外部事故による同期機の界磁電流

Field Current of Synchronous Machine under External Faults

Kenzô Okuda

健 三* 高 林 乍 人* Hayato Takabayashi

Haruo Nohara

近年半導体整流器の進歩は著しく、同期発電機の励磁にも広く使用されているが、同期機の外部回路で事故 が生じた場合、界磁電流が負になり異常電圧を発生することが懸念される。本稿では1台の同期機が外部リア クタンスを介して無限大系に接続される系において,各種短絡,地絡故障が生じたときの界磁電流計算式を誘 導し実験との比較を行ない, さらに標準的機械定数を有する突極および非突極形同期機について検討した。こ の結果、通常の運転状態では界磁電流が負になる機会はほとんどないことが明らかになった。なお本稿では界 磁電流が負になる要因についても言及した。

1. 緒

最近,半導体整流器は長足の進歩をとげ,各方面に利用されてお り,同期機の励磁装置としても広く使用されるに至っている。とこ ろで、整流器を使用した場合送電線などの外部回路で事故が発生す ると, 電機子反作用により界磁電流が負となることが懸念される。 すなわち界磁電流が負となり、整流器により電流が遮断され、界磁 回路に異常電圧を誘起することが予想される。

本稿では同期発電機の運転条件,機械定数,故障条件などを考慮 し、事故時の界磁電流を求める理論式を導き、ディジタル計算機に よる計算プログラムを作成し、実測値との比較を行ない、次に標準 的な機械定数を用いて各種条件について検討し, 界磁電流が負にな る条件を調査した。

2. 理論的解析

二反作用理論(1)を用いて計算式を誘導する。解析に当たって次の 仮定を設ける。(i) 電機子,回転子回路の抵抗はすべて無視する。 (ii) 同期速度を保つものとする。(iii) 初期過渡突極性は無視する。 なお本稿では単位法を用いる。

電圧に関しては

磁束鎖交数に関しては

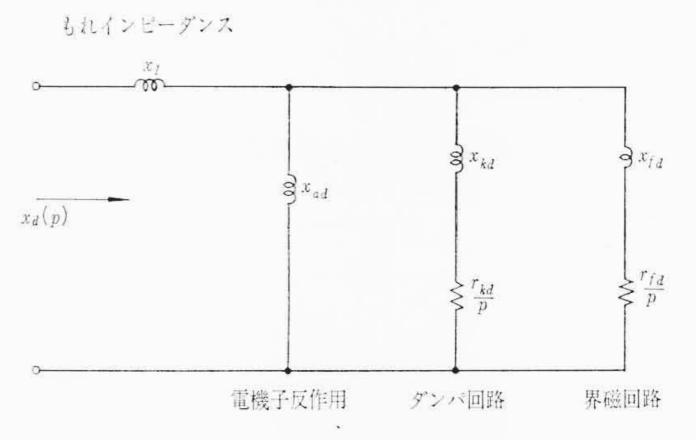
$$\psi_{d} = -x_{d} i_{d} + x_{ad} (i_{fd} + i_{kd})
\psi_{q} = -x_{q} i_{q} + x_{aq} i_{kq}$$

$$\psi_{fd} = x_{ffd} i_{fd} + x_{ad} (-i_{d} + i_{kd})
\psi_{kd} = x_{kkd} i_{kd} + x_{ad} (-i_{d} + i_{fd})
\psi_{kq} = x_{kkq} i_{kq} - x_{aq} i_{q}$$
(4)

 ϕ : 磁束鎖交数 ここに, e: 電 *i*: 電 流 p: d/dtd: 直 q: 横 k: ダンパ f: 界磁卷線

の各回路を示す。

- * 日立製作所日立研究所 工学博士
- ** 日立製作所日立研究所



直軸インピーダンス等価回路

以上の諸式を用いて,系統側の事故に基づく界磁電流の変化分 ifaを求めると次式をうる。

$$i_{fd} = \frac{\left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^{2}}{x_{kkd}}\right) i_{d} + c_{2} - \frac{x_{ad}}{x_{kkd}} \left\{c_{2} + \left(-x_{ffd} + x_{ad}\right) i_{fd0}\right\}}{x_{ffd} - \frac{x_{ad}^{2}}{x_{kkd}}}$$

$$= \frac{\left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^{2}}{x_{kkd}}\right) i_{d} + \frac{1}{x_{kkd}} \left\{x_{kd} c_{2} + x_{fd} \cdot x_{ad} i_{fd0}\right\}}{x_{ffd} - \frac{x_{ad}^{2}}{x_{kkd}}}$$

$$= k_{1} i_{d} + k_{2} \qquad (6)$$

zzc, $c_2=x_{ffd}i_{fd0}-x_{ad}i_{d0}$

を表わし、添字 0 は初期値を示す。 k_1 , k_2 については直軸電流変化 分により影響をうけるものと,初期条件より決定するものとを分離 した。すなわち、

$$k_{1} = \frac{x_{ad} - \frac{x_{ad}^{2}}{x_{kkd}}}{x_{ffd} - \frac{x_{ad}^{2}}{x_{kkd}}}$$

$$k_2 = \frac{x_{kd} \cdot c_2 + x_{fd} \cdot x_{ad} \cdot i_{fd0}}{x_{kkd} x_{ffd} - x_{ad}^2}$$

となる。

図1に直軸インピーダンスの等価回路を示す

(6)式から明らかなように、界磁電流を算出するには電機子電流 の直軸成分を知る必要があり、そのため対称座標法により各相の電 機子電流を求めなければならない。いま1機-無限大系に着目し、 同期機の外部で1線地絡故障が発生した場合を例にとって述べる。

1線地絡を対称座標法により等価回路で表現すると図 2,3 のよう になり、 I_1 , I_2 , I_0 をそれぞれ各対称分回路の故障点における正,逆, 零相分電流とすると次式をうる。

日

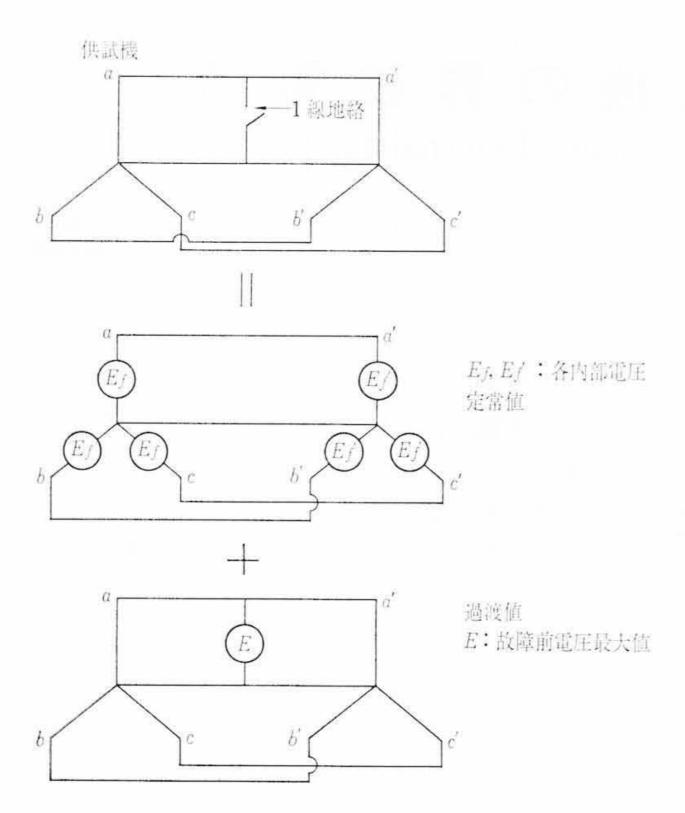
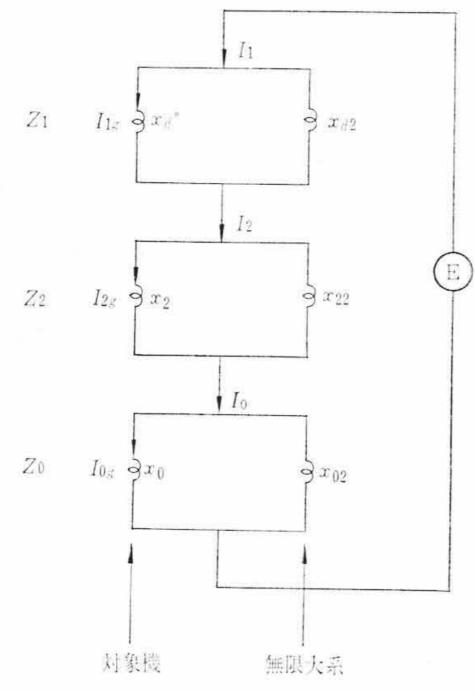


図2 理論式の誘導説明図



$$Z_{1} = \frac{x_{d}^{"} \cdot x_{d2}}{x_{d}^{"} + x_{d2}}$$

$$Z_{2} = \frac{x_{2} \cdot x_{22}}{x_{2} + x_{22}} = Z_{1}$$

$$Z_{0} = \frac{x_{0} \cdot x_{02}}{x_{0} + x_{02}}$$

$$Z_{0} + Z_{1} + Z_{2} = 2Z_{1} + Z_{0} = \frac{2x_{d}^{"} \cdot x_{d2}}{x_{d}^{"} + x_{d2}} + \frac{x_{0} \cdot x_{02}}{x_{0} + x_{02}}$$

$$= \frac{2x_{d}^{"} \cdot x_{d2}(x_{0} + x_{02}) + x_{0}x_{02}(x_{d}^{"} + x_{d2})}{(x_{d}^{"} + x_{d2})(x_{0} + x_{02})}$$

図3 1線地絡等価回路図

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \{ \cos(\theta_0 + t) - \cos(\theta_0) \} \dots (7)$$

 Z_1 , Z_2 , Z_0 を誘導性リアクタンスと考えると電圧が正弦関数に対し電流は余弦関数になる。なお θ_0 は故障発生位相角である。

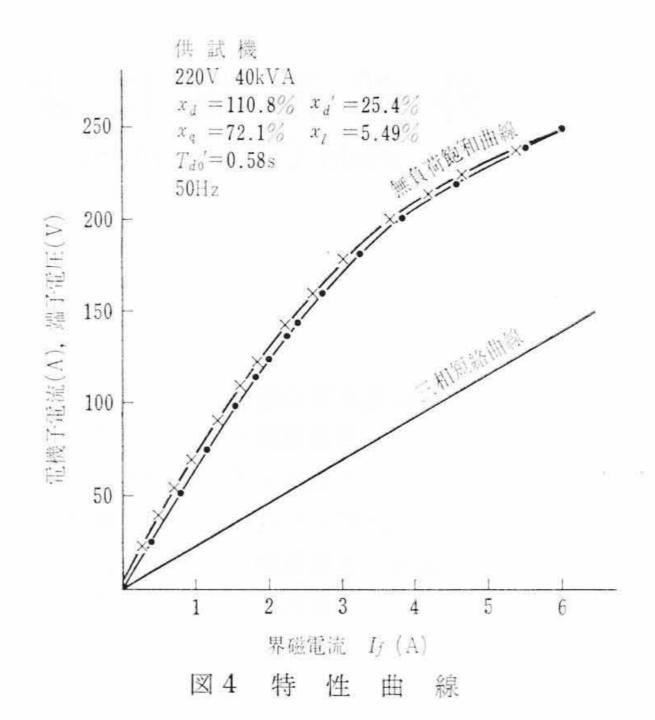
対象発電機の正相,逆相,零相分電流をそれぞれ I_{1g} , I_{2g} , I_{0g} とすると,

$$I_{1g} = I_1 \cdot \frac{x_{d_2}}{x_{d''} + x_{d_2}}$$

$$I_{2g} = I_2 \cdot \frac{x_{22}}{x_2 + x_{22}}$$

$$I_{0g} = I_0 \cdot \frac{x_{02}}{x_0 + x_{02}}$$
....(8)

一般に、初期過渡時に着目すれば $x_d''=x_2$, $x_{d2}=x_{22}$ とおくこと



ができ,

$$I_{1g} = I_{2g} = I_1 \frac{x_{d2}}{x_{d''} + x_{d2}} \dots (9)$$

$$\frac{x_{02}}{x_0 + x_{02}} = \frac{x_{d2}}{x_d'' + x_{d2}} \gamma$$

とすれば

$$\gamma = \frac{\frac{x_{02}}{x_0 + x_{02}}}{\frac{x_{d2}}{x_{d''} + x_{d2}}} \dots (10)$$

となり, a 相発電機電流 iag は

$$i_{ag} = I_{1g} + I_{2g} + I_{0g} = \frac{x_{d2}}{x_{d''} + x_{d2}} (2 + \gamma) \cdot I_1 \dots (11)$$

同様に ibg, icg は

$$i_{bg} = a^2 I_{1g} + a I_{2g} + I_{0g} = \frac{x_{d2}}{x_{d''} + x_{d2}} (-1 + \gamma) \cdot I_1 = I_{cg} \dots (12)$$

となる。

これらより直軸電流を求めると

$$i_{d} = \frac{2}{3} \left[i_{ag} \cos \theta + i_{bg} \cos (\theta - 120^{\circ}) + i_{eg} \cos (\theta + 120^{\circ}) \right]$$

$$= \frac{2}{3} \left[\frac{x_{d2}}{x_{d''} + x_{d2}} (2 + \gamma) \cos \theta + \frac{x_{d2}}{x_{d''} + x_{d2}} (-1 + \gamma) \left\{ \cos (\theta - 120^{\circ}) + \cos (\theta + 120^{\circ}) \right\} \right] I_{1}$$

$$= \frac{2 \cdot E}{A} \left\{ \cos (\theta_{0} + t) - \cos \theta_{0} \right\} \cos (\theta_{0} + t) \qquad (13)$$

ここで、

(13)式を(6)式に代入すれば界磁電流の変化分が求められ、これに事故前の定常分を加算して界磁電流がえられる。

同様に他の故障についても i_a に関する式を求め、(6)式に代入すればよい。

3. 実験ならびに結果の検討

3.1 実 験 条 件

図4は実験に用いた同期発電機の特性を示したものである。実験に際しては対象機の電機子電流を制限するため 0.81 p.u のリアクトルを接続し、その外部を等価発電機端子とみなし、その点にて 1 線地絡、 2 線短絡および 3 線短絡の故障を発生せしめた。なお供試機

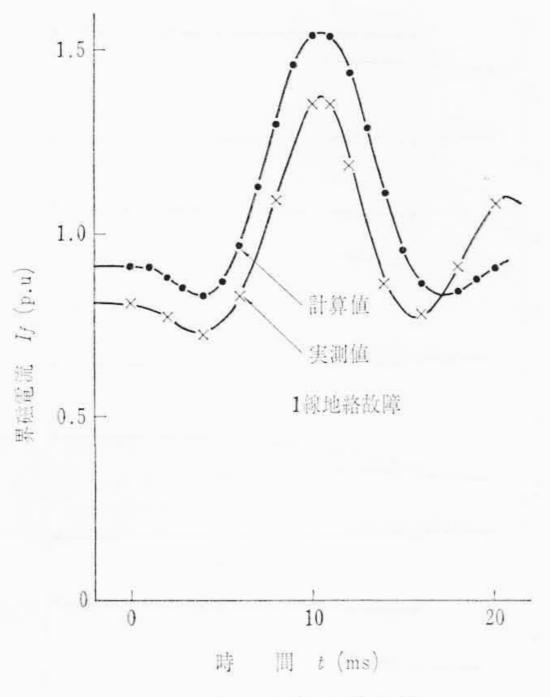


図 5 界磁電流変動曲線

は単独運転とする。

3.2 1 線地絡故障

図 5 は 1 線地絡故障の場合の結果を記したものであり,実測と計算の初期値との間に差が現われているのは,計算式では飽和を無視していることに起因するもので,これが故障後の値の違いにも影響を及ぼしている。数値的検討を行なってみると,初期値で計算値と実測値との間には,0.91/0.81=1.123,すなわち 12% の差を生じており,故障時の最大値では 1.543/1.37=1.128 となる。いま初期状態の界磁電流の差 0.91-0.81 を補正すると計算値は 1.54-0.1=1.44 となり,計算値のほうが 5% 大きめの結果となっている。また実測値は各部の抵抗のため減衰がみとめられる。

3.3 2 線短絡故障

図 6 は b c 相 2 線短絡故障時の結果であり、これでは計算値と実験値との相違は、初期条件では 0.91/0.85=1.07 であるのに比べ、最大値では 2.04/2.3=0.89 となり計算結果のほうが大幅に小さな値を示している。これは過大電流域における飽和のほか、図 3 に示すように同期機リアクタンスとして x_a "のみを考慮し、初期過渡突極性 $(x_q$ " $\pm x_d$ ")に起因する高調波の影響を計算では無視したことが主因である。 実験機ではダンパ巻線がないため x_q " $=x_q$ $\pm 0.72+0.81$ 、 x_d " $=x_d$ $\pm 0.25+0.81$ であり、高調波の影響を推定すると約 10% である (0)。なお完全ダンパ巻線を備えた機械や非突極機の場合は x_d " $\pm x_q$ " であるから高調波の影響は少なくなる。

3.4 3 線短絡故障

図7は3線短絡故障の結果であり、初期値はこの場合も計算結果のほうが大きく、故障中の最大値は実験値のほうが大きくなっている。これらの違いのうち初期値は前述したように飽和を無視したことに起因する。最大値において実験値が計算値を上まわっているのは、実験では飽和により電機子電流が増大し、この影響により界磁電流も増加したもので、このインピーダンスの低下は計算では表現されていない。次にこれを量的に追求すると、初期値における計算値と実験値の比では0.91/0.85=1.07であり、最大値では2.29/2.36=0.972となっている。

4. 典型的な定数を有する機械による検討

突極機,非突極機について標準的な定数を有する機械を例にとって⁽²⁾,各種事故時の界磁電流を検討する。故障種類は前述の3種のほか2線地絡も考慮する。取り扱う系統としては,発電機が△-Y結線の昇圧変圧器を介し送電線に接続され,Y-△結線の変圧器を

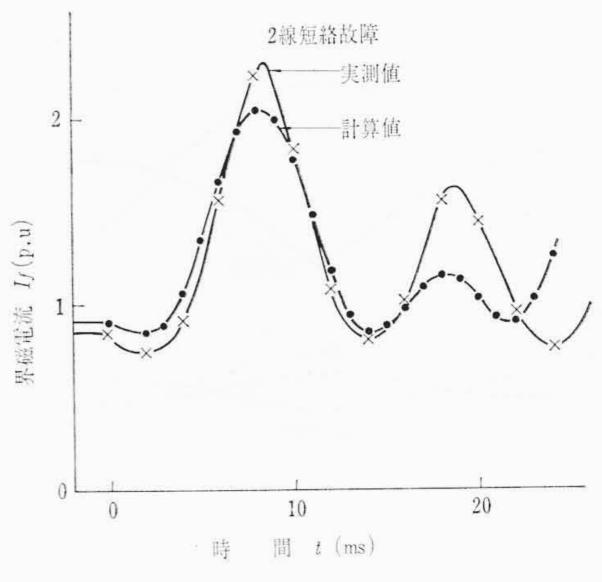


図6 界磁電流変動曲線

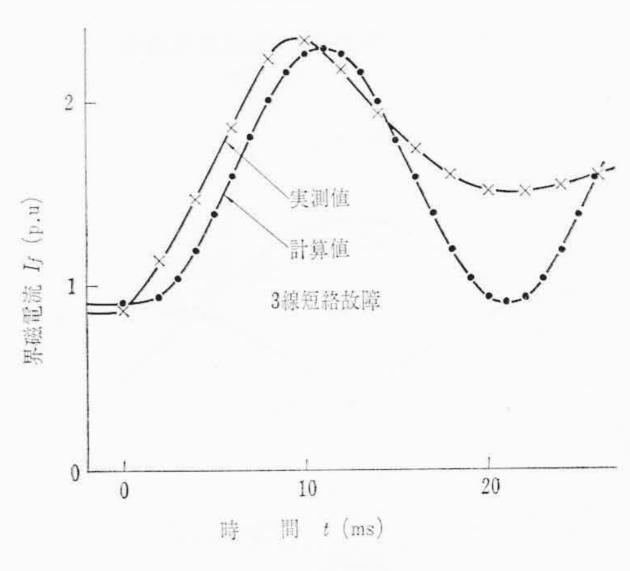


図7 界磁電流変動曲線

通し無限大系母線に並列している場合を想定する。故障は昇圧変圧器の発電機側で生じ、外部リアクタンス $x_e=0.2$ 、系統側零相リアクタンスを無限大とする。

発電機定数

突極 機..... x_d =1.0, x_q =0.652, x_d '=0.321, x_d "=0.209, x_0 =0.087

非突極機...... $x_d=x_q=1.54$, $x_d'=0.27$, $x_d''=0.23$, $x_0=0.18$ 図 8, 9 は発電機の運転条件を無負荷および定格負荷 (P+jQ=0.8+j0.6) とし、1 線地絡、2 線短絡故障時の界磁電流の最大、最小値と短絡位相角の関係を記したものである。1 線地絡、2 線短絡とも短絡位相角の2 倍の周期で変化しており、これは(13)式などから明らかである。両図を比較すると $I_{f. \max}$, $I_{f. \min}$ の曲線の形状には変化がなく、ぼほ定常値が加算された値となる。これらのうち $I_{f. \max}$ 変化幅および $I_{f. \min}$ の変化幅とも2 線短絡のほうが大きく、いずれの故障でも最大値および最小値の生ずる故障発生位相角は等しく、1 線地絡では $\theta_0=0^\circ$, 2 線短絡では $\theta_0=90^\circ$ である。

図 10 は 1 線地絡時における界磁電流の変化状況を記したものであり、短絡位相角 θ_0 =0°、90° の場合につき検討を行なった。 θ_0 =0°では前図のごとく $I_{f\text{-max}}$ が最も大きくなるのに比べ、 θ_0 =90° では最大値が 1 サイクル内に 2 回生じ、この値は θ_0 =0° の場合よりはるかに小さい。次にダンパ巻線効果の影響を調べると、ダンパ巻線効果がないときは、過渡リアクタンスと初期過渡リアクタンスは等しい値となる。ダンパ巻線効果を有する場合は、電機子電流のじょう乱がダンパ巻線に吸収されるため、界磁電流の変化量は著しく低減される。

図11は発電機の運転状態を無負荷とし、界磁電流の最大、最小値と直軸同期リアクタンスとの関係を示したものであり、同期リアク

昭和43年10月

評

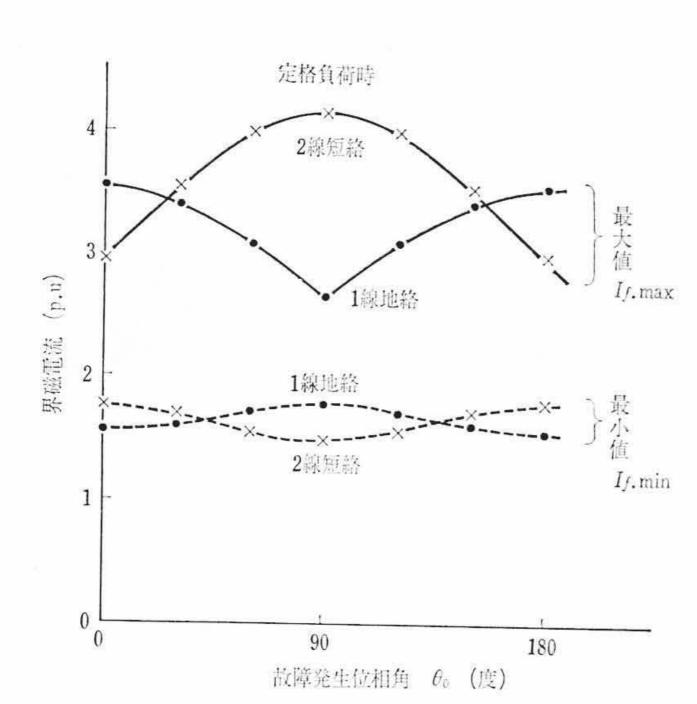


図8 界磁電流対故障位相角曲線

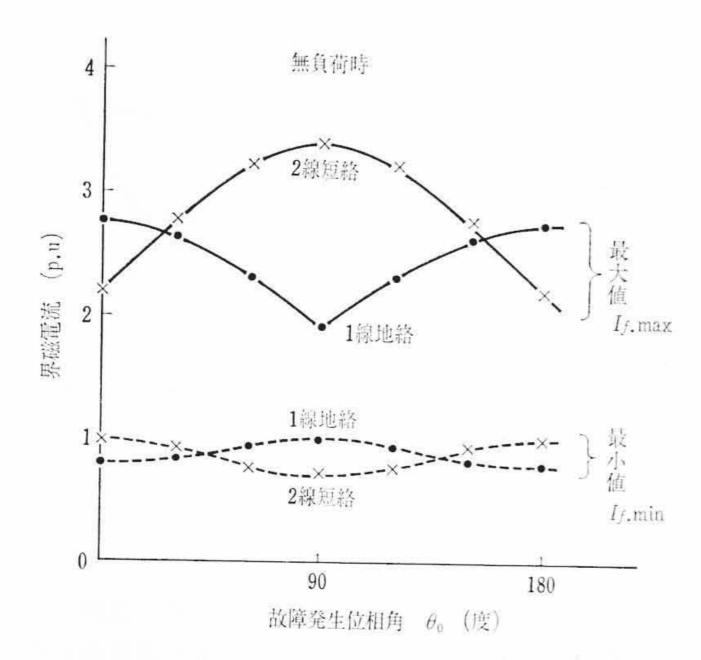


図 9 界磁電流対故障位相角曲線

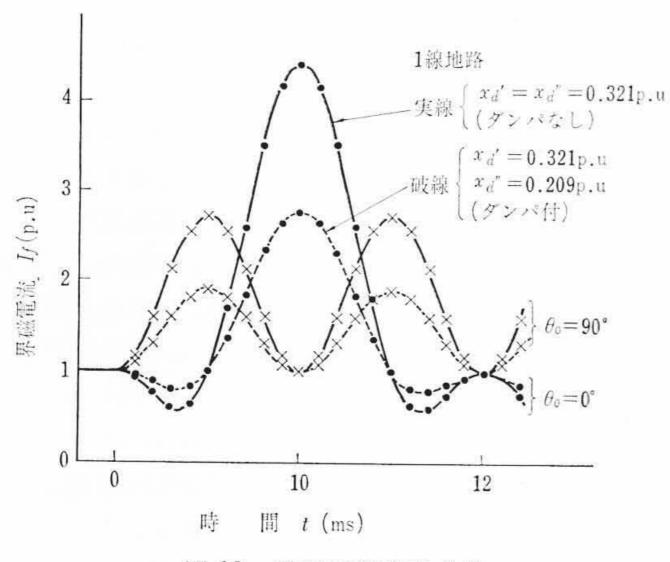


図 10 界磁電流変動曲線

タンスの変化は突極機の場合には、 $1.0 \, \mathrm{p.} \, \mathrm{u} \, \mathrm{veh}$ 心に $\pm 25\%$ 、非突極機の場合には、 $1.54 \, \mathrm{p.} \, \mathrm{u}$ のほか 1.0, $2.0 \, \mathrm{o}$ 例につき計算を行なった。なおほかの各種リアクタンスは一定とした。最小値 $I_{f.\,\mathrm{min}}$ はこれらの故障中 2 線短絡の場合が最も小さな値を示しているが、負にはならない。また同期リアクタンスの変化に対して $I_{f.\,\mathrm{min}}$ はほぼ一定である。最大値 $I_{f.\,\mathrm{max}}$ については非突極機の場合は、同期リアクタンスの増加に対してほとんど変化しないのに比べ、突極機では $I_{f.\,\mathrm{max}}$ は漸増の傾向が認められる。

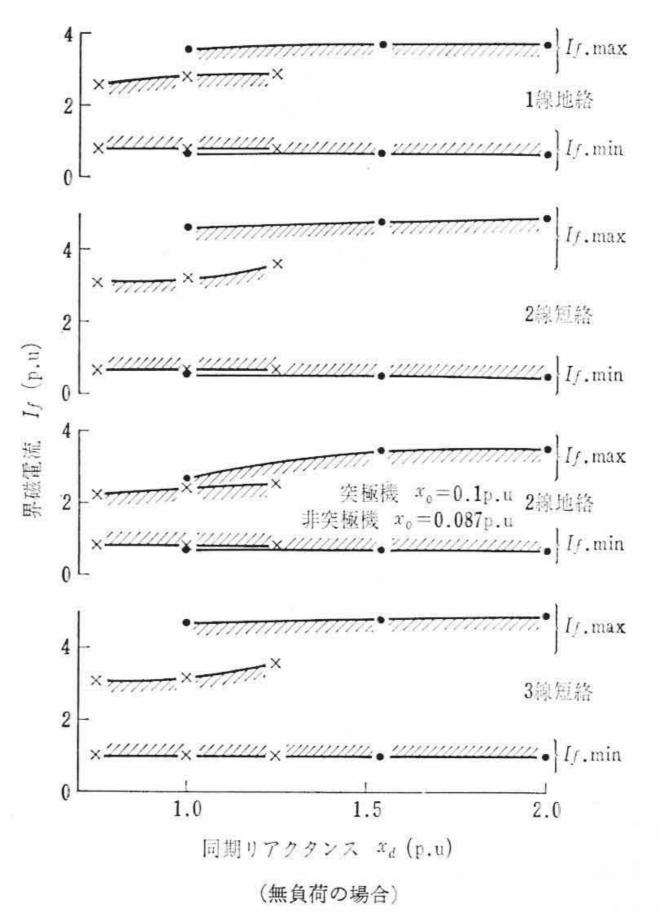


図 11 同期リアクタンス対界磁電流曲線

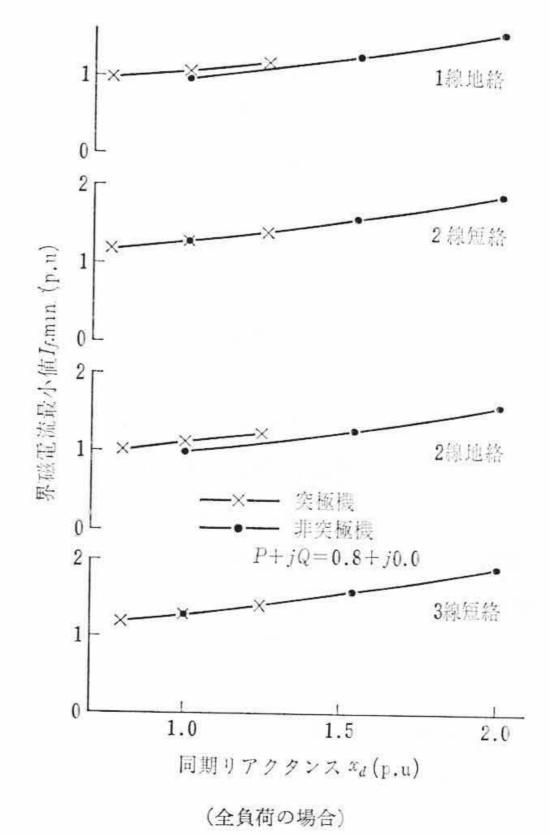


図 12 同期リアクタンス対界磁電流曲線

図 12 は発電機が全負荷運転 (P+jQ=0.8+j0) の場合の $I_{f\text{-min}}$ を示したものである。この場合は突極、非突極機いずれも同期リアクタンスの減少につれて最小値は減少する。このように発電機が無負荷および全負荷運転の状態を比較すると、定常時の界磁電流の小さい無負荷時のほうが $I_{f\text{-min}}$ の値は小さくなるが、負となることはない。

図 13, 14 は発電機有効電力 P=0 とし、進相無効電力 Qに対する最小界磁電流 $I_{f.min}$ の変化状況を記したものであり、同期リアクタンスには前述の値を用いる。 $x_d=1.0$ p.u 以上のものの無効電力については,定常状態で発電機励磁 がゼロとなる点、すなわち $1/x_a$ まで、 $x_d=1.0$ p.u 以下のものの無効電力については 1.0 p.u まで検討することとする。図 13, 14 はそれぞれ突極、非突極機の結果であり、いずれの故障においても進相無効電力の増大に伴い最小界磁電流は

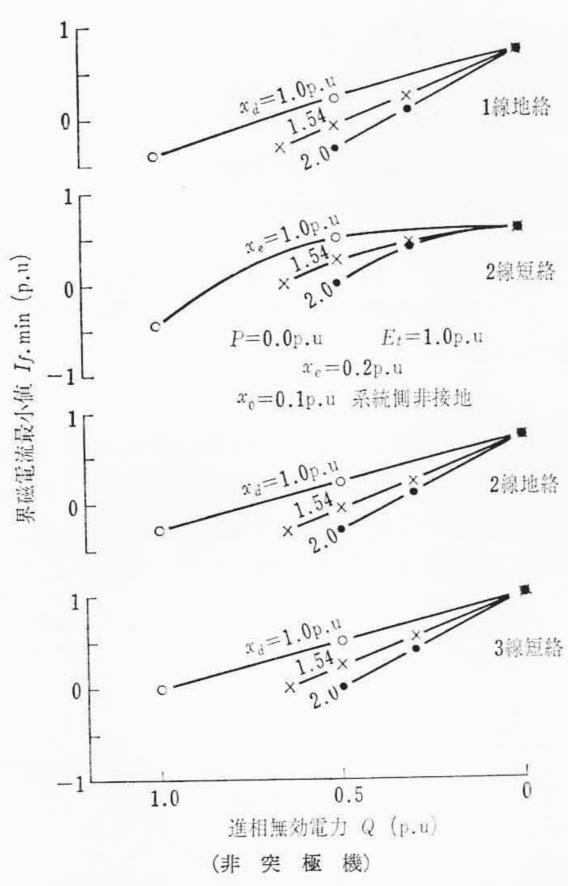


図 13 発電機出力対界磁電流曲線

減少しており、2線短絡故障以外は直線的に低下し、2線短絡故障時には進相無効電力の増大に伴い最小値の変化の割合は増大している。これらの結果では同一故障、同一運転条件においては短絡比が小さいほど界磁電流は小さくなっており、たとえば図 13 において $x_d=1.54$ 、2線地絡の場合 Q>0.46 で $I_{f.min}$ は負となる。また、同一運転条件について突極機と非突極機とを比べると後者のほうが $I_{f.min}$ は負になりやすい傾向がみとめられる。

次に故障が発電機の昇圧変圧器を経た送電線側で生じた場合につき検討を行なう。発電機は突極機 $(x_d=1)$ を仮定し、変圧器インピーダンス 10% とし、発電機側零相回路は昇圧変圧器で開路されており、発電機運転条件は P+jQ=0.0ーj0.5 (進相)とする。この場合の結果は 1 線地絡故障で $I_{f.min}$ は 0.292 p. u, 2 線短絡故障で 0.450 p. u となり、図 14 と比較すると $I_{f.min}$ に関しては変圧器の発電機側事故のほうが若干過酷になる。

5. 結 言

発電機が系統と並列運転中,外部回路で1線地絡,2線短絡,2 線地絡,3線短絡などの故障が生じた場合の界磁電流の様相を調べ

38

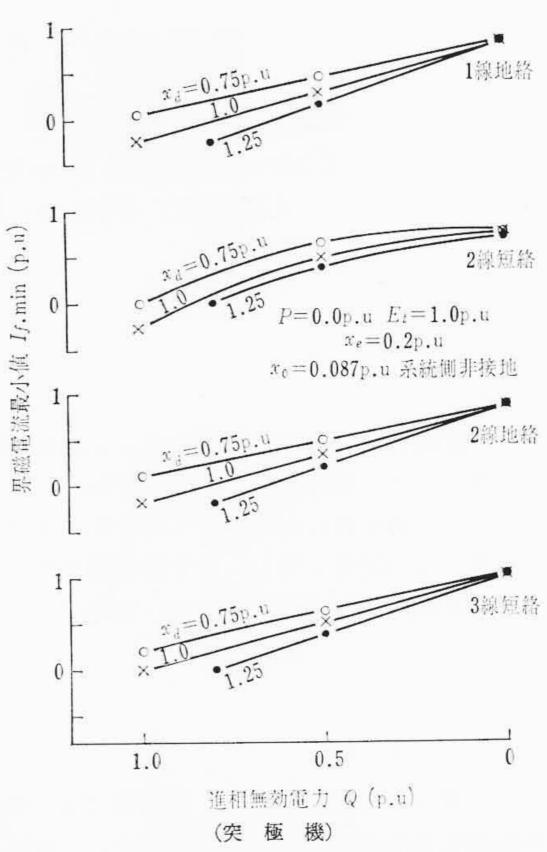


図 14 発電機出力対界磁電流曲線

るために理論式を誘導し実測ならびに数値解析を行ない,次の諸点 を明らかにすることができた**。**

- (1) 同期発電機が無負荷から全負荷運転の範囲では、界磁電流が負になることはなく、調相機運転のときにのみその可能性が存在し、進相無効電力が定格 kVA の約70~80%程度以上になったときに界磁電流の最小はゼロに達する。したがって、同期調相機または調相機運転を行なうような発電機において、整流器を使用する場合には、機械定数の選定に注意が必要であろう。
- (2) 故障条件については、3線短絡時には界磁電流は負になることはなく、他の不平衡故障時に負になる場合がある。
- (3) 短絡比の低下に伴い,界磁電流の最小値は負領域に接近する。ここで検討した範囲では,非突極機のほうが,突極機に比べ若干負領域にはいりやすい傾向が見受けられる。

終わりに臨み、平素ご指導を賜わっている日立製作所日立工場西 部長、北野副部長に深甚の謝意を表する。

参考文献

- (1) C. Concordia: Synchronous Machines: John Wiley (1951)
- (2) 電気学会編: 電気工学ハンドブック (昭 42)