーション計算により求めた。このような制御装置は主電動機が2個程度直列接続される場合に使用されることが多いので、さきにシミュレーション計算を行なったED78形機関車の主電動機接続を2個直列2回路並列とした場合についてシミュレーション計算を行なった。主電動機接続の変更に伴い、主電動機回路抵抗 $R_m$ とインダクタンス $L_m$ を2倍とし、電源側抵抗 $R_r$ をレギュレーションが同じになるように増加した。

図6は電源電圧回復の時定数 $T_r$ を1秒に一定とし、電源電圧減少の時定数 $T_d$ 、帰還率 $k$ および粘着利用率 $\alpha_s$ 、 $\alpha_a$ の関係を示したものである。 $\alpha_s$ は空転軸の粘着利用率、 $\alpha_a$ は空転主電動機に並列

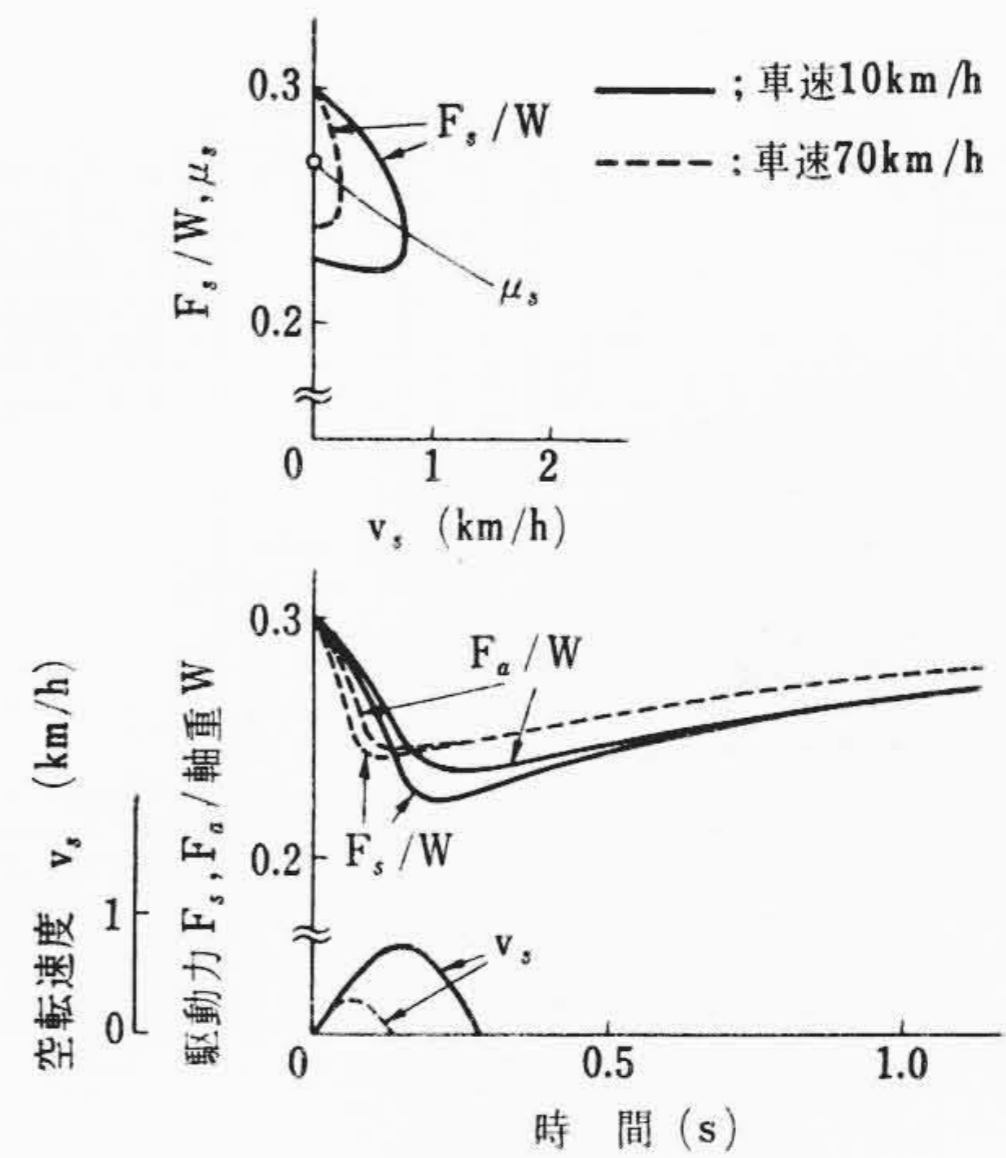


図7 図5のADDFの場合のシミュレーション計算結果の一例

に接続されている粘着主電動機を有する軸の粘着利用率である。帰還率 $k$ は0.1から1.0まで0.1のピッチで計算されており、線で結んだ点では再粘着し、図示されていない点では再粘着しない。

図7は代表的な場合の空転速度と駆動力の変化の様態を示したものである。

図6などより次のことが知られる。

- (1) 制御系の定数を適当に選定することにより、全速度域で再粘着性を有し、かつ粘着利用率を90%以上とすることができる。
- (2) 電源電圧減少の時定数 $T_d$ が大きい場合でも、帰還率をじゅうぶん大きくすれば高い粘着利用率が得られ、かつ帰還率によって粘着利用率はあまり変わらない。しかし、 $T_d$ が主回路の時定数、すなわち電源電圧のステップ状の変化に対する主電動機電流の応答の時定数(本例では、車速ゼロの場合0.07秒、車速70km/hの場合0.02秒)と同程度に小さい場合は、帰還率によって粘着利用率が大幅に変わる。

## 4. ディーゼル電気機関車用“ADDF”

### 4.1 装置の概略説明

ディーゼル電気機関車(以後、DELと略称する)では、一般に主電動機は2個程度直列接続とされ、かつ広い速度範囲にわたりエンジンの出力をじゅうぶん利用するために主発電機の出力を一定にする制御が行なわれている。これらは再粘着性を悪くする作用を有するためなんらかの空転防止対策を必要とする。通常のDELでは、空転検知リレーを設け、それによりエンジンの燃料噴射を絞ってアイドル運転にしたり、主発電機の励磁回路に抵抗をそう入するなどの方式が広く実用されている。これらの方式は一般に即応性に欠け、かつ空転を確実に止めることに主眼をおいていたので、空転時の引張力の減少が大きく粘着利用率が低いため、列車の引き出しあるいは加速が不能となる場合が発生した。このような欠点を改善するため、DEL用のADDFを開発した。以下、輸出用6軸1870馬力DELに適用したものについて述べる。

図8は主回路ならびにADDFの概略説明図である。従来、励磁機の界磁巻線回路に一定の直流電圧110Vを印加していたものを連続制御が可能なサイリスタ増幅器におきかえ、空転によって生じた主電動機電圧の変化分により、その印加電圧を速やかに制御して空転を止めるものである。このサイリスタ増幅器には、電源の電圧や周波数の変動に対してじゅうぶん安定になるように電圧帰還を施し



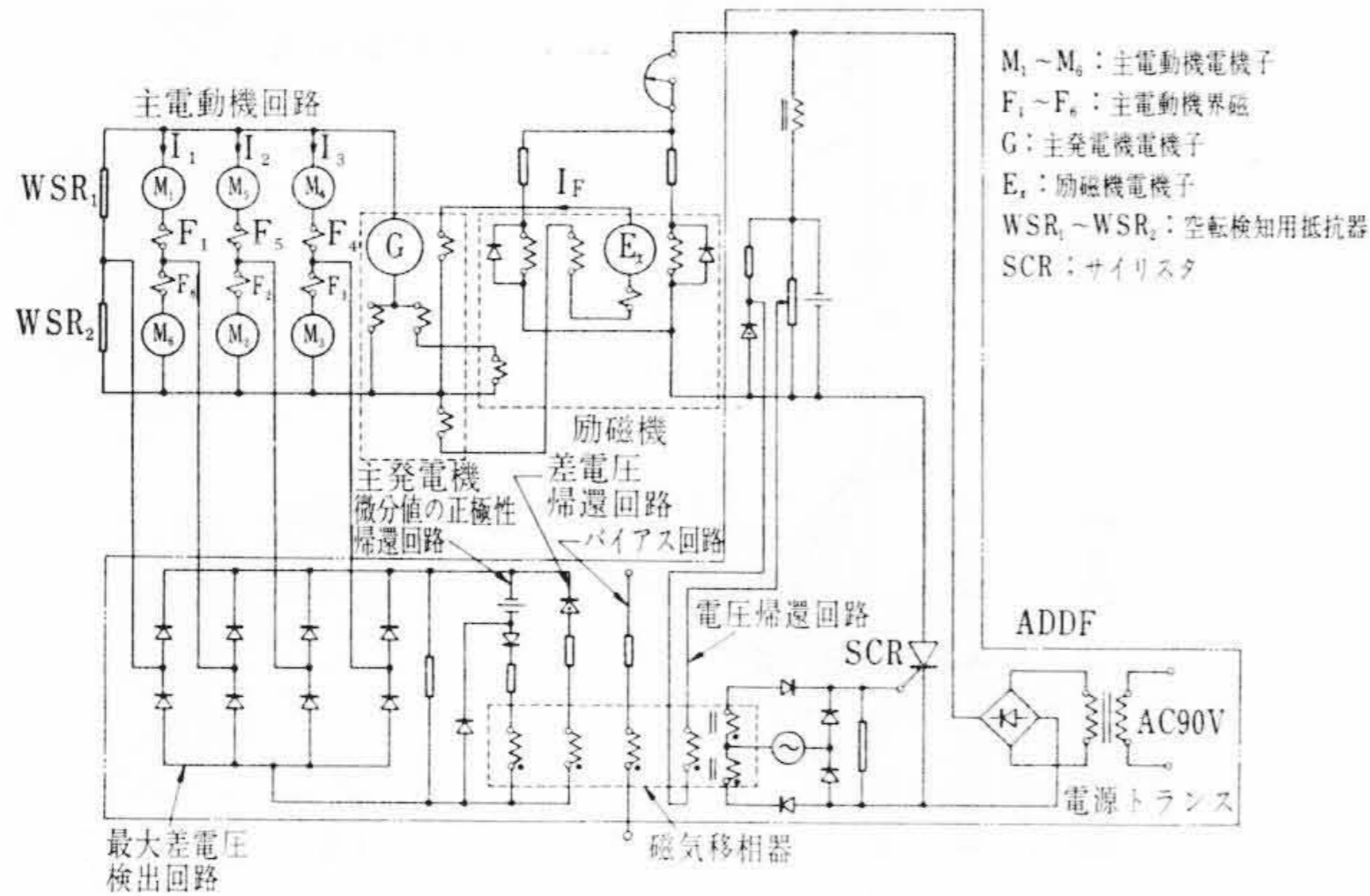


図8 DEL用 ADDF の概略図

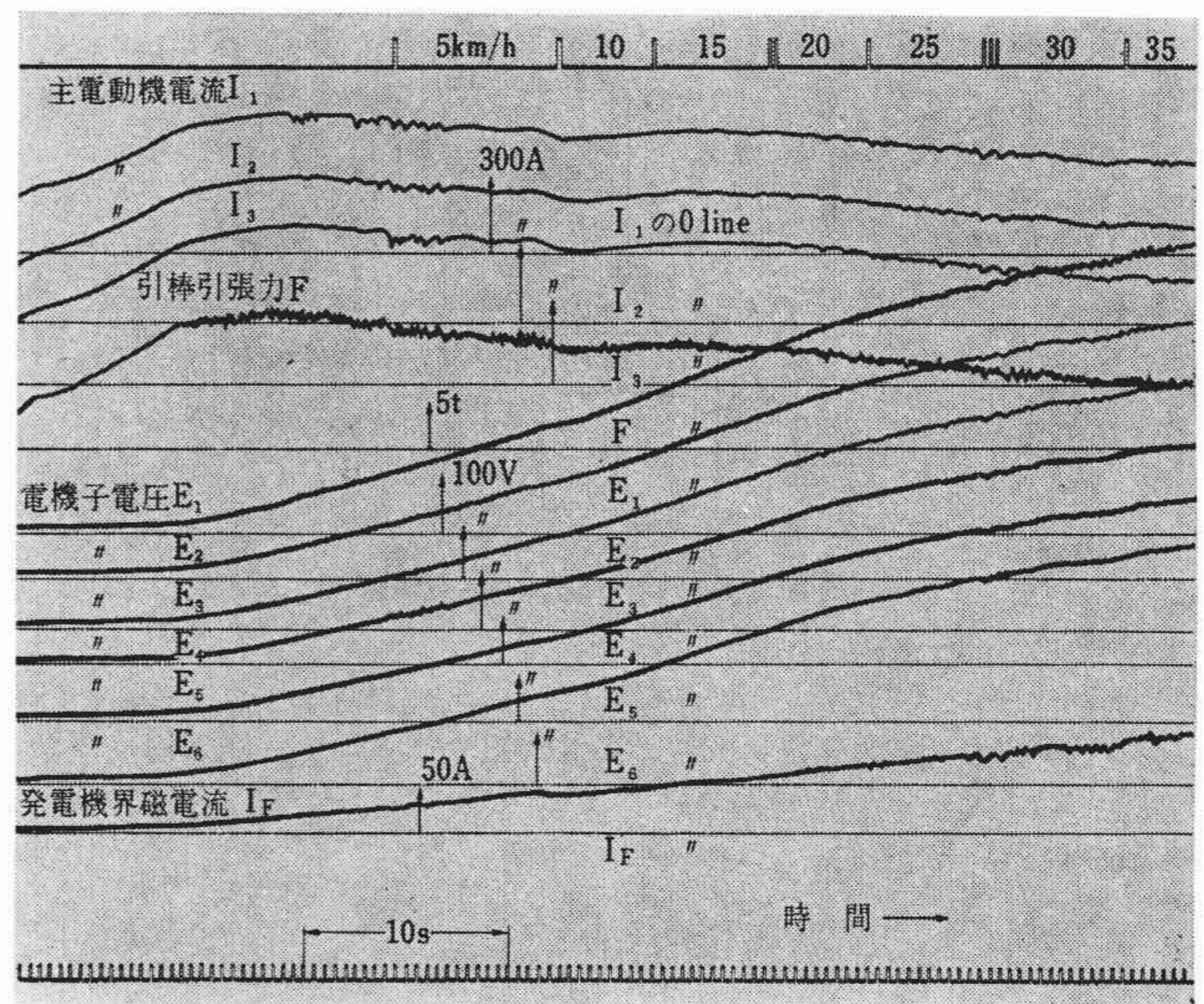


図9 ADDF を使用した場合のオシログラムの一例

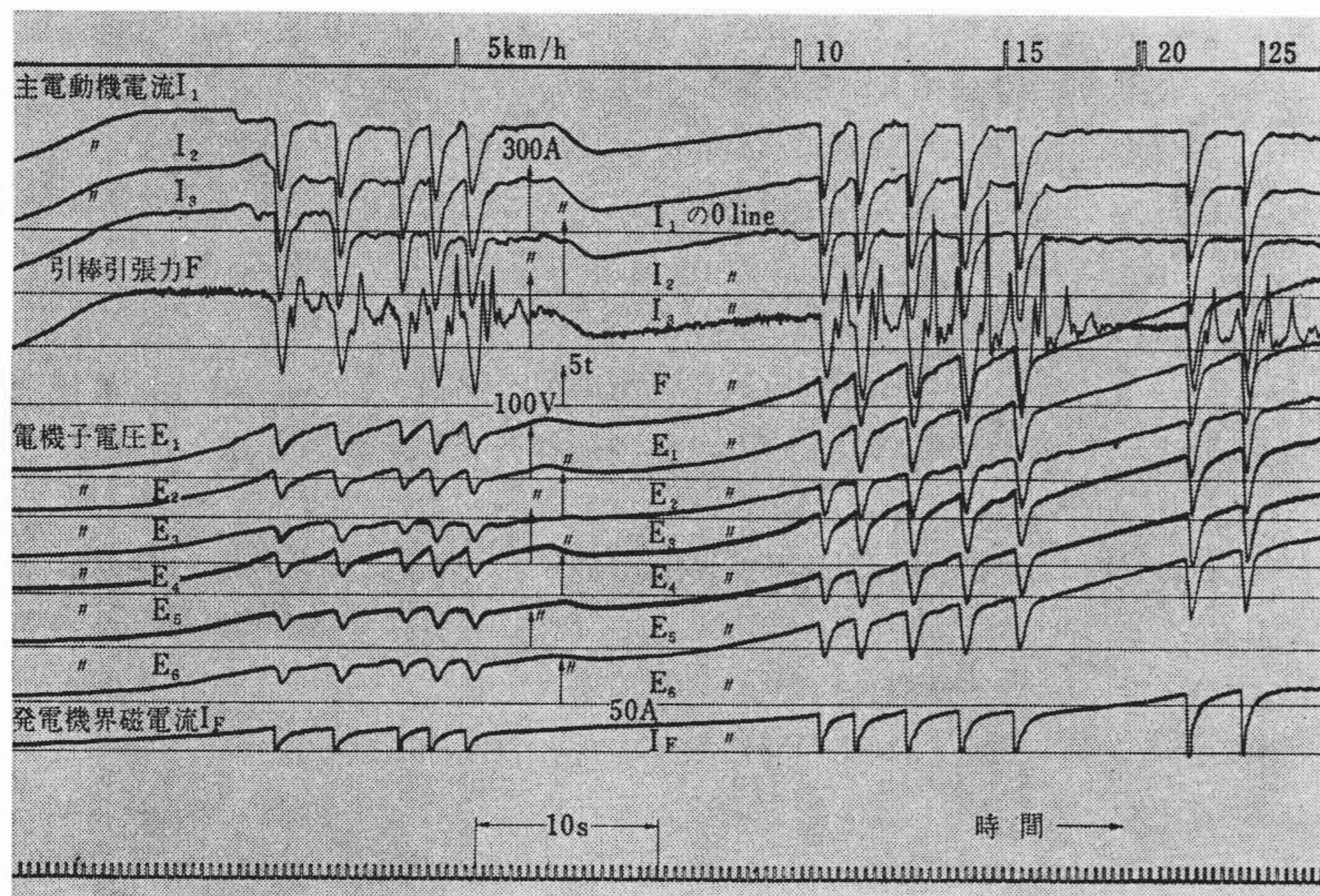


図10 在来形の空転防止装置を使用した場合のオシログラムの一例

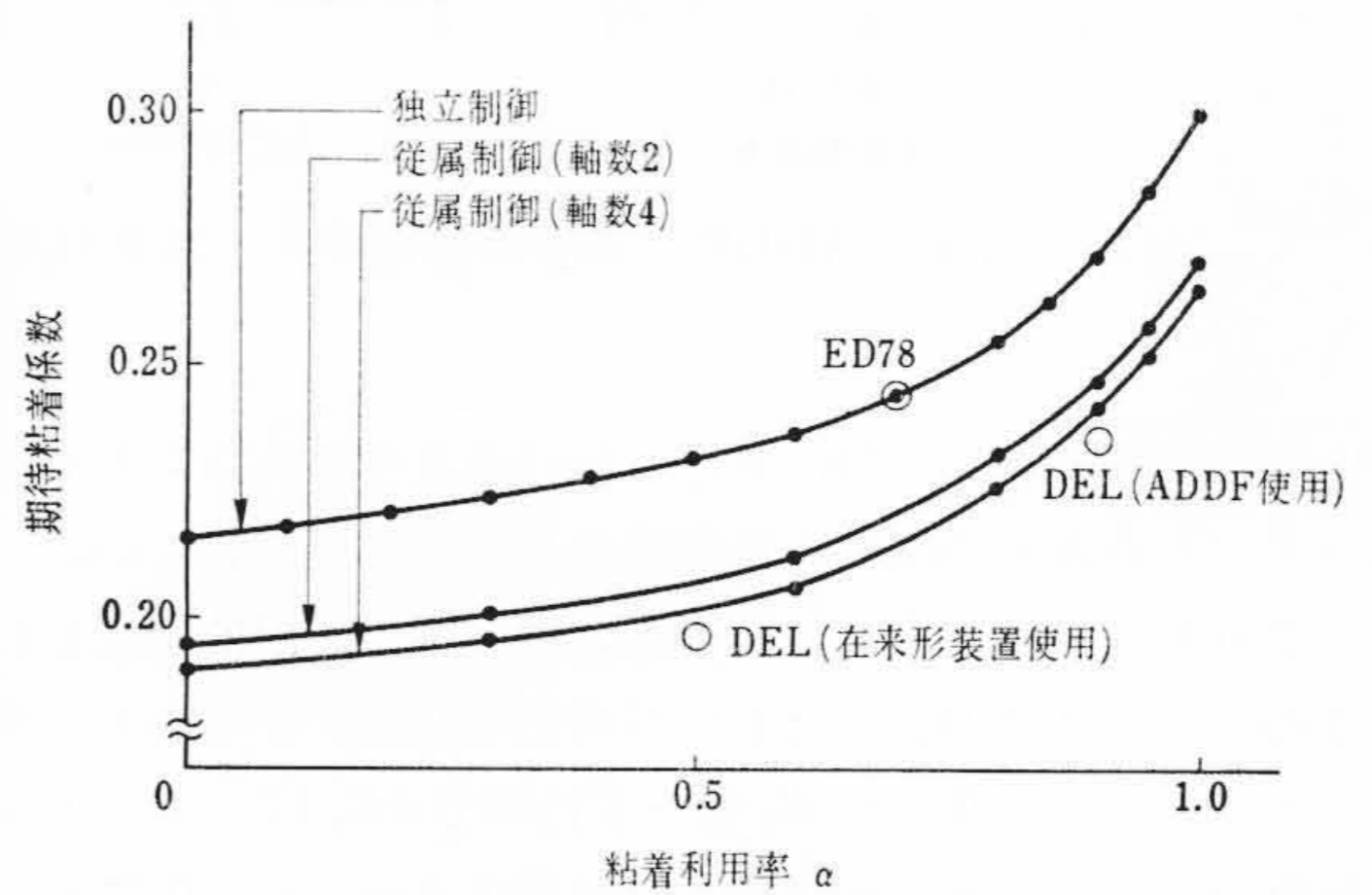


図11 期待粘着係数

ている。再粘着の制御は、各直列に接続された主電動機の間点および抵抗器 WSR の中間点の電圧の最大差電圧（空転時は空転速度にはほぼ比例した変化分を生ずる）およびその微分値（空転時は空転加速度にはほぼ比例した変化分を生ずる）の正極性を、適当な不感帯を持ってサイリスタ増幅器の出力電圧が減少する方向に帰還することにより行なっている。定量的には、微分値帰還のほうは空転加速度で約 2 mile/h/s でサイリスタ増幅器の出力電圧を絞り始め、差電圧帰還のほうは約 2 mile/h で出力電圧を絞り始めるように設定されている。通常、機関車の空転加速度は空転の初期に 3~20 mile/h/s であるから、微分値帰還の方のみでじゅうぶん微小空転速度のうちには再粘着し差電圧の帰還は行なわれない。この差電圧帰還は、微小空転加速度で空転が起こり、高い空転速度に達することを防止するためのバックアップの役目を果たすために設けられているものである。DEL の場合は、励磁機の界磁印加電圧のステップ状の変化に対する主発電機出力電圧の応答の時定数（図 5 の  $T_a$ ,  $T_r$  に相当する）は、主回路の時定数に比べてじゅうぶん大きいので、図 5 に設けたような特別なおくれ要素を設けず、かつ帰還のゲインをじゅうぶん大きくしている。

4.2 試験結果

水戸工場構内試運転線において、供試機関車に負荷用の機関車を

2両連結しそれらにブレーキをかけて負荷とし、レール面上に散水しながら供試機関車で力行加速して再粘着状況を調べる試験を行なった。

図 9 は ADDF を使用した場合のオシログラムの一例である。空転による主電動機電流の減少量は微少であり、したがって空転による引張力の減少量も少なく、粘着利用率は 0.9 以上と推定される。

図 10 は在来形の空転防止装置を使用した場合のオシログラムの一例である。この場合には、ADDF の場合に比べて空転による主電動機電流の減少量が多く、したがって空転による引張力の減少量も多く、粘着利用率は 0.5 程度となっている。

5. 期待粘着係数の推定

期待粘着係数は全粘着引張力の期待値を全動軸上重量で除した値であり、実際には本線上で多数回の粘着性能試験を行なって求めるべきものであるが、そのような試験は非常に困難である。そこで、車輪レール間限界摩擦係数の確率的分布を仮定して計算した結果<sup>(1)</sup>により推定してみる。

限界摩擦係数のレール方向距離に対する変動の様子は、緩慢に変動する成分に急速に変動する成分が重畳しているものと考えた。図 11 は緩慢変動成分の平均値  $\bar{\mu}=0.3$ 、標準偏差  $\sigma=0.05$ 、急速変動成



分の標準偏差  $\sigma_r=0.025$  の場合の期待粘着係数（最適駆動力設定値での値）の計算結果である。独立制御の場合の期待粘着係数は、軸数に無関係であり軸重移動の影響もあまりないが、従属制御の場合は軸数および軸重移動が増加すると期待粘着係数は減少する。図 11 の従属制御の場合の軸重移動率は、粘着係数設定値（全駆動力設定値/全動軸上重量） $\mu_d=0.3$  のとき 10% としている。

さきにシミュレーション計算結果で示した MVR 付交流機関車の代表例の ED 78 形機関車の低速（10~20 km/h）走行時は、空転速度が微小値であり限界摩擦係数の回復による再粘着を期待しうることを考慮すると独立制御と考えられ、表 1 より粘着利用率  $\alpha=0.7$  である。本例の 6 軸 DEL の在来形空転防止制御の場合は  $\alpha=0.5$  の従属制御、ADDF の場合は  $\alpha=0.9$  の従属制御と考えられる。したがって、以上の三つの場合の期待粘着係数は図 11 中に示したようになる。

これより、本例の DEL で ADDF を使用した場合の期待粘着係数は在来形空転防止装置を使用した場合より約 20% 増加し、ED 78 形機関車の低速走行時より若干低い値となることが推定される。しかし、軸を機械的に連結して等価的に軸数を減少したり、軸重移動の補償をじゅうぶん行なうなどの改善策を講ずることにより、ADDF を使用した場合の期待粘着係数を、一般の MVR 付交流機関車の低速域と同等になるまで向上することは可能と考えられる。

6. 結 言

主電動機印加電源電圧を連続的に制御しうるサイリスタ式などの電気車を対象として、全速度域にわたり粘着力を有効に利用する再粘着制御方式について検討し、微分差帰還方式再粘着制御装置“ADDF”を開発した。おもな結果は次のとおりである。

- (1) ADDF は、空転加速度が正のときは駆動力をすみやかに減少させ、空転加速度が負のときは徐々に回復するように主電動機印加電源電圧を制御するもので、このような制御により、全速度域にわたり約 90% 以上の粘着利用率が得られることがわかった。
- (2) ディーゼル電気機関車にこの ADDF を適用し、構内試験を行なった結果、予期どおりの性能が得られた。
- (3) ADDF を使用した場合の期待粘着係数は、在来形の空転防止装置を使用した場合に比べて約 20% の向上を期待できる。

終わりに臨み、本研究に対しご指導を賜った日本国有鉄道車両設計事務所の担当各位、ならびに日ごろご指導ご援助を賜っている鉄道技術研究所車両性能研究室の各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 弘津：機械学会講演論文集 No. 215, p. 243-246 (昭 44-10)
- (2) 油井ほか：日立評論 51, 778 (昭 44-8)
- (3) 弘津：機械学会論文集 Vol. 34, No. 265, p. 1523~1532 (昭 43-9)

Vol. 53

日 立 評 論

No. 11

目 次

■ 論 文

- ・ボロン鋳鋼品の製造法に関する二、三の検討
- ・高速圧縮機弁板の応用計測
- ・最近の大形ピレットフライングシャワー
- ・電力系統総合運用自動化における中央自動化システム
- ・HILECTOL シリーズサイリスタ・レオナード装置
- ・タングステン線の延法に与えるルテニウムの効果
- ・日立マグトレーサ（自動すみ肉溶接装置）
- ・家庭用温風暖房機の諸特性
- ・短縮ダイヤル用集中化記憶装置

- ・ポリビタントインエナメル線の諸特性
- 沸騰水形原子力発電設備特集
- ・最近の沸騰水形原子力発電設備
- ・中国電力株式会社島根原子力発電所第 1 号機 460 MW の建設
- ・大容量原子力タービン発電機
- ・BWR プラントの炉心性能計算シミュレーション
- ・再循環ポンプ用可変周波数電源 MG セット
- ・バーナブルポイズン核特性の実験と解析
- ・日立製作所における原子力機器の耐震研究

発行所 日 立 評 論 社

東京都千代田区丸の内一丁目 5 番 1 号  
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地  
郵便番号 101

振替口座 東京 20018 番