

自 励 式 交 流 発 電 機

Self-Excited A.C. Generators

横 田 馨* 渡 辺 博*
Kaoru Yokota Hiroshi Watanabe

内 容 梗 概

最近の交流発電機の自動電圧調整器には整定時、過渡時の電圧変動率の減少、回復時間の短いことなどの条件が要求されるようになってきた。このため自励式交流発電機が開発されてきた。日立製作所ではこのような要求を満足させるために自励式交流発電機の開発に努めた結果、試作試験ならびにすでに製作納入した 250 kVA 自励式交流発電機とも優秀な結果を得た。現在、大小多数の自励装置付交流発電機を製作中である。本文では自励式交流発電方式の大略を紹介した。

1. 緒 言

従来より使用されている交流発電機の自動電圧調整器は直流励磁機の界磁電流を制御することによって、交流発電機の端子電圧を一定に保つ方式であった。この場合整定時における電圧変動率を小さくすることは比較的容易であるが、急激な負荷変動に対しては困難である。発電機に急に負荷をかけると発電機特性によって決まる電圧が瞬時に降下する。その上発電機に複巻作用がないこと、直流励磁機および制御装置の時定数による調整作用の時間おくれのため発電機電圧はさらに降下する。この電圧降下の防止法として発電機を必要以上に大きくして短絡比を増し、さらに速応励磁を行っている。また発電機負荷が誘導電動機の場合は起動電流が大きいため、全電圧起動可能なのは小容量のものに限られ、ほとんど減圧起動を余儀なくされていた。

この難点を補うため主回路電流による複巻特性をもつ自励式交流発電機が開発された。日立製作所ではすでに多数の自励式交流発電機を納入または製作中であるが、その大略をここに紹介する。

2. 自励式交流発電機の特長

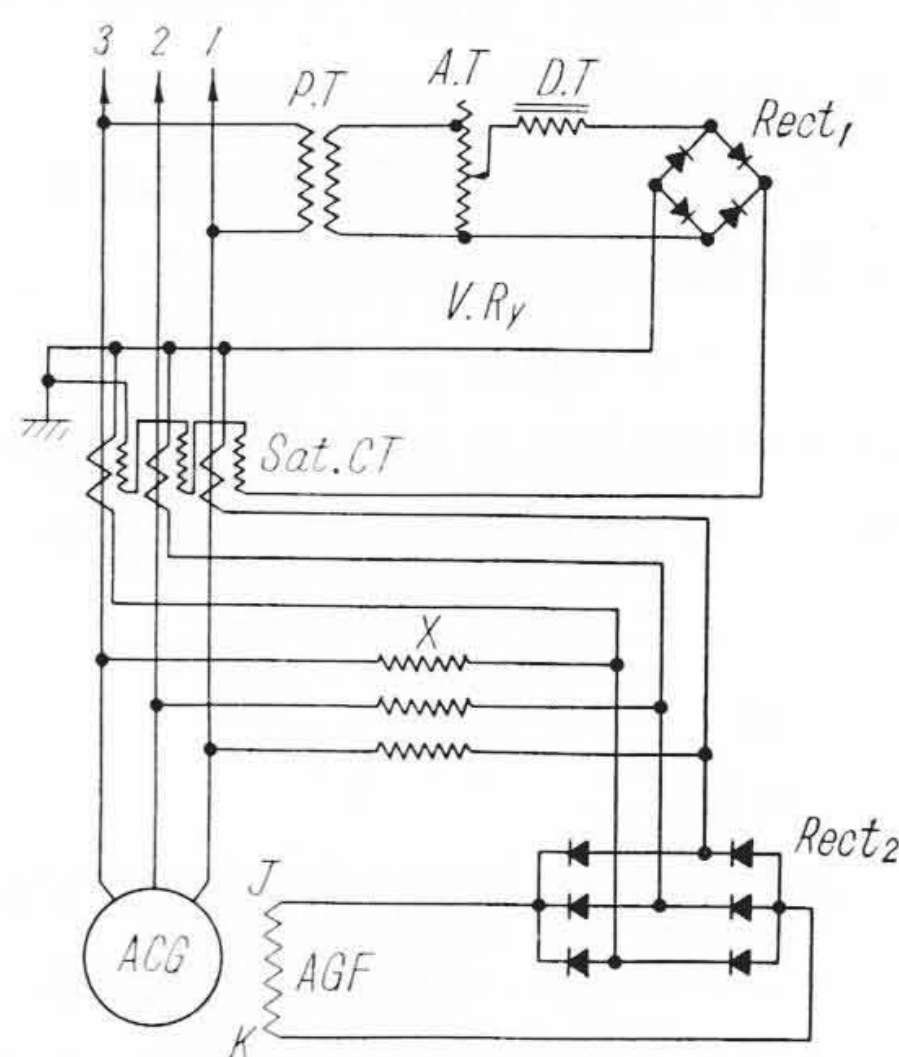
自励式交流発電方式は従来の直流励磁機をもつ交流発電方式と比較して下記のような特長を有している。

- (1) 急激な負荷変動に際しての電圧降下は複巻特性のため瞬時電圧変動率が小さく、回復時間も速い。
- (2) 直流励磁機が不要であるので保守、取り扱いが容易である。
- (3) 発電機のすえつけ面積が少なくすむ。

上記のように、自励式交流発電機は多くの特長をもち、従来の自動電圧調整器の精度に近づけることができるので、定電圧電源としてその使用範囲も広い。

3. 励磁方式の説明

第1図は交流発電機の自励装置の結線を示す。無負荷



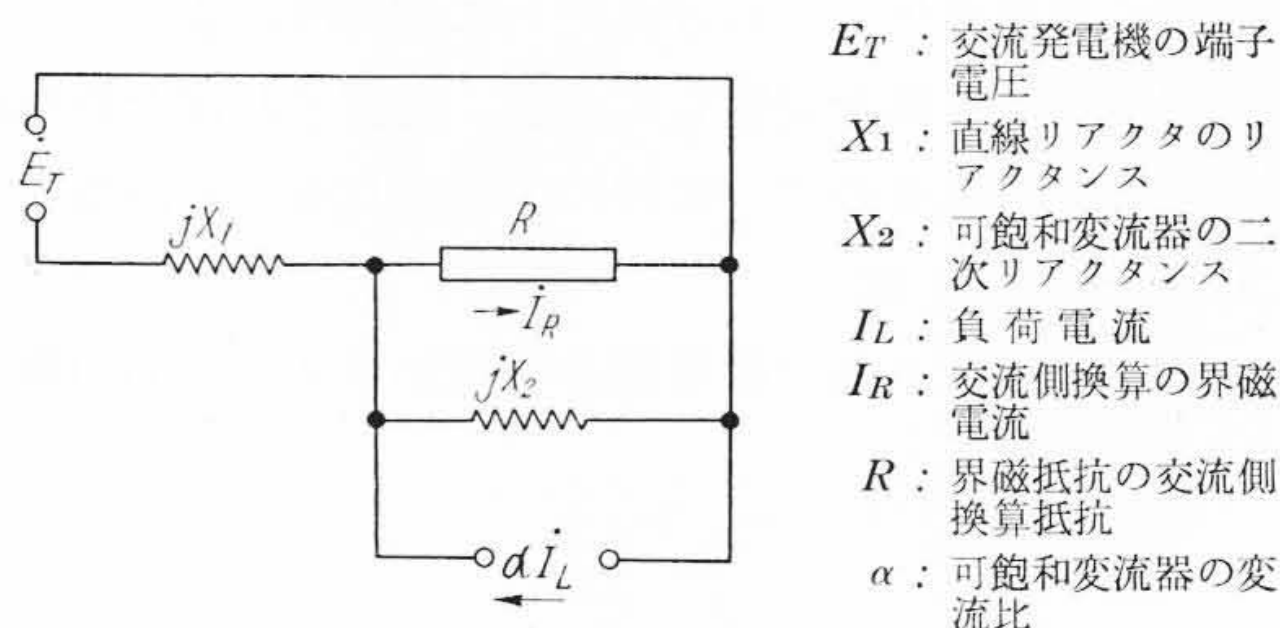
ACF : 交流発電機
AGF : 界磁巻線
A.T : 単巻変圧器
D.T : 検出用飽和リアクタ
P.T : 検出用変圧器
Rect1 Rect2 : 金属整流器
Sat. CT : 可飽和変流器
X : 直線リアクタ

第1図 自励装置結線図

励磁電流は交流発電機端子より直線リアクタを通して得られる。負荷が印加されたときの発電機電圧降下の補償は各相に接続されている可飽和変流器により行われる。すなわち、発電機電圧より得られる電流と可飽和変流器二次電流とをベクトル的に加えることにより負荷のいかんにかかわらず、端子電圧をほぼ一定に保たせるようにしたものである。

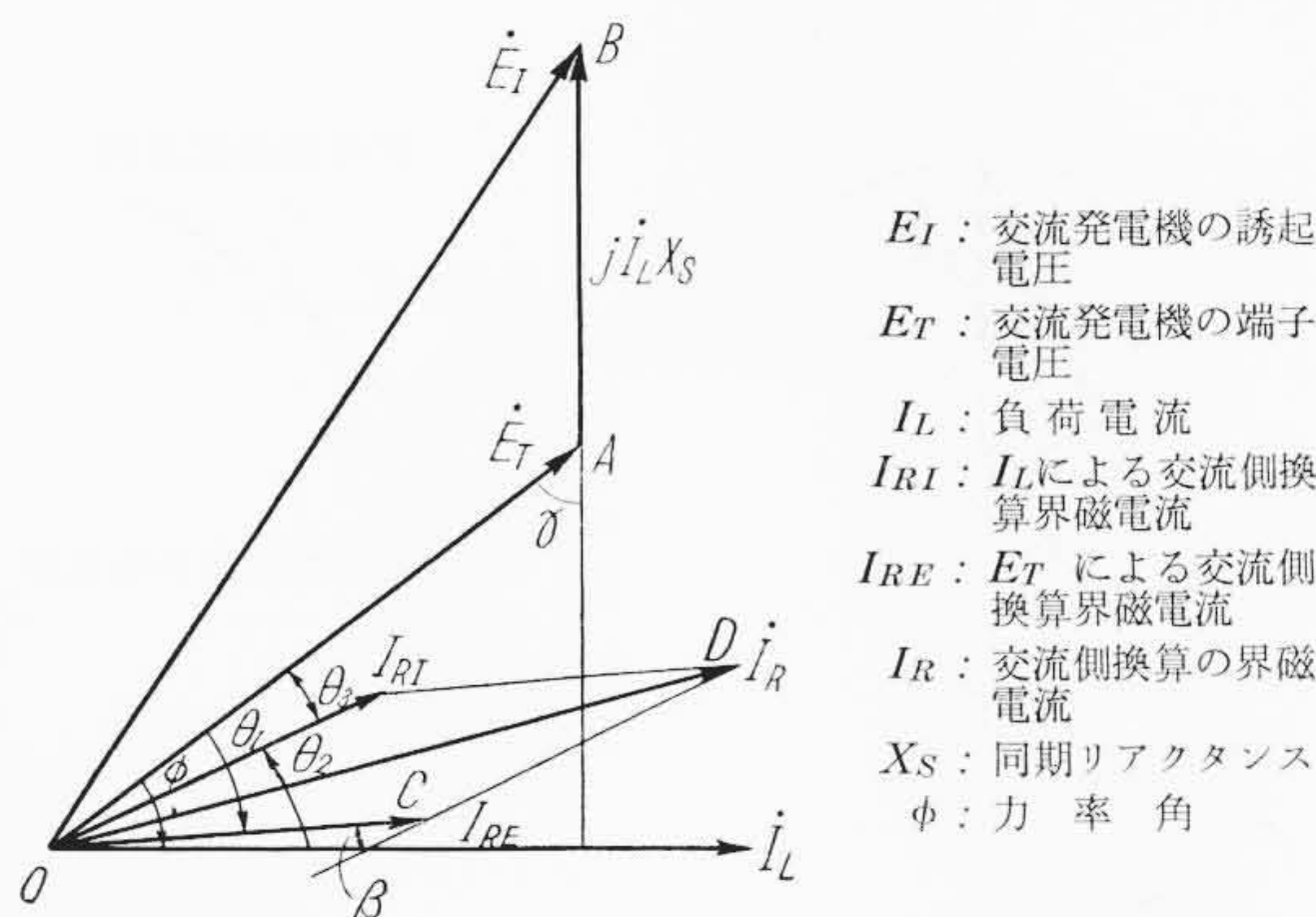
第1図の一相の等価回路を第2図に示し、第2図のベクトル図を第3図に示す。

第2図と第3図から発電機電圧が一定に保持される効果が容易に了解される。すなわち、発電機の誘起電圧を



第2図 自励装置の一相等価回路

* 日立製作所日立工場



第3図 一相等価回路のベクトル図

$\dot{E}_I$, 端子電圧を $\dot{E}_T$ とすれば $\dot{E}_I - \dot{E}_T$ が同期リアクタンス X_S による電圧降下 $jX_S \dot{I}_L$ ($\dot{I}_L$ は負荷電流) となる。したがって、負荷電流 $\dot{I}_L$ のいかにかわらず一定の端子電圧 $\dot{E}_T$ を得るには $\dot{E}_I$ に相当する界磁電流 $\dot{I}_R$ を与えればよい。このことは次のことから了解される。すなわち、界磁抵抗を交流側に換算して R とすれば電圧 $\dot{E}_T$ より供給される界磁電流 $\dot{I}_{RE}^{(1)}$ は

$$\dot{I}_{RE} = \dot{E}_T \frac{X_2}{X_1 + X_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + X_2^2}} \angle \theta \dots \dots (1)$$

$$\angle \theta_1 = -\tan^{-1} \frac{X}{R} \quad X = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}$$

となる(符号の定義は第2図, 第3図による)。可飽和変流器を通して界磁回路に供給される電流 $\dot{I}_{RI}$ は

$$\dot{I}_{RI} = \alpha \dot{I}_L \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \angle \theta_2 \dots \dots \dots (2)$$

$$\angle \theta_2 = \tan^{-1} \frac{R}{X}$$

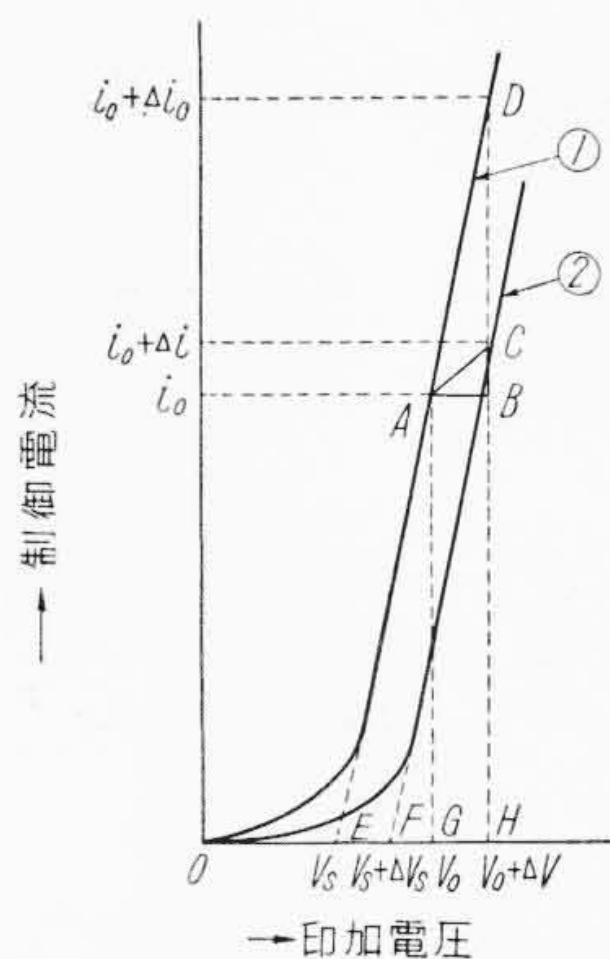
上記(1)(2)式と第3図から $\theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2}$, $\gamma = \frac{\pi}{2} - \phi$, 付録1より $\beta = \frac{\pi}{2} - \phi$, したがって $\beta = \gamma$ なることがわかる。可飽和変流器の変流比 α および X_1, X_2 を適当に選択すれば $\triangle OAB$ と $\triangle OCD$ とは相似形となるから電流比 I_{RI}/I_{RE} は

$$\frac{\dot{I}_{RI}}{\dot{I}_{RE}} = \frac{X_S \dot{I}_L}{\dot{E}_T} \dots \dots \dots (3)$$

となる。この結果、交流側換算の界磁電流 $\dot{I}_R (= \dot{I}_{RI} + \dot{I}_{RE})$ はいかなる端子電圧 $\dot{E}_T$, 負荷電流 $\dot{I}_L$ に対しても誘起電圧 $\dot{E}_I$ を得るに必要な発電機界磁電流となる。

4. 補 正 回 路

前述したように直線リアクタと可飽和変流器のみにて発電機の固有の電圧降下の大半を補償することはできるが、温度変化による界磁巻線抵抗の変化、交流発電機に直結される原動機の回転数の変化、磁気回路の磁気飽和



第4図 電圧検出用飽和リアクタ特性曲線

などの影響が発電機端子電圧を変える原因になる。したがって、電圧変動率をさらに小さくするためには電圧補正回路を付加する必要がある。補正回路は発電機端子電圧 → 検出用変圧器 (PT) → 単巻変圧器 (AT) → 電圧検出用飽和リアクタ (DT) → 金属整流器 (Rect₁) → 可飽和変流器 (Sat. CT) → 金属整流器 (Rect₂) → 発電機界磁回路と形成される。電圧検出用飽和リアクタの特性は第4図曲線(1)に示すようなものである。すなわち整定電圧に相当する電圧 V_0 に対して電圧変動 ΔV であれば制御電流 i_0 は $(i_0 + \Delta i_0)$ と大幅に変化する。発電機駆動用原動機がディーゼル機関のような場合には電圧変動と周波数変動とは同時に起るので実際の制御電流は $(i_0 + \Delta i_0)$ より小さくなる。すなわち変動後の電圧 ($V_0 + \Delta V$) において曲線(1)は周波数変動の影響により曲線(2)に移行するものと考えられる。第4図においてA点における切線と横軸との交点をE, C点における切線と横軸との交点をFとし, $OE = V_s$, $OF = V_s + \Delta V_s$ とすれば

$$BC = K_f \{ (V_0 + \Delta V) - (V_s + \Delta V_s) \} - K_f (V_0 - V_s)$$

ゆえに

$$K = \frac{BC}{AB} = \left(1 - \frac{\Delta V_s}{\Delta V} \right) K_f \dots \dots \dots (4)$$

ただし, K_f : 電圧 V_0 , すなわちA点における飽和リアクタの利得

K : 電圧変動, 周波数変動を考慮した飽和リアクタの利得

(4)式から明らかなように、駆動用原動機の変動率が大きい場合には電圧検出用飽和リアクタでは十分な周波数補償が行われない。

電流 $\dot{I}_R$ の大きさは(1)(2)式および第3図から次式のように表わされる。

$$I_R^2 = \frac{X_2^2}{R^2 (X_1 + X_2)^2 + X_1^2 X_2^2} (E_T^2 + \alpha^2 I_L^2 X_1^2 + 2E_T \alpha I_L X_1 \sin \phi) \dots \dots \dots (5)$$

(5)式より X_2 により電流 $\dot{I}_R$ の大きさが変わることがわかる。可飽和変流器には制御巻線が設けてありこれに直流電流を流し鉄心の飽和を変えることにより可飽和変流器二次リアクタンス X_2 が変化する。 X_2 の変化に対する電流 $\dot{I}_R$ の変化量 K_{SCT} は次のとおりになる。

(3)式および第3図から(5)式は

$$I_R^2 = \frac{X_2^2}{R^2(X_1+X_2)^2 + X_1^2 X_2^2} E_I^2 \dots\dots (6)$$

ゆえに

$$X_2 = \frac{RX_1}{\sqrt{\left(\frac{E_I}{I_R}\right)^2 - X_1^2 - R}} \dots\dots (7)$$

(6)式より

$$K_{SCT} = \frac{\partial I_R}{\partial X_2} = \frac{\left(\frac{R}{X_2}\right)^2 \left(1 + \frac{X_1}{X_2}\right) X_2}{E_I^2} I_R^2 \dots\dots (8)$$

(8)式に(7)式を代入すれば

$$K_{SCT} = \frac{I_R^2}{E_I^2 X_1 R} \sqrt{\left(\frac{E_I}{I_R}\right)^2 - X_1^2} \left\{ \left(\frac{E_I}{I_R}\right)^2 - X_1^2 + R^2 - 2R \sqrt{\left(\frac{E_I}{I_R}\right)^2 - X_1^2} \right\} \dots\dots (9)$$

(9)式から明らかなように、変化量 K_{SCT} は直線リアクタのリアクタンス X_1 の選び方により一義的に決定される。それゆえ、直線リアクタのリアクタンスは補正回路系の利得に影響する。

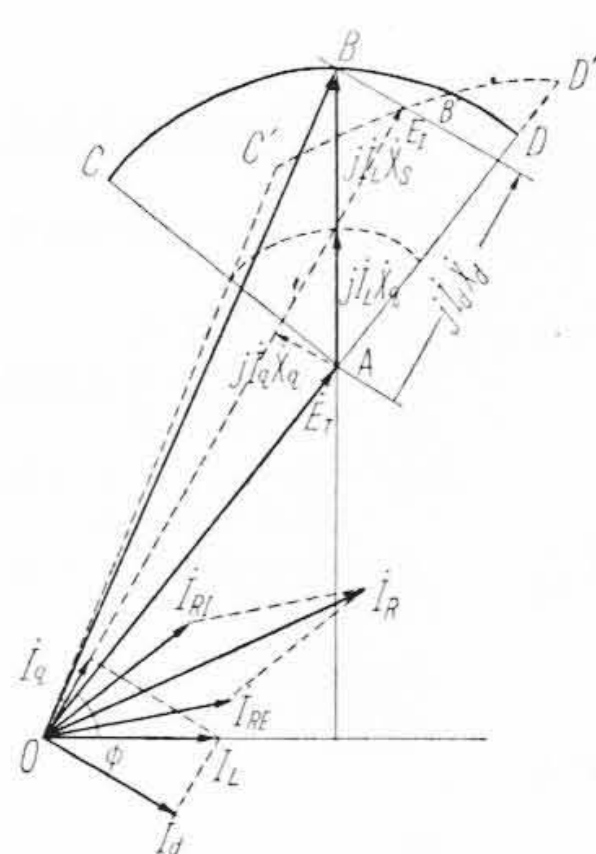
また(1)(2)(3)式より変流比 $\alpha = X_s/X_1$ となるから設計製作にあたり所望の補正回路系の利得を決めれば(7)(9)式より X_1, X_2, α の値が決定する。

5. 自励式交流発電機の特性

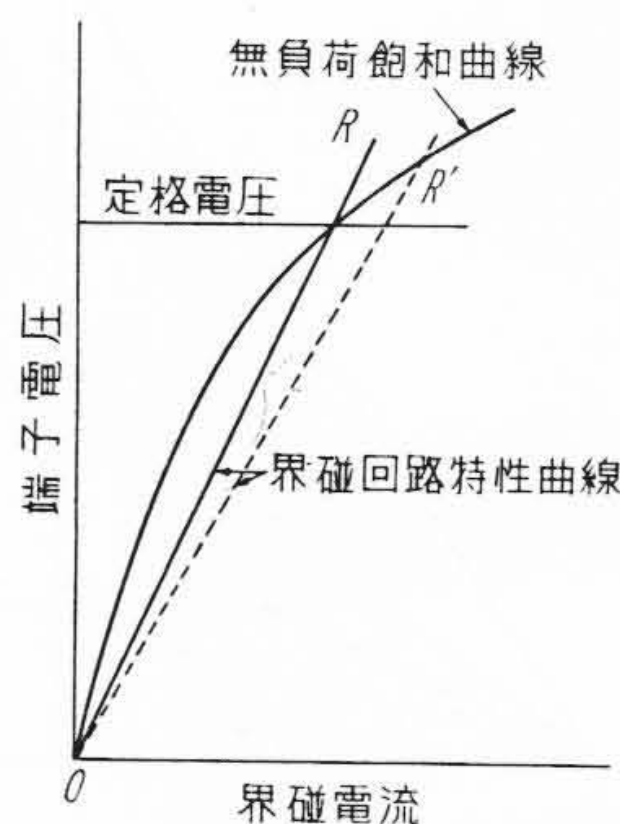
第3図の説明で、 $\triangle OAB$ が実際の発電機のベクトル図であるように述べたが、一般に凸極発電機のベクトル図は実際には第5図点線に示したように実線で示した非凸極発電機のベクトル図と異なり励磁電流に多少の変化を生ずることになる。たとえば力率 ϕ の全負荷で発電機電圧を定格値に保つためには $OB = OB'$ になるように励磁電流を調整すると、ほかの力率では励磁電流は合わなくなる。すなわち力率100~0%間の励磁電流による誘起電圧は実際には $C' \rightarrow B' \rightarrow D'$ となるので力率100%では $AC > AC'$ となり力率0%では $AD < AD'$ となる。したがって、負荷力率によって端子電圧に変動をきたすことになる。負荷力率のいかんにかかわらず発電機誘起電圧の軌跡が $C \rightarrow B \rightarrow D$ に近い軌跡の非凸極交流発電機ならば整定後の電圧変動率はさらに小さくなる。

6. 電圧の自己確立

発電機の運転初期の電圧発生は、直流機と同様発電機磁気回路の残留磁気による。これにより発電機端子に誘起する残留電圧は定格回転数において定格電圧の4~7%である。電圧の自己確立が可能なためにはこの残留電圧が金属整流器の内部電圧降下より大でなければならぬ。すなわち整流器直列個数を S とすれば全波整流の場合



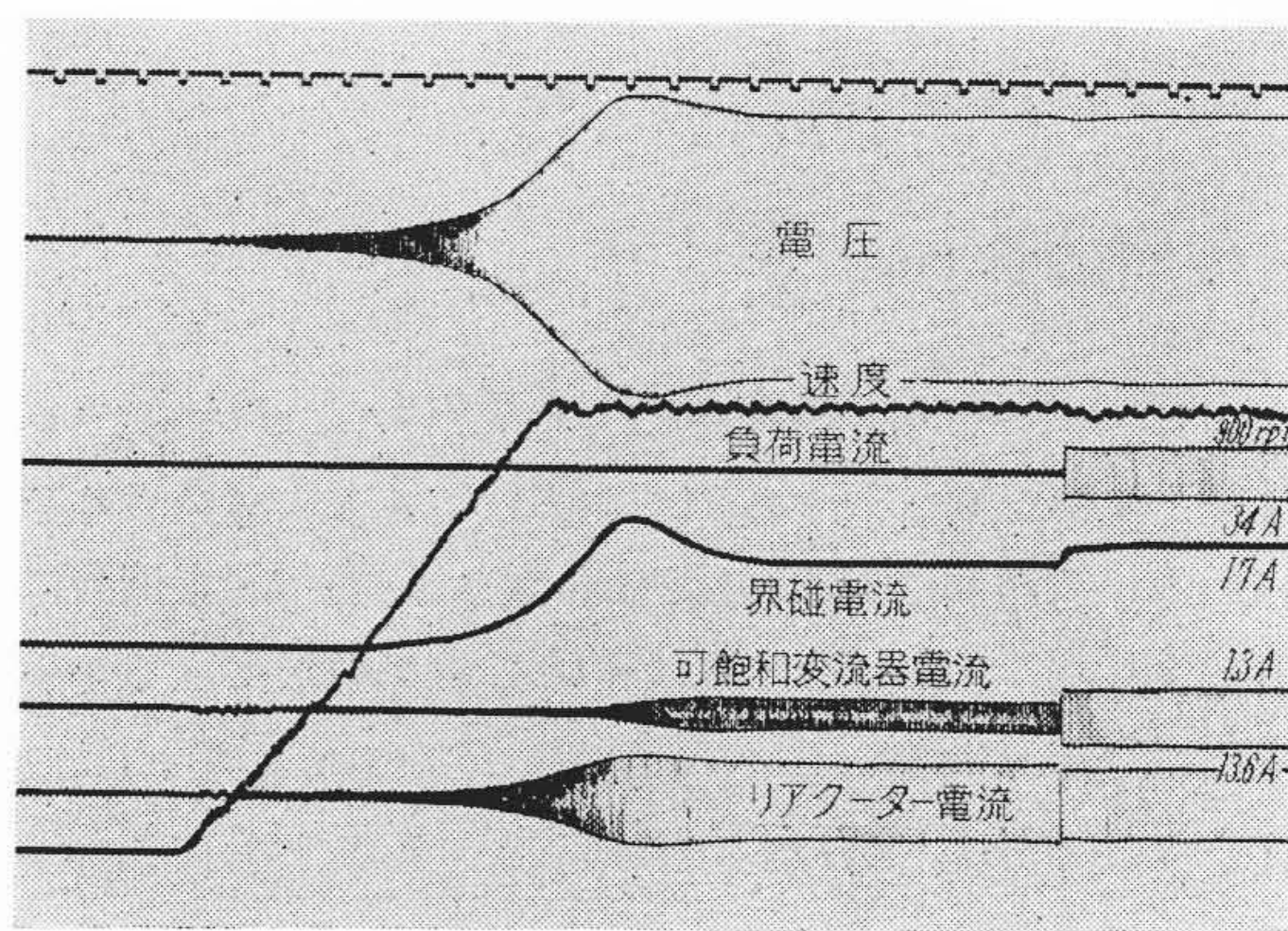
第5図 凸極発電機のベクトル図
 E_I : 交流発電機の誘起電圧
 E_T : 交流発電機の端子電圧
 I_L : 負荷電流
 I_d : 負荷電流の直軸分
 I_q : 負荷電流の横軸分
 I_{RI} : I_L による交流側換算界磁電流
 I_{RE} : E_T による交流側換算界磁電流
 I_R : 交流側換算の界磁電流
 X_s : 同期リアクタンス
 X_d : 直軸リアクタンス
 X_q : 横軸リアクタンス
 ϕ : 力率角



第6図 界磁回路特性曲線

第1表 金属整流器使用例

励磁電圧	シリコン整流器		ゲルマニウム 整 流 器		セレン 整 流 器	
	直列個数 (S)	内部電圧降 下 (2 Svi)	直列個数 (S)	内部電圧降 下 (2 Svi)	直列個数 (S)	内部電圧降 下 (2 Svi)
110	2	2×2×1.2 4.8V	3	3×2×0.6 3.6V	5	5×2×1.2 12V
55	1	2.4V	2	2.4V	3	7.2V



第7図 定格電圧確立のオシログラム

$$2 Svi < V_R \dots\dots (10)$$

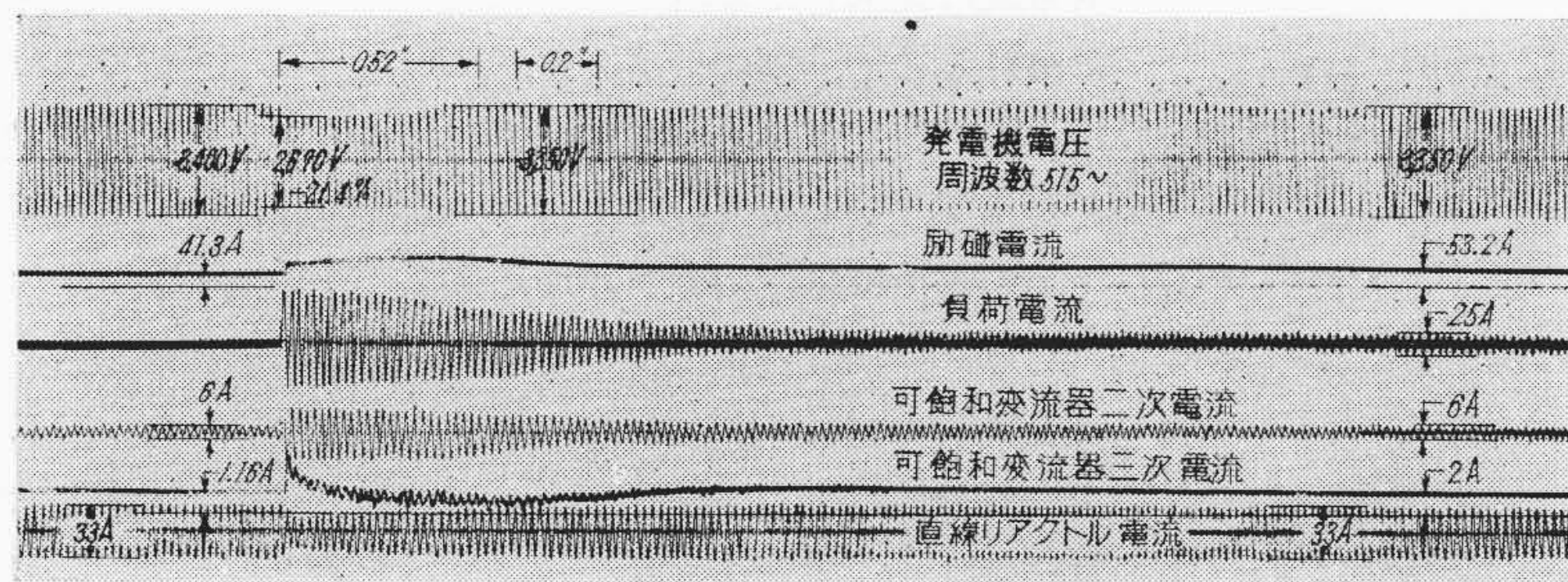
v_i : 整流器1個の内部電圧降下

V_R : 残留電圧

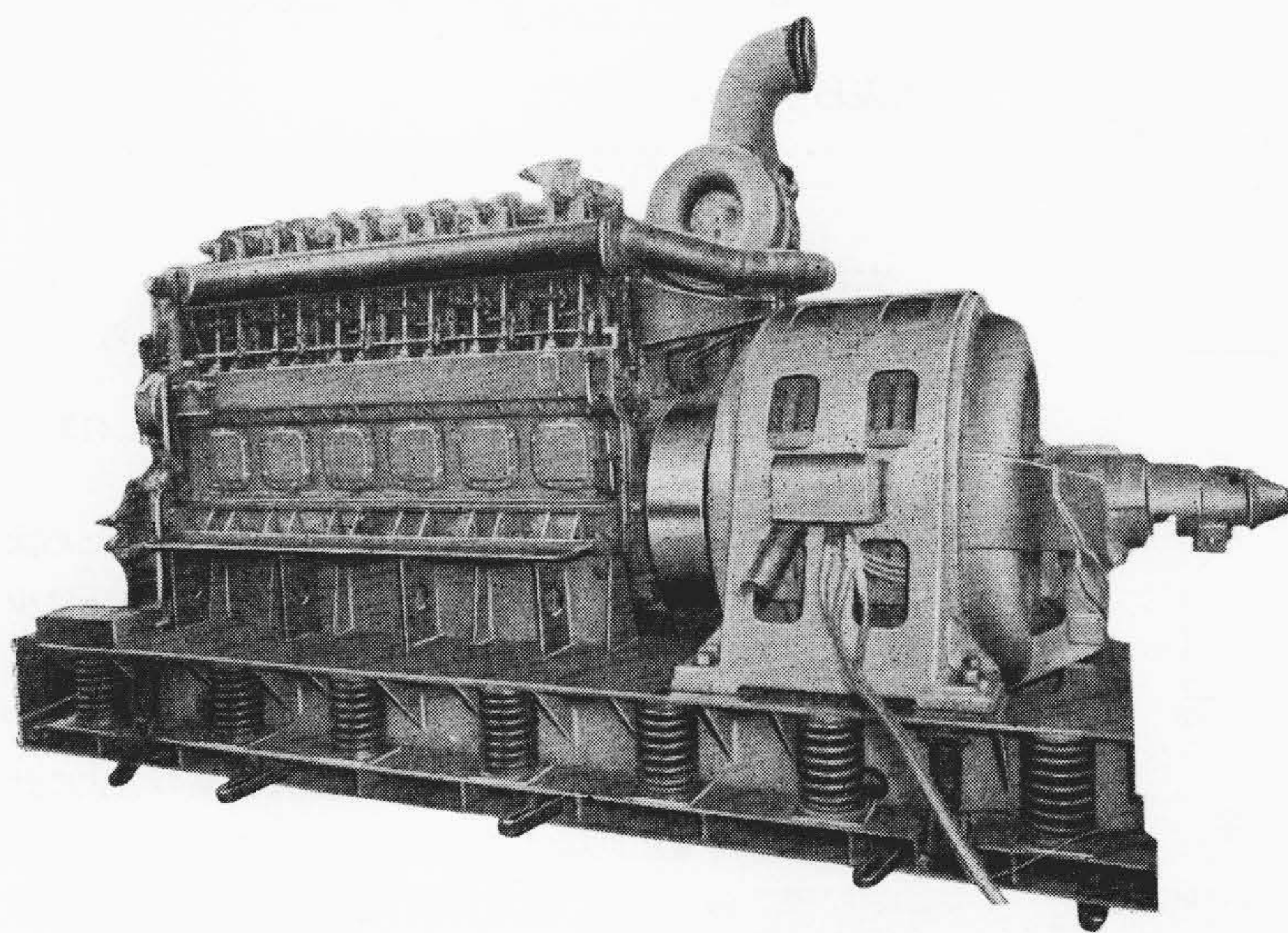
の関係が必要である。

本方式に使用される金属整流器の直列個数、内部電圧降下および発電機励磁電圧との一例を第1表に示す。

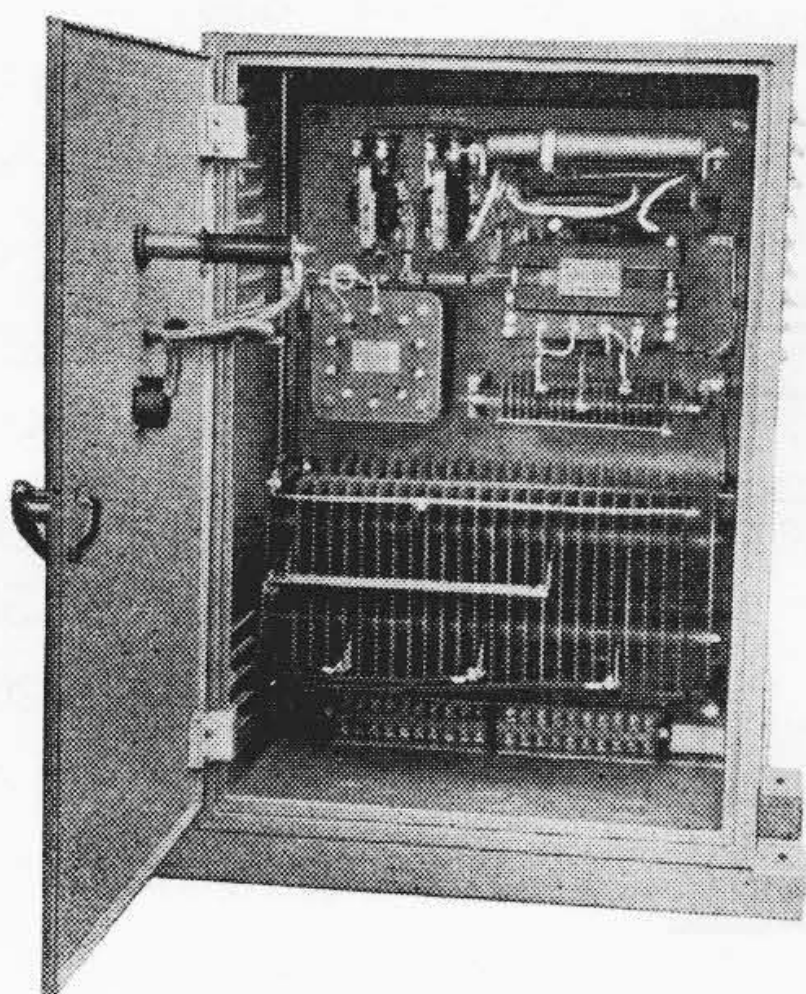
残留磁気の大小は比較的履歴特性の顕著な磁極および



第8図 起動オシログラム



第9図 自励式交流発電機の外観



第10図 励磁装置キュービクル内部

継鉄の材質によりほぼ決定する。したがって残留電圧は固定子、回転子の空隙の大きさに反比例する。また発電機に短絡事故が生じた場合、残留磁気を減少せしめるので電圧自己確立が困難なことがある。このような場合バッテリーを併用すればよい。

残留電圧により定格電圧まで電圧上昇する過程は第2図で図の等価回路および(1)式より明らかなように、残留電圧によりわずかの I_R が流れ界磁を強め発電機電圧 E_T を増加する。 E_T が低い間は制御電流は流れないが E_T が上昇して電圧検出飽和リアクタの飽和点に達すると、可飽和変流器の制御巻線に制御電流が流れる。したがって電圧の上昇とともに可飽和変流器リアクタンス X_2 が減少するので、 X_2 を流れる電流が増して励磁を弱めることになる。第6図のとおり初めは界磁回路特性曲線 OR' により電圧上昇するが X_2 の減少とともに OR に移り飽和曲線の交点で定格電圧が確立される。

電圧確立のオシログラムの一例を第7図に示す。電圧確立の時間は発電機の開路界磁時定数により異なる。

7. 過 渡 特 性

7.1 発電機電圧変動

発電機無負荷から負荷を投入したとき、発電機端子電圧降下の決定は重要な問題である。これは励磁電圧一定とした時の電圧降下と、発電機端子電圧を補正するように励磁電圧が変化し、これによる端子電圧の上昇変化を重ねた値になる。

負荷投入時一定励磁電圧として端子電圧を求めると、次式になる。

$$E = Z_q \cdot Z \left\{ \left(\frac{1}{(X_d' + X)(X_q + X) + (r + R)^2} - \frac{1}{(X_d + X)(X_q + X) + (r + R)^2} \right) e^{-\frac{t}{T}} + \frac{1}{(X_d + X)(X_q + X) + (r + R)^2} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここで E : 負荷投入時の発電機端子電圧 (励磁一定)

Z : 負荷インピーダンス $\sqrt{R^2 + X^2}$

Z_q : $\sqrt{(R + r)^2 + (X_q + X)^2}$

X_d : 直軸リアクタンス

X_q : 横軸リアクタンス

X_d' : 直軸過渡リアクタンス

r : 電機子抵抗

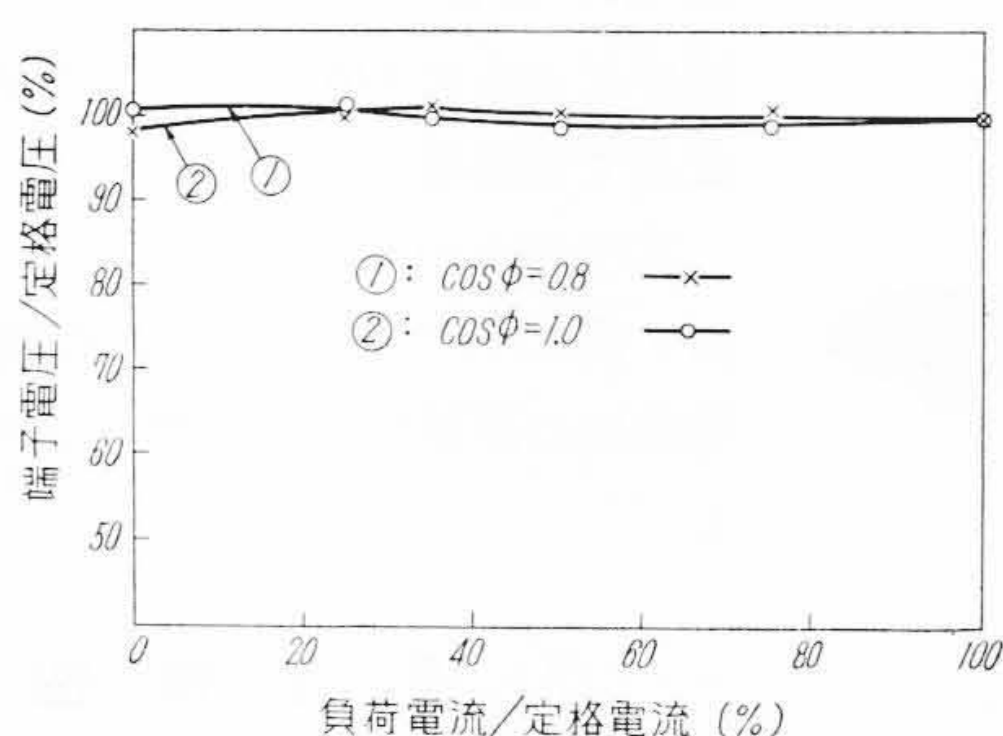
T : 負荷時界磁時定数=

$$T_{do'} \frac{(r+R)^2 + (X_d' + X)(X_q + X)}{(r+R)^2 + (X_d + X)(X_q + X)}$$

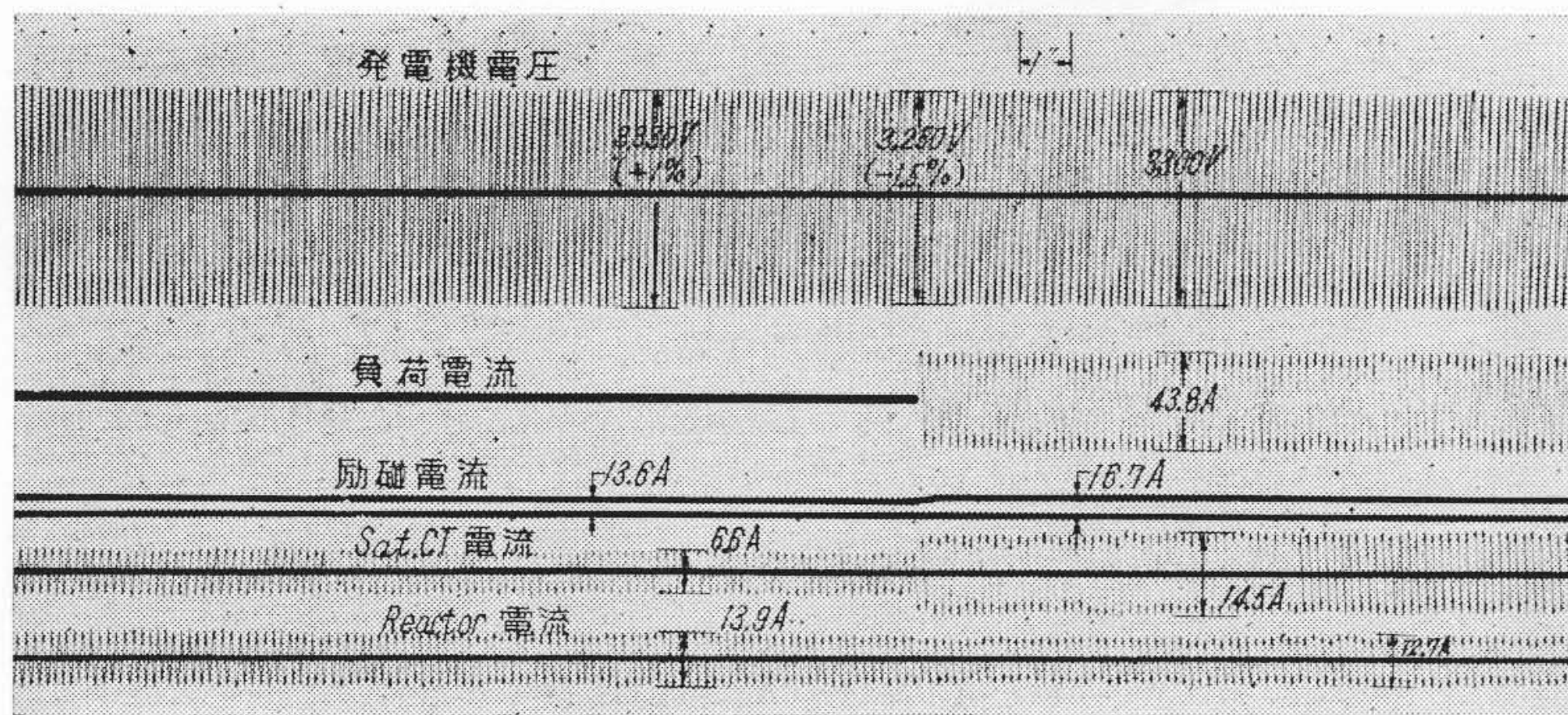
$T_{do'}$: 発電機開路時定数

(11)式より明らかなように励磁電圧一定として負荷投入すれば端子電圧は瞬時に一定電圧だけ降下し、その後は T なる時定数で変化しさらに電圧は低くなる。

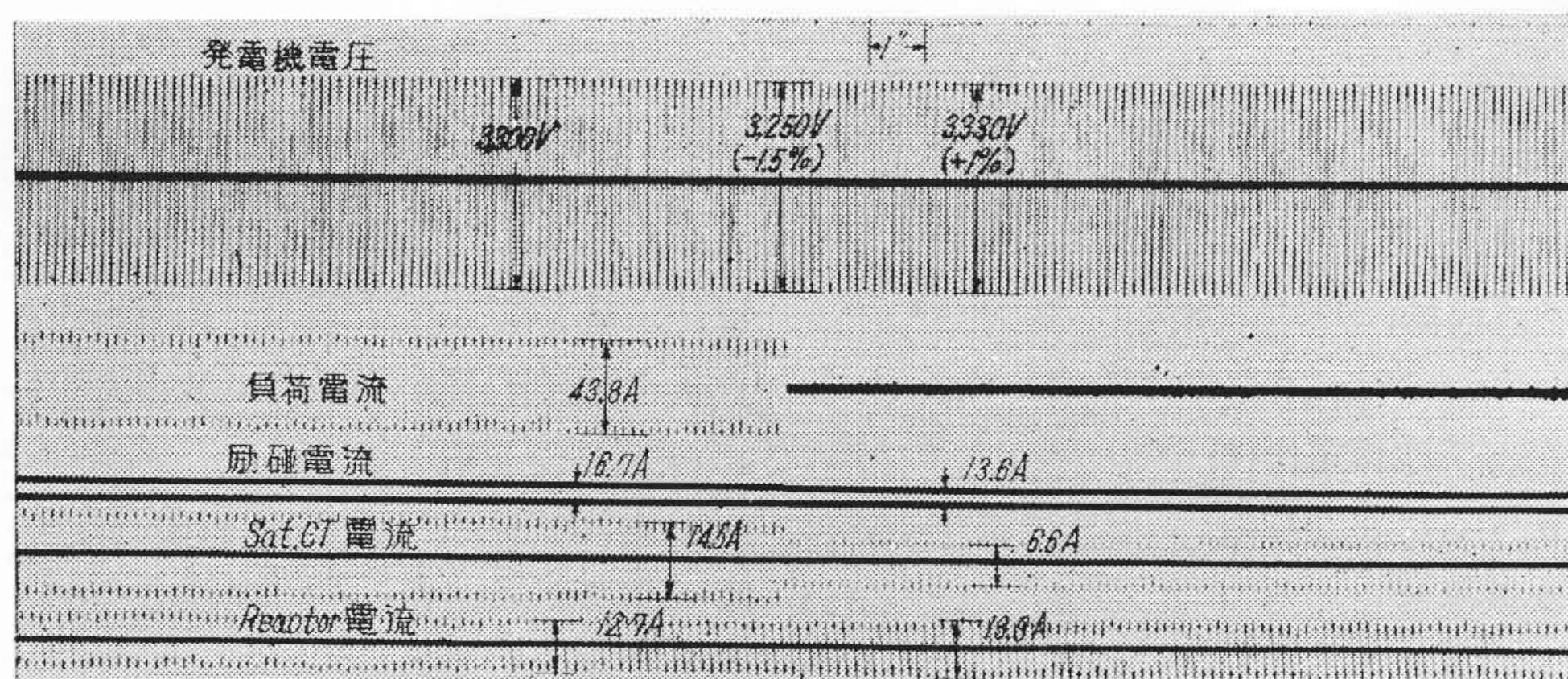
従来の励磁機付自動電圧調整器では、電圧降下の検出から動作するまでに時間遅れがあり、かつ制御量は電圧降下分だけである。したがって最小電圧は負荷投入瞬時になく、時間遅れだけさらに降下する。このとき自動電圧調整器が動作し、励磁機の電圧上昇率により発電機の電圧は回復するが、負荷電流に対する制御量が少ないからこの回復に時間を要する。しかし自励式においては負



第11図 整定電圧変動率



第12図 力率100%全負荷投入オシログラム



第13図 力率100%全負荷遮断オシログラム

荷電流に比例した電流が可飽和変流器を通して界磁回路に流れるので、制御量が大きく、したがって負荷投入直後の次のサイクルで電圧回復が開始する。したがって電圧最小値は負荷投入瞬時にあり、回復時間がきわめて早く界磁電流は単位函数的に増加し良好な特性を示す。

自励式の場合の電圧降下を考慮するに、上述のごとく負荷電流の増加に伴って端子電圧が回復するから、(11)式に此の回復分を重畳して考えればよい。端子電圧の計算結果は、

$$E_T = 1 - \frac{X_d'}{X_d' + X} e^{-\frac{t}{T}} \dots\dots\dots (12)$$

で表わされる。ここに

E_T : 負荷投入時の端子電圧 (励磁電圧の変化を考慮)

ただし、力率0で考えてあり、

前述のように最小電圧は $t=0$ の瞬時にあるから

$$E_{\min} = \frac{X}{X_d' + X} \dots\dots\dots (13)$$

となる。しかし、自励式では応答がきわめて早いいため次過渡リアクタンスの影響で上式よりさらに電圧降下は少なくなる。

7.2 誘導電動機の起動

前述したように、自励式交流発電機は従来の方式に比較すると瞬時電圧回復ははるかに早く、これは負荷が誘

導電動機である場合の起動の現象からうかがえる。たとえば第8図は3,400 V, 220 kW (300 HP)の誘導電動機を起動したオシログラムであるが、これより明かなように負荷印加時の次のサイクルから界磁電流が急増して電圧は回復し始めている。また供試誘導電動機の起動kVAは発電機容量の119%になっているが瞬時電圧変動率は21.4%, 電圧回復は約0.5秒である。(13)式で計算すると26.3%になるがこれは次過渡リアクタンスの影響を考慮すればほぼ実測値と一致する(付録Ⅱ)。

8. 自励式交流発電機の実施例

日立製作所にて製作納入した自励式交流発電機の一例について次に述べる。

発電機仕様

定格容量.....	250kVA
定格電圧.....	3,300/6,600 V
周 波 数.....	60~
回 転 数.....	900 rpm
力 率.....	80%
相 数.....	三相
駆動原動機	

...ディーゼル機関, 軸馬力220kW(300HP)

励磁方式.....自励式

接続図はすでに第1図に示し, 回路の内容については前述したとおりであるが, 発電機端子電圧が高圧であるために直線リアクタは変圧器を通して発電機端子に接続されている。また発電機電圧の調整は単巻変圧器により制御電流を調整して行われる。

第9図はディーゼル機関に直結されている自励式交流発電機の外観を示し, 第10図は励磁装置キュービクルの内部を示す。

8.1 整定電圧変動率

第11図より明らかなように原動機の変動率を3.5%と仮定したとき, 力率100%, 80%のおのおのにおける無負荷と全負荷間の電圧変動率は定格電圧に対して±2%の範囲にはいっている。

8.2 全負荷遮断, 投入

第12図は力率100%の全負荷投入のオシログラムの一例を示し, 第13図は同一力率における全負荷遮断のオシログラムの一例を示したものである。試験結果の平均から発電機電圧は数サイクルで回復している。全負荷投入, 遮断瞬時の電圧変動率は最大5~6%であった。

9. 結 言

以上, 自励式交流発電機の動作, 構造, 特性などにつ

いて述べたが, 従来の自動電圧調整器付交流発電機と比較すると前述のような多くの特長があるので今後, 広い分野に使用され十分にその特長を発揮するものと思われる。また自励発電方式は実用化されて日もまだ浅いが今後, 大容量発電機にも応用されると考えられる。

終りに臨み, 終始御指導下さった日立製作所日立工場 泉部長, 高木部長, 平川, 田附両課長, 藤木, 小淵両氏, ならびに関係各位に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) H.F. Storm: Trans AIEE p.1014~p.1017 Vol 70. (1951)

付 録 I

第3図より $\dot{I}_{RI}$ が $\dot{E}_T$ より θ_3 おくれているとすれば

$$\theta_3 = -(\phi - \theta_2) = \theta_1 + \frac{\pi}{2} - \phi$$

また $\dot{I}_{RE}$ が $\dot{I}_{RI}$ よりおくれていると

$$\beta = -(\theta_1 - \theta_3) = \frac{\pi}{2} - \phi$$

付 録 II

次過渡リアクタンスの影響を考えたとき発電機端子電圧降下は(13)式に次過渡リアクタンスの影響を表わす項を加えた次式になる。

$$E_T = \left(\frac{X}{X + X_d''} - \frac{X}{X + X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T'}} + \left(1 - \frac{X_d'}{X_d' + X} \right) e^{-\frac{t}{T}}$$

ここで T' : 次過渡時定数

X_d'' : 次過渡リアクタンス

供試機 $X_d = 0.3$ $X_d'' = 0.22$ であるので上式で計算すれば電圧降下は20.7%となる。

Vol. 41

日 立

評 論

No. 9

- ◎電源開発株式会社 南川越変電所納 80,000 kVA 同期調相機
- ◎出光興産株式会社納 1,100 kW (1,450 HP) 海水ポンプ駆動タービン
- ◎シンチレーションカウンタに関する一般的注意
- ◎電子顕微鏡による工業煙霧質について
- ◎エレベータの全自動群管理方式
- ◎自動車冷房装置の研究
- ◎動力伝達用平歯車の動荷重に関する研究
- ◎磁 気 ド ラ ム

- ◎F4B 形 トランジスタ 搬送 電話 装置
- ◎ド リ フ ト ト ラ ン ジ ス タ
- ◎チ ュ ー ナ 用 受 信 管
- ◎メラミンプラスチック化粧板ヒッターライトの構造特性
- ◎押出機におけるビニル材料の流動挙動
- ◎低温用 3.5% Ni 鋼の熱処理と熔接
- ◎高 C-高 V-Co 高速度鋼の切削耐久力について
- ◎電 気 車 両 用 制 御 器 の 保 守

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地 振替口座東京 21824 番
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 振替口座東京 20018 番