単相突発短絡試験による界磁相互漏れリアクタンスの推定とその影響

正員 平松 大典*
 正員 平山開一郎*
 正員 徳増 正*
 非会員 佐藤 利幸***

正員 小柳 薫**
 正員 上村 洋市*
 正員 高畠 幹生*
 正員 荒 隆裕****

Estimation of Field Mutual Leakage Reactance by Line-to-Line Sudden Short Circuit Test and Effect of Reactance

Daisuke Hiramatsu*, Member, Kaoru Koyanagi**, Member, Kaiichirou Hirayama*, Member,
 Yoichi Uemura*, Member, Tadashi Tokumasu*, Member, Mikio Takabatake*, Member,
 Toshiyuki Satoh***, Non-member, Takahiro Ara****, Member

This paper describes the effect of mutual leakage reactance in rotor circuit (Canay reactance) on analysis of medium capacity generator transient and dynamic behavior. The authors proposed the decision method of field mutual leakage reactance, and analyzed sudden short circuit and voltage dip on sudden load application by simulations using the electromagnetic transients program (ATP-EMTP) and compared the results with the experimental data.

キーワード：発電機，単相突発短絡，負荷投入，界磁相互漏れリアクタンス，EMTP
Keywords: generator, line-to-line sudden short circuit, sudden application of a load, field mutual leakage reactance, EMTP

1. まえがき

従来から同期機の等価回路モデルとして図 1 に示した Park モデル (a) を用いて過渡現象を解析することが一般的である⁽¹⁾。すなわち d 軸に対して，3 個の巻線（電機子巻線・界磁巻線・制動巻線）全てに鎖交する主磁束と各巻線の漏れ磁束をベースにしていた。

これに対し，三相突発短絡時の界磁電流特性について Park モデル (a) による解析値と実測値とに差が有ることが報告されている。この現象について，界磁巻線・制動巻線のみを取り囲む磁束に対応する界磁相互漏れリアクタンス（ x_c ：Canay リアクタンスとも呼ばれている）を考慮した等価回路モデル（図 2）が提案されている^{(2)~(4)}。筆者等は負荷遮断時の過渡特性等を中心に，従来モデルとの違いについての検討を行ってきた^{(5) (6)}。

界磁相互漏れリアクタンスは三相突発短絡時の界磁電流波形から求める方法が一般的で有る。この方法は大容量機では比較的容易であるが，中小容量機では電機子時定数が小さく過渡直流分の減衰が速いので測定が難しい面がある。

図 1 Park モデル (a)
 Fig. 1. Park model (a).

*(株) 東芝 京浜事業所
 （筆頭者）〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4
 Toshiba Corporation
 2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045
 ** (株) テプコシステムズ
 〒105-0004 東京都港区新橋 6-19-15
 Tepco Systems Corporation
 6-19-15, Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0004
 *** 北芝電機（株）
 〒960-1292 福島市松川町字天王原 9
 Kitashiba Electric Corporation
 9, Matsukawa-cho, Aza Tennoubara, Fukushima 960-1292
 **** 雇用 能力開発機構 職業能力開発総合大学校
 〒229-1196 相模原市橋本台 4-1-1
 Employment and Human Resources Development
 Organization of Japan, Polytechnic University
 4-1-1, Hashimotodai, Sagami-hara 229-1196

図 2 界磁相互漏れリアクタンスを考慮したモデル

Fig. 2. Considered field mutual leakage reactance model.

そこで今回、筆者等は、界磁相互漏れリアクタンスの推定方法として単相突発短絡試験を利用する方法を提案するとともに、中小容量発電機システムの応答性評価に採用される負荷投入特性に対する界磁相互漏れリアクタンスの影響について検討したので報告する。

2. 三相突発短絡時の界磁電流について

2.1 解析モデルと基本式 今回の解析で採用した同期機モデルの界磁部分を図 3 に示す。ここで①大容量発電機モデルとして 48P-15750kVA-11000V-50Hz②中容量発電機モデルとして 6P-400kVA-3300V-50Hz（いずれも突極機）を使用した。発電機は無限大母線に接続されている系統モデル、線路のインピーダンスは、ほぼゼロ ($10^{-6} \Omega$) とした。励磁方式はブラシレス交流励磁方式である。なお 48P-15750kVA のリアクタンス・時定数を付録に示した。

2.2 三相突発短絡時の界磁特性と従来モデル 図 4 に 48P-15750kVA 突極形発電機の三相突発短絡時の界磁特性実測波形を示す。

三相突発短絡時の界磁電流は (1) 式で与えられる⁽²⁾⁽⁷⁾。

$$i_{f3phase} = i_{fo} + i_{fo} \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \times \left\{ e^{-t/T'_d} - \left(1 - \frac{T_{kd}}{T'_d} \right) e^{-t/T''_d} - \frac{T_{kd}}{T''_d} e^{-t/T_a} \cos 2\pi ft \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで i_{fo} : 短絡前界磁電流, $T_{kd} = x_{kd}/2\pi f R_{kd}$: d 軸ダンパー回路時定数, 他は 2 軸理論の一般的なリアクタンス・時定数である。

図 4 の三相突発短絡試験の電機子電流波形から得られたリアクタンス・時定数 $x_d, x'_d, x''_d, T'_d, T''_d$ を用いて Park モデル (a) によりシミュレーションした界磁電流波形を図 5 に示す。実測値と (1) 式の計算値とは差がある。簡易的な (1) 式のみならず、連続系シミュレーション言語による解析, EMTP (ATP) による解析結果も同様な差が見られた。

2.3 界磁相互漏れリアクタンスの推定 以上、従来は電機子端子から見た特性をベースに Park モデル (a) の各リアクタンス・時定数を算定しているため、界磁電流特性の実測値と差を生じていると考えられる。そこで、三相突発短絡時の電機子端子から見た特性とともに、界磁電流特性をもとに界磁相互漏れリアクタンスを算出し、それを考慮した Park モデル (b) (図 2) の適用を考える。

図 3 解析モデル

Fig. 3. Analysis model.

図 4 48P-15750kVA 三相突発短絡時の界磁特性
Fig. 4. Field characteristics of 3-phase sudden short circuit 48P-15750kVA.

図 5 三相突発短絡（無負荷時）界磁電流

Fig. 5. Field current during three-phase sudden short circuit at no load.

界磁相互漏れリアクタンス x_c を考慮した Park モデル (b) (図 2) において三相突発短絡から得られる定数 $x_d, x'_d, x''_d, T'_d, T''_d$ と各リアクタンスの関係は次のようになる。

$$x_d = x_l + x_{ad} \dots \dots \dots (2)$$

$$x'_d = x_l + \frac{x_{ad}(x_{fd} + x_c)}{x_{ad} + x_{fd} + x_c} \dots \dots \dots (3)$$

$$x''_d = x_l + \frac{x_{ad}x_{fd}x_c + x_{ad}x_cx_{kd} + x_{ad}x_{fd}x_{kd}}{x_{ad}x_{fd} + x_{ad}x_{kd} + x_{fd}x_{kd} + x_cx_{kd} + x_cx_{fd}} \dots \dots \dots (4)$$

$$T'_d = \frac{1}{\omega R_{fd}} \left(x_{fd} + x_c + \frac{x_{ad}x_l}{x_{ad} + x_l} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$T''_d = \frac{1}{\omega R_{kd}} \times \left(x_{kd} + \frac{x_{ad}x_cx_{fd} + x_{ad}x_{fd}x_l + x_cx_{fd}x_l}{x_{ad}x_{fd} + x_{fd}x_l + x_cx_{ad} + x_cx_l + x_{ad}x_l} \right) \dots \dots \dots (6)$$

従来の Park モデル (a) では $x_c = 0$ であり、変数が 1 つ

 図 6 三相突発短絡時界磁電流解析値 (x_c 考慮)

Fig. 6. Field current during three-phase sudden short circuit at no load (considering x_c).

減ることから各リアクタンス成分を求めることができる[†]。しかし界磁相互漏れリアクタンス x_c を考慮すると、各リアクタンス成分の決定にはさらに条件が必要である。

2.4 三相突発短絡試験による界磁相互漏れリアクタンスの推定 界磁相互漏れリアクタンス x_c 推定にあたり、三相突発短絡時の界磁電流特性を使用する方法が一般的である⁽²⁾⁽³⁾。三相突発短絡時の界磁電流 (1) 式の直流分を (7) 式に記す。

$$i_{f3phaseDC} = i_{fo} + i_{fo} \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \left\{ e^{-t/T'_d} - \left(1 - \frac{T_{kd}}{T''_d} \right) e^{-t/T''_d} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ここで界磁電流実測波形に包絡線を描く事により短絡瞬時の直流分 i_{f3DC0} を求める事ができる。短絡前の界磁電流を i_{f30} とすると次の関係式が成立する⁽⁸⁾。

$$i_{f3DC0} = i_{f30} + K_3 i_{f30} \dots \dots \dots (8)$$

$$K_3 = \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \frac{T_{kd}}{T''_d} \dots \dots \dots (9)$$

$$T_{kd} = \frac{x_{kd}}{2\pi f R_{kd}} \dots \dots \dots (10)$$

(8), (9) 式から T_{kd} を求め、(2) ~ (6) 式と (10) 式を連立させて解く事により図 2 の各リアクタンス成分を求める事ができる。以上の手順により、モデル機の場合、界磁漏れリアクタンス $x_c (= -0.112)$ を算出した。この x_c を用いてシミュレーションを行った結果を図 6 に示す。結果は実測とよく一致している。

3. 単相突発短絡試験による界磁相互漏れリアクタンスの推定

3.1 中容量発電機の三相突発短絡時の界磁電流特性 中容量発電機モデル 6P-400kVA の三相突発短絡時の界磁電流実測値を図 7 に示す。

図 7 の様に中容量発電機では電機子側抵抗分が大きく過渡直流分の減衰が速く、前節で述べた界磁電流の包絡線を利用し、界磁相互漏れリアクタンスを推定する事は容易ではない。

そこで以下、筆者等は新たに電機子抵抗分が大きい場合

[†] ここで x_l (電機子漏れリアクタンス) は実測が難しいことから本論文では設計値を使用することとした。

図 7 6P-400kVA 三相突発短絡時の界磁電流実測値

Fig. 7. Field current of 3-phase sudden short circuit 6P-400kVA.

図 8 6P-400kVA 単相突発短絡時の界磁電流実測値

Fig. 8. Field current of Line-to-Line sudden short circuit 6P-400kVA.

でも推定精度の落ちない、三相突発短絡試験に替わる界磁相互漏れリアクタンス推定法を提案する。

3.2 単相突発短絡試験による推定法の提案 単相 (線間) 突発短絡試験は逆相リアクタンスの測定に適用される⁽⁴⁾ が、三相突発短絡試験ほど一般的ではない。図 8 に 6P-400kVA 単相突発短絡時の界磁電流実測値を示す。三相突発短絡時と比較し、電機子回路過渡直流分による基本波成分の減衰は速いが、2 倍の高調波分は継続している。

以下、筆者等が提案する単相突発短絡試験を用いて界磁相互漏れリアクタンスを推定する 2 つの方法を紹介する。

単相突発短絡時の界磁電流は (11) 式で示される⁽⁷⁾。

$$i_{f1phase} = \left\{ \left(\frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x_2} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x_2} \right) e^{-t/T'_{d(l-1)}} + \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x_2} e^{-t/T'_{d(l-1)}} + 1 \right\} i_{fo} - \frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x_2} (1 + b) \times \left\{ F(\cos 2\theta - b \cos 4\theta + \dots) + \frac{x''_d + x_2}{x_2} e^{-t/T_a} \sin \alpha (\sin \theta - b \sin 3\theta + \dots) \right\} i_{fo} \dots \dots \dots (11)$$

ここで

$$F = \left(1 - \frac{x_d'' + x_2}{x_d' + x_2}\right) e^{-t/T_{d(l-1)}''} + \left(\frac{x_d'' + x_2}{x_d' + x_2} - \frac{x_d'' + x_2}{x_d + x_2}\right) e^{-t/T_{d(l-1)}'} + \frac{x_d'' + x_2}{x_d + x_2}$$

$$T_{d(l-1)}'' = T_{do}'' \frac{x_d'' + x_2}{x_d' + x_2}, \quad T_{d(l-1)}' = T_{do}' \frac{x_d' + x_2}{x_d + x_2}$$

また

$$b = \frac{x_2 - x_d''}{x_2 + x_d''}, \quad \theta = 2\pi ft + \alpha$$

α : 短絡時の位相 (磁極軸の a 相磁化軸に対する進み角)

$$\frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \dots\dots\dots (12)$$

: 界磁巻線と制動巻線の分流比である。

(a) 直流分からの推定 単相突発短絡直後の波形に注目する。(7) 式と同様に (11) 式から直流分を抽出すると (13) 式となる。 $x_d, x_d', x_d'', x_2, T_d', T_d''$ は電機子端子側から見たリアクタンス・時定数であり、界磁相互漏れリアクタンス考慮の有無にはよらない。界磁相互漏れリアクタンス x_c 考慮の有無は (12) 式の分流比に反映される。

$$i_{f1phaseDC} = \left\{ \left(\frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x_d''}{x_d' + x_2} - \frac{x_d - x_d''}{x_d' + x_2} \right) \times e^{-t/T_{d(l-1)}''} + \frac{x_d - x_d''}{x_d' + x_2} e^{-t/T_{d(l-1)}'} + 1 \right\} i_{fo} \dots\dots\dots (13)$$

界磁電流実測値から、短絡瞬時の直流分 i_{f1DC0} を求める事ができる。ここで短絡前の界磁電流を i_{f10} とすると次のようになる。

$$i_{f1DC0} = i_{f10} + K_{1DC} i_{f10} \dots\dots\dots (14)$$

$$K_{1DC} = \frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x_d''}{x_d' + x_2} \dots\dots\dots (15)$$

実測結果から (15) 式の分流比に相当する値を求め、(2) ~ (6) 式と連立させて解くことにより、界磁相互漏れリアクタンス x_c を含む全リアクタンスと抵抗を算定する事ができる。

(b) 交流分からの推定 次に単相突発短絡実施後の永久短絡時に注目する。

時定数による減衰を考慮すると永久短絡時の (11) 式の界磁電流交流分は (16) 式となる。

$$i_{f1phaseAC} = \frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x_d''}{x_d + x_2} \cos 2\theta \times i_{fo} \dots\dots\dots (16)$$

ただし、ここで $|b| = \left| \frac{x_2 - x_d''}{x_2 + x_d''} \right| \ll 1$ とした[†]。

(a) 項で述べた直流分による推定と同様に $x_d, x_d', x_d'', x_2, T_d', T_d''$ は電機子端子側から見たリアクタンス、時定数であり、界磁相互漏れリアクタンス考慮の有無にはよらない。また 2 倍周波分の振幅を K_{1AC} とすると (17) 式となる。

$$K_{1AC} = \frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x_d''}{x_d + x_2} \dots\dots\dots (17)$$

(2) ~ (6) 式と (17) 式を連立させて解く事により、界磁相互漏れリアクタンス x_c を含む全リアクタンスと抵抗を算定する事ができる。

4. 提案手法の検証

前章で単相突発短絡時の界磁電流から界磁相互漏れリアクタンスを推定する方法を提案した。ここで、本提案手法の妥当性を確認するため、EMTP シミュレーション及び実機測定データにより、界磁相互漏れリアクタンスを推定してみた。

4.1 EMTP シミュレーションによる検証

(a) 直流分からの推定 モデル機 48P-15750kVA は図 4 の三相突発短絡試験の結果から各リアクタンス及び x_c を求めることができた。この定数を用いて EMTP による単相突発短絡シミュレーションを行った。

単相突発短絡では短絡発生時のタイミング (位相) により電機子電流、界磁電流波形が異なってくる。図 9 ~ 図 12 に短絡発生時のタイミングを電気角 90 度の位相差で変化させた 2 例 (Case1: 図 9, 図 11 Case2: 図 10, 図 12) を示す。

図 13 に Case1, 2 の界磁電流について直流分を求めた結果を示す。図 11, 図 12 の様に単相短絡時の波形は短絡時の位相により全く異なるが、基本波及び 2 倍の高周波分を除いた直流分の挙動は同一であることがわかる。

実測の場合、短絡時の位相を制御する事は困難であるが、短絡時の位相によらず界磁電流直流分が一定で有る事から一意的に上記推定法が適用できる。本例では、界磁相互漏

図 9 48P-15750kVA 単相突発短絡時の電機子電流 (Case1)

Fig.9. Simulation of armature current during Line-to-Line sudden short circuit 48P-15750kVA (Case1).

[†] これが成立する条件については付録に示す。

図 10 48P-15750kVA 単相突発短絡時の電機子電流 (Case2)

Fig.10. Simulation of armature current during Line-to-Line sudden short circuit 48P-15750kVA (Case2).

図 11 48P-15750kVA 単相突発短絡時の界磁電流 (Case1)

Fig. 11. Simulation of field current during Line-to-Line sudden short circuit 48P-15750kVA (Case1).

図 12 48P-15750kVA 単相突発短絡時の界磁電流 (Case2)

Fig. 12. Simulation of field current during Line-to-Line sudden short circuit 48P-15750kVA (Case2).

図 13 48P-15750kVA 単相突発短絡時界磁電流直流分

Fig.13. Simulation of field current DC component during Line-to-Line sudden short circuit 48P-15750kVA (Case1, 2).

図 14 48P-15750kVA 単相突発短絡時界磁電流振動分

Fig.14. Simulation of field current AC component during Line-to-Line sudden short circuit 48P-15750kVA (Case1, 2).

図 15 6P-400kVA 単相突発短絡時の界磁電流

Fig. 15. Field current of Line-to-Line sudden short circuit 6P-400kVA.

れリアクタンスとして $x_c (= -0.115)$ が得られた。

(b) 交流分からの推定 図 9～図 12 は短絡発生から 1 秒までの波形を示している。Case1, 2 について減衰終了後の 9.5 秒から 10 秒までの界磁電流振動波形を図 14 に示す。

短絡時の位相により短絡瞬時の電機子電流及び界磁電流の波形は異なっているが、減衰分が終了した後の交流分振幅は Case1, 2 で同等である事がわかる。直流分と同様、短絡時の位相によらず界磁電流交流分振幅が一定であることから一意的に上記推定法が適用できる。本例では、界磁相互漏れリアクタンスとして $x_c (= -0.117)$ が得られた。

以上 EMTP によるシミュレーション結果から各方法によって求めた界磁相互漏れリアクタンスは以下の様に、ほぼ同等となり提案手法を検証する事ができた。

- ① 三相突発短絡時の界磁電流より $\dots\dots\dots x_c = -0.112$
- ② 単相突発短絡時の界磁電流直流分より $\dots\dots\dots x_c = -0.115$
- ③ 単相突発短絡時の界磁電流交流分より $\dots\dots\dots x_c = -0.117$

4・2 実機による検証 次に実機による提案手法の検証結果を報告する。図 7 に示した様に 6P-400kVA では三相突発短絡時の界磁電流は減衰が速く、この波形から界磁相互漏れリアクタンスを推定する事は難しい。前節と同様に、単相突発短絡試験結果から界磁相互漏れリアクタンスを推定する。短絡発生のタイミングを変化させた 2 ケース (case3, 4) の界磁電流実測波形を図 15 に示す。

図 16 に Case3, 4 における単相突発短絡直後の界磁電流直流分を示す。短絡時のタイミングによらず、直流分は同等である事がわかる。これより $x_c = -0.082$ を得る。また減衰終了後の界磁電流交流分から $x_c = -0.085$ を得る。

図 16 6P-400kVA 単相突発短絡時界磁電流直流分
Fig. 16. Field current DC component during Line-to-Line sudden short circuit 6P-400kVA.

図 17 6P-400kVA 三相突発短絡時の界磁特性
Fig. 17. Field characteristics of during 3-phase sudden short circuit 6P-400kVA.

図 18 4P-10kVA 三相突発短絡時の界磁特性
Fig. 18. Field characteristics of during 3-phase sudden short circuit 4P-10kVA.

EMTP シミュレーション同様，両方法による推定は，ほぼ同等である。

次に得られた x_c を用いて三相突発短絡時の界磁電流をシミュレーションした結果と実測値との比較を図 17 に示す。ほぼ一致しており推定方法の妥当性が確認された。

また同様な手法により 4P-10kVA 突極発電機でも単相突発短絡試験から得られた x_c を用いて三相突発短絡シミュレーションを行った結果を図 18 に示す。実測値とほぼ一致した結果が得られ，三相突発短絡時の界磁電流基本波分の減衰が大きい小容量機に対しても，本提案の推定が十分に適用可能であることが確認された。

5. 界磁相互漏れリアクタンスと負荷投入特性

3 章で述べた様に界磁相互漏れリアクタンスを考慮することは，(9) 式に示した界磁巻線と制動巻線の分流比に影響する。そこで筆者等は界磁相互漏れリアクタンスを考慮した場合の界磁電流，端子電圧への影響を負荷遮断，PSS

図 19 負荷投入時界磁電流解析値

Fig. 19. Simulation of generator field current during sudden application of a load.

図 20 負荷投入時端子電圧解析値

Fig. 20. Simulation of generator terminal voltage during sudden application of a load.

効果について検討した結果を報告してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。今回，中容量発電機と励磁システムとの評価に広く用いられる負荷投入特性について考えてみた。

4 章で得られた x_c を用いて EMTP により 6P-400kVA 発電機が 4P-50kW（始動 kVA：370kVA）誘導電動機を始動した場合のシミュレーションを行った。なお励磁は中容量で広く用いられる自励複巻方式とした。

図 19，図 20 に界磁相互漏れリアクタンス x_c 考慮の有無による界磁電流，端子電圧（実効値）の変化を示す。

図 20 から分かるように，端子電圧は x_c 考慮の有無にかかわらず，同様な結果である。また，図 19 の界磁電流には負荷投入直後に若干の差異が見られる。今回のモデル機では $x_c < 0$ であり，負荷投入にともない界磁回路に分流する割合が $x_c = 0$ の場合と比較し変化する。図 19 の投入直後の差はこれによるものと考えられる。一方，端子電圧は電機子側から見た諸定数 $x_d, x'_d, x''_d, T'_d, T''_d$ に依存し，AVR で制御されていることから，負荷遮断時と同様に界磁相互漏れリアクタンスによる有意差がないと考えられる。

6. まとめ

発電機過渡時界磁電流特性に影響を与える界磁相互漏れリアクタンスについて三相・単相突発短絡，負荷投入の検討を行い次の点が明らかになった。

- 突発短絡試験実測値から，界磁電流の動きを考える場合，回転子側のみに鎖交する磁束に対応する界磁相互漏れリアクタンス（Canay のリアクタンス）を考慮した方が実際の現象に近い波形となる。

●界磁相互漏れリアクタンスの推定方法としては従来、三相突発短絡時の界磁電流特性を用いる事が一般的である。しかし中小容量発電機では電機子側抵抗分が大きく過渡直流分の減衰が速く、界磁相互漏れリアクタンスを推定する事は容易ではない。そこで今回

① 単相突発短絡時の界磁電流直流分

② 単相突発短絡時の界磁電流交流分

を用いる方法を提案し、シミュレーション、実測データから妥当性を確認する事が出た。

●シミュレーションの結果から、負荷投入時の界磁電流、端子電圧は AVR の制御に支配されるため、負荷遮断時と同様に界磁相互漏れリアクタンス考慮の有無による違いは顕著には現れにくいと考えられる。

今後、さらに非同期投入等の発電機過渡現象時における、界磁相互漏れリアクタンスの界磁特性への影響について検討を行う予定である。

(平成 15 年 6 月 23 日受付、平成 15 年 8 月 21 日再受付)

文 献

- (1) R.H. Park: "Two Reaction Theory of Synchronous Machines", *Trans. AIEE*, Vol.48, p.716 (1929)
- (2) B. Adkins: *The General Theory of Electrical Machines*, Chapman and Hall (1957)
- (3) I.M. Canay: "Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagrams of The Synchronous Machine", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-88, No.7, p.1114 (1969)
- (4) "Application technology of synchronous machine constants", IEE Japan Technical Report, No.798 (2000) (in Japanese)
「同期機諸定数の適用技術」, 電気学会技術報告, No.798 (2000)
- (5) D. Hiramatsu, K. Koyanagi, K. Hirayama, Y. Uemura, and T. Sato: "Analysis of Generator Load Rejection Phenomena influenced by the Rotor Leakage Reactance", *National Convention Record IEE Japan*, 6-031 (2003) (in Japanese)
平松大典・小柳 薫・平山開一郎・上村洋市・佐藤利幸:「発電機過渡時における界磁漏れリアクタンス」, 平成 15 年電気学会全国大会, 6-031 (2003)
- (6) K. Koyanagi, D. Hiramatsu, K. Hirayama, and Y. Uemura: "A Study on PSS Effects Using a Generator Model with Canay Reactance", *National Convention Record IEE Japan*, 6-032 (2003) (in Japanese)
小柳 薫・平松大典・平山開一郎・上村洋市:「界磁漏れリアクタンスを考慮した発電機モデルに基づく PSS 効果の解析」, 平成 15 年電気学会全国大会, 6-032 (2003)
- (7) T. Igari: *Theory of Electrical Machine*, CORONA Publishing, CO., LTD. (1977) (in Japanese)
猪狩武尚: 電気機械理論, コロナ社 (1977)
- (8) Y. Takeda and B. Adkins: "Determination of synchronous machine parameters allowing for unequal mutual inductance", *Proc. IEE*, Vol.121, No.12 (1974-12)

付 録

1. モデル機定格とリアクタンス・時定数

定格: 48P-15750kVA-125min⁻¹-11000V-50Hz

付表 1 モデル機 d 軸定数

app. Table 1. d-axis constants of model machine.

	Xc=0	Xc considered		Xc=0	Xc considered
X _d	0.903	←	X _c	0	-0.112
X _{d'}	0.378	←	X _{ad}	0.701	0.701
X _{d''}	0.288	←	X _{fd}	0.235	0.348
T _{d'}	1.675	←	R _{fd}	0.000745	0.000746
T _{d''}	0.057	←	X _{kd}	0.168	0.533
R _a	0.00624	←	R _{kd}	0.01461	0.03190
X _l	0.202	←	T _{kd}	0.336	0.533

Reactance:(pu) Time constant :(sec)

$$2. |b| = \left| \frac{x_2 - x_d''}{x_2 + x_d''} \right| \ll 1 \text{ について}$$

上記が成り立つのは突極同期機では、各磁極に設けられた制動巻線が極間接続されている場合である。本解析のモデル機 48P-15750kVA, 6P-400kVA 両機ともこの条件に該当する。付図 1 に突極同期機の界磁磁極の構造例を示す。

付図 1 の様に制動巻線を短絡する導体が隣接する磁極と接続している場合は dq 軸制動巻線漏れリアクタンスの差が小さく $x_d'' \cong x_q''$ とすると (付 1) 式の様になる⁽⁷⁾。

$$x_2 = \frac{1}{2} (x_d'' + x_q'') \cong x_d'' \dots \dots \dots \text{(付 1)}$$

制動巻線を短絡する導体が隣接する磁極と接続していない場合は

$$x_2'' \neq x_d \dots \dots \dots \text{(付 2)}$$

であり、この場合は (16) 式は

$$i_{f1phaseAC} = \frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x_d''}{x_d'' + x_2} \frac{2x_2}{x_d + x_2} \cos 2\theta \times i_{fo} \dots \dots \dots \text{(付 3)}$$

と若干複雑になる。ここで (17) 式を

$$K_{1AC} = \frac{x_{kd}}{x_{fd} + x_{kd}} \frac{x_d - x_d''}{x_d'' + x_2} \frac{2x_2}{x_d + x_2} \dots \dots \dots \text{(付 4)}$$

と置き換える。(2)~(6) 式と (付 4) 式を連立させて解く事により、界磁相互漏れリアクタンス x_c を含む全リアクタンスと抵抗を算定する事ができる。

付図 1 突極機界磁磁極構造

app. Fig. 1. Construction of salient pole.

平 松 大 典 (正員) 1980 年 3 月慶応義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。主として同期発電機,同期電動機的设计に従事。現在,電動回転機部参事。技術士(電気・電子部門)。

徳 増 正 (正員) 1974 年 3 月東京大学物理工学科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。重電技術研究所にて主として有限要素法による回転機の電磁界解析に従事。現在,電力・産業システム技術開発センター回転機器開発部主査。

小 柳 薫 (正員) 1971 年,東京教育大学理学部応用物理学科卒。2000 年,東京都立大学工学研究科電気工学専攻(博士課程)卒。工学博士。英国技術士。1971 年 4 月から 1996 年 3 月まで(株)東芝にて電力系統解析に従事。現在,(株)テプコシステムズにて電力系統分野のソフトウェア開発に従事。1995 年電気学会論文賞受賞。IEE 及び IEEE 会員。

高 畠 幹 生 (正員) 1997 年 3 月東京大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社重電技術研究所にて主として回転機の電磁界解析に従事。現在,電動機的设计に従事。電動回転機部主務。

平 山 開一郎 (正員) 1970 年 3 月北海道大学電気工学科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。主として発電制御システムの開発,设计に従事。現在,府中電力システム工場技監。1994 年計測自動制御学会より技術賞受賞。工学博士(北海道大学)。

佐 藤 利 幸 (非会員) 1982 年 3 月宮城工業高等専門学校電気工学科卒業。同年 4 月北芝電機(株)入社。主として発電機的设计に従事。現在,回転機部参事。

上 村 洋 市 (正員) 1977 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。重電技術研究所にて主として電力系統の解析に従事。現在,火力水力事業部にて電機系解析に従事。

荒 隆 裕 (正員) 1977 年 3 月職業訓練大学校電気工学科卒業。同年 4 月雇用促進事業団(現:雇用能力開発機構)に入る。1980 年 4 月職業訓練大学校(現:職業能力開発総合大学校)助手。主として電気機械の解析と制御に関する研究に従事。現在,教授。工学博士。日本産業教育技術学会会員。IEEE 会員。