

ED 71 形交流電気機関車の性能について

Characteristics of Type ED 71 A. C. Electric Locomotives

伊 沢 省 二* 浅 野 弘** 河 井 貞 治**
Shōji Izawa Hiroshi Asano Sadaharu Kawai

内 容 梗 概

今回国鉄東北線の黒磯-白河間に引きつづき、白河-福島間の電化が完成し、ED 71 形交流電気機関車も試作機を含めて合計 32 両が同線区に投入され、営業運転中である。

同機関車については、昭和 35 年度中にも現地試験をはじめとし多くの試験が行われ、機関車および主要機器の性能もほぼ判明したので、以下に定電圧制御方式の粘着性能に及ぼす効果、主電動機の合理的な脈流対策および水銀整流器の性能を中心として、その検討結果を述べた。

1. 緒 言

さきに東北線黒磯-白河間の交流電化発足に際し、ED 711 号車より ED 713 号車にいたる 3 両の試作機が製作され、昭和 34 年 5 月より行われた現地試験の結果、日立製作所において製作した ED 711 号車が量産の際の標準設計として採用された。

したがって以後福島を経て仙台までの電化に当って、同線区に投入された量産形 ED 71 はすべて同機を基準として製作された。

ED 711 についてはすでに報告^①したが、量産機は ED 711 と比べて、制御方式のほか変更された点も相当あり、ここにその性能に関係する主要事項をとりまとめ報告する。

第 1 図は ED 71 (以下特に断らない限り量産機を指す) の外観を示す。

2. 一 般 仕 様

機関車の一般仕様を第 1 表に示す。また速度-引張力曲線を第 2 図、ノッチ曲線を第 3 図に示す。

3. 定電圧制御方式

ED 71 においては 1,200 t の貨物をけん引し、10% こう配起動を行うためには、粘着係数約 40% を必要とし、ED 711 においても種

々の設計上の新機軸が折込まれたが、量産機においてはさらに速度制御方式にいわゆる定電圧制御方式 (以下 AVR 制御方式と略す) を採用し、粘着特性の向上をはかっている。以下この AVR 制御方式について述べる。

3.1 制 御 方 式

第 4 図は ED 71 の主回路つなぎを示し、平常の運転においては高圧タップ切替器により主変圧器タップを切替えて電圧制御を行うが、重負荷こう配起動など高度の粘着性能が要求される際には、主電動機端子電圧を主幹制御器より与えられる基準電圧に比例するように制御する閉回路自動制御系を構成して運転する。

したがってこの場合の起動は、あらかじめ水銀整流器の制御格子を点弧することなく高圧タップ切替器を任意のタップまで進段せしめておき、その後格子に電圧を印加して水銀整流器を運転に入れ、基準電圧を 0 より徐々にあげて起動を行う。なお基準電圧を最高まで進めたあとは、主幹制御器の主ハンドルにより自由に高圧タップ切替制御を行うことができる。

第 5 図は主電動機回路 4 群中の 1 群を、制御系も含めて示したもので、AVR 制御の動作原理は、主電動機端子電圧を制御装置磁気増幅器に負帰還し、これと主幹制御器の摺動抵抗により与えられる基準電圧と比較し、その差を増幅して水銀整流器の格子点弧位相、換言すれば出力電圧を制御するものである。

以上のような制御により、運転中もし 1 台の主電動機が空転した場合には、主電動機の回転速度は上昇し、その端子電圧も上昇するが、基準電圧を変化させない限り主電動機端子電圧は空転発生前の値に急速におさえられる。

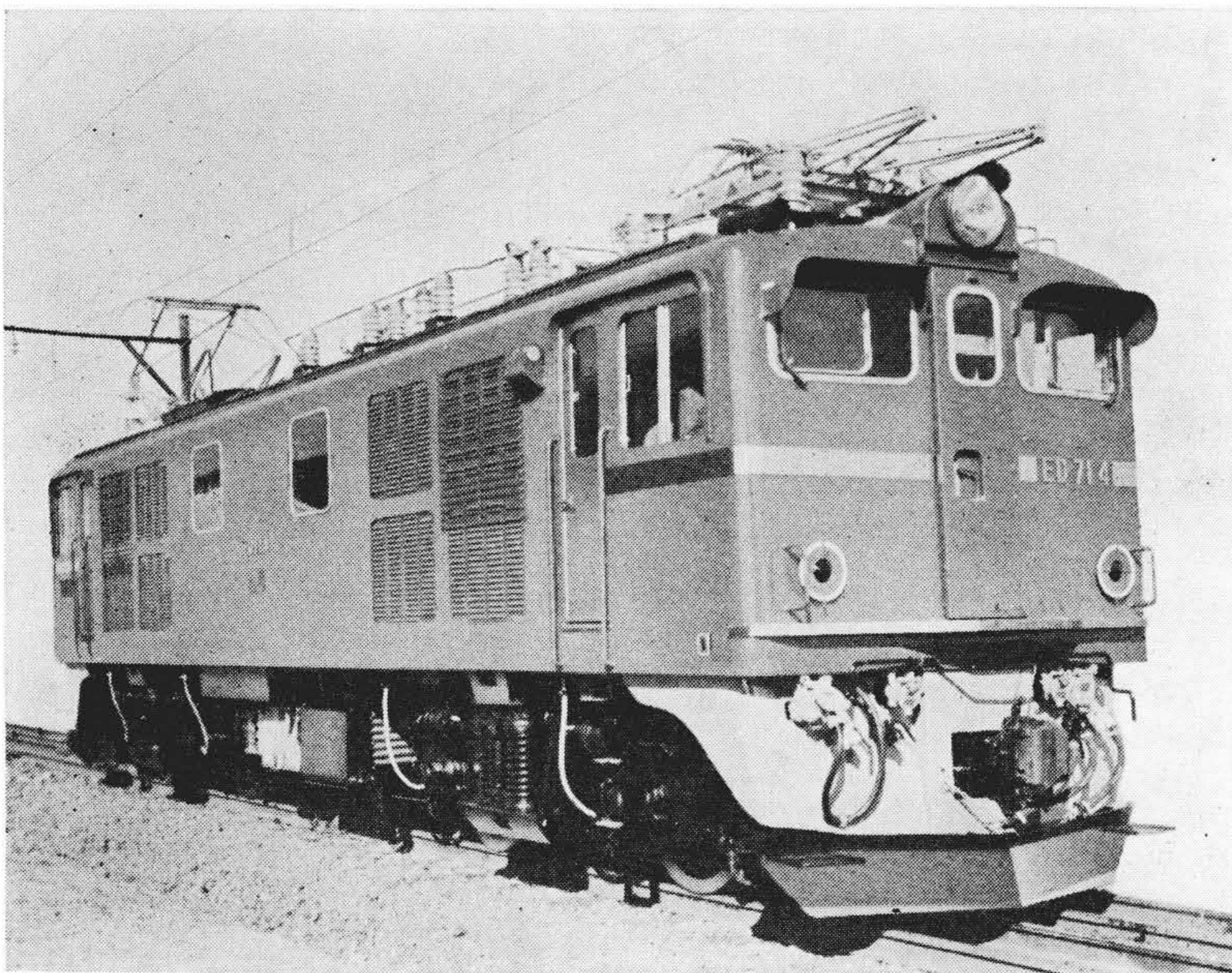
このように AVR 制御はスムーズなノッチレス電圧制御の効果と相まって、主電動機端子電圧および空転速度の上昇を自動的に防止し、動輪の再粘着をはかるものである。

3.2 AVR 制御の効果

AVR 制御によるこう配起動試験を昭和 35 年 8 月、東北本線において行ったが、その試験条件の概要は下記のとおりである。

- (a) 試験場所 東北本線 25% こう配 (直線および曲線区間)
- (b) 試験荷重 600 t (機関車を含まず)
- (c) レール条件 乾燥および撒水
- (d) AVR 制御回路 総合増幅率約 5~27
- (e) 撒 砂 行わず

試験結果は直線区間においては、いずれの場合も容易に起動し、撒砂を行うことなく粘着係数 40% 前後の値を



第 1 図 機 関 車 外 観

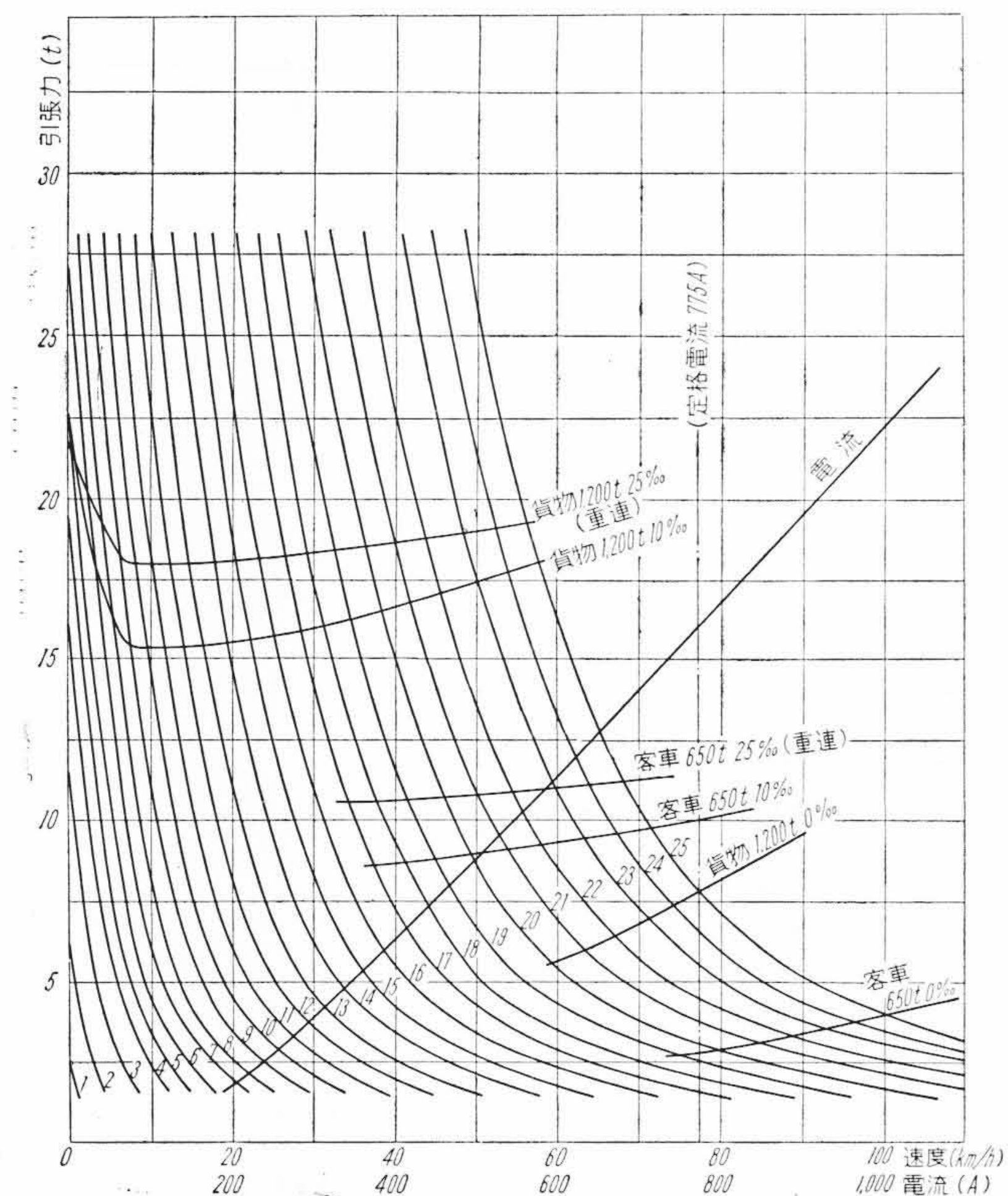
* 日立製作所水戸工場

** 日立製作所日立工場

ED71 形 交 流 電 気 機 関 車 の 性 能 に つ い て

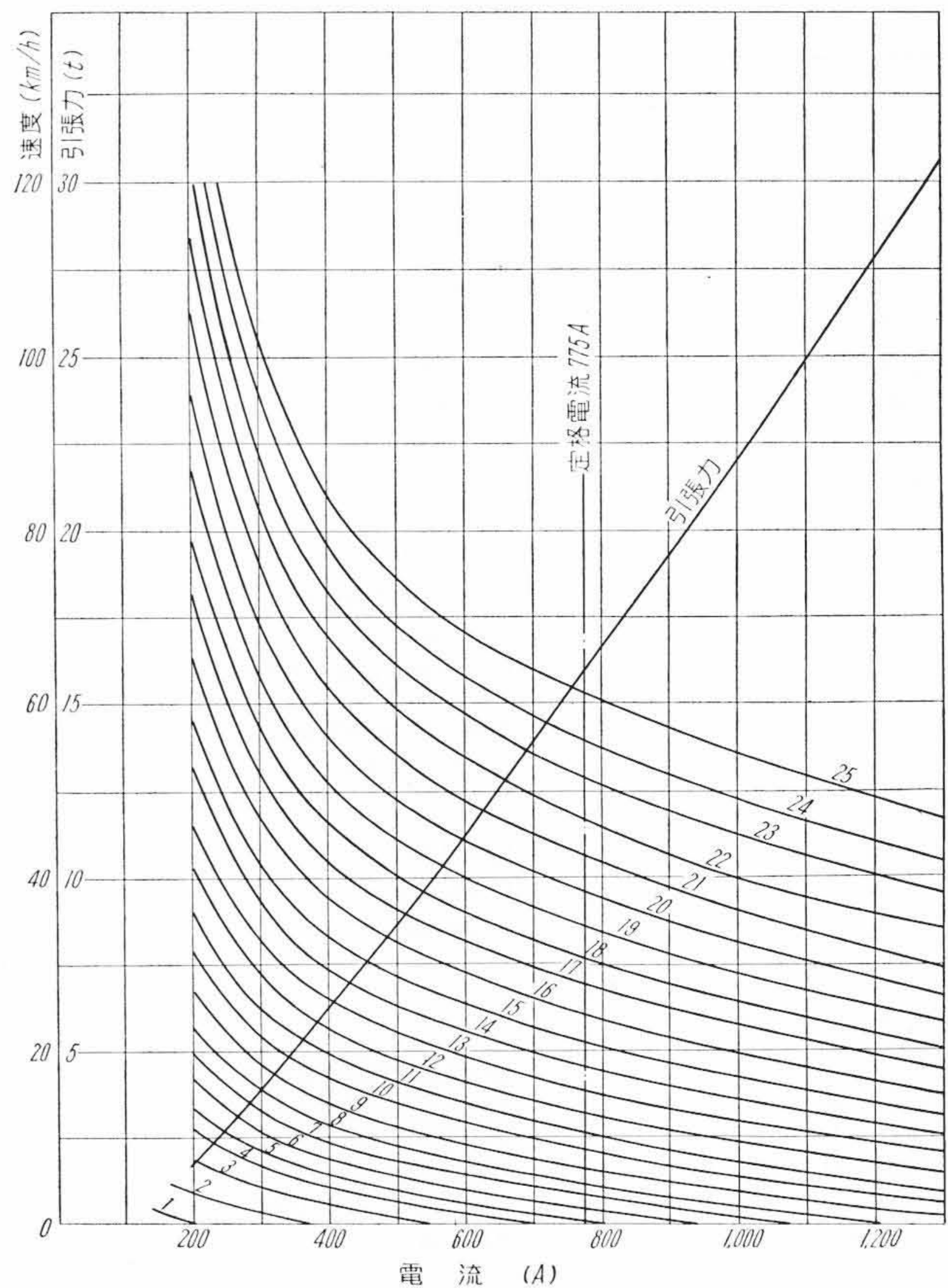
第1表 機 関 車 一 般 仕 様 比 較

項 目	ED 711 号 車	ED 714 号 以 降 車
用 途	客 貨 両 用	客 貨 両 用
電 気 方 式	単相交流 20 kV 50～	単相交流 20 kV 50～
運 転 整 備 重 量	64 t	64 t
車 軸 配 置	Bo—Bo	Bo—Bo
機 関 車 主 要 寸 法	箱形兩運転台	箱形兩運転台
連 結 面 間 長 さ	14,400mm	14,400mm
車 体 長 さ	13,600mm	13,600mm
心 皿 間 距 離	7,600mm	7,600mm
車 体 高 さ	3,550mm	3,550mm
車 体 幅	2,800mm	2,800mm
台 車	揺まくら式 2 軸ボギー	揺まくら式 2 軸ボギー
固 定 軸 距 離	2,500mm	2,500mm
動 輪 径	1,120mm (計算 1,080mm)	1,120mm (計算 1,080mm)
動 力 伝 達 方 式	1 段減速固定中空軸式	1 段減速固定中空軸式
歯 車 比	15：82＝1：5.47	15：82＝1：5.47
機 関 車 性 能		
連 続 定 格 出 力	1,900 kW	1,900 kW
連 続 定 格 速 度	42.5 km/h	42.5 km/h
連 続 定 格 引 張 力	16,000 kg	16,000 kg
最 高 運 転 速 度	95 km/h	95 km/h
主 変 圧 器	1 台	1 台
形 式	(日立形式) AF1V-AMCC 屋内用送油風冷式密封形，ラジアルコアタイプ	(国鉄形式) MT1 屋内用送油風冷式密封形，ラジアルコアタイプ
冬 期 容 量	1 次 2,980 kVA，2 次 3,410 kVA， 3 次(補機用) 146 kVA，4 次(暖房用) 420 kVA	1 次 2,910 kVA，2 次 3,320 kVA 3 次(補機用) 146 kVA，4 次(暖房用) 410 kVA
夏 期 容 量	1 次 2,560 kVA，2 次 3,410 kVA，3 次(補機用) 146 kVA	1 次 2,490 kVA，2 次 3,320 kVA，3 次(補機用) 146 kVA
電 圧	1 次 20 kV，2 次 1,107 V×2，3 次 465 V，4 次 1,570 V	1 次 20 kV，2 次 1,075 V×2，3 次 465 V，4 次 1,570 V
相 数，周 波 数	単相，50～	単相，50～
定 格	連 続	連 続
水 銀 整 流 器	1 組	1 組
形 式	(日立形式) ISFO-8GT 単極封じ切り風冷式エキサイترون	(国鉄形式) RM1 単極封じ切り風冷式エキサイترون
タ ン ク 径	310mm	310mm
容 量	2,046 kW	2,046 kW
タ ン ク 数	8	8
主 電 動 機	4 台	4 台
形 式	MT101 直流，直巻，補極付	MT 101 A 直流，直巻，補極付
連 続 定 格 出 力	475 kW	475 kW
連 続 定 格 電 圧	660 V	660 V
連 続 定 格 電 流	775 A	775 A
連 続 定 格 回 転 数	1,140 rpm	1,140 rpm
極 数	6	6
平 滑 リ ア ク ト ル	4 台	4 台
回 路 電 圧	660 V	660 V
連 続 定 格 電 流	775 A	775 A
インダクタンス	4 mH	4.2 mH
制 御 方 式		
速度制御方式	10ノッチ未満……水銀整流器の位相制御 10ノッチ以上……高圧タップ切替電圧制御 (位相制御10ノッチ)＋(タップ制御24ノッチ)	高圧タップ切替電圧制御および水銀整流器の位相制御による定電圧制御 タップ制御 25 ノッチ
ノ ッ チ 数	位置追従方式 (磁気増幅器使用)	位置追従方式 (磁気増幅器使用)
重 連 制 御 方 式	DC 100 V	DC 100 V
制 御 回 路 電 圧		
制 御 装 置		
タ ッ プ 切 替 器	立形油入スライド式	立形油入スライド式
位 相 制 御 器	抵 抗 加 減 式	抵 抗 加 減 式
補 機 回 路 電 圧	440 V 50～ 三相	440 V 50～ 三相
補 助 回 転 機	組	組
相 数 変 換 機	1-100 kVA，440 V，1,490 rpm 単相—三相 直流発電機(2.5 kW，100 V，25 A，1,490 rpm) 付	1-100 kVA，440 V，1,490 rpm 単相—三相 直流発電機 (5 kW，100 V，50 A，1,490 rpm) 付
主電動機用電動送風機	2-電 動 機……440 V，50～，13 kW，三相誘導電動機 送 風 機……1,465 rpm，風量 80m ³ /min×2，風圧 200mmAq	2-電 動 機……440 V，50～，13 kW，三相誘導電動機 送 風 機……1,465 rpm，風量 80m ³ /min×2，風圧 200 mmAq
直流リアクトル用電動送風機	1-電 動 機……440 V，50～，2.2 kW，三相誘導電動機 送 風 機……1,465 rpm，風量 60m ³ /min，風圧 60mmAq	1-電 動 機……440 V，50～，2.2 kW，三相誘導電動機 送 風 機……1,465 rpm，風量 10 m ³ /min，風圧 45 mmAq
電動空気圧縮機	1-電 動 機……440 V，50～，15 kW 三相誘導電動機 空気圧縮機……C 3,000形，吐出力295.4l/min，圧力6.5～8kg/cm ²	1-電 動 機……440 V，50～，15 kW，三相誘導電動機 空気圧縮機……C 3,000形，吐出力295.4l/min，圧力6.5～8kg/cm ²
主変圧器用電動送風機	2-電 動 機……440 V，50～，1.5 kW，三相誘導電動機 送 風 機……1,430 rpm，風量 70m ³ /min，風圧 50 mmAq	2-電 動 機……440 V，50～，1.5 kW，三相誘導電動機 送 風 機……1,430 rpm，風量 70m ³ /min，風圧 50 mmAq
主変圧器用電動油ポンプ	1-電 動 機……440 V，50～，2.2 kW，三相誘導電動機 油 ポ ン プ……1,425 rpm，揚油量 0.75 m ³ /min，総揚程 8m	1-電 動 機……440 V，50～，2.2 kW，三相誘導電動機 油 ポ ン プ……1,425 rpm，揚油量 0.75 m ³ /min，総揚程 8 m
整流器用電動送風機	2-電 動 機……440 V，50～，7.5 kW，三相誘導電動機 送 風 機……2,900 rpm，風量 150 m ³ /min，風圧 105 mmAq	2-電 動 機……440 V，50～，7.5/0.95 kW，三相誘導電動機 送 風 機……2,900/1,430 rpm，風量 150/75 m ³ /min，風圧 105/26 mmAq
ブ レ ー キ 装 置	空気ブレーキおよび手ブレーキ	空気ブレーキおよび手ブレーキ



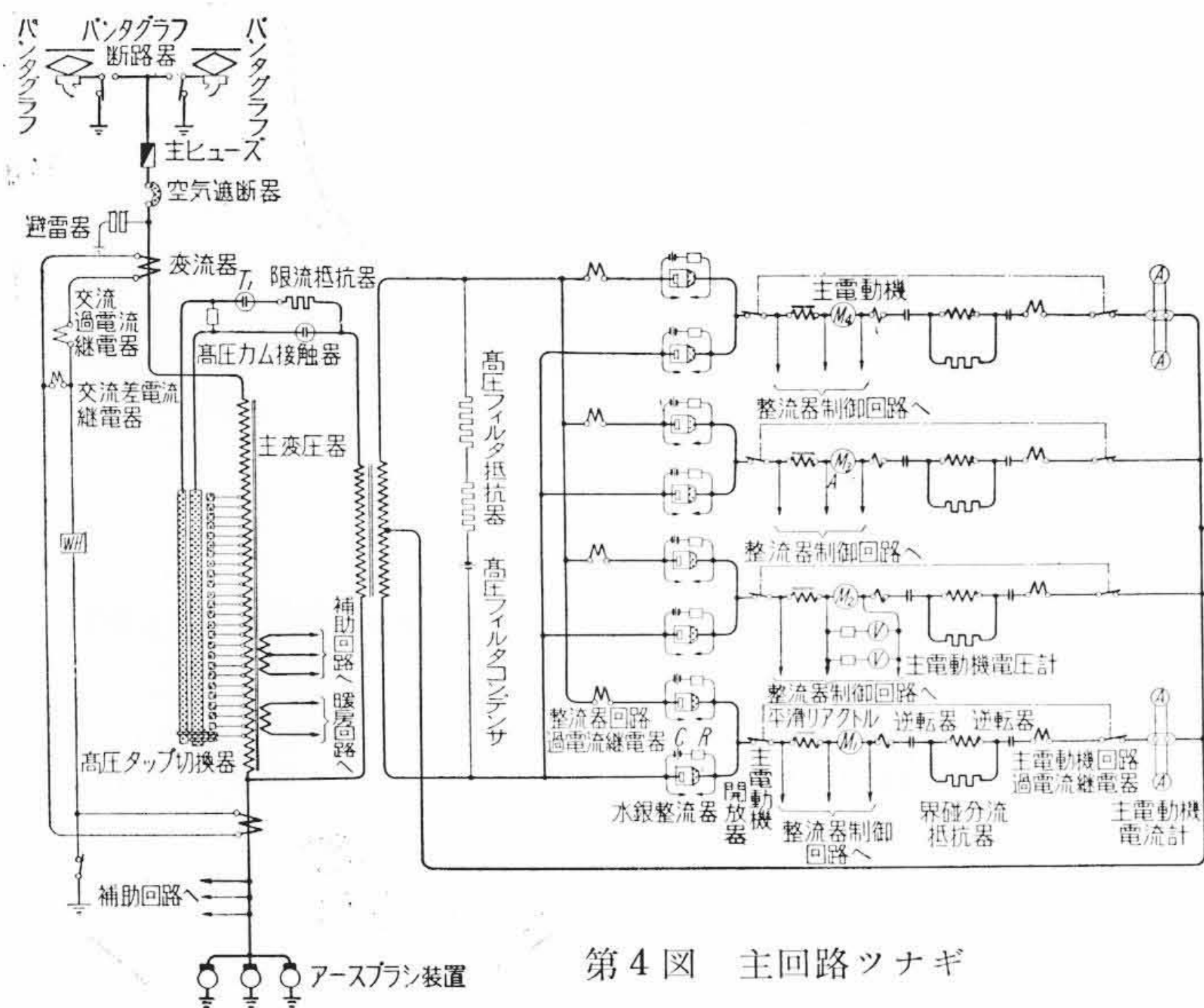
ED71 形交流電気機関車
速度—引張力曲線
架線電圧 20 kV 50 c/s
主電動機 MT 101 A 形 475 kW×4
動輪径 1,080 mm (計算用)
歯車比 82 : 15
機関車重量 64 t

第 2 図 速度—引張力曲線

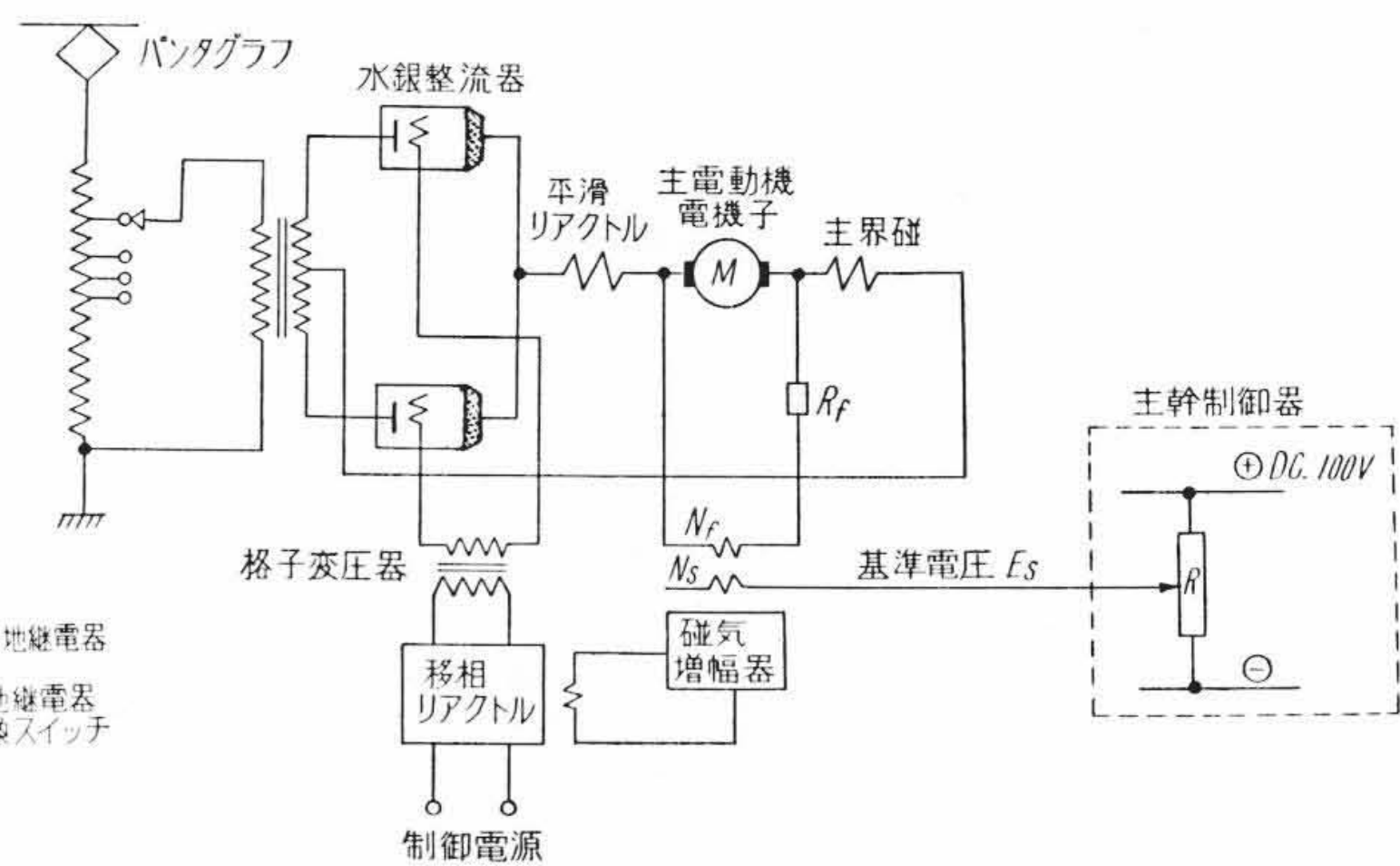


ED71 形交流電気機関車
ノッチ曲線(タップ制御時)
架線電圧 20 kV 50 c/s
歯車比 82 : 15
主電動機 MT 101 A 形
電動機定格電圧 660 V
動輪直径 1,080 mm
475 kW×4

第 3 図 ノッチ曲線



第 4 図 主回路ツナギ



第 5 図 AVR 制御説明図

しばしば記録し、空転速度も AVR 制御はタップ制御に比し小さく、容易に再粘着する傾向を示した。

第 6 図は起動試験時の電流オシログラフの一例である。

しかし起動後、速度が上昇し、15 km/h 付近よりさらに加速しようとする場合、あるいは曲率半径 600m を有する曲線区間における起動においては、空転速度が増大し、加速あるいは引出困難な場合があった。

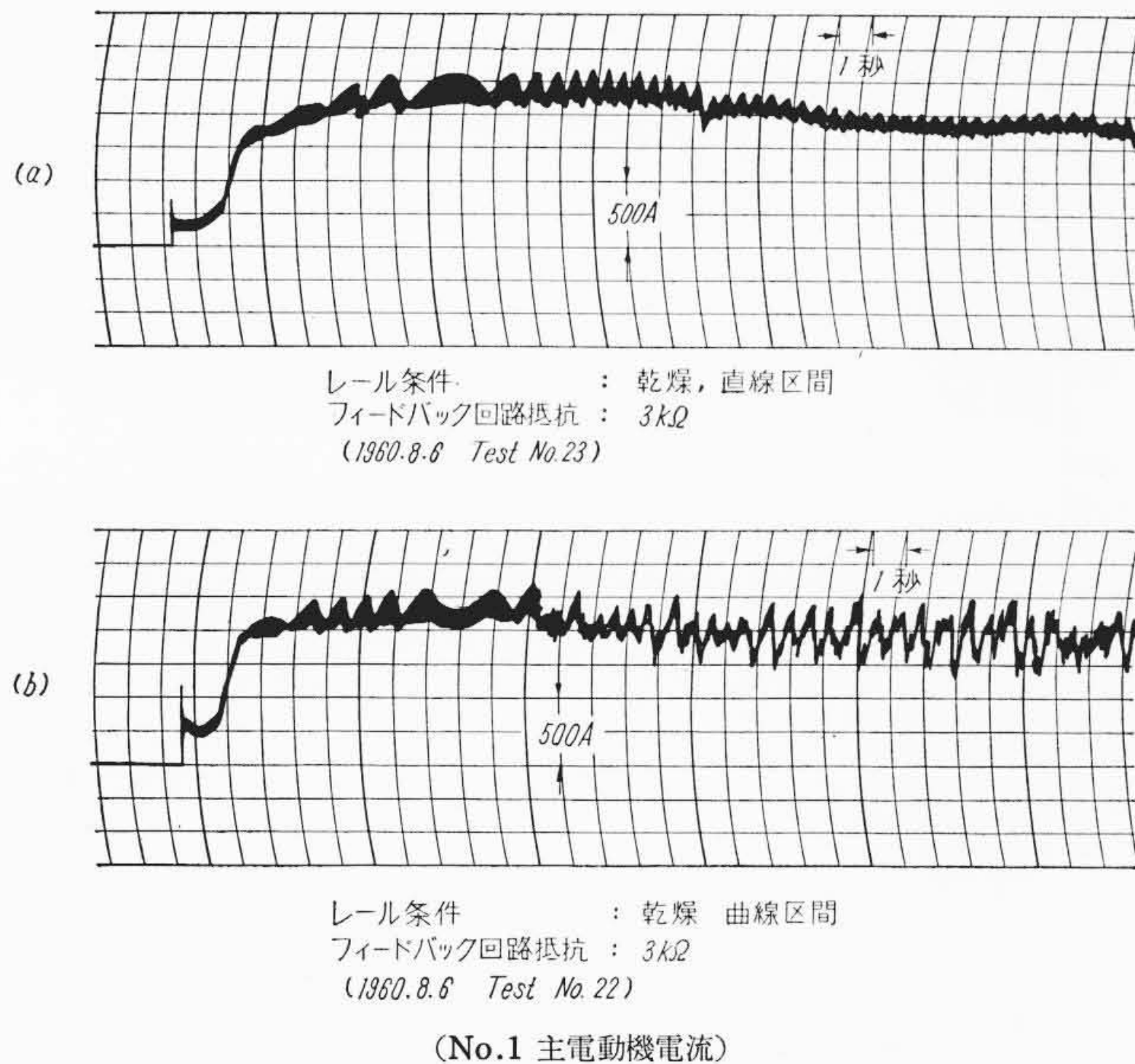
AVR 制御は高速のとき、換言すると整流器出力電圧の高い範囲になるほど、総合増幅率が一定であっても空転速度が上昇する傾向にあり、上記 15 km/h 付近において加速困難な場合の粘着係数 30～

25%はともかくとして、曲線区間起動において引出し困難の場合でも粘着係数 42～40%を得ていることは、AVR 制御の効果が発揮されたといえよう。

このときの主電動機電流の状況の一例を第 6 図(b)に示す。図からもわかるように、これらの場合はいずれも電流波形は約 1.2～2.0 c/s の振動の上に、さらに 8 c/s 程度の振動が重った波形を示し、外部所見は台車のピッチングがみられ、各軸は空転再粘着を繰り返す。

このような台車のピッチングを生ずる段階に至ると、安定した再粘着は困難となり、起動中の機関車の加速度は極度に減少するので、この振動源を究明するためまず電氣的制御系にその原因がないかを検討した。

第 7 図(a)は台車、駆動装置のばね系を除外した AVR 制御系のブロック線図である。これに主電動機電流 1,000 A、機関車速度 5



第6図 こう配起動時の主電動機電流オシログラム

km/h 付近における各要素の定数を代入すると第7図(b)となる。

ここにおいて空転が発生し、負荷トルク τ_L が単位関数的に変化した場合の主電動機回転速度、電流などの状況を、変化分のみに注目してアナログコンピュータにより求めれば第8図のように結果を得、振動波形を含まないことがわかる。この状況はフィードバック回路抵抗 $R_f=10^3(\Omega)$ 、ダンピング回路なしの場合についても求めたが、ほとんど変りなかった。

一方駆動装置クイルばね系の固有振動数は計算により約8c/sと推定され、またこの振動はタップ制御の場合にも現れていることから空転時の8c/s振動はクイルばねの振動によるものと考えられる。したがってこのばね系の振動を改善すれば粘着性能はさらに改善の余地はあるものと考えられる。

なお第7図(a)の中より主回路常数によって構成される小ループ回路のみを取り出して同図(c)とし、同回路の固有振動数を求めれば、これは簡単に計算により求められ

$$\omega_0 = \frac{1}{T_E T_M} - \left(\frac{1}{2T_E} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに 電気的時常数 $T_E = L/R$

$$\text{機械的時常数 } T_M = \frac{RJ}{(K\phi)^2}$$

より $\omega_0 = 12.3 \text{ rad/s}$

$$f_0 = 2\pi/\omega_0 = 1.95 \text{ c/s} \dots\dots\dots (2)$$

となる。これはAVR制御系と関係なく決まる数値であるが、このように比較的小さい局所振動がAVR制御系の中に単独で存在することは困難であると考えられ、空転時にみられる1.2~2.0c/sの振動は車体の上下振動(振動数は約1.5c/s程度)と共振しているものと推定される。

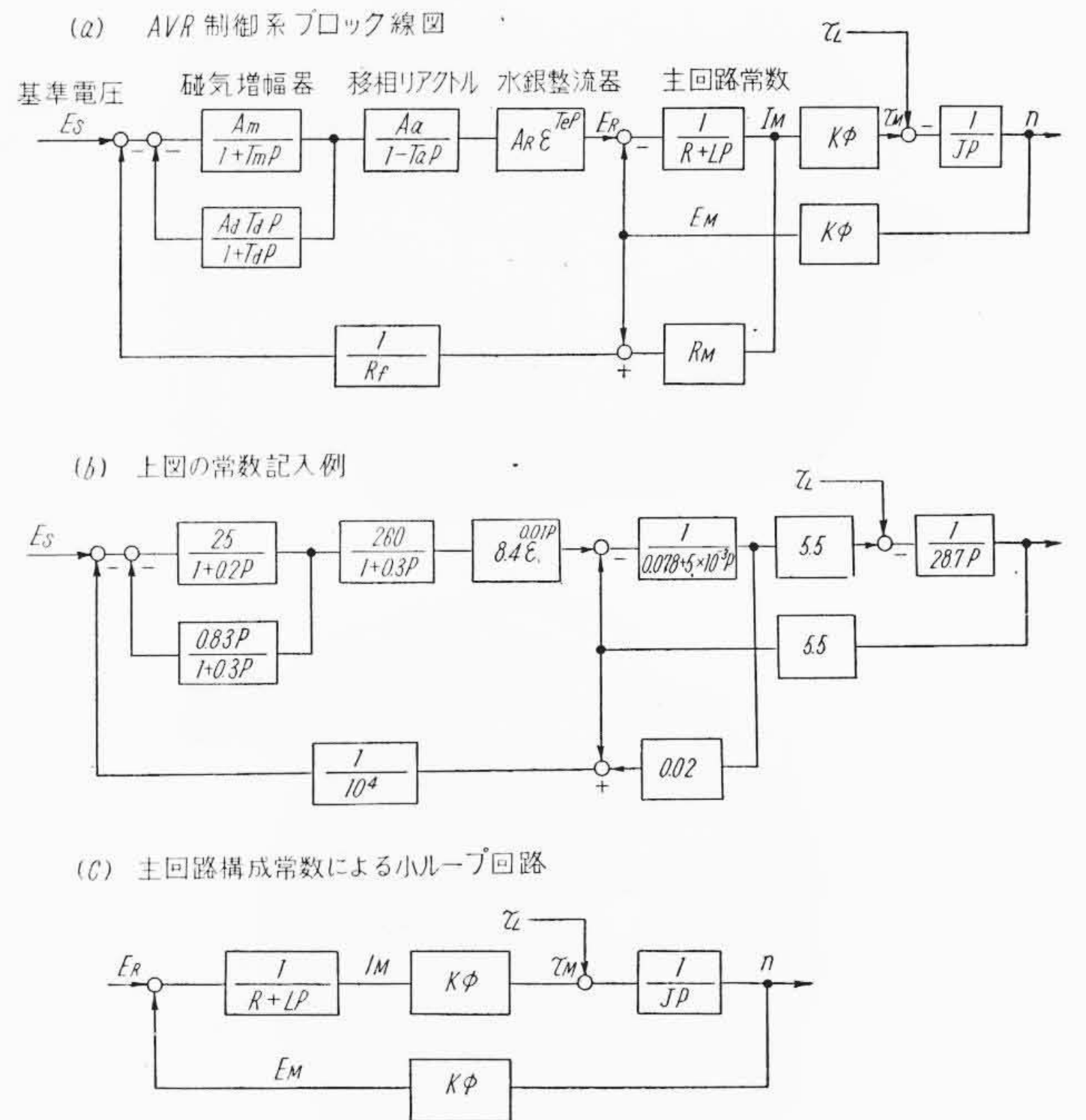
これらの点についてはさらに今後機械系を含めた解析を進めてゆく予定である。

4. 主 電 動 機

4.1 MT101A形主電動機の改良点

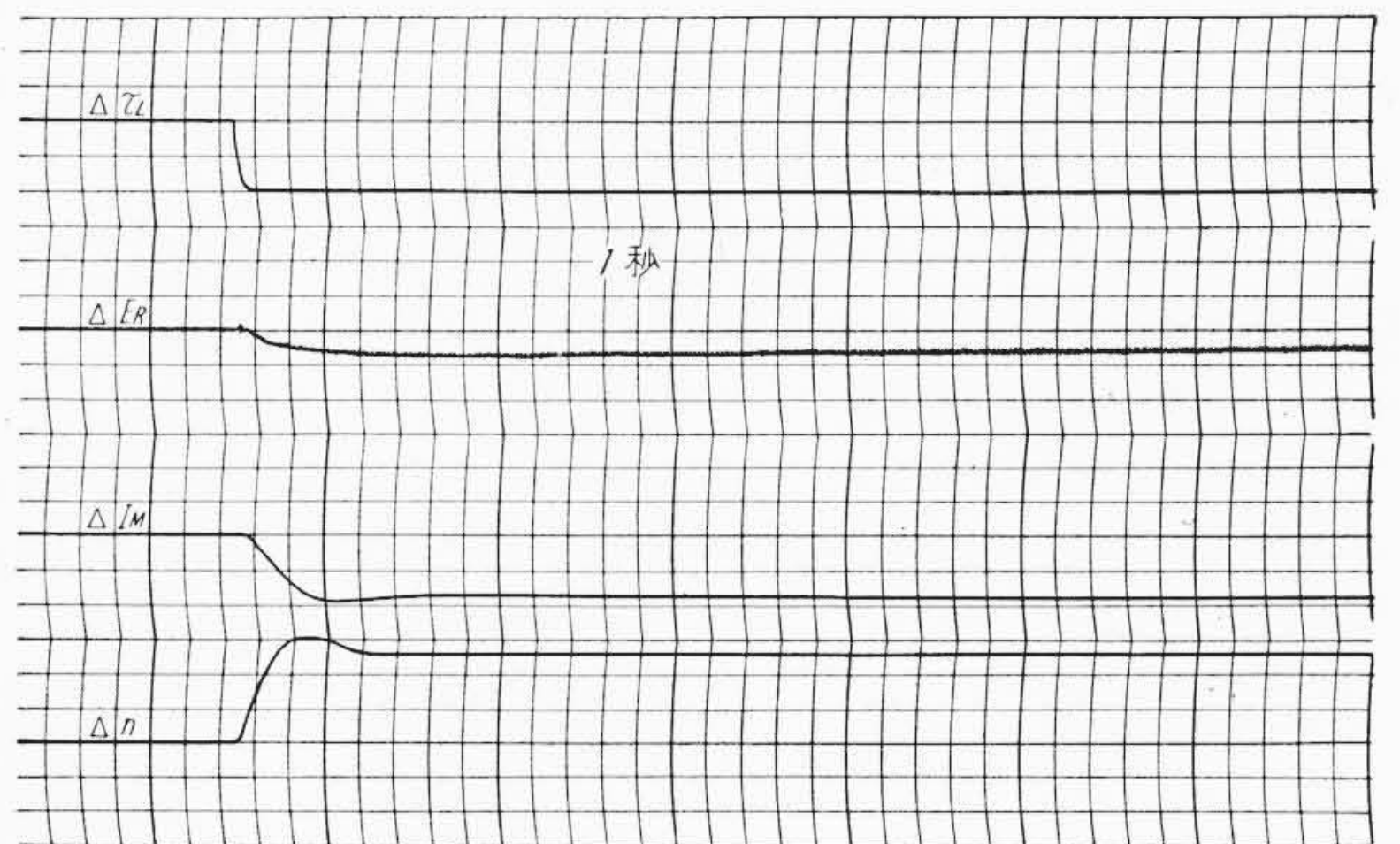
量産ED71形に使用しているMT101A形475kW主電動機は試作車の使用実績や各種の試験、検討の結果、つぎのように整流の改善と保守上の改良が加えられている。

(1) MT101形では界磁電流の脈動をおさえるため主極コイルを抵抗器により15%分流していたが、整流器逆弧時などのせん絡



- T_m : 磁気増幅器時常数 (s)
- T_d : ダンピング回路時常数 (s)
- T_a : 移相リアクトル時常数 (s)
- T_R : 水銀整流器無数時間 (s)
- A_m : 磁気増幅器増幅度 (A/A)
- A_d : ダンピング回路増幅度 (A/A)
- A_a : 移相リアクトル増幅度 (A/deg.)
- A_R : 水銀整流器増幅度 (V/deg.)
- R, L : 主回路等価抵抗 (Ω) およびインダクタンス (H)
- R_f : フィードバック回路抵抗 (Ω)
- E_R : 水銀整流器出力電圧 (V)
- I_M : 主電動機電流 (A)
- E_M : 主電動機逆起電力 (V)
- $K\phi$: 主電動機の逆起電力と速度の比 (Volt·s/rad)
- τ_M : 主電動機出力トルク (Newton·m)
- τ_L : 負荷トルク (Newton·m)
- J : 動輪を含めた主電動機慣性性能率 kg-m^2
- R_M : 主電動機電機子回路抵抗 (Ω)
- n : 主電動機回転速度 (rad/s)

第7図 AVR 制御系ブロック線図

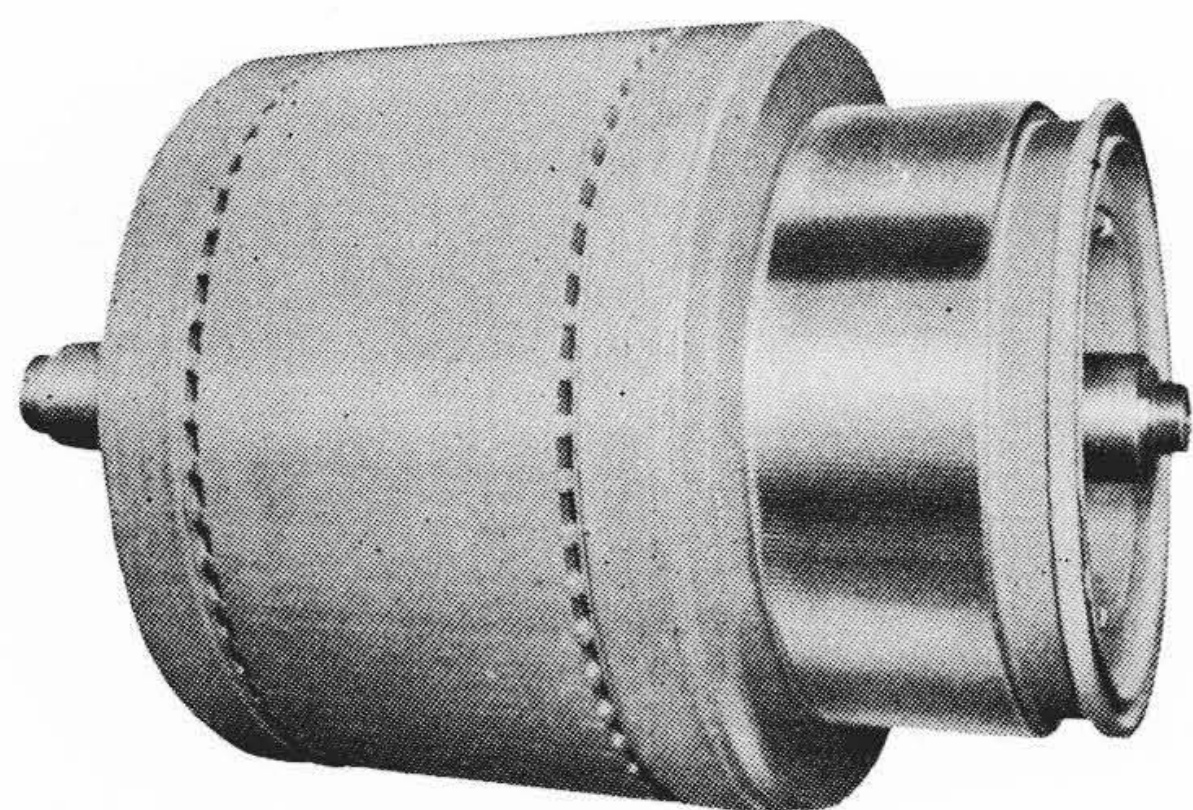


第8図 アナコン解析結果

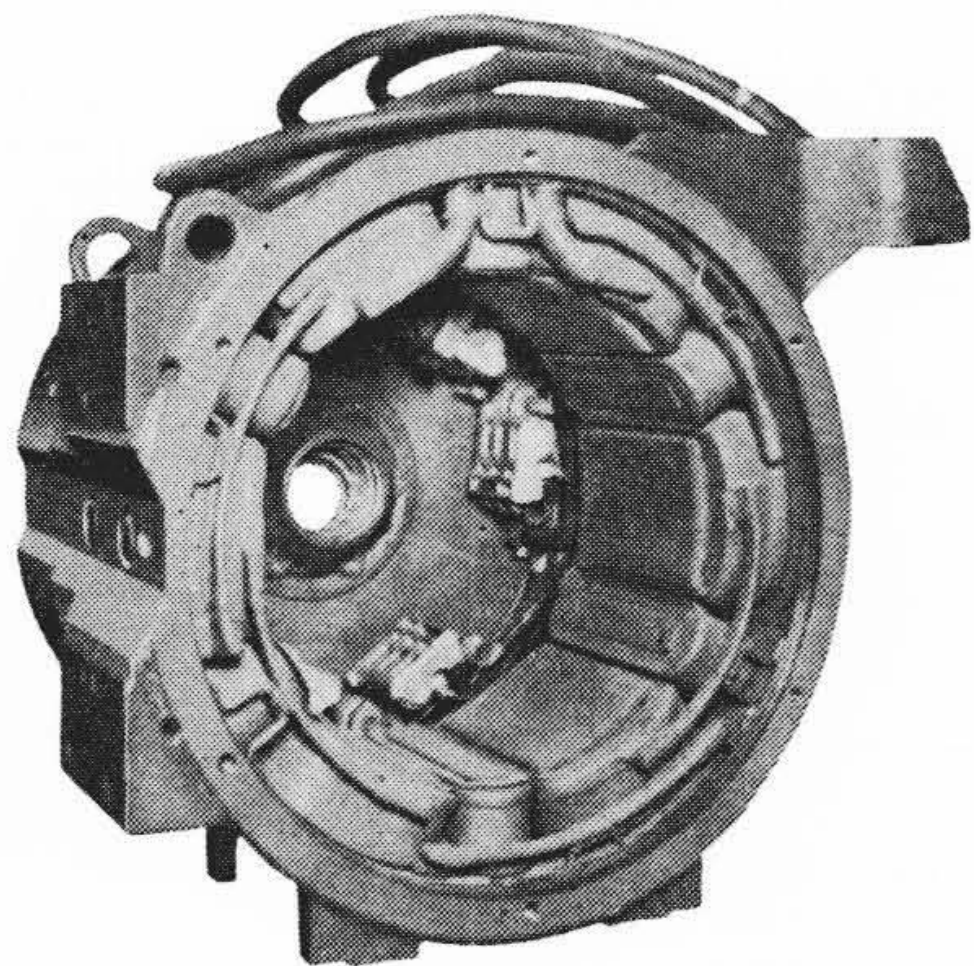
を防ぎ、整流、温度上昇などの点から最適の2%の分流率に変更した。

(2) 過負荷時の整流を改善するため、磁気棒の厚さを13%、補極鉄心の幅を14%、補極コイルの巻数を9%増して補極磁気回路の飽和をおさえ、また平滑リアクトルの過負荷におけるインダクタンスを増して整流ならびに粘着特性の改善を計った。

(3) ピニオンの材質をSNCM26に変更するとともに、歯形転移量を7mmに増し、歯車中心間距離の増加分3mmだけピニオンの歯底の肉厚を増し、さらに電機子軸とのはめあい部テーパ $1/10$ を $1/15$ に変更してピニオンの強化を計った。



(a) 電 機 子



(b) 固 定 子

第 9 図 MT101A 形 475 kW 主電動機

(4) 歯車側軸受を N-326/C4 に変更することにより、ピニオンを抜かないで軸受箱、鏡ぶたの分解、組立てができるようにした。第 9 図に固定子および電機子を示す。

4.2 最適界磁分流率の決定

整流器式電気車用主電動機は単相全波整流による脈流電源により運転されるため、整流ならびに温度上昇を許容限度内におさめるよう主電動機的设计、平滑リアクトルのインダクタンス、界磁分流率などの最適の組合わせを、車両全体として最も小形軽量で保守の簡単になるように計画すべきである⁽²⁾。また水銀整流器式の場合には万一逆弧が発生しても主電動機がせん絡や地絡を起して以後の運転に支障を起すことのないよう、電流急変に対する過渡時の整流の良いたことが考慮されねばならない。

以下これらの点につき MT101A 形主電動機について検討結果および実測結果の一部をまとめた第 10 図につき述べる。

4.2.1 電 流 脈 動 率

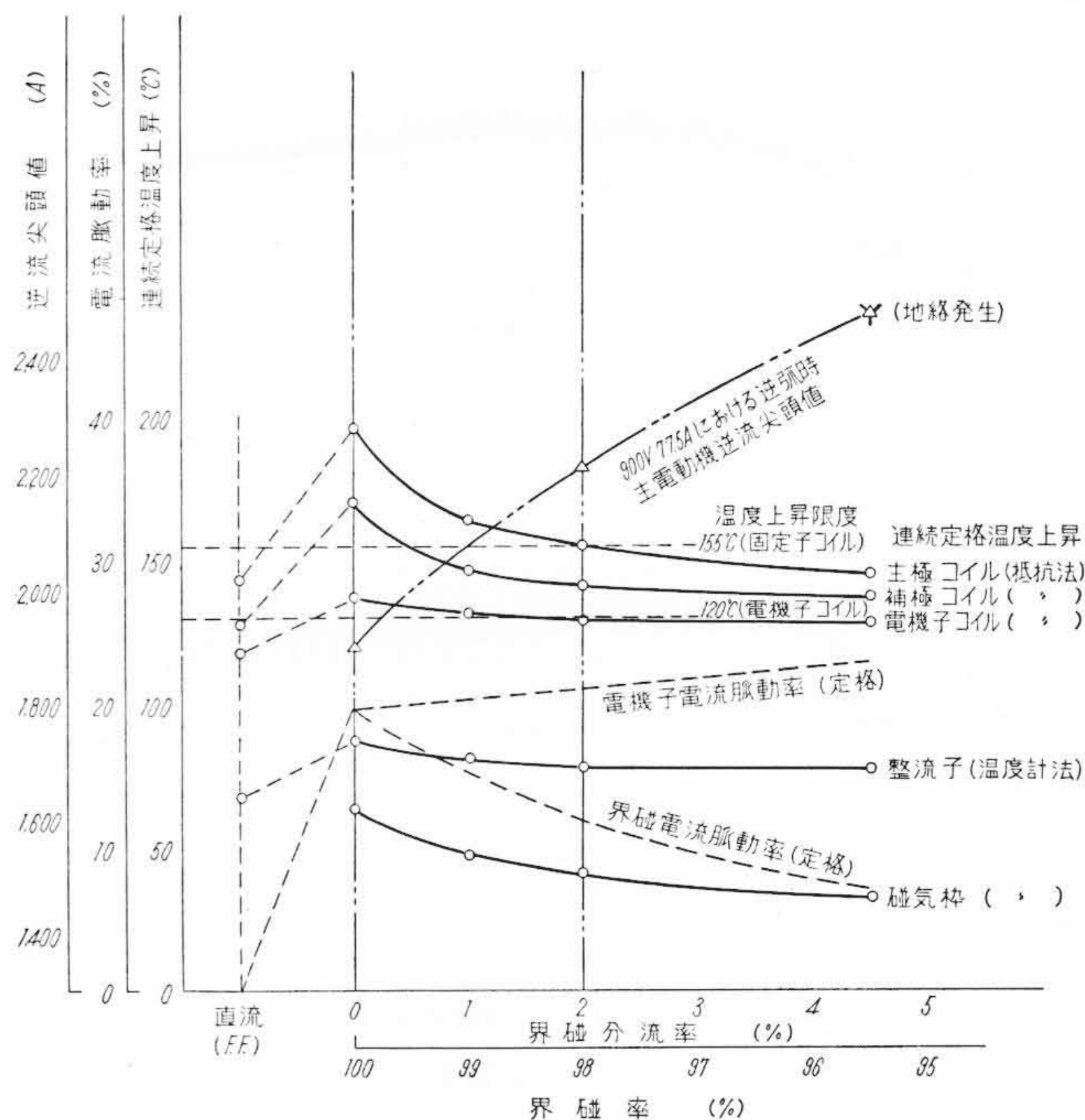
整流器の出力電圧 e は、平均値を E_d 、 $2n$ 次高調波電圧の波高値を E_{2nf} 、電源周波数を f 、時間を t とすれば(3)式で表わされる。

$$e = E_d + \sum_{n=1}^{\infty} E_{2nf} \sin 4nf\pi t \quad (3)$$

電動機回路の全抵抗を R 、 $2nf$ (Hz) に対するインピーダンスを Z_{2nf} 、電動機逆起電力の平均値を E_c 、 $2nf$ 成分の振幅を E_{c2nf} 、高調波電流の位相遅れを φ_n とすれば電動機には(4)式の電流 i が流れる。

$$i = \frac{E_d - E_c}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_{2nf} - E_{c2nf}}{Z_{2nf}} \sin(4nf\pi t - \varphi_n) \\ = I + \sum_{n=1}^{\infty} I_{2nf} \sin(4nf\pi t - \varphi_n) \quad (4)$$

実際には第 2 次高調波(50 Hz の場合は 100 Hz)成分が主であり、またインピーダンスとして抵抗分は小さいため、脈動電流は 100 Hz に対するリアクタンスを X_{100} とすればほぼ $\frac{E_{100}}{X_{100}}$ となって電流脈動率 p は



連続定格 475 kW 660 V 775 A 1,140 rpm
最高使用電圧 900 V

第 10 図 界磁分流率と温度上昇、電流脈動率および逆流尖頭値の関係

$$p \div \frac{I_{100}}{I} \div \frac{E_{100}}{X_{100} I} \quad (5)$$

で近似される。以下 4 次以上の高調波を省略して、界磁コイルのインピーダンスを $Z_f = R_f + jX_f$ 、分流抵抗を R_s 、界磁率を α (分流率は $1 - \alpha$) とすればつぎの諸式から概略値を算出することができる。

$$\text{分流抵抗 } R_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot R_f \quad (6)$$

$$\text{界磁電流の平均値 } I_f = \alpha I = \frac{R_s}{R_f + R_s} I \quad (7)$$

$$\text{界磁電流の脈動率 } p_f \div \frac{p}{\alpha} \cdot \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + X_f^2}} = p \cdot \frac{R_f + R_s}{\sqrt{R_s^2 + X_f^2}} \quad (8)$$

$$\text{界磁電流の脈動分 } I_{fr} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_f \cdot p_f \div \frac{p I}{\sqrt{2}} \cdot \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + X_f^2}} \quad (9)$$

$$\text{分路電流の平均値 } I_s = (1 - \alpha) I = \frac{R_f}{R_f + R_s} I \quad (10)$$

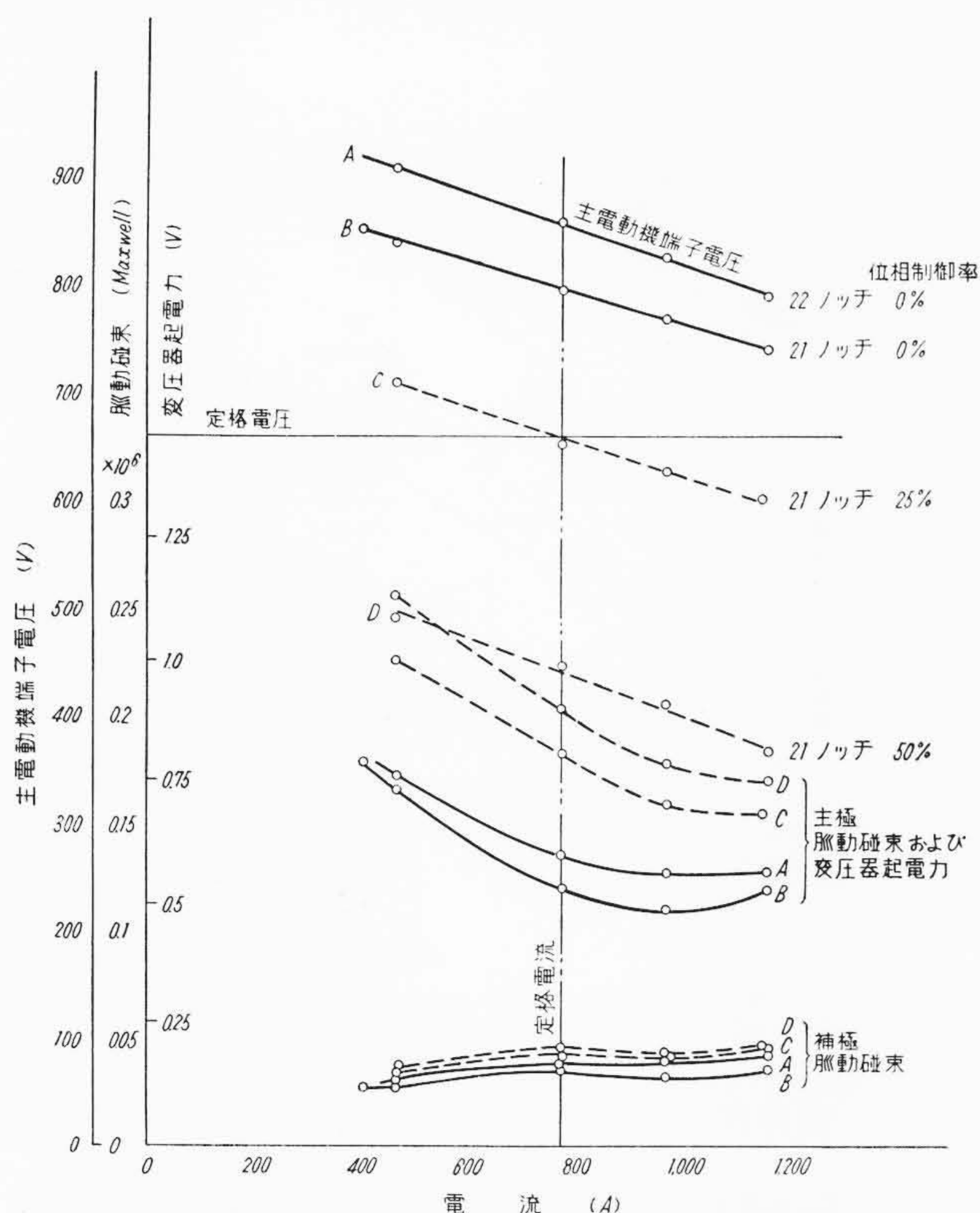
$$\text{分路電流の脈動率 } p_s \div \frac{p}{1 - \alpha} \cdot \frac{X_f}{\sqrt{R_s^2 + X_f^2}} \\ = p \cdot \frac{X_f (R_f + R_s)}{R_f \cdot \sqrt{R_s^2 + X_f^2}} \quad (11)$$

$$\text{分路電流の脈動分 } I_{sr} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_s \cdot p_s \div \frac{p I}{\sqrt{2}} \cdot \frac{X_f}{\sqrt{R_s^2 + X_f^2}} \quad (12)$$

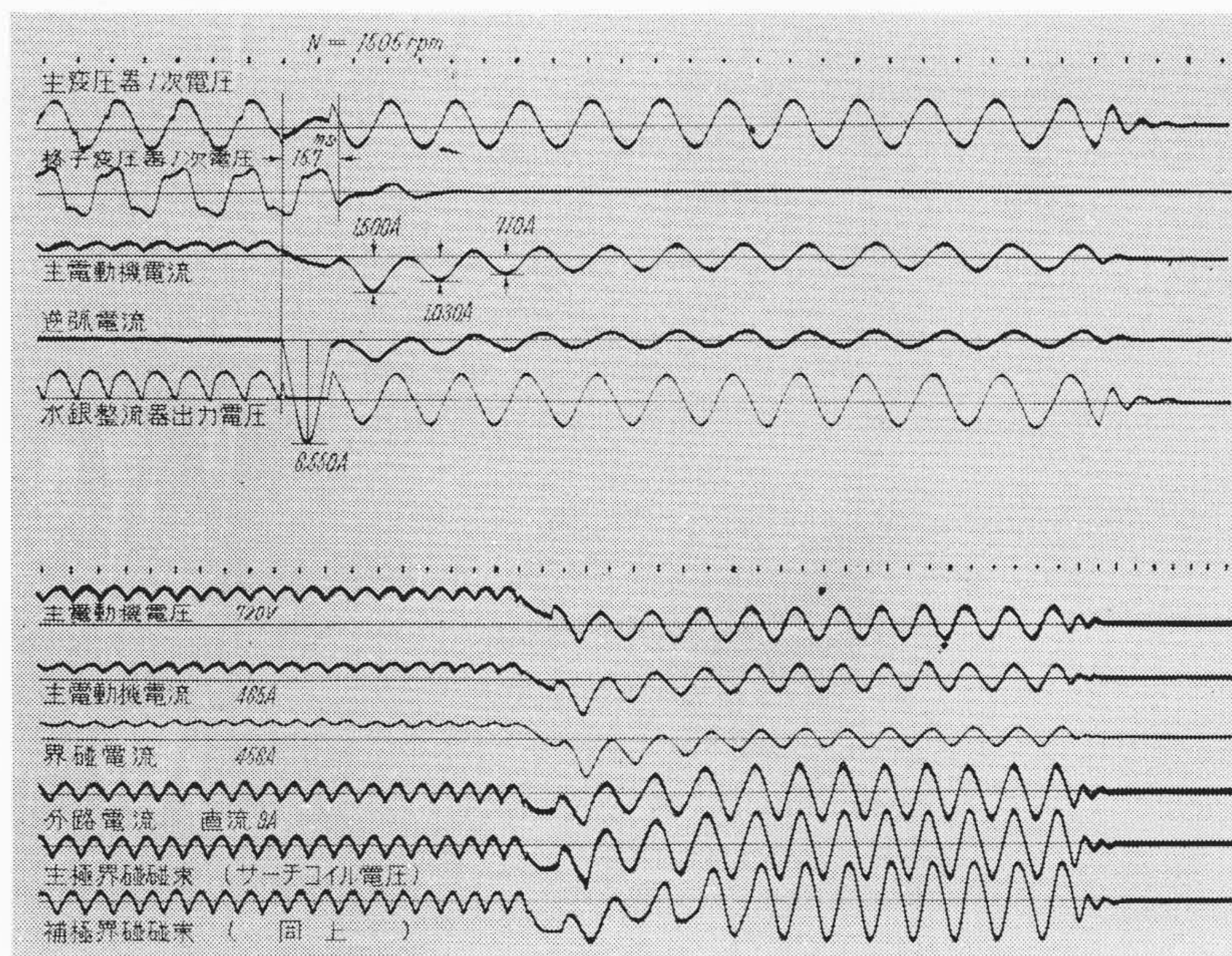
$$\text{分流抵抗損失 } (I_s^2 + I_{sr}^2) R_s \div \left\{ (1 - \alpha)^2 + \frac{p^2 X_f^2}{2(R_s^2 + X_f^2)} \right\} I^2 R_s \quad (13)$$

(13) 式からわかるように分流抵抗は第 2 項の脈動分による損失がかなり大きくなることに注意を要する。

界磁分流率を増すと主極コイルのインピーダンスが減少するため電機子電流の脈動率は大きくなるが、主極コイルの脈動電流に対するリアクタンスは磁気回路にソリッドの磁気棒があって比較的小さいため 2 % 分流により 1.5 % 増すに過ぎない。しかし直流分を 2 % 分流する抵抗値は主極コイル抵抗の 49 倍にあたるが、主



第 11 図 界磁分流抵抗のない場合の主極および補極の脈動磁束（主電動機 1 台のみ運転）



第 12 図 脈流運転および人工逆弧試験時の電圧、電流ならびに脈動磁束によるサーチコイル誘起電圧の波形

極コイルのインピーダンスに対しては約67%の抵抗で分路することになるため、界磁電流の脈動率は半減し、定格で12%程度となる。これらの数値はほぼ計算値に一致している。

4.2.2 温度上昇

脈流運転の場合、脈動電流により銅損が電機子および補極コイルは(2)(3)式よりほぼ $\sqrt{1+\frac{p^2}{2}}$ 倍、主極コイルは(7)~(9)式より全界磁の直流運転の場合の $\alpha^2\sqrt{1+\frac{p^2}{2}}$ 倍になり、さらに表皮効果による損失が加わるほか磁気回路、特に磁気枠の過流損失が著しく、第10図にみられるように分流率2%以下で温度上昇が急増する。本機は2%分流で温度上昇限度以下に納まっている。

4.2.3 整 流

第11図に界磁分流抵抗のない場合の主極ならびに補極脈動磁

束を、サーチコイルにより電圧および位相制御率を変えて測定した結果を示す。同図の磁束は真空管電圧計で測定した脈動磁束による誘起電圧の実効値より100~の波高値に換算して示した。A、Bの磁束が過負荷において増しているのは平滑リアクトルの飽和により電流脈動率が大きくなるためである。脈動磁束は直流磁束の飽和の影響を受け、脈動電流のみでは決まらないが、直流磁束が等しい場合には電流脈動率にほぼ比例するので電源電圧にほぼ比例し、位相制御により増大する。いま主極脈動磁束を ϕ_{fr} (Maxwell)とすればブラシで短絡されて整流をうけている電機子コイルに発生する1ターンあたりの変圧器起電力 e_l (V)は(14)式で与えられる。

$$e_l \doteq 4.44 \cdot 2f \cdot \phi_{fr} \times 10^{-8} = 4.44 \times \phi_{fr} \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (14)$$

この変圧器起電力による短絡電流をブラシの接触抵抗と短絡コイルのインピーダンスによって許容値以下におさえる必要があり、界磁分流抵抗のない場合は許容値以上となって火花を発生するが(交流整流子電動機の場合よりインピーダンスは大きい)、ブラシのカバリングの大きいことに注意する必要がある。前記のように界磁を2%分流すると変圧器起電力は半減し、全運転範囲にわたって許容値以下におさえられる。これらの検討にあたってはソリッドの磁気回路を含む場合、主極磁束脈動率が磁気回路中の渦流や飽和により電流脈動率の10~20%に減少し、 X_f の値も磁気飽和曲線から求めた値の10~20%に過ぎないことに注意を要する。

つぎに電機子電流の脈動によるリアクタンス電圧の残留火花電

圧⁽³⁾に対しては補極の脈動磁束の減衰ならびにそ

の電流からのおくれが問題となるが、補極の脈動磁束はほとんどソリッドの磁気枠中に生ずる渦流により打消されてもれ磁束のみとなり、電機子反作用による逆方向の磁束が補極空隙磁束を支配するため第12図にみられるように主電流の脈動分と逆位相に近い脈動磁束となる。この脈動磁束による速度起電力と脈動電流によるリアクタンス電圧のベクトル和として残留リアクタンス電圧を概略算定することができる。

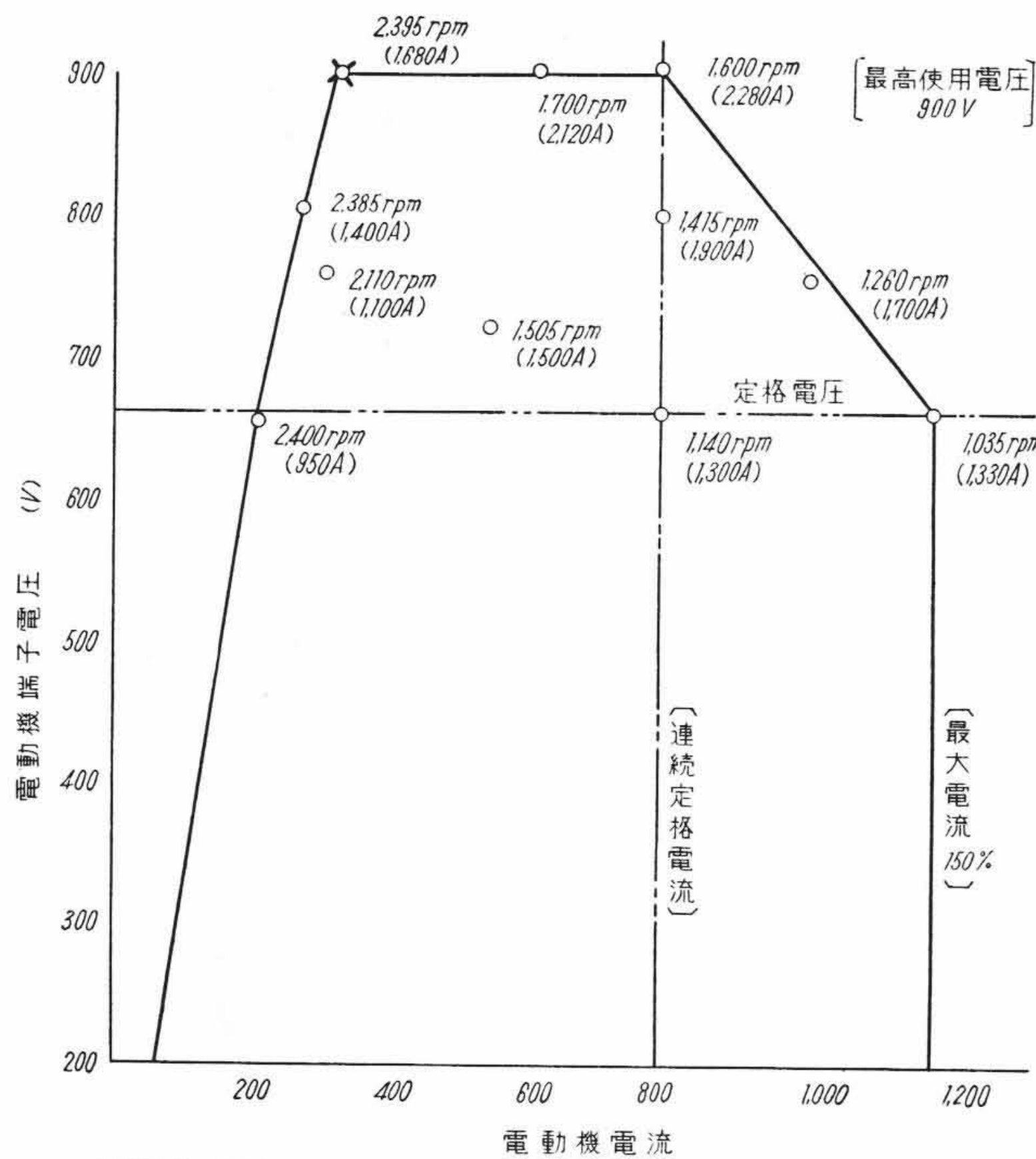
本機はさきに述べたようにこう配起動時の粘着性能を改善するため、必要に応じて整流器の格子制御によるAVR運転を行うが、定格ノッチで格子制御により加速する場合でも、整流火花は実用上差つかえない程度である。

火花の原因となる脈流による残留火花電圧は上記の変圧器起電力ならびにリアクタンス電圧のベクトル和として求められ、これを許容値以下におさえるよう界磁分流率と直流リアクトルの値を決定する必要がある。

本機の場合は小形軽量化により、比較的リアクタンス電圧が高いので界磁分流率を15%という大きい値にとると、インピーダンスの減少による脈動電流の増大がかえって合成火花電圧を増大させ、また過渡時の整流を害して好ましくなく、2%程度の分流率とし、定格で4.2mH程度の直流リアクトルを使用するのが適当であるという結論を得た。

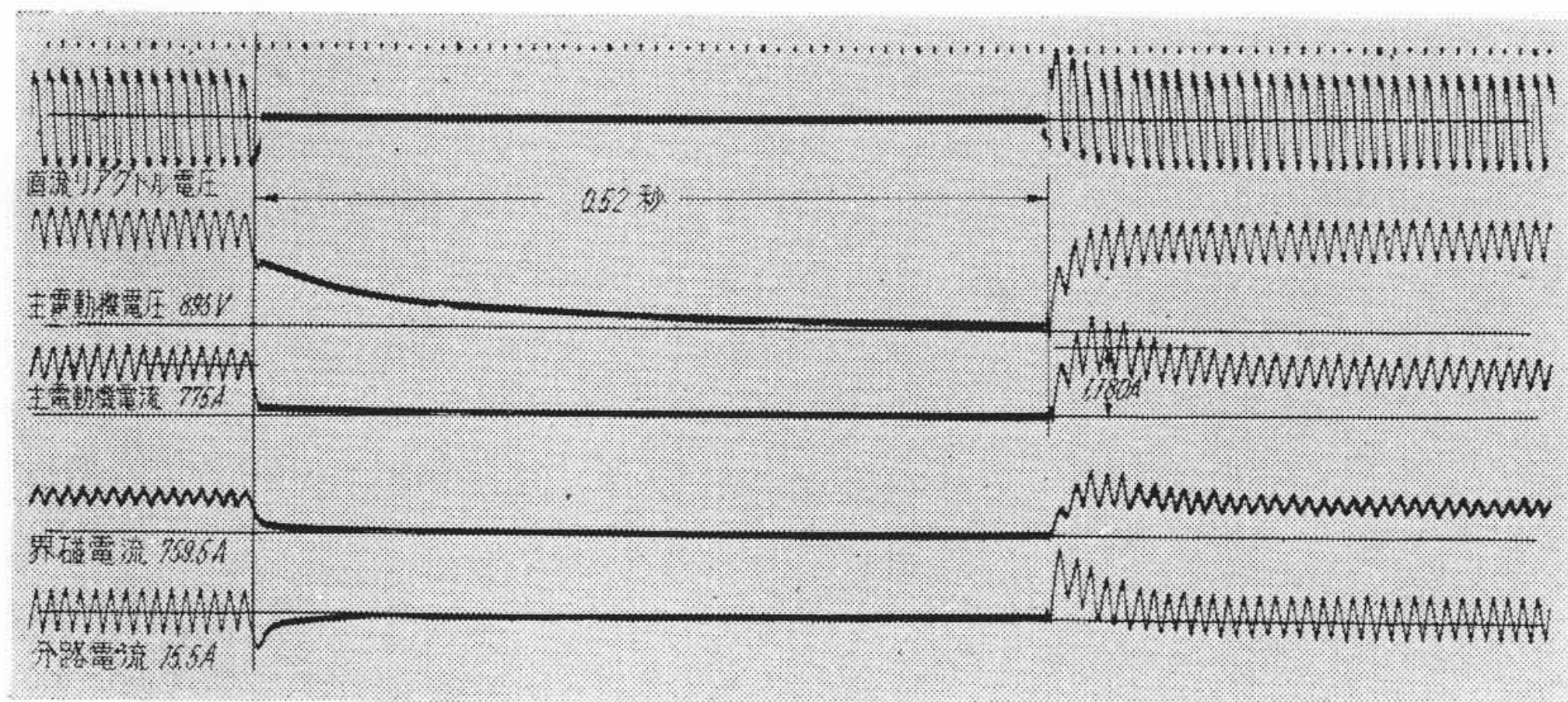
4.2.4 過渡時の整流

第10図に人工逆弧試験の結果より、900V 775Aにおける界磁分流率と主電動機の逆流尖頭値の関係を示した。逆流尖頭値は分流率とともに増大し、4.5%以上の分流率では地絡を生ずる。さらに分流率の大きい場合には整流子のVリング側端面などでせん絡を生じ、整流子を損傷する。日立製作所製水銀整流器は正常な使用条件では逆弧の発生はまったくみられないが、万一温度制御な



添附数値は回転数を示す（逆流尖頭値）
○印は地絡、閃絡の発生なし
×印は軽微な地絡発生を示す

第 13 図 界磁分流率 2% における MT101A 形主電動機の人工逆弧試験結果



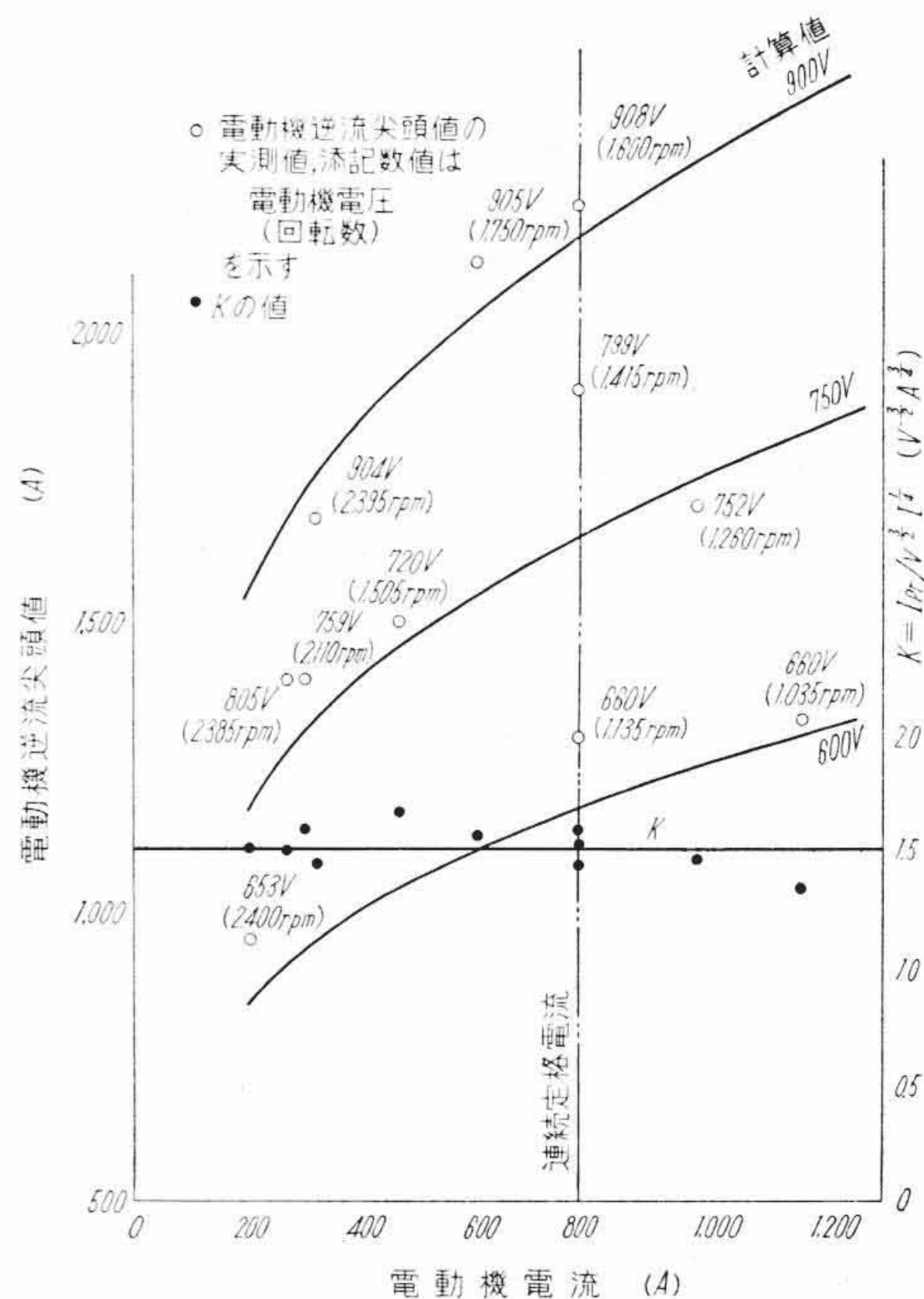
第 14 図 895 V 775 A 1,610 rpm における 0.52 秒の電力中断試験オシログラム

どに故障を生じた場合などの事故を考慮すると逆弧時に主電動機の整流子を損傷することは運転保守上好ましくない。

本機は 4.1 で述べたように過渡時の整流改善を計り、また界磁分流率を 2% とすることにより、第 13 図に示すように運転範囲のほぼ全域において逆弧時にもせん絡、地絡を生じないものとすることができた。最悪条件の 905 V 2,395 rpm ではアーキングスタッドへの地絡がみられたが、整流子の損傷はほとんどなく、そのまま使用できる軽微なものであった。またタップ制御ならびに位相制御運転で種々の電力中断、電圧急変などの試験を行った結果、いずれも安定した整流が保たれ、実用上十分な整流安定度を有していることが確認された。

第 12 図に 720 V 1,505 rpm における人工逆弧試験、第 14 図に 900 V 775 A における 0.5 秒の電力中断試験のオシログラムを示す。

逆弧時に主電動機に流れる逆流の尖頭値は主磁束のおくれによる短絡電流の最大値と交流電流の波高値の和として求められ、磁気回路の飽和、回路のインピーダンスなどに左右されるが、逆弧時の電動機電圧 V 、電流 I と逆流尖頭値 I_{pr} の間にはほぼ (15) 式のような関係がある。



第 15 図 逆弧時の運転条件と逆流尖頭値の関係

$$I_{pr} = KV^{\frac{3}{2}} \cdot I^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

第 15 図の試験結果に示すように ED71 形機関車で 2% 分流率の場合の K の値は 1.53×10^{-2} 程度である。逆流尖頭値は逆弧発生

より約 1.3 サイクル後に生じ、運転条件による時間差は少ないので、過渡時の整流の苦しさは速度 N (rpm) と逆流尖頭値 I_{pr} (A) の積で判断することができる。上記試験結果では $N I_{pr}$ が 4×10^6 以下ではせん絡や地絡を生じていない。もちろん、整流子片間電圧が許容値をこえ、あるいは定常時の補極の強さが許容値以上にずれているような運転条件では $N \cdot I_{pr}$ 以外にこれらの影響を考慮しなければならない。

5. 水銀整流器

本機関車に使用された水銀整流器および付属装置（格子制御装置）はすべて日立エキサイترون整流器であり、その運転実績は満足すべきものである。

5.1 構造、仕様

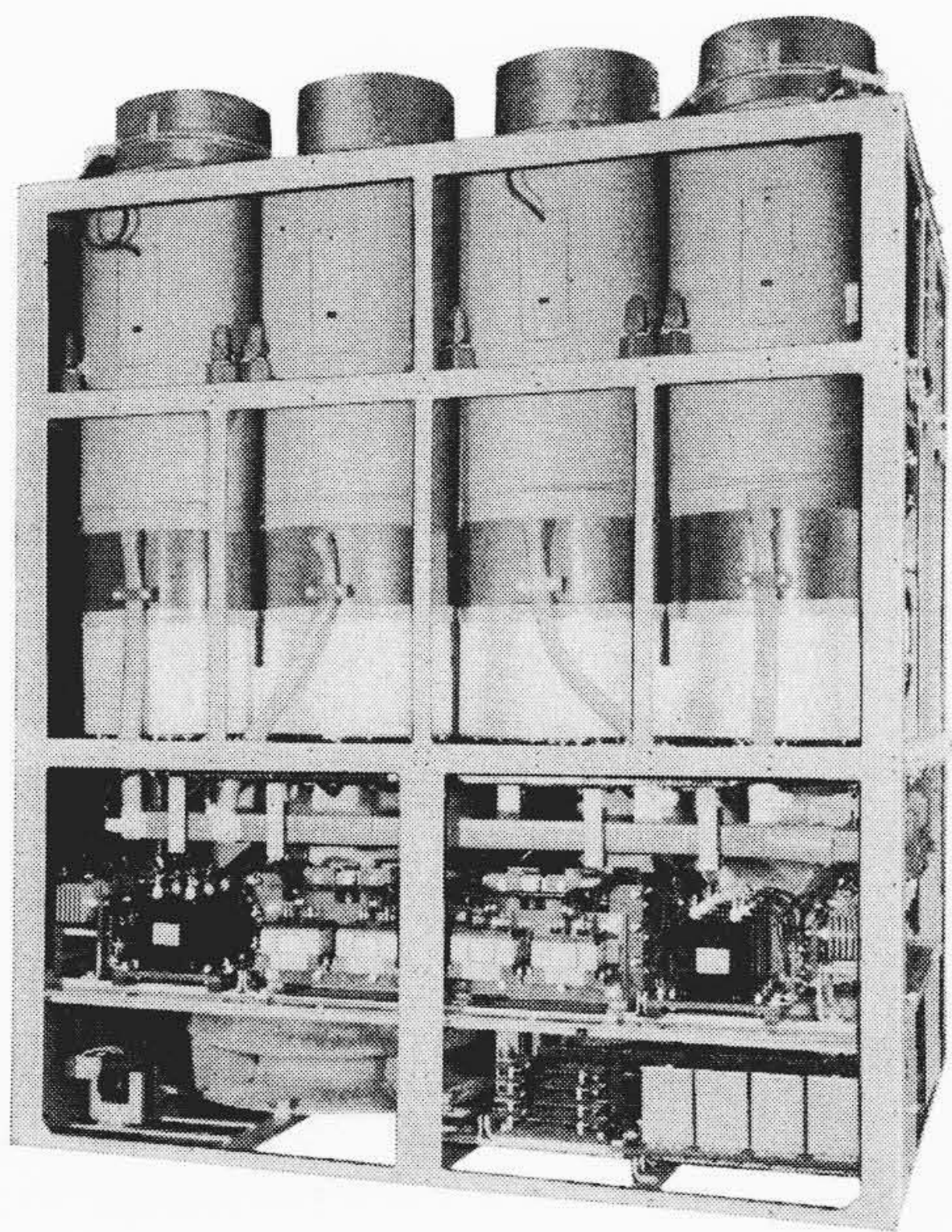
水銀整流器の仕様は次のとおりである。

容量	2,046 kW/660 V/775 A × 4
	(受電電圧 18 kV) において
定格	連続
結線方式	ユニット結線
格子制御	18ノッチ(変圧器 2 次電圧 720 V) まで全範囲
周囲温度	-10°C ~ 35°C
過電圧	DC 900 V
形式	ISFO-8 GT
使用タンク	RM1 8 タンク

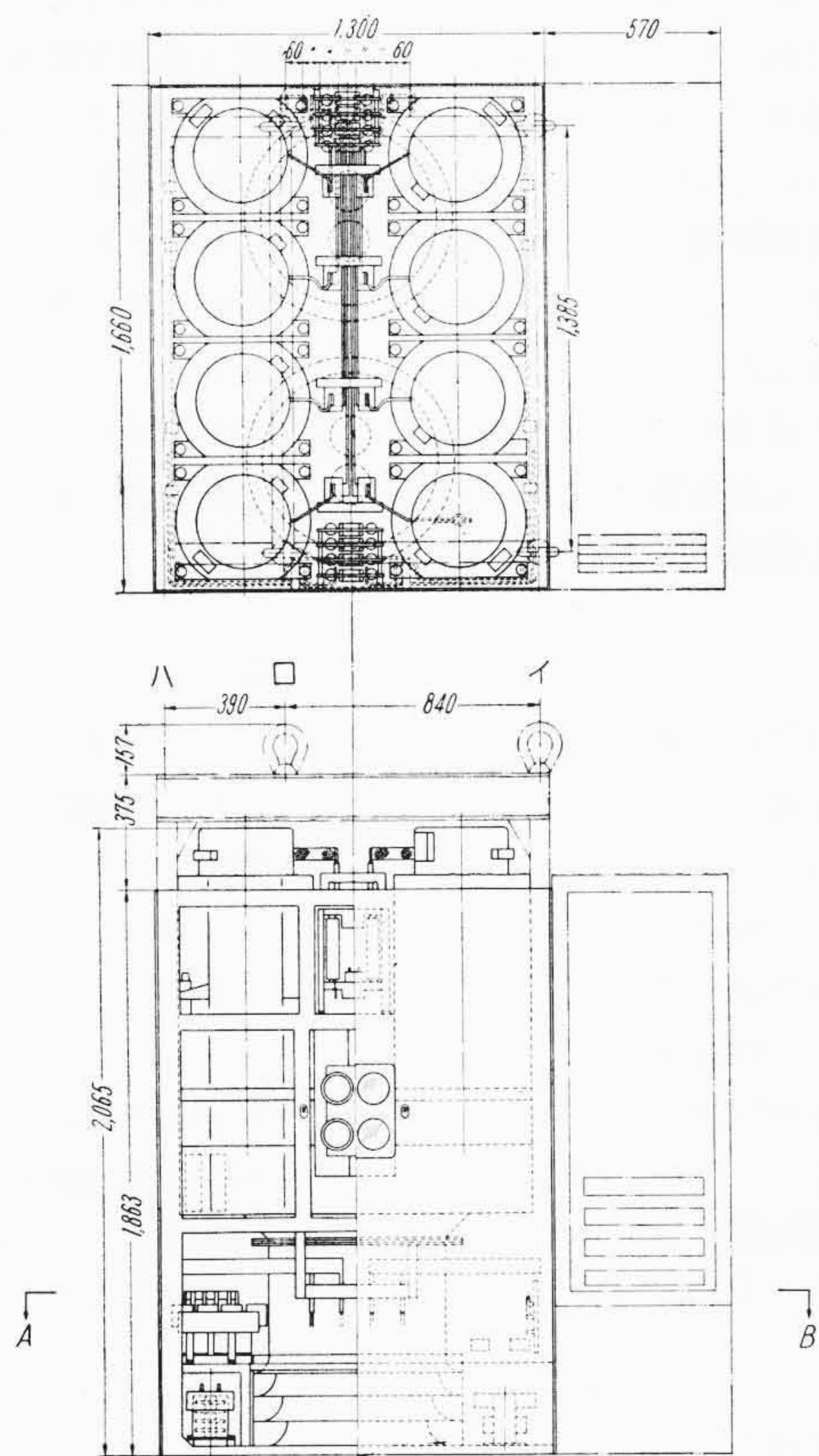
使用タンクは風冷封じ切りエキサイترون形であり、整流装置はブロック構造となっており、整流器制御装置と一体に連結されている。

第 16 図は整流器ブロック外観写真、第 17 図はその組立図を示す。車両用電気品の特長として、きわめてコンパクトに設計され空間利用率の高い構造となっている。

車両用整流器は十分な過負荷容量と信頼度を有することが必要で



第 16 図 ED71 用 2,046 kW 水銀整流器ブロック



第 17 図 ED71 用水銀整流器組立図

あることはいうまでもない。ED-71 においては、保護装置との関連において次の条件で十分なる負荷耐量が必要である。

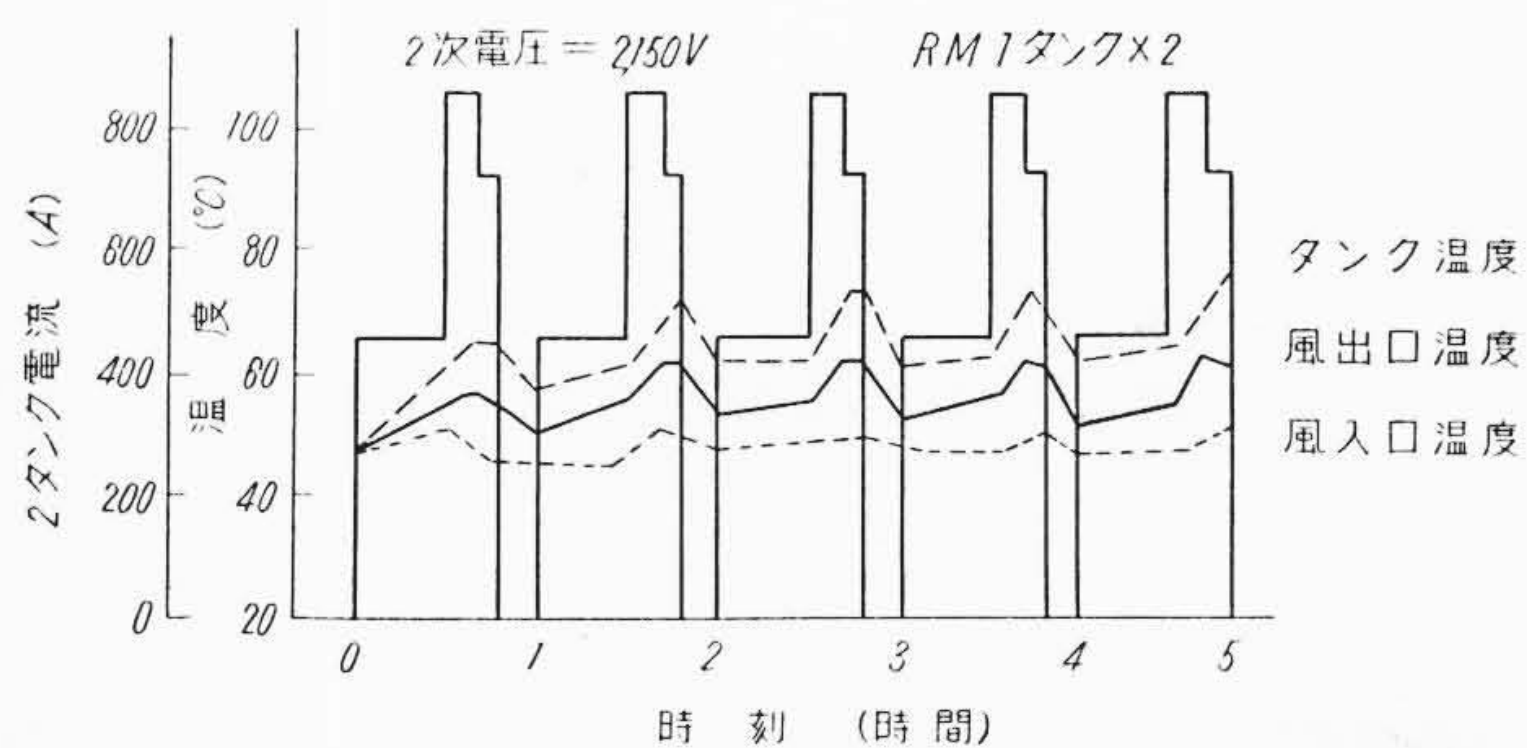
- (a) 受電電圧 16~22 kV 定格 20 kV
- (b) 直流電圧 最高 900 V まで使用
- (c) 負荷電流 こう配起動およびこう配力行時には 160% および 130%

すなわち定格点と対応させると第 2 表のようになる。

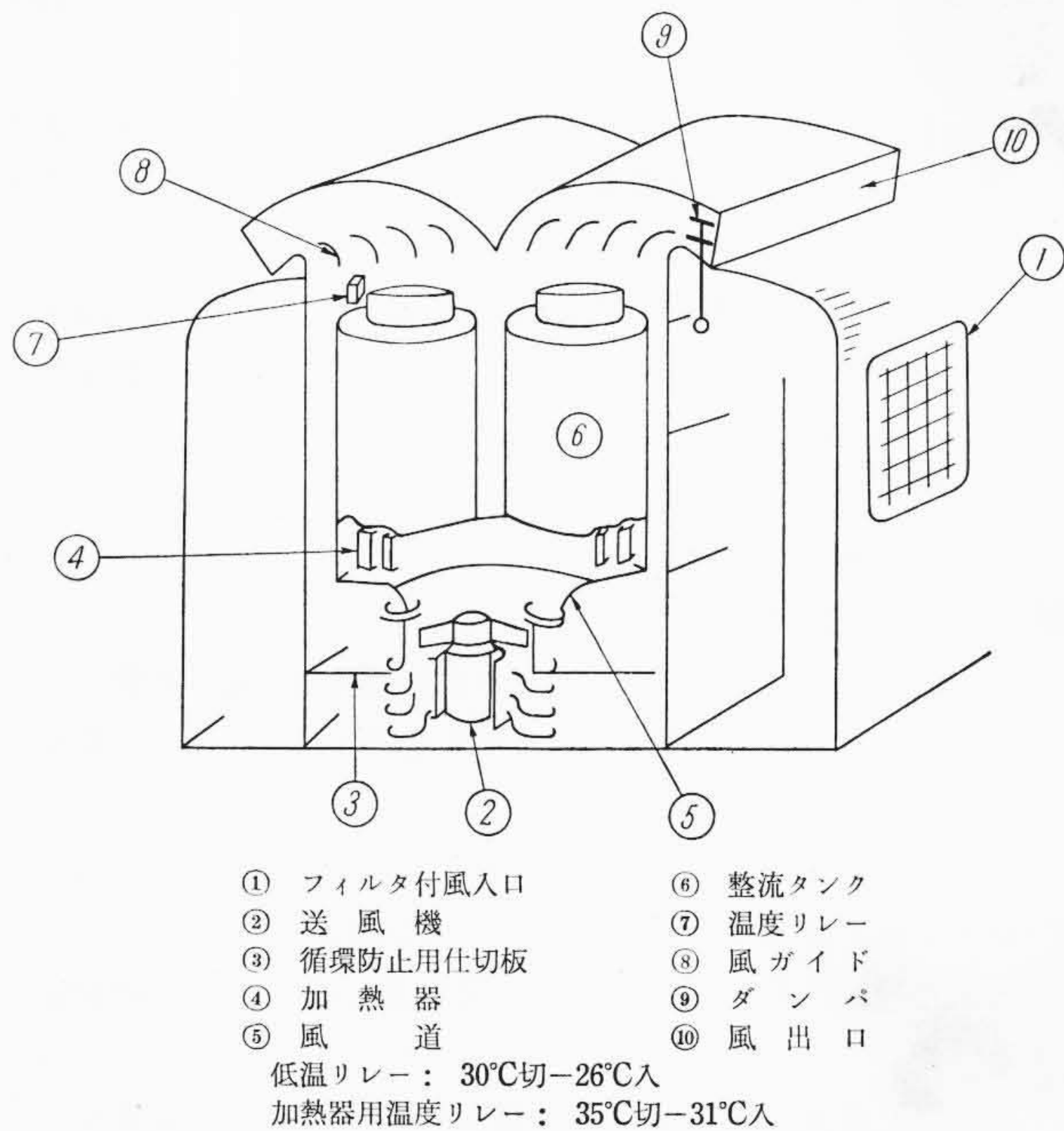
この使用状態を考慮して設計、試験が行われた。タンクの特性についてはすでに発表⁽²⁾したので重複を避けるが、第 18 図に熱帯規格相当（風入口温度 50°C）として実施した試験結果を示す。2 タンク出力にて $1,500 \text{ V} \times 514 \text{ A} = 770 \text{ kW}$ にて十分の余裕あることを示

第 2 表 動作比較表

	定 格 点	最高使用条件	%
変圧器二次電圧	937 V	1,325 V	141
直 流 電 流	775 A×4	1,000 A×4	130
直 流 出 力	2,046 kW	3,600 kW	176



第 18 図 入口 50°C における試験



第 19 図 ED71 用水銀整流器温度制御説明図

し、本タンクの過負荷容量の大きいことを物語っている。

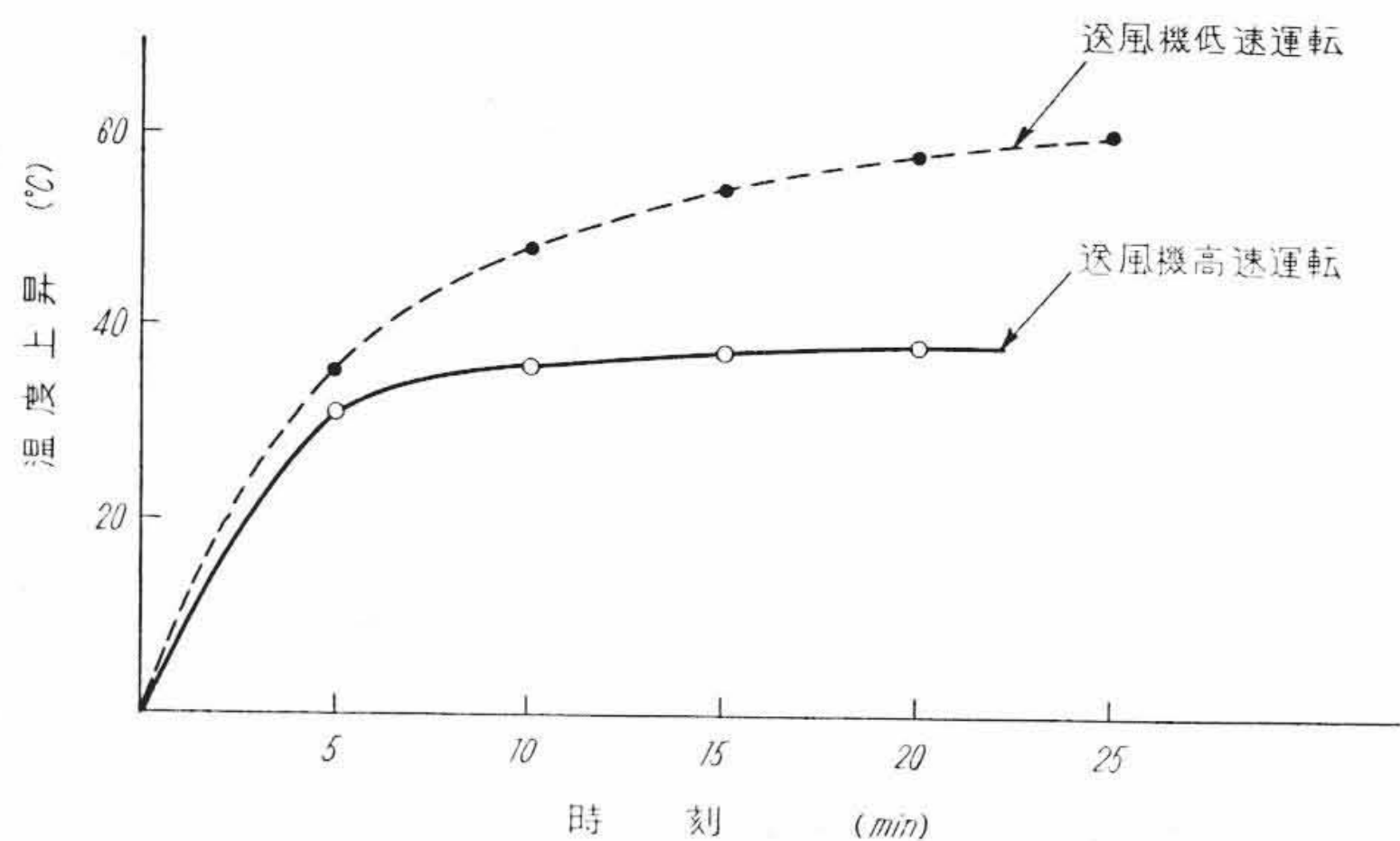
5.2 温度制御方式

水銀整流器において良好なる運転特性を発揮させるためには、温度制御が完全であることが必要である。温度制御の最も重要な点の一つとして、予熱時間の短いことがある。すなわち車両運転上予熱時間（すなわち運転操作上の死時間）が少ないことが必要である。そこで ED 71 用整流器では、温度制御回路を第 19 図のとおり構成している。

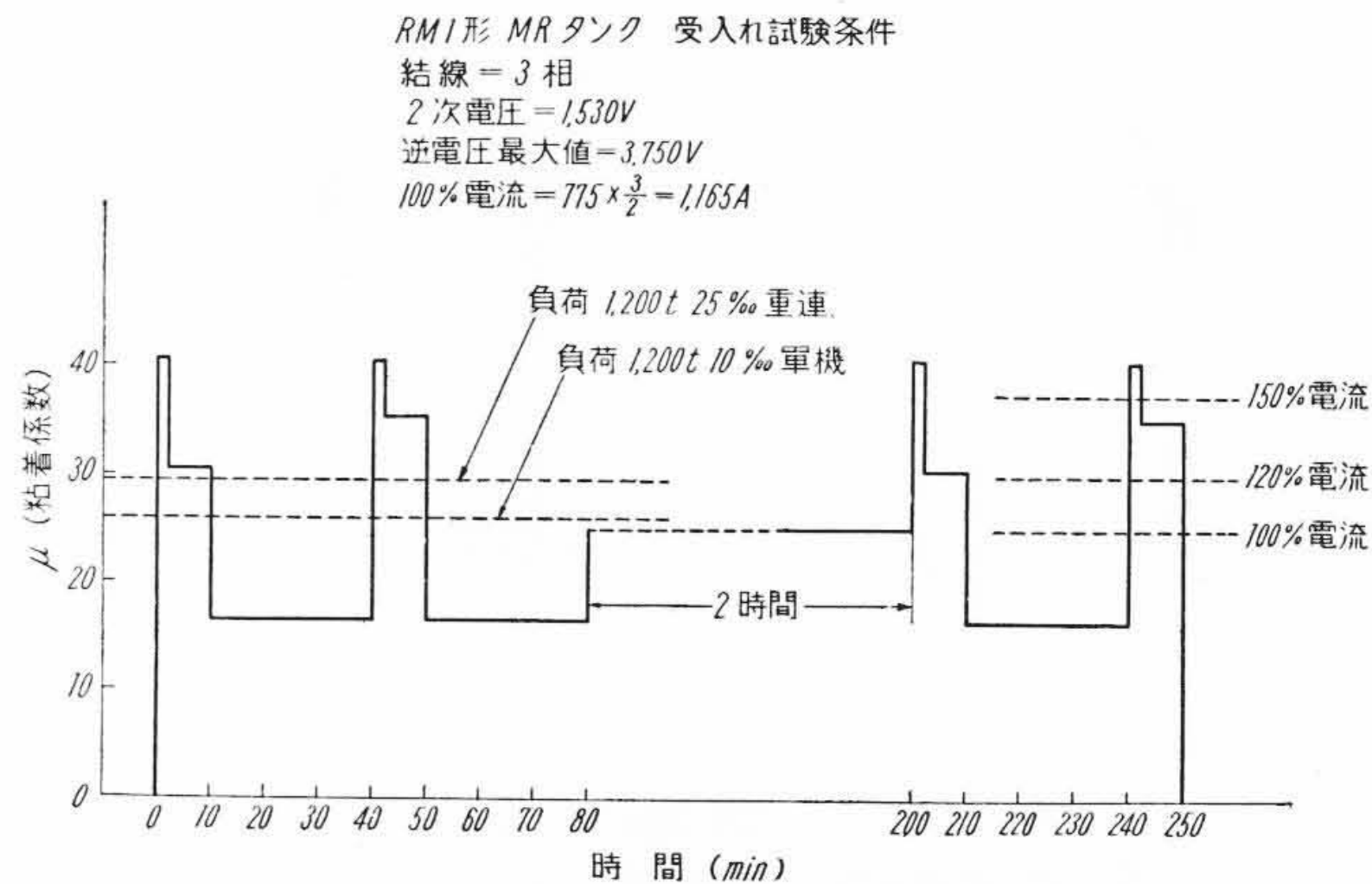
予熱時には送風機運転とともに、下部加熱器が自動投入され、熱風が整流タンクに送られ急速に加熱される。この場合熱効率を向上させるため、④なる加熱器はタンクに対して偏心して取付けられ、局部的な加熱が行われる。タンクは格子構造としてかご形が採用されているので、かかる方式で安定な運転ができる。

通常の運転は、送風機連続運転、加熱器自動投入により整流タンクを最適条件に保持させる。温度制御に利用される温度継電器は風出口温度を検出して動作するバイメタル形リレーである。風出口部には⑨なるダンパが使用された。

第 20 図は予熱時間とタンク温度上昇の関係を示した試験データ



第20図 予熱特性(ED 71 用水銀整流器)



第21図 タンク受入れ試験方法

で、いかに急速に予熱操作が行われるかを知ることができる。

5.3 格子制御の問題

交流電気機関車において粘着性能を改善するために大巾な格子制御によるAVR制御が行われたのはED 71が始めてで、水銀整流器に対しては0~100%の格子制御が行われるのでその動作責務は過酷となる。これに対処したのが振動防止回路の採用である。すなわち転流終期にタンク陽極-陰極間にかかる振動電圧の電位傾度を緩和し、かつ非振動系とするため整流タンク陽極-陰極間にCRによるダンピング回路を使用した。

回路電圧(2次電圧1,000V以上)が高い場合には数 μ Hの陽極リアクトルを使用すべきであるが(この例としてED-461用整流器がある)ED 71用整流器では18ノッチ(2次電圧720V)でも格子制御する電圧が比較的低いので、重量、寸法節約の意味から陽極リアクトルは使用せずに好成績をおさめた。

5.4 タンクの性能試験

白河-福島間電化に当っては29両の水銀整流器(タンク数にして $8 \times 29 = 232$ タンク)を約6箇月で製作する必要があったため、量産化特に232タンクの性能を判定するためには厳密にして能率的な試験が必要となってきた。その要求仕様は第2表に示されるものである。試験の能率を向上させるためには三相での試験が望ましいので、最初三相と単相運転におけるタンクの負荷耐量を検討し、三相試験がかなり過酷であることを知った。そこで試験としては三相で、飛躍過電圧、逆電圧最大値を運転中の最悪条件に合わせ、負荷電流に対しては推定最大負荷にさらに余裕を見込んだ。第21図はその試験サイクルである。25% 1,200t、負荷、重連運転におけるこう配起動、こう配力行運転を想定し、この試験方法で全タンクの性能を確認し、あわせて試験方法を自動化して能率を向上した。

5.5 運転実績

量産化された水銀整流器は35年1月より次々に運転に入り、4月より全車両営業運転を開始した。現在までの運転実績はほぼ満足すべきものと判断される。

29両とも逆弧発生およびタンク不良による交換はまだ1件も発生していない。このことは十分な負荷耐量あることを証明するとともに、機械的にも強固な風冷エクサイトロン形の特長を十分に発揮したものといえる。

第2表に示したように本整流器はきわめて過負荷容量の大きいものとして計画されたため、整流タンクの温度上昇は実際運転では15~20°Cに過ぎず、電流についてはかなり余裕を残している。

電圧については回復運転を始め過電圧ノッチで運転されることが多く、主電動機端子電圧は定格660Vに対し900V近くで運転されることが多く、かかる見地よりも過電圧耐量に大幅な余裕と十分な試験を実施したことが好結果を得ているものと思われる。

以上より従来ややもすれば交流電気機関車電気品にて弱点の一つとされていた水銀整流器もED 71形では信頼性の高い静止機器としての特長を発揮したといえよう。

6. 結 言

以上ED 71の量産に際し、性能上問題とされた主要点につき、一応の成果を得たことを述べたが、本論文でふれた事項はもちろん、機関車全体としてながめるとき、まだまだ解決すべき問題も多い。

われわれは現在ここに得られた結果に決して満足することなく、さらにより性能のすぐれた交流電気機関車の製作に、今後とも努力してゆきたい所存である。

最後に本機関車の製作に際し、日本国有鉄道ご当局、特に設計上のご指導をいただいた臨時車両設計事務所および現地試験の実行に当られた運転局、技術研究所、東北支社現地のかたがたに深く謝意を表するとともに、今後のご指導をお願いする次第である。

参 考 文 献

- (1) 伊沢ほか：日立評論 41,969 (昭 34-8)
- (2) 桑島ほか：日立評論別冊 No. 32,76 (昭 34)
- (3) 一木ほか：日立評論 38,75 (昭 34)

昭和36年3月20日発行

鉄道電子機器特集号

日立評論 別冊第39号

◎列車無線電話装置
 ◎列車無線電話用無線装置
 ◎列車無線電話用伝送装置
 ◎列車無線電話用交換制御方式
 ◎札幌-函館極超短波多重無線通信装置
 ◎日本国有鉄道札幌鉄道管理局納RX-8形クロスバ市外交換装置

◎連接集線装置
 ◎座席予約用電子計算装置MARS-1について
 ◎SLS-13形運転基本性能曲線計算機
 ◎電車自動運転装置
 ◎電車定位自動停止装置

発行所 日立評論社
 取次店 株式会社オーム社書店