

SCR を用いた交流発電機の自励装置

Self-exciting Equipment of AC Generators by SCR

磯野 昭* 滝田 武夫** 橋本 忠雄**
Akira Isono Takeo Takita Tadao Hashimoto

要 旨

発電機電圧から界磁入力をうる SCR 式自励装置を製作し、現在ディーゼル発電機と組み合わせて使用している。

この装置は次の特長をもっている。

- (1) 小形軽量である。
- (2) 負荷による電圧変動が小さく、電圧変動過渡時の界磁応答がきわめて速い。
- (3) 発電機出力周波数変動の影響をほとんど受けない。
- (4) 調整部が少なく、発電機との組合せ試験が簡単である。

本装置はビルディング、ポンプ所などの非常用電源設備として、すでに昭和 39 年 10 月以降 30 台受注し、横浜市水道局小雀ポンプ所 2,500 kVA 発電機をはじめ、数十台が順調に営業運転にはいつている。

1. 緒 言

励磁装置の重量、据付面積が軽減される、過渡時の界磁応答が速いなどの利点から発電機電圧および負荷電流の両方から界磁入力をとる複巻特性の自励式交流発電機が生まれ⁽¹⁾、すでに数万 kVA の発電機まで実用に供されている。

SCR (Silicon Controlled Rectifier) の出現により SCR を用いた自励式交流発電機が出現したことは周知であるが⁽²⁾、SCR を用いた自励式発電機には大別して 2 種類ある。その一つは従来の自励式発電機と同じ複巻特性で、発電機の飽和および界磁抵抗の変化による電圧変動分だけを SCR で調整するものである。その二は界磁入力を発電機電圧だけからとり、発電機電圧の制御をすべて界磁用 SCR の制御角調整に頼る、いわゆる分巻特性のものである。今回製作したものは装置が簡単な分巻特性のものである。

この励磁装置は小さな入力で界磁電圧を制御できるため AVR (Automatic Voltage Regulator) を簡単な半導体で構成することが

可能であり、励磁機付の発電機はもちろん従来の磁気増幅器を使用していた自励式発電機に比べても電圧変動過渡時の応答が著しく速くなる⁽³⁾⁽⁴⁾。

2. 励磁装置の概要

図 1 に代表的なスケルトンダイヤグラムを示す。励磁装置は電圧検出、SCR のゲート信号位相調整、ゲート信号発生、各回路と発電機に界磁入力を供給する整流回路から成る。

2.1 電圧検出回路

図 2 に励磁装置の概略結線図を示す。補助変圧器 T_1 の 2 次回路のツェナーダイオード ZD により定電圧を作り、 T_1 の 3 次によって発電機電圧に比例した電圧を作る。これから発電機電圧の変動をトランジスタ TRS_1 および TRS_2 のベース電流に変え、さらに TRS_2 の内部抵抗に変える。この抵抗をツェノン回路の可変抵抗として用いる。発電機電圧調整は抵抗 R_4 を変えることにより行ない、広い範囲の調整が可能である。また、ツェナーダイオード ZD は温度係数が零になるよう素子の組合せを行ない、 TRS_1 、 TRS_2 の温度による電圧降下の変化はダイオード D_3 によって補償されており、周囲温度の変化による発電機電圧の変化はほとんどない。

2.2 ゲート信号位相調整回路

SCR のゲート信号位相はツェノン回路によって調整される。図 3 (a) にツェノン回路を、(b) にそのベクトル図を示す。抵抗 R を零

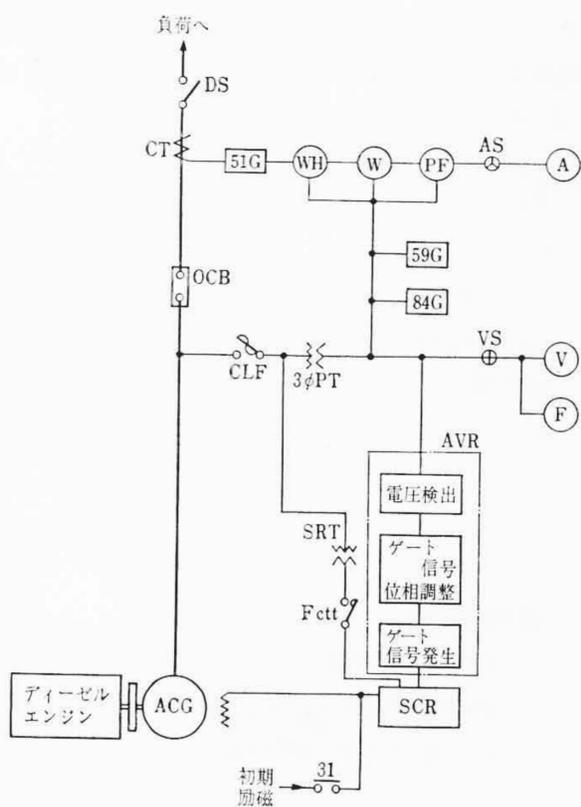


図 1 スケルトンダイヤグラム

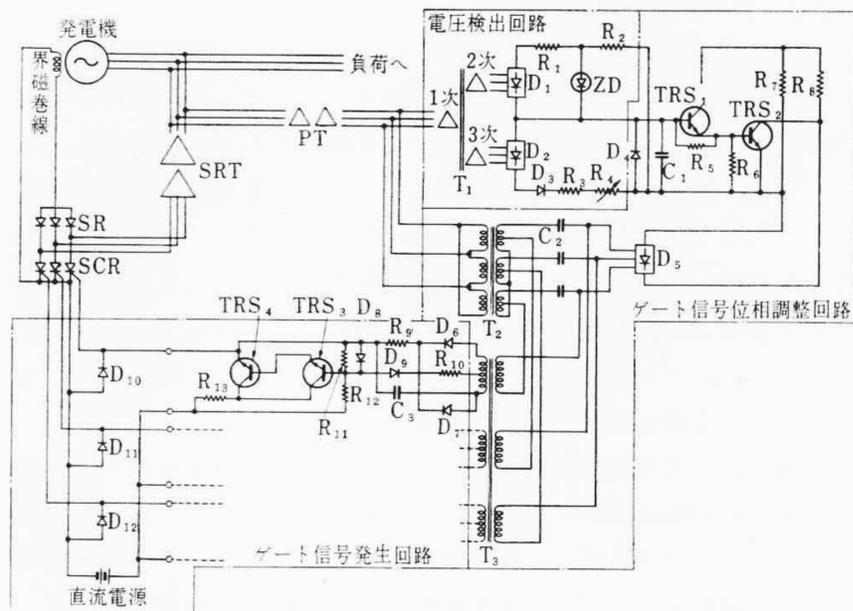


図 2 励磁装置の概略結線図

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所国分工場

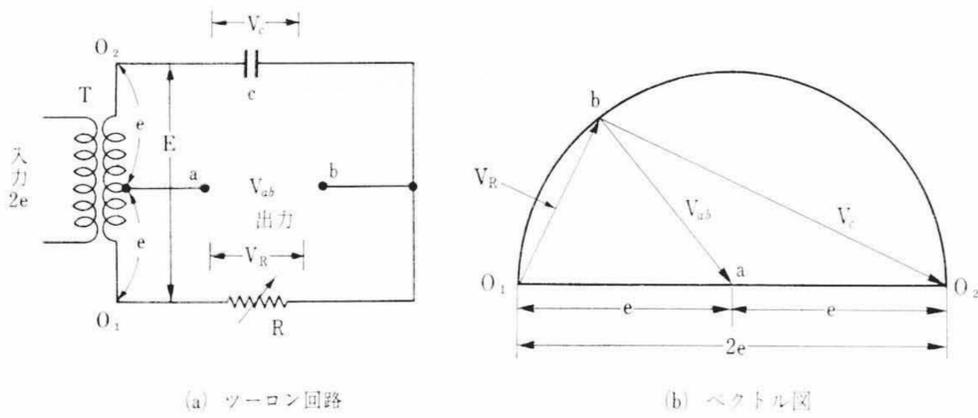


図3 ツーロン回路

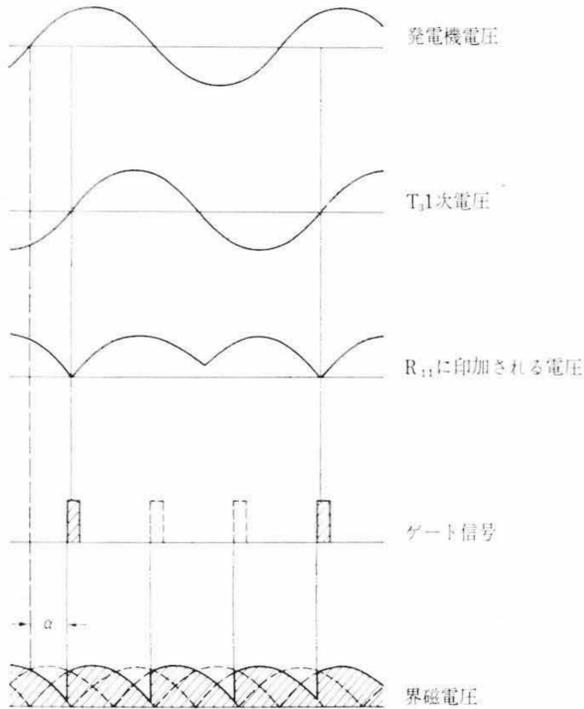


図4 各部の電圧波形

から無限大まで変化させることにより、出力電圧 V_{ab} の位相は入力電圧 $2e$ より零～180度の位相遅れを生じ、かつ V_{ab} の大きさは常に e に等しい。実際にはトランジスタ TRS_2 の内部抵抗1個を可変抵抗として用い、三相の電圧を移相するため補助変圧器 T_2 およびコンデンサ C_2 と組み合わせて図2のように構成する。発電機電圧が整定値より大きくなれば、トランジスタ TRS_1, TRS_2 のベース電流が減少して TRS_2 の内部抵抗が大きくなり、ツーロン回路の出力電圧すなわち補助変圧器 T_3 の1次電圧の位相がおくれ、SCRの点弧位相が遅くなり、界磁電圧が小さくなって発電機電圧を低下させる。発電機電圧が整定値より低くなれば、 TRS_2 の内部抵抗は小さくなり、SCRの点弧位相が進み、発電機電圧を大きくする。

2.3 ゲート信号発生回路

短絡故障などにより発電機電圧を失った場合に界磁入力が無くなってしまふ分巻特性発電機の欠点を補うため、ゲート信号の発生方法には特別の考慮をはらっている。発電機電圧が零またはきわめて低い場合、SCRのゲートには直流が印加され、発電機電圧が上昇するにつれてSCRのゲート信号はしだいに幅の狭いパルスに変化する。したがって短絡故障などにより発電機電圧を失っても、故障を切りはなせば、残留磁気によって自動的に電圧を確立する。またこの方法によれば初励磁用の電源容量は小さくてすみ、場合によっては初励磁用電源を省略することもできる⁽⁵⁾。

整流器変圧器SRT 2次の整流回路はグレッツ結線の3アームがSR (Silicon Rectifier), 3アームがSCRで構成されており、SCRのゲート信号は360度ごとに印加される。図4は図2の結線で発電機電圧、補助変圧器 T_3 の1次電圧、抵抗 R_{11} に印加される電圧、ゲート信号および界磁電圧の関係を示したものである。図2の結線

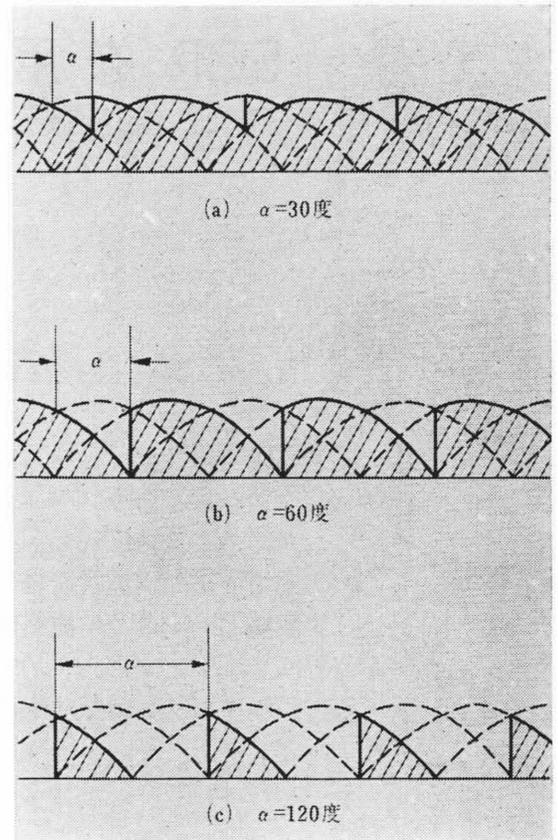


図5 制御角 alpha と界磁電圧

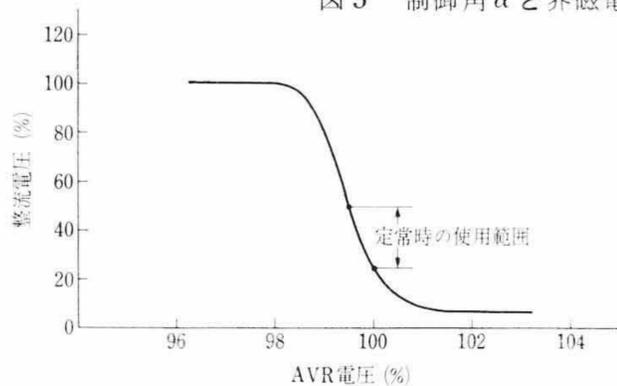


図6 AVR電圧と整流器電圧の関係

においてツーロン回路による移相角度とSCRの制御角 α はほぼ等しい関係にある。

2.4 整流回路

整流器用変圧器の2次電圧は誘導電動機起動などを考え、発電機電圧が相当低下しても定格界磁電圧を供給できるよう、十分余裕のある電圧をとっている。整流回路は前述のように構成されており、界磁電圧と整流電圧の関係は重なり角の影響、SR, SCRの電圧降下を無視して(1)式の関係にある。

$$E_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} E_{ac}(1 + \cos \alpha) = \frac{1.35}{2} E_{ac}(1 + \cos \alpha) \dots\dots (1)$$

ただし、 E_{dc} : 直流電圧

E_{ac} : 交流線間電圧実効値

α : SCRの制御角

すなわち、制御角 α を0～180度に変えることにより界磁電圧を最大～零と制御する。図5は制御角 α と界磁電圧波形の関係を示したものである。

3. 特性

3.1 励磁装置単体特性

図6は励磁装置単独で整流器用変圧器電圧を一定とし、AVR電圧を変えたときの整流電圧変化の一例である。AVR電圧の変化に対する整流電圧の変化量は大きく、励磁系の制御利得の高いことがわかる。

3.2 発電機と組み合わせた特性

発電機と組み合わせたときの特性として250kVA交流発電機を用いて得られた諸特性について述べる。

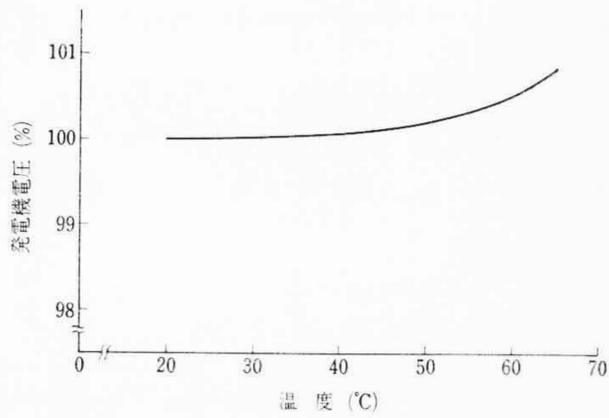


図7 温度特性

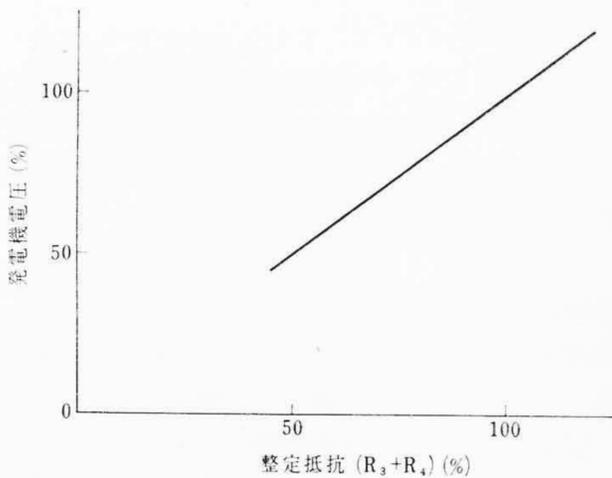


図8 整定抵抗と整定電圧の関係

使用した発電機仕様は下記のとおりである。

容量	250 kVA	回転数	1,000 rpm
周波数	50 ~	電圧	440V
電流	328A	pf	0.8
x_d	96%	x_d'	25%
x_d''	17%	T_{d0}'	3.8 秒

(1) 負荷による電圧変動

無負荷 ~115% の誘導負荷 (力率約 0.1) に対し電圧変動は約 0.5% である。

(2) 周波数特性

±10% の周波数変化に対し電圧変動はほとんどない (0.1% 以下)。

(3) 温度特性

図7に AVR 周囲温度と発電機電圧の関係を示す。通常考えられる温度範囲に対し発電機の電圧変動はほとんどない。

(4) 発電機整定電圧

整定電圧は図2の抵抗 R_3 および R_4 によって大幅に変わる。図8は整定抵抗と整定電圧の関係を示したものである。

(5) 負荷投入時の電圧変動

図9は 115% 誘導負荷投入時のオシログラムを示す。負荷投入後、界磁電圧はほとんど時間遅れなく達し得る最大電圧となり、3.8 秒と 250 kVA の容量にしては大きな T_{d0}' を持つ発電機であるにもかかわらず、0.6 秒で発電機電圧は一定となり、かつ発電機電圧の過渡振動は測定不可能なほどわずかである。負荷はほぼ純リアクタンスに近いと考えられるから、投入時の発電機電圧変動の最大値は x_d' が作用するものとして通常取り扱われている。 x_d' 25% を用いてこの変動を計算すれば

$$\frac{x_d'}{x_e + x_d'} = 22.3 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 x_e : 負荷リアクタンス

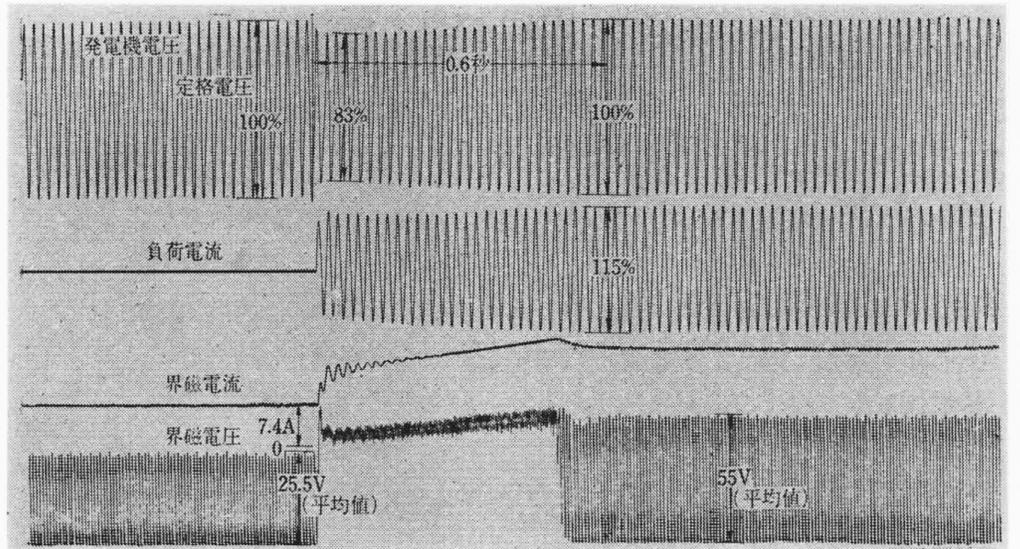


図9 115% 誘導負荷投入時のオシログラム

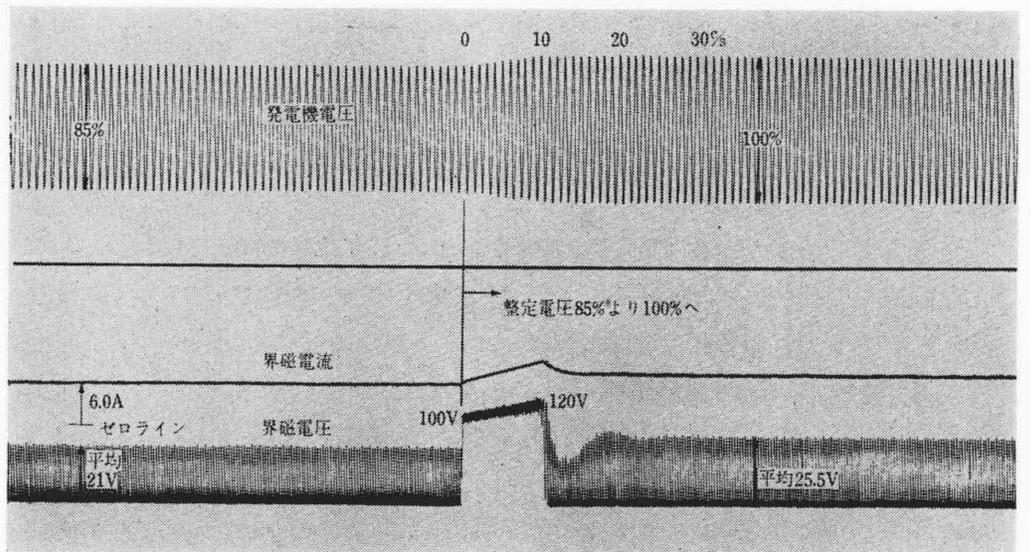


図10 インディシャル応答 (平滑回路時定数 39 ms)

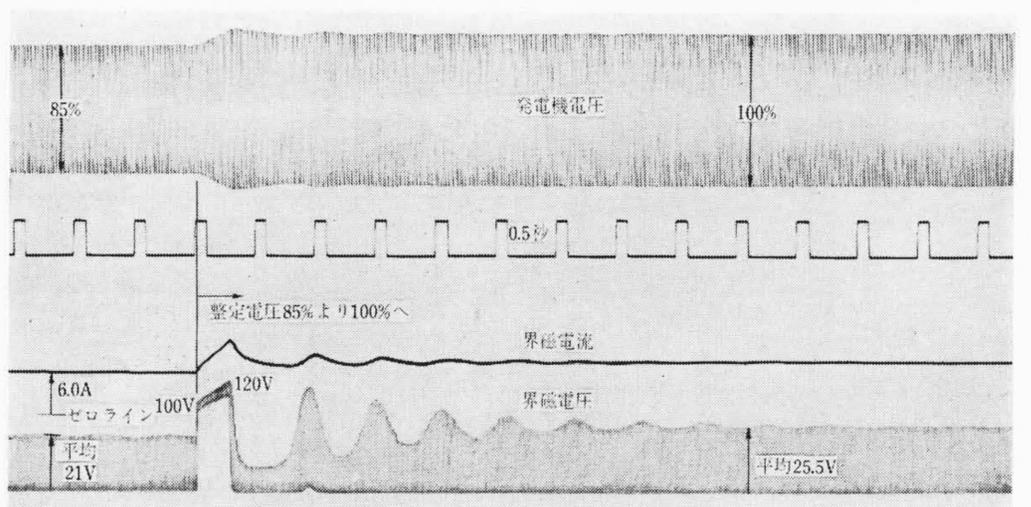


図11 故意に大きな平滑回路時定数を持たせたときのインディシャル応答 (平滑回路時定数 490 ms)

となり x_d'' 17% を用いて計算すれば 16.2% となる。これに対し実測値は 17% の電圧降下であって図9のようなきわめて速い界磁電圧の応答に対しては交鎖磁束の変化も速く、発電機リアクタンスとしては x_d' と x_d'' の中間の値それも x_d'' に近い値が作用しているものと思われる。この現象は負荷遮断時においても同様であって前述の負荷遮断時の電圧上昇の実測値は最大 21% であるのに対し、 x_d' を用いての計算値は

$$\frac{x_e + x_d'}{x_e} - 1 = \frac{x_d'}{x_e} = 28.7\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

であり、 x_d'' を用いての計算値は 19.5% と電圧上昇の最大値もまた x_d'' に近い値が作用している。

(6) インディシャル応答

AVR 応答のおくれはほとんど発電機電圧を検出する際の平滑

表1 過渡振動電圧の諸定数

T_1 (s)	$\frac{2\pi}{\beta}$ 計算値 (s)	$\frac{2\pi}{\beta}$ 実測値 (s)	$\frac{1}{\alpha}$ 計算値 (s)	K	$\sqrt{1+A^2}$	$\sqrt{1+B^2}$
0.49	0.61	0.54~0.58	0.87	200	1.01	40
0.039	0.18	≒0.16	0.078	200	1.06	150

回路の時定数できまり、その他の部分の影響は小さい。平滑回路の時定数は40ms程度にとれば十分その目的が達せられ、図9でも明らかなように、この程度の値に対しては発電機電圧および界磁電圧変動過渡時の過渡振動はほとんど認められない。また当然乱調防止回路は不要である。

図10, 11は発電機整定電圧を85%→100%と急変したときの発電機電圧および界磁電流のインディシャル応答を示す。図10は通常の平滑回路時定数39msの場合であり、図11は過渡振動の測定を容易にするため、平滑回路の時定数を故意に大きく490msにとった場合である。図では初期の電圧変動が大きいため、始め界磁電圧はその取り得る最大値を保ち、発電機電圧は一様に上昇し、ほぼ整定電圧に近づいた後、電圧の減衰振動が始まる。ただし図10では減衰が大きく発電機電圧の振動は測定困難なほど小さい。

発電機電圧の飽和を無視し、発電機電圧に対する界磁電圧の変化を直線で近似し、AVRを一次おくれと仮定すれば、整定電圧の変化に対する発電機電圧の変動分 ΔE_1 および界磁電圧の変動分 ΔE_2 はAVRおよび界磁巻線の二つの一次おくれを持つ帰還回路から(4), (5)式のように求められる。

$$\Delta E_1 = \frac{K}{K+1} \left\{ 1 + e^{-\alpha t} \sqrt{1+A^2} \sin(\beta t + \theta_1) \right\} 1 \dots\dots (4)$$

$$\Delta E_2 = \frac{K}{K+1} \left\{ 1 + e^{-\alpha t} \sqrt{1+B^2} \sin(\beta t - \theta_2) \right\} 1 \dots\dots (5)$$

ここで、 $\alpha = \frac{T_1 + T_2}{2T_1 \cdot T_2}$ $\beta = \sqrt{\frac{K+1}{T_1 \cdot T_2} - \left(\frac{T_1 + T_2}{2T_1 \cdot T_2}\right)^2}$

$A = \frac{\alpha}{\beta}$ $B = \frac{K+1-\alpha T_1}{T_1 \cdot \beta}$

$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{1}{A}$ $\theta_2 = \tan^{-1} \frac{1}{B}$

K: 制御利得

1: 単位関数

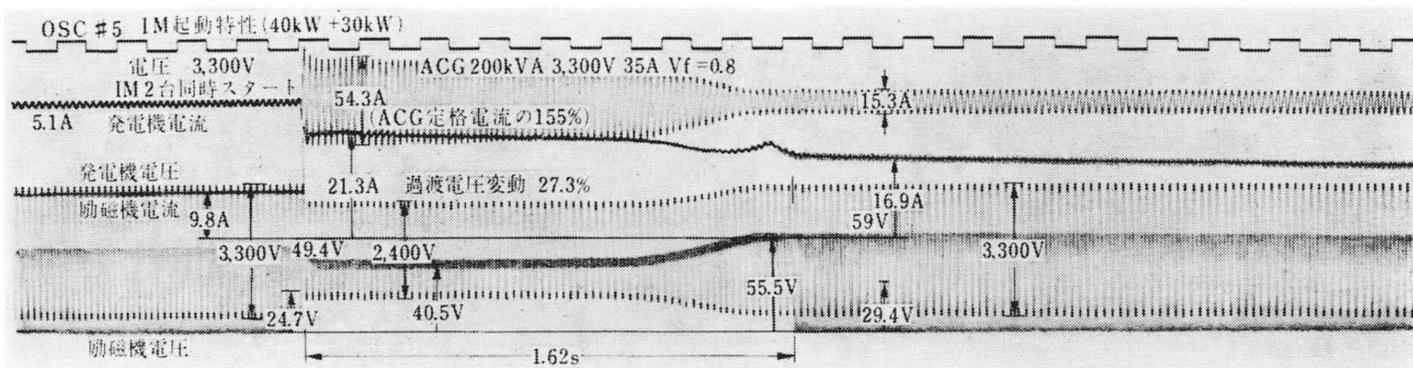
T_1 : AVRの時定数

T_2 : 界磁巻線の時定数

通常 T_1 の値は小さく $T_1 \ll T_2$ であるから $\alpha \approx 1/2 \cdot T_1$ となり過渡電圧の減衰はほとんどAVRの時定数で決定される。表1は図10および図11から求めた過渡電圧振動周期 $2\pi/\beta$ の計算値と実測値の比較で、両者はよく一致し、本装置の励磁系は前述のように二つの一次おくれを持つ回路に簡略化して大きな誤りはないと考える。

(7) 誘導電動機起動時の特性

本装置は発電機電圧からのみ界磁入力をとるいわゆる分巻特性の自励装置であるが、整流器用変圧器2次の電圧には十分余裕を持たせてあり、図9の力率の低い大負荷投入のオンシロプログラムから推定できるように誘導電動機起動の際にも通常考えられる範囲の負荷に対してはなんら問題ない。図12は200kVA, 3.3kV発電機で40kWおよび30kWの誘導電動機を同時起動した際のオンシロプログラムである。発電機電圧が72.7%に低下したときの発電機電流は155%、すなわち誘導電動機の起動途中における負荷は低力



発電機 200 kVA 3.3kV 電動機 40 kW+30 kW 同時起動

図12 誘導電動機起動時のオンシログラム

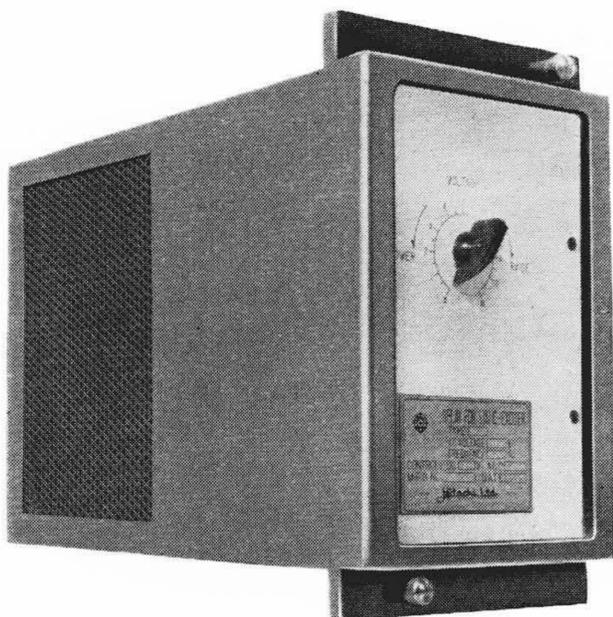


図13 AVR

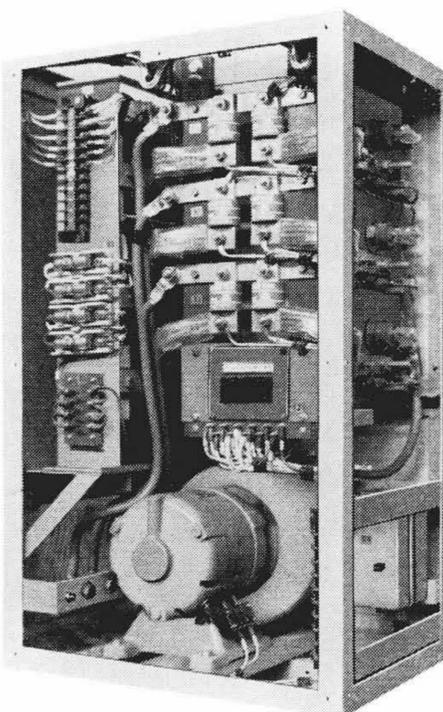


図14 整流装置ボックス内部

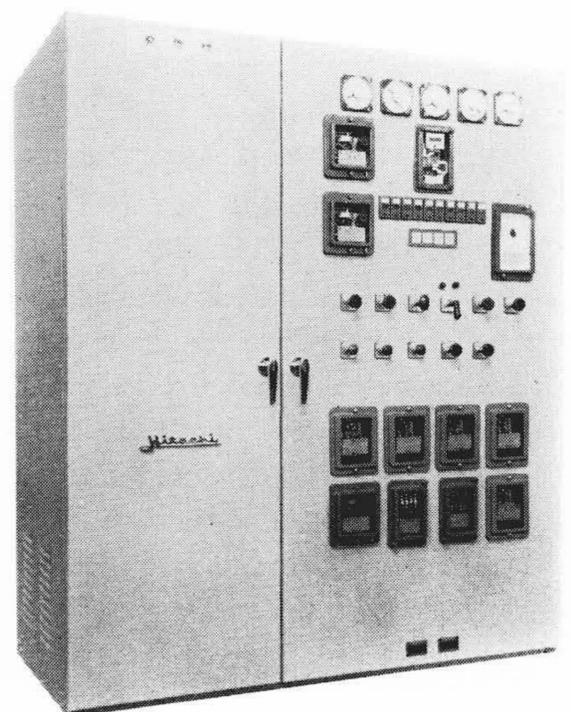


図15 発電機制御キュービクル

率のうえ、発電機容量に対し

$$\frac{1.55}{0.727} \times 100 = 213 (\%) \dots\dots\dots (6)$$

と過大であるにもかかわらず、なんら支障なく起動している。

4. 機器の構成

図13に AVR 部分 (ここで AVR とは電圧検出回路, ゲート信号位相調整回路, ゲート信号発生回路をいう), 図14に励磁用整流装置を収納したボックス, 図15に本装置を収納したキュービクルを示す。このキュービクルは, 据付面積, 容積において従来形の約40%に縮小化され好評を博している。

5. 結 言

SCR を用いた交流発電機の自励電圧調整装置は, 制御入力小さくてすみ, すべて半導体素子で構成されているので, 小形, 軽量, 安価であり, かつ制御利得が大きいため負荷による電圧変動が小さく,

電圧変動過渡時の界磁応答がきわめて速いなどすぐれた特性を示している。現在これらは数十台納入され, 好調に運転されている。本装置はビルディングやポンプ所などの非常電源のほか, 自家用発電設備用, 特殊周波数電源など広い範囲の需要が期待される。

おわりに臨み, 本装置を積極的に採用された需要者各位に対し厚くお礼申し上げます。また, 種々ご助言をいただいた日立製作所日立研究所小林部長, 高林主管研究員, 奥田研究員, 国分工場広吉課長, 池田課長, 試作にあたりご協力いただいた日立研究所葛貫技術員, ならびに本装置の試験にあたりご助力いただいた国分工場配電盤検査課および日立工場電機検査課のかたがたに衷心より謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) H. F. Storm: TAIEE 70, 1014 (1951)
- (2) 河上, 上妻, 永長: 明電舎時報 38, 23 (昭36-10)
- (3) 磯野, 上和野: 昭和38年電気学会東京支部大会 No. 144 (昭38-11)
- (4) 磯野: 昭和39電気四学会連合大会 No. 727 (昭39-4)
- (5) 磯野: 特許公報 昭和39-2046 (昭和39-9)

Vol. 48 日 立 評 論 No. 2

目 次

<p>■ 論 文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東海銀行納電子為替交換システム関係 ・食塩水電解用 11,000 kW シリコフォーマ ・高耐圧シリコン整流素子 ・0.6 m³ パワーショベル用ブレーキドラムの改良 ・日立温水ボイラ WP-50 形について ・心臓血管造影撮影用 X 線装置 ・BH形モートルブロックの巻上用スプロケットとリンクチェーンのかみ合い ・ミラクルワイヤの特性 <p>■ 包装荷造機械特集</p> <ul style="list-style-type: none"> ・包装技術の展望 ・日立砂糖充てん封かん機 	<ul style="list-style-type: none"> ・重量選別機の検出部 ・日立一括上包包装機 ・パレットローダ <p>■ 製品紹介</p> <ul style="list-style-type: none"> ・真空遮断器“HI-VAC”とメタルクラッド配電盤 ・日立ハイセットラー ・日立 SA₂ 形電磁ブレーキ ・新形アナログ計算機“アストリックシリーズ” ・275 kV 1×1,200 mm² アルミ被 OF ケーブル ・全アルミ軽量変圧器 ・オートステープラ ・エアステープラ, ハンドステープラ
--	--

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地

振替口座東京 71824 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

Vol. 26 日 立 造 船 技 報 No. 3, 4

目 次

<ul style="list-style-type: none"> ・ダム放水管の給気管断面積の算定法 ・船用2サイクル過給ディーゼル機関の起動性能 ・高圧用メカニカルシールの研究 (第1報) <li style="padding-left: 20px;">——押付け力が密封特性に及ぼす影響—— ・耐候性高張力鋼の溶接施工法 ・生型鑄鋼用鑄物砂の実用化 ・工業用純チタニウムの圧延焼なましの材の電子顕微鏡による直接観察 ・コルモノイ No. 5 および No. 6 溶接実地適用のための 	<p>実験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・含有物質の放射化分析による液量の測定 ・進水時の船体運動 <li style="padding-left: 20px;">——船首落下について—— ・プロペラバランステストにおける許容量の検討 ・最近の軸系ねじり振動におけるプロペラ減衰に関する考察 ・ステンレス鋼管の最小曲げ半径の決定
---	---

……………本誌に関する照会は下記に願います……………

日立造船株式会社技術研究所

大阪市此花区桜島北之町 60