## サイリスタ分巻自励同期機の

## 系統事故時の過渡特性

# Transient Behavior of Synchronous Machines with Shunt-connected Thyristor Excitation Under System Faults

Shunt-connected thyristor excitation has such features as quick response and ease of operation and maintenance, but at the time of system faults such as line-to-line and three-phase short circuit protective measures should be taken against abnormal inverse voltage induced therefrom in the magnetic field. In analyzing this problem the authors used a digital simulation method and carried out laboratory tests using a 300 kVA synchronous testing machine. As a result, it was confirmed that the thyristor shunt-connected self-excitation system can be applied with sufficient reliability to large capacity generators.

後藤益雄\* Masuo Gotô 古山昌之\*\* Masayuki Furuyama

前沢嗣伸\*\*\* Tsugunobu Maezawa

地福順人\*\* Junjin Jifuku

#### □ 緒 言

最近,発電機の大容量化とともに励磁方式も種々の方式が使用されてきている<sup>(1)</sup>。発電機の出力側から励磁電源を得るサイリスタ分巻自励方式は、大容量タービン発電機の場合,国内ではあまり使用されていないが、次のような利点があり、サイリスタの信頼性向上とともに外国(カナダなど)では広く使用されている。すなわち、

- (1) 静止機器であるため、励磁器の保守点検が容易である。
- (2) 速応励磁制御が可能であるから、過渡安定度の向上が図れる。
- (3) タービン発電機軸直結の励磁機をなくすことができ、主機まわり配置を簡単にし、軸長の長大化を少なくできる。

サイリスタ自励方式の問題点として、おもに速応性に起因する制動作用の減少があるが、これは安定化回路を設けることにより解決できる<sup>(2)</sup>。また、系統事故時の励磁電源の確保であるが、これも発電機端子における三相完全短絡のような特殊な場合を除けば励磁電源を確保できることがわかっている。

次に問題となるのは、系統事故時、界磁に誘起される過電 圧および過電流についてである。すなわち、系統に事故が発生した場合、発電機の界磁電流は電機子電流の影響により、 激しく変動する<sup>(3)</sup>。この場合、界磁電流が負になれば、整流器により逆電流が阻止され、界磁巻線に過電圧を誘起する。また、界磁巻線には過電流が誘起される場合もある。これらの 過電圧および過電流はサイリスタに加わるため、サイリスタ 励磁装置の設計にあたっては、これらの過電圧および過電流 を系統に事故が発生したときの発電機の運転特性<sup>(4)</sup>と関連して解明する必要がある。

ここでは、系統に 2 線および 3 線短絡事故が発生したときの現象を解析する方法について述べ、さらにこの間の現象のディジタルシミュレーションプログラムによる結果について示した。次に、このシミュレーション結果と300kVA同期機による実験値との比較について述べる。さらにタービン発電機の実機例につき系統事故時における界磁過電圧、界磁過電流および異電圧異位相投入時の界磁逆電圧の様相を明らかにし、界磁過電圧の抑制法について示す。

#### 2 ディジタルシミュレーションの方法

対象とした系統は**図1**に示すように、サイリスタ分巻自励 装置を有する発電機が、1回線送電線を介して無限大母線に 接続されるものとし、2線線間短絡または3線短絡が送電線 上で生ずる場合を考える。発電機は、磁気飽和や高調波のない理想的なものとし、サイリスタ励磁装置および励磁制御系 につき、次の仮定を設ける。

- (1) サイリスタ励磁装置は三相全波整流とし、6個のアームのうち、最大3個まで通流するものとし、4個以上の通流はないものとする。通常の機器定数では、この仮定は満足される。
- (2) ゲート信号がなくなったときは、界磁電流がゼロになるまで、その瞬時に通流していたアームを通じて界磁電流が供給され続けるものとする。
- (3) 界磁電流が負となれば、整流器部分は等価的に開路するものとする。
- (4) 自動電圧調整器入力電圧は、発電機端子線間電圧の瞬時値の三相のうちの最大値によるものとする。
- (5) 励磁制御系の伝達関数は一次遅れ系として取り扱う。

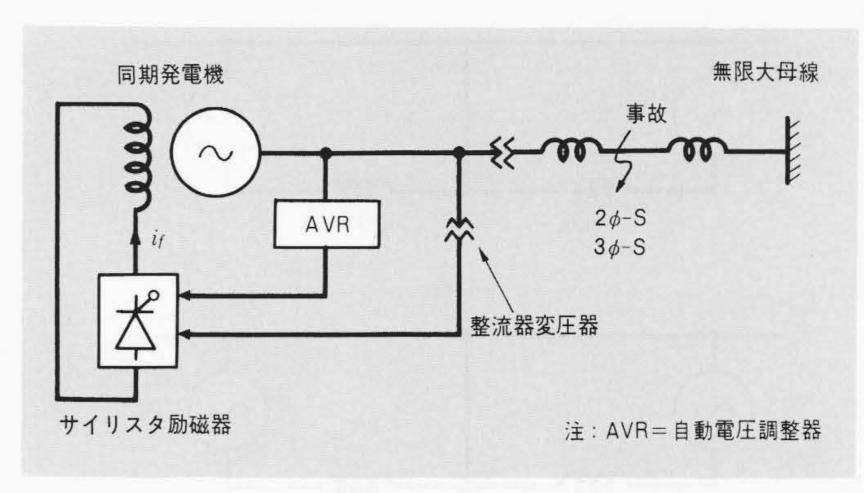
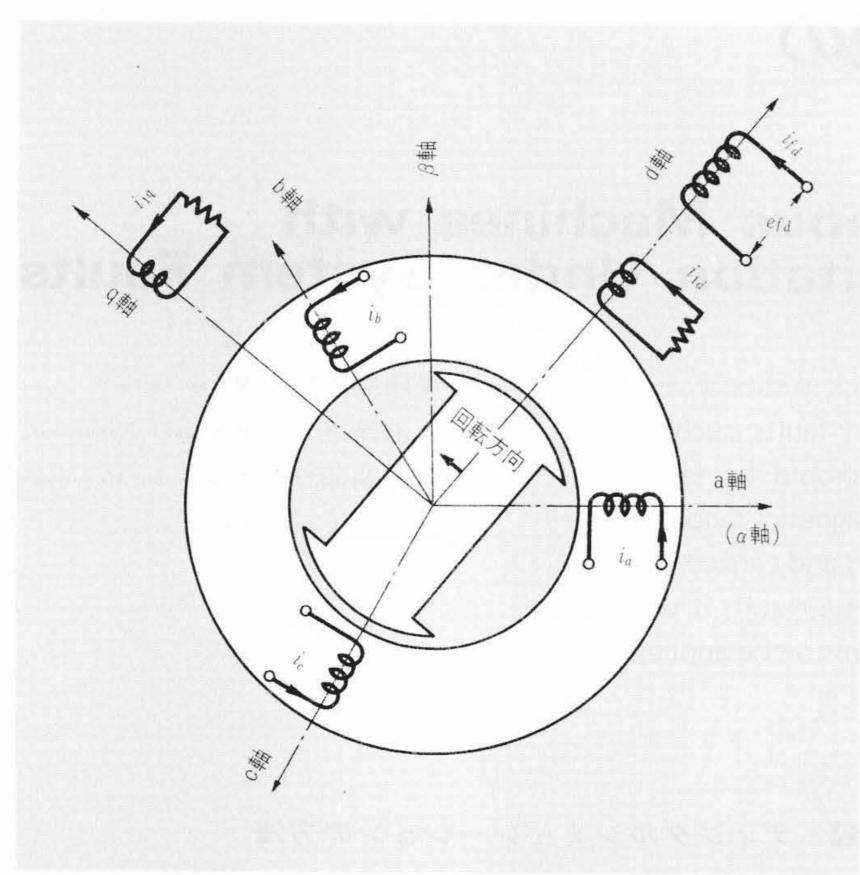


図 I サイリスタ分巻自励式同期発電機 サイリスタ励磁器の電源を、 同期発電機の出力側からとっているものである。

Fig.I Synchronous Machine with Shunt-connected Thyristor Exciter



同期機のモデル 固定子側はα-β座標,回転子側はd-q座標によっ ている。

Representation of a Synchronous Machine

発電機の数学的表現としては、系統故障として、2線線間 短絡および3線短絡を考えているので、電機子側の諸量は、 不平衡故障に対しても表現の容易なClarke座標(α-β座標) を用いた。回転子側の界磁巻線および等価制動巻線としては d-q座標表示とする。図2は、同期機のモデルを示すもので ある。また図3および図4は故障条件の表示を等価回路で示 すものである。ここでea∞、eβ∞はそれぞれ無限大母線のα、 β軸電圧である。これらを使って同期機を表わせば、まず電 機子回路について,

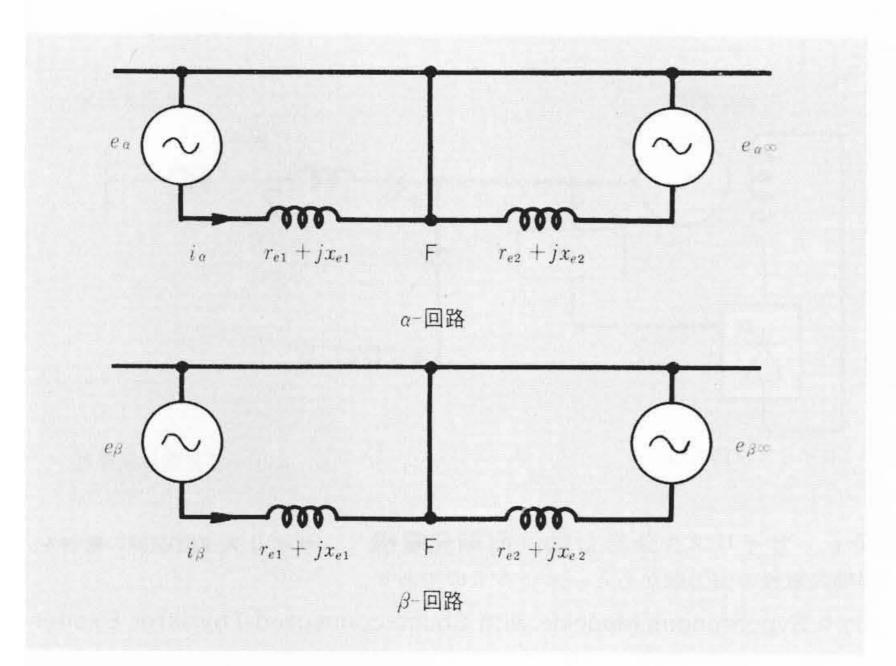


図 3 三相短絡時の等価回路  $\alpha, \beta$ 回路で表わした場合の $\alpha, \beta$ 回路とも 故障点Fが短絡されている。

Fig. 3 Equivalent Circuits for Three-phase Short-circuit Fault

3線短絡時

$$e^{\alpha} = xe_1 p i_{\alpha} + re_1 i_{\alpha}$$
 (3)  
 $e^{\beta} = xe_1 p i_{\beta} + re_1 i_{\beta}$  (4)  
2 線線間短絡時(b,c相短絡)  
 $e^{\alpha} = (xe_1' + xe_2) p i_{\alpha} + (re_1 + re_2) i_{\alpha} + e_{\alpha}$  (3)'  
 $e^{\beta} = xe_1 p i_{\beta} + re_1 i_{\beta}$  (4)'  
界磁回路について、  
 $e^{\beta} = p \psi_{\beta d} + r_{\beta d} i_{\beta d}$  (5)

ただし、界磁電流 isa が負になったときは、整流器部分は等価 的に開路するものとする。

直軸等価制動巻線回路について,

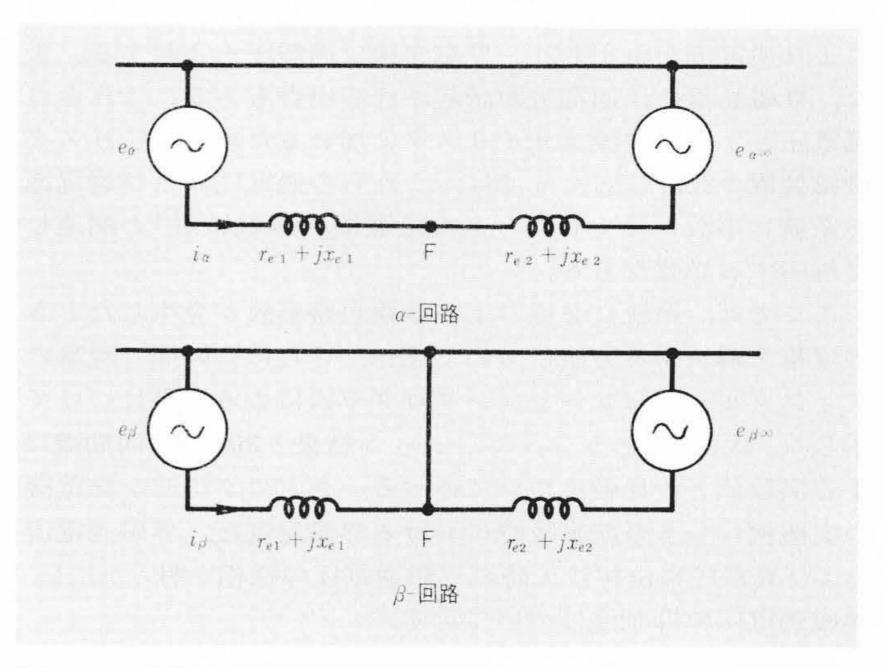
横軸等価制動巻線回路について,

 $0 = p \phi_{1q} + r_{1q} i_{1q} \cdots \cdots (7)$ 次に回転子の運動方程式は,

 $2Hp^2\theta = \frac{1}{\omega_0}(T_i - T_g) \cdots (8)$ ここで $T_i$ は原動機からの入力軸トルクであり、 $T_g$ は発電機の 電気トルクで次式により表わされる。

 $T_g = \psi_{\alpha} i_{\beta} - \psi_{\beta} i_{\alpha}$  .....(9) 以上の(1)~(9)式にて、まず(1)(2)式のea、esを(3)、(4)式または (3)', (4)' 式に代入消去し、また磁束 $\phi$ はおのおの電流で表わ されるから、結局(3)式または(3)'  $\sim$ (9)式までの7式にて、 $i\alpha$ 、 is, ifa, i1a, i1a, θ, Tgの7変数を未知数とする連立微分方 程式として、これらの数値解を求めることができる。 $i\alpha$ 、 $i\beta$ は直ちに三相量に変換できる。なおここまでは界磁電圧efaは 既知量として扱ったが、AVR(自動電圧調整器)を考慮する とefaは未知数となり、図5のブロック線図に対応する方程式 が追加される。

次にサイリスタ励磁器の各アームの電流および直流側電圧 の瞬時値を求める方法につき述べる。仮定のように対象とす る整流状態は重なり角が60度以内で、同時には2~3アームが 通流している状態を考える。図6は、このときのサイリスタ ブリッジ回路の電圧, 電流波形を示すものである。不平衡事 故のときなどに交流側の電圧が不平衡になっても取り扱うこ とができるように、各相電圧の大きさにより、1サイクルの 区間を同図に示すように 6 個のインターバル (int 1~int 6) に分割して解析を進める。たとえばint 1においては、正側の



2 線線間短絡時の等価回路 b, c相線間短絡であるからβ-回路 のみ故障点Fで短絡となる。

Fig. 4 Equivalent Circuits for Line-to-line Short-circuit Fault

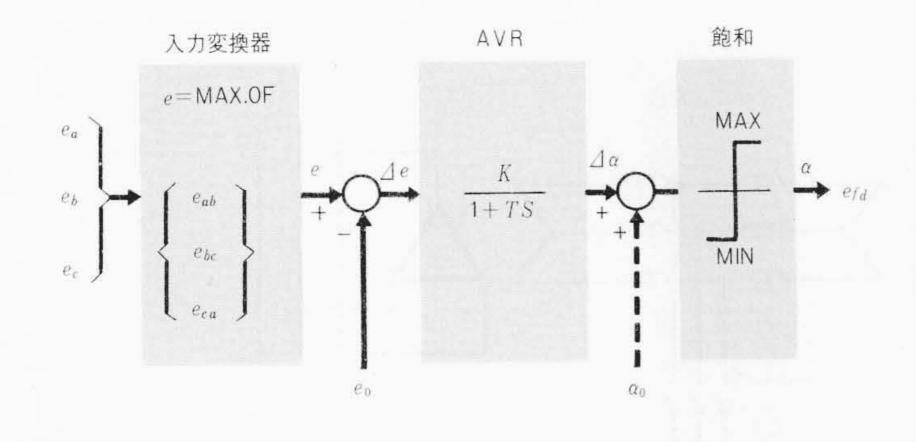


図 5 励磁制御系のブロック図 AVRは発電機端子電圧の最大値を検出し、サイリスタ制御角αを制御する。

Fig. 5 Schematic Block Diagram of Excitation Control System

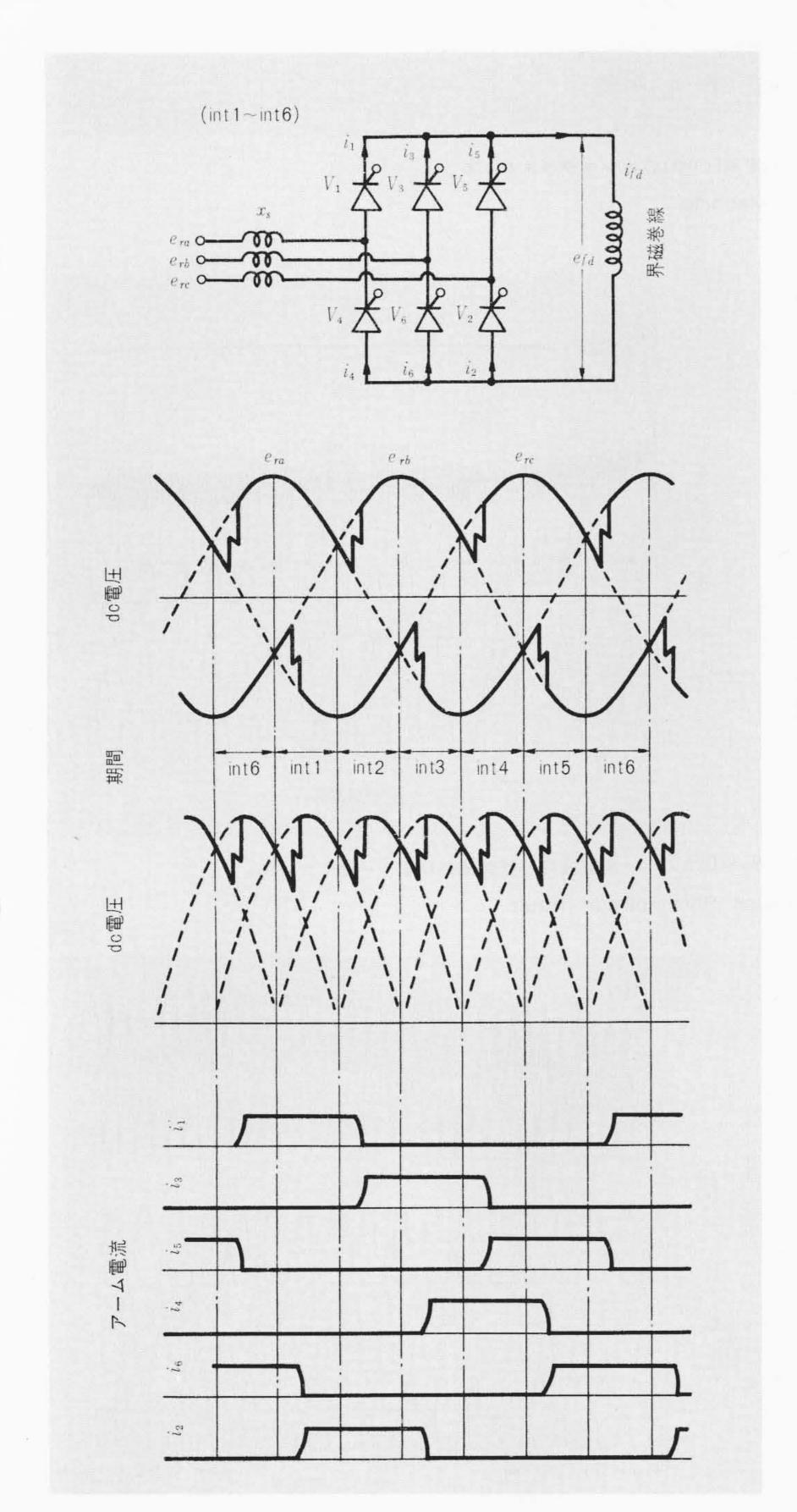


Fig. 6 Waveform of Voltage and Current is Thyristor Bridge Circuit

整流器は常にV1のみが通流しているから、電流の関係として

 $i_6=i_{fd}$  ......(11)

となる。次いで点弧パルスが $V_2$ に印加されて、 $V_2$ が通流を始めると、直流電流は $V_6$ から $V_2$ に転流を開始する。この転流期間中は、

$$i_2+i_6=i_{fd}$$
 .....(12)

$$pi_6 = \frac{1}{2} \left( \frac{erc - erb}{r_s} + pi_{fd} \right) \cdots (13)$$

が成立するから、これより $i_2$ 、 $i_6$ が求まる。 $i_6=0$ となる点をもって転流終了時点とすることができる。直流側の電圧 $e_{fa}$ は、 $\mathbf{図5}$ より次のように求まる。

点弧前

$$e_{fd} = (e_{ra} - x_{sp}i_{1}) - (e_{rb} + x_{sp}i_{6}) \cdots (14)$$

点弧後

$$e_{fd} = (e_{ra} - x_s p_{i1}) - (e_{rb} + x_s p_{i2}) \cdot \cdots \cdot (15)$$

同様にint 2~int 6についても計算できる。このような方法により整流装置の各アーム電流の値が正確に求まるので、整流器各素子の温度上昇、逆電圧なども容易に計算でき、素子の容量決定および保護装置の設定の根拠となる。

以上の関係式をもとに、電子計算機HITAC 5020Fを使って、サイリスタ自励式発電機の系統事故時の過渡特性のディジタルシミュレーションを行なった。

#### 図 試験機による実測結果と計算との比較

上記のディジタルシミュレーションによる計算結果の妥当性を確認するため、交流模擬送電線につながれた 300kVA 同期発電機を用いて実験を行なった。ここでは 2 線線間および 3 線短絡事故時の界磁電圧、界磁電流および整流器のアーム電流について計算値との比較検討を行なった。

図7は、実験に用いた回路図を示すものである。実験はしゃ断器CB1を投入し2線線間または3線短絡を発生せしめ、このときの現象をオシログラムにより測定記録する。

図8(a)は、この結果の3線短絡時のオシログラムを、また同(b)は同一条件での前述したシミュレーションプログラムによる計算結果をそれぞれ示すものである。また図9(a)および(b)は、2線線間短絡時のそれぞれ実測および計算結果を示すものである。これらの図からわかるように、前述の方法により各アーム電流および励磁器出力電圧などの諸量を正確にシミュレートすることができることが判明した。

#### □ 代表的タービン発電機のシミュレーション

代表的タービン発電機を例にとり、サイリスタ励磁装置およびその保護装置の設計に必要な前述のシミュレーションプログラムを用いて系統事故時における界磁過電圧および界磁過電流の検討を行なった。したがって、ここでは系統事故として通常考えられる事故のうち最も過酷な場合を想定し線路事故はいずれも主昇圧変圧器の系統側高圧端子で発生するものとした。なお表1は、計算に用いた機器および系統の諸定数を示すものである。

界磁回路に逆電流および過電圧が誘起される例として、図10は脱調した場合の界磁電流、界磁電圧を、図11は2線線間短絡故障時における界磁電流および界磁電圧の変化を示すものである。図10および図11は、いずれも弱め励磁運転の場合であるが、強め励磁運転時の故障に対しては界磁電流は負とならず、したがって過電圧は誘起されない。

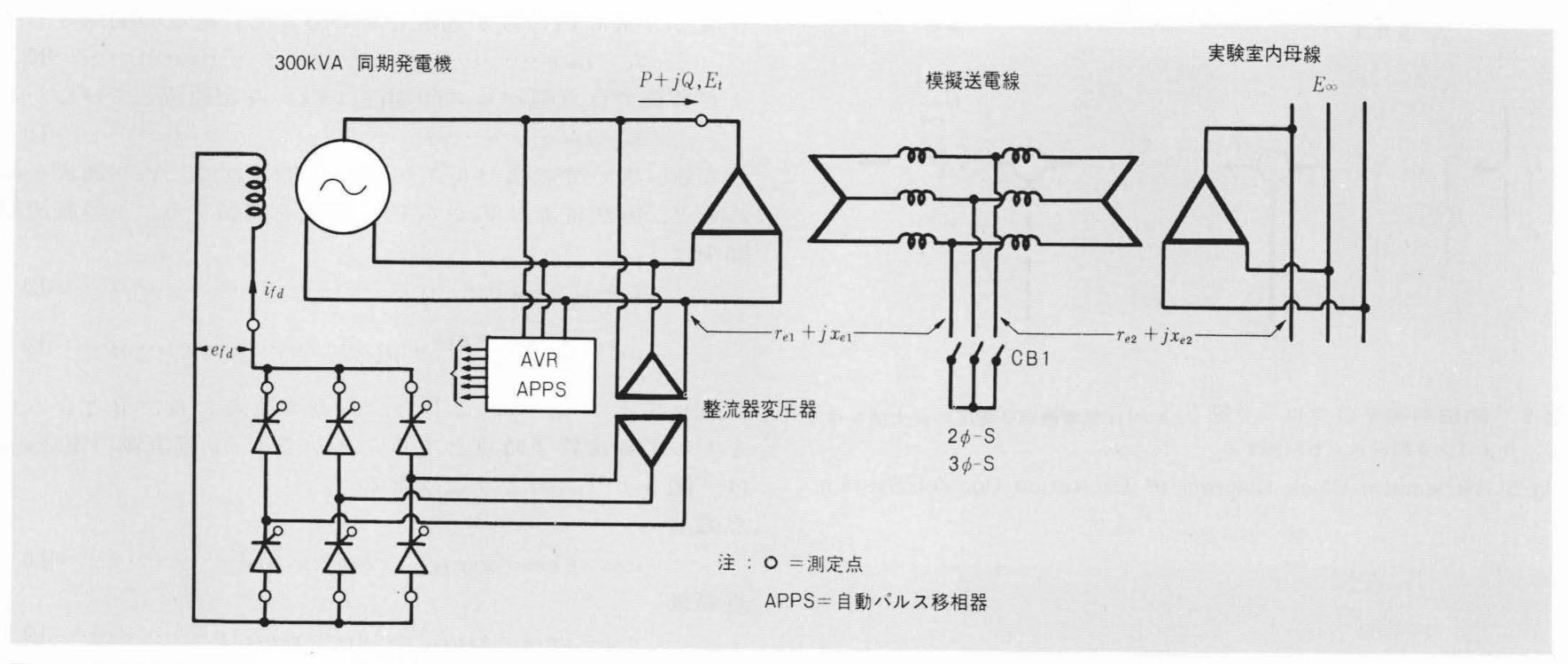


図 7 300kVA機による実験回路図 しゃ断器CBIを投入したときの各測定点(〇印)のオシログラムをとる。

Fig. 7 Schematic Diagram for Test Using a 300kVA Synchronous Machine

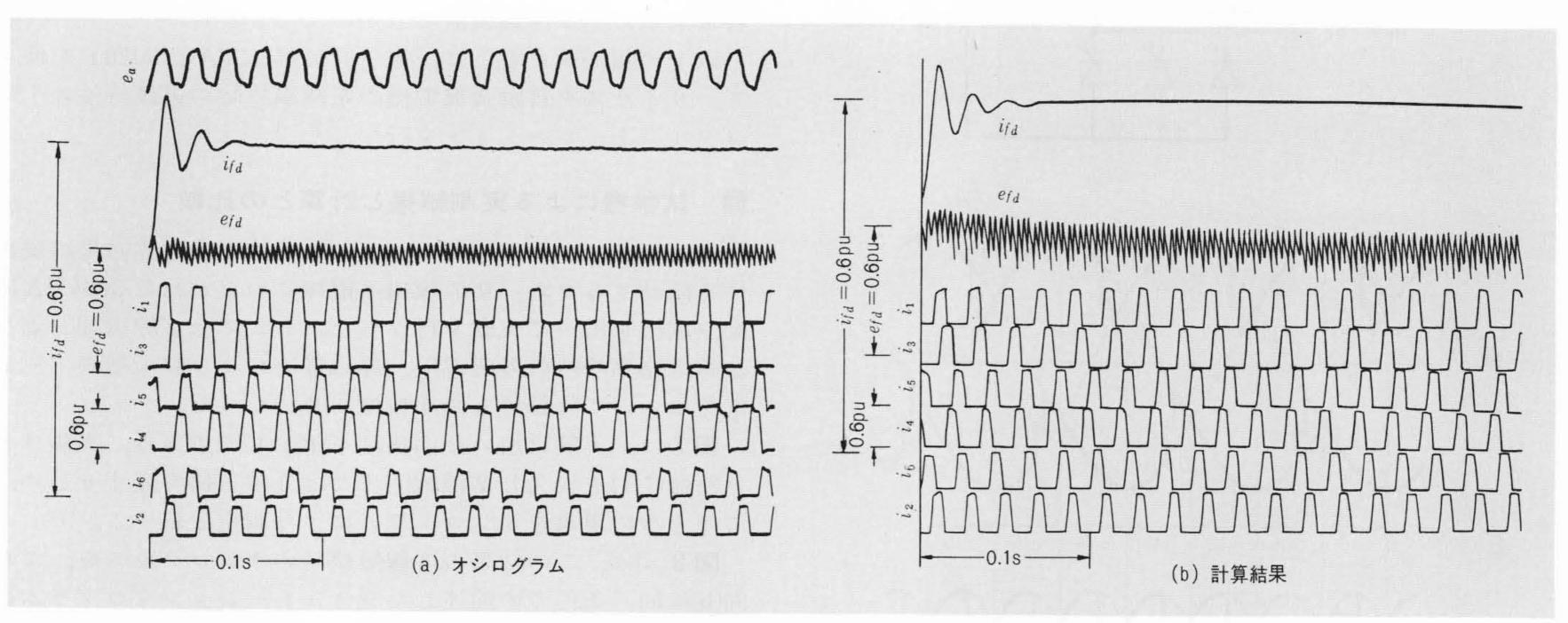


図 8 実験結果と計算結果(3線短絡)(P=0.0, Q=−0.016, Et=0.42, E∞=0.5) 実験結果と計算結果はよく一致している。

Fig. 8 Comparison of Test and Calculation Results under Three-phase Short-circuit Fault

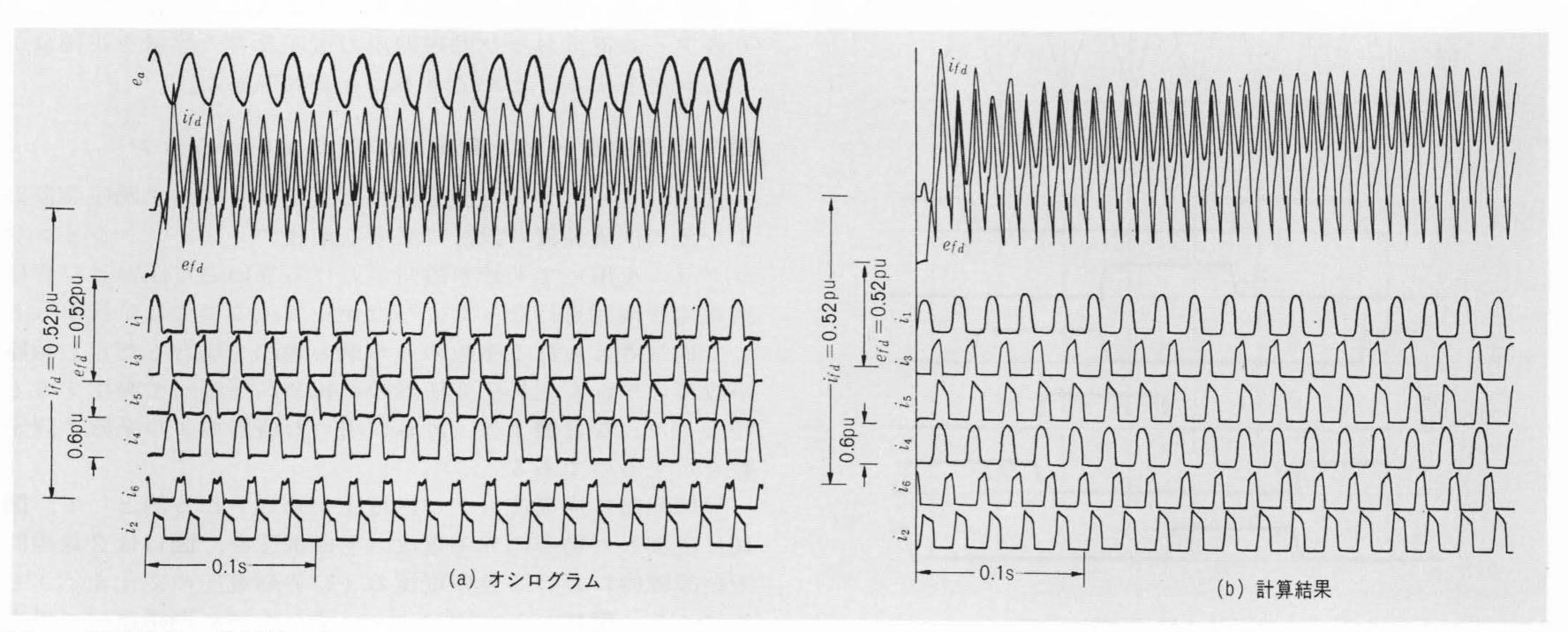


図 9 実験結果と計算結果(2線線間短絡) 不平衡短絡の場合,界磁電流は倍周波で振動する。(P=0.0, Q=0.004, Et=0.52,  $E_{\infty}=0.5$ ) Fig. 9 Comparison of Test and Calculation Results under Line-to-line Short-circuit Fault

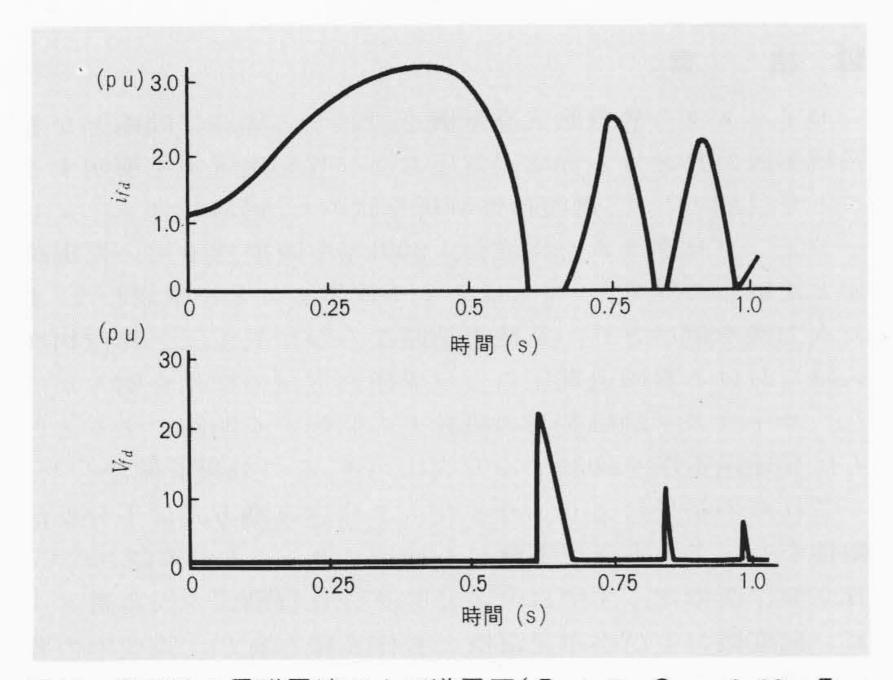


図10 脱調時の界磁電流および逆電圧(P=1.0, Q=-0.28, Et=0.9,  $E_{\infty}=1.0$ ) 界磁電流が負になろうとするとき、大きな界磁逆電圧が発生する。

Fig. 10 Induced Field Current and Voltage on Pull-out

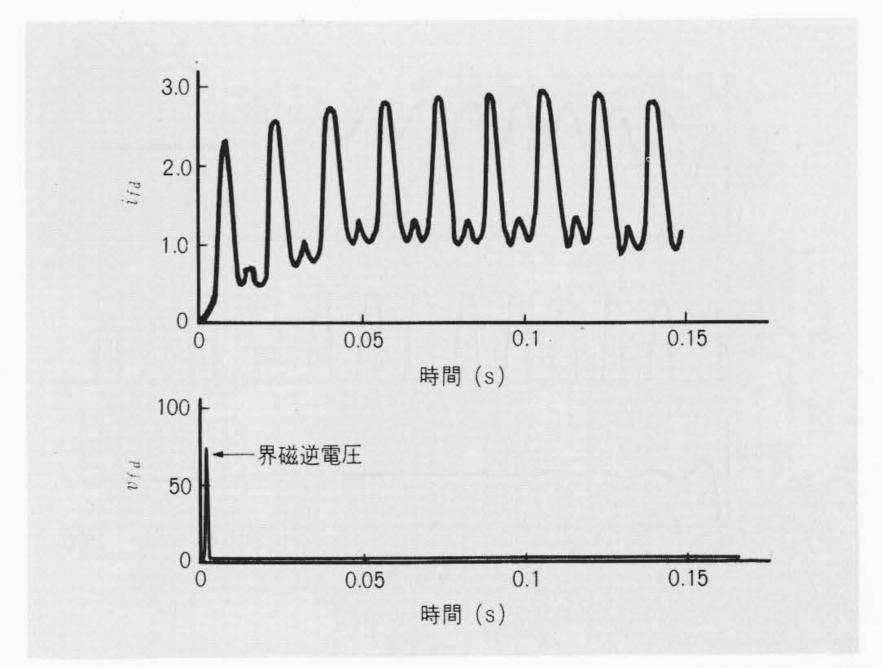
表 | タービン発電機および系統定数 代表的な一例を示したものである。

Table. I Typical Turbine-generator and System Constants

	発	電	機			励 磁	弦 装 置
$X_d$	:	1.	. <b>82</b> p	u	頂上電	庄:	7 . <b>4</b> p u
$\mathbf{X}_{d}$	:	0	. 161	"	AVR	:	$\frac{\mathcal{K}}{1+\mathcal{T}s}$
$\chi_d$ "	:	0	. 121	"	K	:	2,700deg/pu
$X_q$	:	1.	. 82	"	T	- :	0.01s
$\mathbf{X}_{q}$ "	•	0.	121	"	<b>X</b> s	: -	0.16pu
$\mathcal{T}_{d}$	: 0.685s				(励磁容量ベース)		
$\mathcal{T}_d$ "	<b>:</b>	0	.041	"		系	統
$\mathcal{T}_q$ "	1	0	.041	"	X t		0.15pu
Н	:	3	. 45	"	Xe		0.10 "

サイリスタ励磁装置を設計する場合,この逆電圧がどの程度になるかということは重要な項目であり、低いほど望ましいことはいうまでもない。そこでこの逆電圧を抑制する方法の一つとして、図12に示すように、界磁巻線に並列に抵抗を接続することが考えられる。この並列抵抗値を変えることにより図13に示すように誘起電圧も変わる。図13より、界磁巻線抵抗の50倍程度の抵抗値をもつ抵抗を界磁巻線に並列に接続することにより、無負荷界磁電圧の約10倍、励磁器定格電圧の約3倍程度に逆電圧を抑制することができる。この並列抵抗接続による損失の増加および励磁器容量の増加は、全体からすればごくわずかであり、この方法は逆電圧防止のため有効な方法といえる。

界磁に発生する過電流は、上記とは逆に、強め励磁のときのほうが大きい。図14は、強め励磁運転中の3線短絡故障時の界磁電流の変動曲線を示すものである。通常、サイリスタ素子の過電流許容値や、保護用ヒューズの溶断特性は過電流



図II 2線線間短絡時の界磁逆電圧 最初のIサイクル目だけ大きな界磁逆電圧が発生している。(P=0.0, Q=-0.44, Et=0.9,  $E_\infty=1.0$ )

Fig. II Induced Field Current and Voltage under Line-to-line Fault

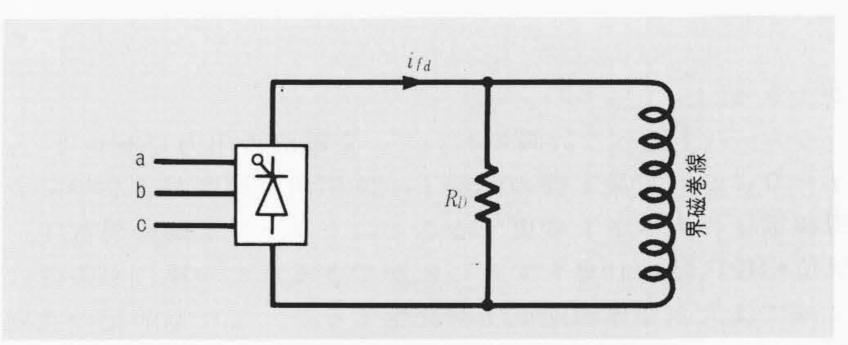


図12 外部並列抵抗 外部並列抵抗を入れて界磁逆電圧の抑制を図る。

Fig. 12 Connection of External Shunt Resistor

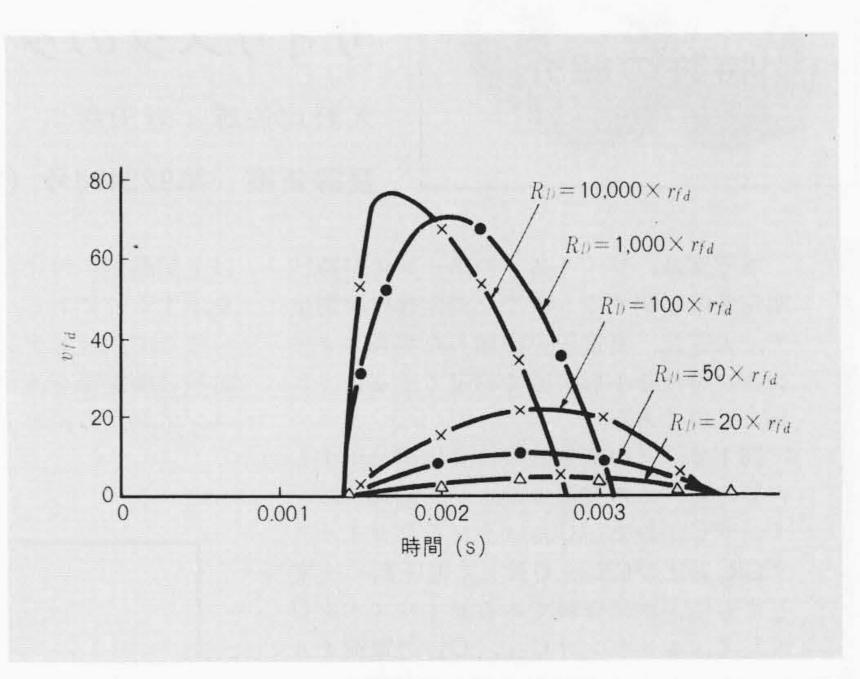


図13 2線線間短絡時の界磁逆電圧に及ぼす外部並列抵抗の効果外部並列抵抗を小さくすると界磁逆電圧は押えられる。(P=0.0, Q=-0.44, Et=10.9,  $E_{\infty}=1.0$ )

Fig. I3 Induced Field Overvoltage with External Shunt Resistor under Line-to-line Fault

が流れ始めてから電流の自乗平均値で示されることが多く、 このような観点から、同図中にアーム電流のrms値も示して ある。

これらの例からもわかるように本シミュレーションプログラムを用いることによりサイリスタ素子の電流容量,逆耐電圧の決定および保護用ヒューズとの協調を適正に行なうこと

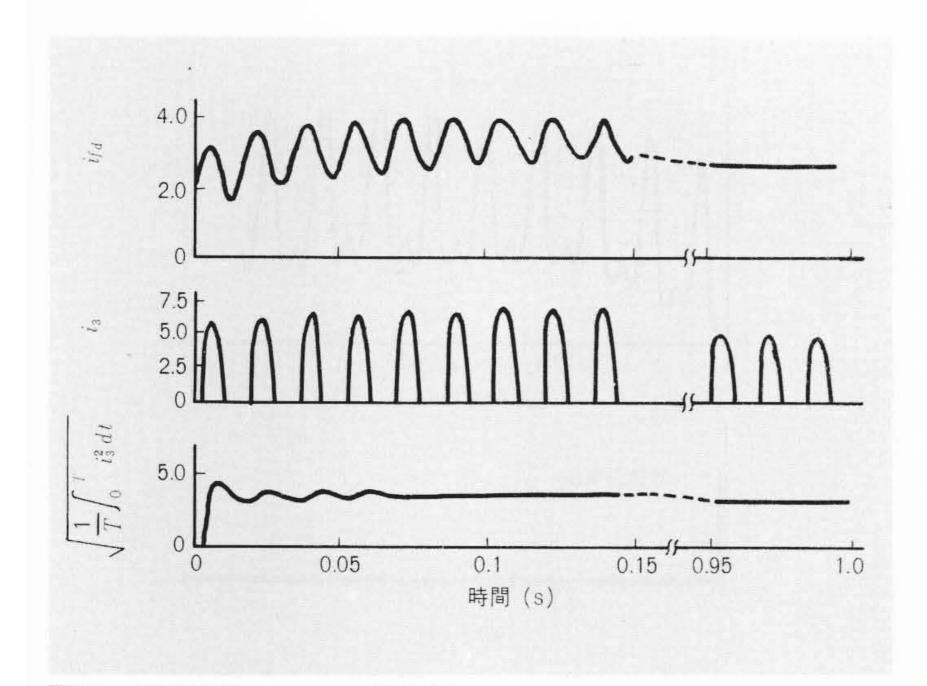


図14 界磁電流とアーム電流(P=1.0, Q=0.42, Et=1.07,  $E_{\infty}=1.0$ )  $i_3$ はちょうど $i_{5d}$ の山の個所で通流するためアーム電流が大きくなる。 Fig. 14 Induced Field Current and Arm Current

ができる。

なお、以上述べた計算において、発電機の出力をゼロとし、t=0において発電機の回転子の位相角、速度および無限大母線電圧の大きさを変更することにより、発電機の異電圧、異位相投入時の計算をすることができる。この場合も条件によっては大きな界磁逆電圧が発生するが、これも前記の並列抵抗接続により抑制することができる。

#### 5 結言

サイリスタ分巻自励式発電機を設計する場合に問題となる 系統事故時における界磁過電圧および界磁過電流を解明する ことを目的として,過渡特性解析を試みた。過渡特性シミュレ ーションプログラムを作成し、300kVA 同期機を用いた実験 値と比較した結果、これらはよく一致することを確認した。ま た火力機を例にとり、系統事故時ならびに異電圧、異位相投 入時における界磁過電圧および界磁過電流の様相を明らかに し、サイリスタ励磁装置の設計上の問題点を明確にするとと もに界磁過電圧を抑制する方式につき、その効果を確認した。

これらの結果により、サイリスタ分巻自励方式は十分な信頼性をもって大容量発電機にも適用できることが確認された。 日立製作所では、すでにサイリスタ分巻自励式の大容量タービン発電機および水車発電機の製作実績を有し、需要家の要求に応じうる体制が整っている。

終わりに臨み,終始ご指導をいただいている国内外の電力 会社各位に対し深く謝意を表わす次第である。

#### 参考文献

- (1) 庄山,川村:「タービン発電機の励磁方式」,日立評論 **51**, 1092 (昭44-12)
- (2) 高橋, 磯野, 奥田:「同期発電機の励磁制御による安定度の 向上」, 電気学会電力技術研究会資料 ET-71-7 (昭46-4)
- (3) 奥田, 高林, 野原:「外部事故による同期機の界磁電流」 日 立評論 50,871 (昭43-10)
- (4) 庄山, 古山:「大容量タービン発電機の運転特性」, 日立評論 54, 330 (昭47-4)



### サイリスタのターンオフ特性測定装置

天野比佐雄・岩田幸二

#### 登録新案 第922498号 (実公昭45-18173号)

本考案は、サイリスタのターンオフ特性 測定装置に関するもので、測定操作が簡単 で、大電流、高電圧を印加した場合のター ンオフ特性を小形装置で測定できるように したものである。

図1は、その測定装置の具体例を示すものである。この装置において、最初にコンデンサ $C_{01}$  および $C_{02}$  はそれぞれサイリスタ $CR_1$  および $CR_2$ をONして電圧 $E_1$ に充電しておく。次に資料であるサイリスタをONして、コンデンサ $C_{01}$ 、 $C_{02}$ の電荷をリアクトル $C_{01}$  および試料を通して放電する。この放電による順電流の通流後試料は逆阻止状態となる。試料が逆阻止後、サイリスタ $CR_1$ をオンして電圧 $E_1$ によってコンデンサ $C_{01}$  を定電流で充電すれば、試料の電圧は逆から順方向に直線的に変化する。

したがって試料の逆電圧期間よりターンオフタイム Toffが測定できる。測定後、サイリスタ $CR_2$ をONしてコンデンサ $C_{02}$ を電圧 $E_1$ に充電し、次の測定に備える。図 2

は上記動作における試料の電流,電圧波形を示すものである。

ここで、コンデンサ $C_{01}+C_{02}$ の容量を 試料に順電流を流すのに十分なものとし、 コンデンサ $C_{01}$ を十分小さくしておけば所 望のdv/dtを得るための充電電流は小さくて済み、また試料の逆回復時間に無関係にターンオフ特性が測定できるので、測定装置が小形簡単化され、測定操作も容易となる。

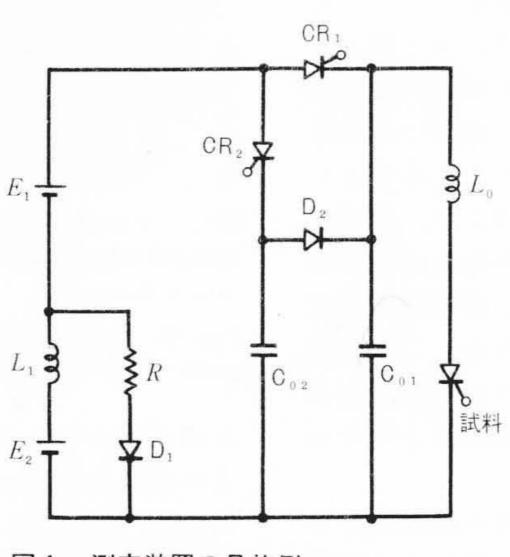


図1 測定装置の具体例

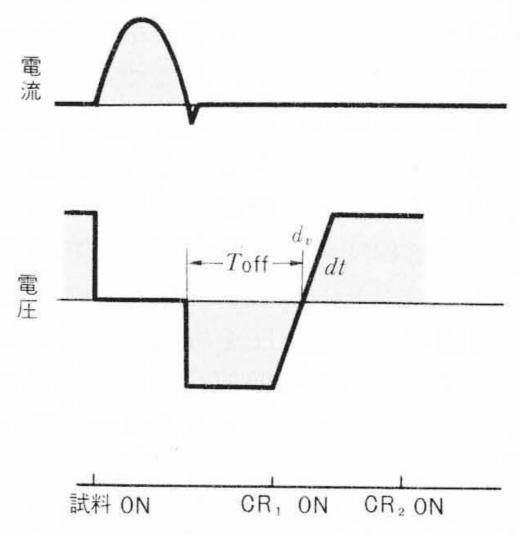


図2 試料の電流,電圧波形