突極形同期機の三相突発短絡時における磁気飽和特性解析

正員 島 和 男 (日立)

正員 井 出 一 正 (日立)

正員 高 橋 身 佳 (日立)

Analysis of Magnetic Saturation in a Salient-Pole Synchronous Machine after Sudden Three-Phase Short Circuit

Kazuo Shima, Member, Kazumasa Ide, Member, Miyoshi Takahashi, Member (Hitachi, Ltd.)

In order to evaluate magnetic saturation at sub-transient and transient states of a large-sized salient-pole synchronous machine, the currents and leakage inductances after sudden three-phase short circuits are analyzed by a two-dimensional non-linear transient finite element method (FEM). The currents are calculated both by direct and indirect methods. The direct method uses the FEM and considers fluctuation of the magnetic saturation after the short circuit. The indirect method solves the Park's differential equations without the fluctuation. Results of the direct method agree well with measurements. When the pre-short voltage is large, fluctuation of the leakage inductances after the short is large and it greatly affects values of the short-circuit currents. As the pre-short voltage becomes large, the damper leakage inductances become saturated at first, then the field leakage inductances and finally the armature leakage inductances. Although the indirect method considers saturation at the pre-short condition, it gives inaccurate results and they are nearly the same as the results by the linear FEM. In general, it is thought that saturation of the leakage flux should be considered where sub-transient conditions with large disturbance are analyzed.

キーワード：同期機，磁界解析，磁気飽和，漏れインダクタンス，ダンパ

Keywords: Synchronous machines, finite element analysis, magnetic saturation, leakage inductances, damper

1. ま え が き

JEC-2130⁽¹⁾では，同期機は定格負荷時に電機子において突発短絡を生じても短絡電流に耐える構造とすることが規定されている。また，設計仕様として初期過渡・過渡時の諸定数が規定される場合がある。このように，同期機は初期過渡・過渡特性を考慮して設計する必要がある。そこで，初期過渡・過渡特性を支配する漏れ磁束の挙動と，機器の各部構造の関係を把握することが重要になる。特に，突発短絡時には過大な電流が流れるため，同期機内に局所的に大きな漏れ磁束が生じて磁気飽和が生じる可能性がある。この場合には漏れ磁束の飽和も考慮する必要がある。

また，モータドライブシステム解析および系統解析などの同期機を含むシステムの解析や，モータの高応答ベクトル制御などのためには，同期機モデルの漏れインダクタンス値の把握が重要になる。系統の安定度解析では通常，主磁束の飽和のみを扱い，漏れ磁束の飽和を無視しているが⁽²⁾⁽³⁾，擾乱の大きい条件に対してはこれを考慮すべきことを指摘した文献もある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

しかし，筆者らの知る限り，初期過渡・過渡時の磁気飽和について十分に検討された例は見当たらない。文献(6)では発電機内部の磁束分布の過渡挙動を示しているが，ギャップ磁束分布の実測を用いた推定にとどまっている。一方，近年盛んに用いられている有限要素法(FEM)は，内部磁束分布を知ることができる点で実測には無い利点がある。この種の解析としては，円筒形同期機を対象とした初期過渡時の漏れインダクタンスの解析例がある⁽⁷⁾。しかし，これは1周期単位での平均的な値の計算にとどまっており，回転位置によって刻々と変化するインダクタンスの計算までは検討されていない。また，固定子と回転子の巻線分布の違いにより生じる漏れインダクタンス⁽⁸⁾が考慮されていないように見受けられる。さらに，突極形同期機に対しては，これに類する解析例は見当たらない。

一方，筆者らは，突極形同期機を対象に，磁気飽和を考慮したFEMによって漏れインダクタンスを計算する方法を先に提案した^{(9)~(11)}。これは，固定子と回転子の巻線分布の違いにより生じる漏れインダクタンスを含めて，全ての漏れインダクタンスを分離できる。これらの漏れインダ

クタンスはそれぞれ、機内の特定部位の漏れ磁束量に対応している。また、インダクタンス値を各時刻ごとに計算できる。よって、初期過渡・過渡時磁気飽和特性の解析に利用できる。

初期過渡・過渡条件には様々な運転状態が考えられるが、三相突発短絡条件が代表的である⁽²⁾⁽⁵⁾。そこで本報告では、突極形同期機の三相突発短絡時を対象に、短絡電流の飽和特性をFEMで計算すると共に、上記提案方法によって漏れインダクタンスの時間変化を計算する。これによって、初期過渡・過渡時の磁気飽和特性を明らかにする。対象機は300MVA級大容量突極形発電機である。

2. 解析法

三相突発短絡時の電流およびインダクタンスを、二次元FEMで解析する。電流は、直接解法と間接解法の二通りの方法で計算する⁽¹²⁾。

〈2・1〉 直接解法 本論文における直接解法の解析方法を示す。磁気飽和を考慮した非定常FEMと電気回路の連成解析によって突発短絡電流を計算する。回転子は積層磁極で、速度変動を無視して一定回転させる。電機子および界磁巻線は、それぞれ三相短絡結線および定電圧源の外部回路に接続する。それぞれの外部回路に設計値の巻線抵抗と端部漏れインダクタンスを加える。ダンパ回路には材料の導電率を与える。 $B-H$ 曲線は、飽和磁化付近の2.1T程度までは実測直流磁化曲線を用い、それ以上は真空透磁率の傾きで外挿する。固定子の $B-H$ 曲線は、積層効率と通風ダクトを考慮してカタログ値を補正して使用する⁽¹³⁾。文献(13)の方法によって突発短絡前の定常運転条件（電機子電圧・電流・力率）を満たす電機子・界磁電流をあらかじめ計算しておき、この条件での静磁界を突発短絡FEM解析の初期値とする。

直接解法は、突発短絡後における磁気飽和の時間変動を考慮した方法である。

〈2・2〉 インダクタンス計算法 前節の直接解法による突発短絡電流の解析は多数の実施例がある⁽¹²⁾。一方、本論文では電流だけでなく、突発短絡後の磁気飽和変動を考慮して各時刻の漏れインダクタンスを計算する。これは、文献(9)(10)の詳細モデルによって計算する。詳細は該文献に譲り、計算法の概略を以下に述べる。まず直接解法を実施し、各時間ステップにおける鉄心内各要素の透磁率を求める。次に、それぞれの時間ステップにおいて、求めた透磁率分布に固定した線形静磁界解析を実施することによって、全巻線の自己・相互・漏れインダクタンスを分離する。電機子巻線とダンパバーは d, q 軸回路に変換する。図1に、対象機のダンパバー番号とダンパ回路の記号を示す。

〈2・3〉 間接解法 本論文では、間接解法と直接解法の突発短絡電流を比較することによって、突発短絡後の磁気飽和変動による影響の大きさを評価する。

間接解法は、発電機定数（インダクタンスと抵抗）によって表されるParkの電圧方程式を⁽¹¹⁾、数値積分によって

図1 対象機のダンパバー番号とダンパ回路の記号（毎極ダンパバー数 $N_{dp}=8$ ）

Fig. 1. Symbols for damper bars and circuits.

表1 無負荷0.25puからの三相突発短絡時諸定数

Table 1. Sudden three-phase short-circuit constants from 0.25pu no-load condition.

	x_d' (pu)	x_d'' (pu)	T_d' (sec)	T_d'' (sec)	T_a (sec)
measured	0.30	0.16	2.85	0.064	0.29
non-linear FEM	0.277	0.161	2.67	0.077	0.34
linear FEM	0.278	0.181	2.78	0.106	0.37

解く方法である。まず数値積分の前に、あらかじめ静磁界FEM解析を実施し、突発短絡前の定常運転条件におけるインダクタンスを計算しておく⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。つぎに、このインダクタンスを用いて、インダクタンスを一定値としてParkの電圧方程式を解き、突発短絡電流を計算する。この方法は、突発短絡後しばらくの間は電機子・界磁・ダンパ巻線それぞれの鎖交磁束量がほぼ一定に保たれるため⁽⁶⁾、鉄心内の磁気飽和状態があまり変化しない、とみなす単純な仮定に基づく。なお、電機子抵抗・界磁抵抗・ダンパ回路抵抗は、導体寸法と材料の導電率から表皮効果を無視して計算したものを用いる。

このように、間接解法には、突発短絡後の磁気飽和変動を無視していることによる誤差が生じる欠点がある。これを利用すると、間接解法と直接解法の比較によって、磁気飽和変動の影響を評価できることになる。なお、間接解法では静磁界FEM解析と簡単な数値積分のみで済むため、直接解法よりも桁違いに計算時間が短いという利点もある。

3. 解析結果

〈3・1〉 実測と解析の比較 まず、実測との比較により、直接解法の妥当性を示す。図2に、無負荷、電圧0.25puからの三相突発短絡電流を示す。表1に、同図からJEC-2130の方法によって求めた諸定数を示す⁽¹⁾。図表中、non-linear FEMが磁気飽和を考慮した非線形解析、linear FEMが磁気飽和を無視して鉄心比透磁率を10000に設定した線形解析、measuredが実測である。図2の実測は包絡線で示した。図2、表1から、非線形解析は実測と合っている。これ

[†]なお、〈2・2〉節のインダクタンス計算法で求めた各時間ステップごとのインダクタンスを逐次用いてParkの電圧方程式を解く方法も可能である。これならば直接解法とほぼ同じ突発短絡電流波形が求まるはずである。しかし、直接解法によって電流波形を求めた後にParkの電圧方程式を解いて同じ電流波形を求める順序となるため、実用上の意味を見出しにくい。このため本論文では取り上げない。

図3 無負荷 0.25pu からの三相突発短絡時の FEM による磁束密度分布（短絡から半周期後）
Fig. 3. Flux density distribution at half-period after sudden short circuit from 0.25pu no-load condition.

図2 無負荷 0.25pu からの三相突発短絡電流の実測と解析の比較（1 period = 1/60 sec）
Fig. 2. Sudden three-phase short-circuit currents from 0.25pu no-load condition.

に対し、線形解析は初期過渡領域で実測との誤差が生じている。本解析条件では短絡前には鉄心のいずれの部分にも磁気飽和が生じていない。それにもかかわらず線形解析と非線形解析が合わないことから、突発短絡後に新たに磁気飽和が生じており、その影響が電流に現れているといえる。一方、表1の x_d' , T_d' より、初期過渡状態が終わった過渡状態においては、線形解析と非線形解析の差がほとんど無く、磁気飽和の影響が見られない。

図3に、図2の非線形解析による、短絡半周期後の磁極頭部磁束密度分布を示す。ダンパバー#8（と#1）のスリット近傍で磁束密度が3Tを超えており、ダンパ漏れ磁路の

局所的な磁気飽和が顕著になっている。この飽和がダンパバー電流自身によることは、磁気飽和部位から明らかである。これ以外の鉄心部分は、図示外も含めて全て1.5T以下になっており、飽和していない。これより、ダンパスリット近傍の磁気飽和だけが電機子電流に影響していると推測される。これは後のインダクタンス解析によって確認する。

〈3・2〉突発短絡電流 次に、短絡前の負荷条件を変えて、直接解法と間接解法の短絡電流波形を比較する。

図4に、無負荷、電圧0.05puからの突発短絡電流を示す。電機子、界磁、ダンパバー電流のいずれも直接解法（non-linear FEM）と間接解法（differential equations）が合っている。この条件では電流が小さいため短絡後であっても全く磁気飽和が生じていない。飽和のない条件では間接解法の精度が良好なことがわかる。

図5に、無負荷、電圧0.25puからの短絡電流を示す。同図(a)より、短絡初期の数周期において間接解法が直接解法と合っていない。これは、間接解法では短絡後の飽和状態変化を考慮できないためである。直接解法と間接解法のダンパバー電流の差は大きく、突発短絡半周期後において2倍近くになっている。これは、明らかに図3に示したダンパスリット近傍における磁気飽和の影響である。一方、界磁電流にはあまり差が無い。

図6に、定格負荷（電圧1.0pu）からの短絡電流を示す。全巻線の電流が間接解法と直接解法で著しく異なっている。短絡前後で機内の磁気飽和状態が全く異なっており、短絡後の磁気飽和変動の影響が非常に強いことがわかる。

図7に、定格負荷からの突発短絡より半周期後の磁束密度分布を示す。ダンパバーのスリット近傍で磁束密度が7Tを超える部分があり、定常運転状態では生じ得ない磁気飽和レベルになっている。界磁極片（界磁極頭部の両端）や固定子歯部も3Tを超えている。特にダンパ近傍の磁束密度が極端に高いことから、実際は磁束分布が軸方向に大きく広がっていると考えられ⁽⁶⁾、二次元解析では磁束密度や短絡電流を大きく評価している可能性がある。この点の詳細検討には計算時間の過大な三次元解析が必要と考えられ、今後の課題とする。ただし、いずれにしても飽和が著しいことになり変わりなく、二次元解析でも飽和特性の検討は可能と考える。なお、短絡前電圧が同一であるため、無負荷、電圧1.0puからの突発短絡における飽和特性も定格負荷時と

(a) Phase B armature currents.

(b) Field currents.

(c) Damper bar #1 currents.

図4 無負荷 0.05pu からの三相突発短絡電流

Fig.4. Sudden three-phase short-circuit currents from 0.05pu no-load condition.

(a) Phase B armature currents.

(b) Field currents.

(c) Damper bar #1 currents.

図5 無負荷 0.25pu からの三相突発短絡電流

Fig.5. Sudden three-phase short-circuit currents from 0.25pu no-load condition.

類似している。

図8に、無負荷時を対象に、短絡前電圧と突発短絡電流最大値の関係をまとめた。短絡前電圧が大きくなると線形直接解法や間接解法が非線形直接解法と合わなくなることがわかる。さらに、間接解法は、短絡前の磁気飽和状態を考慮しているにもかかわらず、飽和を全く無視した線形解析とほぼ同じ結果である。線形直接解法や間接解法では突発短絡時最大電流を過小評価している。

続いて図9に、解析電流波形から JEC-2130 によって求めた諸定数と、短絡前電圧の関係を示す。非線形直接解法の結果から、 x_d'' は電圧 0.25pu で既に飽和の影響が強くなっている。また、 x_d' は電圧 0.5pu 以下では飽和の影響が小さく、1.0pu で影響が大きい。これに対し、間接解法は線形直接解法と同程度の値であり、飽和はわずかである。このことから、短絡前の磁気飽和状態だけでは、初期過渡諸定数の磁気飽和を全く説明できないことがわかる。電圧 0.05pu などにおいて間接解法の x_d'' と x_d' が線形直接解法よりも少し大きいのは、間接解法では電流の高調波が無視されるためである。なお、短絡前電圧が 0.5 および 1.0pu における非線形直接解法の場合、JEC-2130 に従って片対数グラフに描いた包絡線が、飽和の影響で直線にならないため、近似直線の引き方によって諸定数がばらつく⁽¹⁴⁾。図9は、短絡初期を重視して近似直線を引いた場合であり、諸定数が小さめに出ている。

(a) Phase B armature currents.

(b) Field currents.

(c) Damper bar #1 currents.

図6 定格負荷からの三相突発短絡電流

Fig. 6. Sudden three-phase short-circuit currents from rated load condition.

〈3・3〉 インダクタンス 機内各部における漏れ磁束の飽和状態を把握するため、文献(9)(10)の方法によって突発短絡後の漏れインダクタンスの時間変化を計算する。

図10に漏れインダクタンス変化を示す。解析ケースは電圧0.05~1.0puの無負荷時から、および定格負荷時からの三相突発短絡である。図中、周期(Period)が0におけるインダクタンス値は、短絡前における値である。全般に、突発短絡から0.5, 1.5, 2.5周期後には固定子の起磁力と回転子の起磁力が対向するために局所的な飽和が著しく、漏れインダクタンスが短絡前よりも小さくなっている。一方、突発短絡から1, 2, 3周期後には回転子が元の位置(電気角)に戻って飽和が緩和され、漏れインダクタンス値も戻っ

図7 定格負荷からの三相突発短絡時のFEMによる磁束密度分布(短絡から半周期後)

Fig. 7. Flux density distribution at half-period after sudden short circuit from rated load condition.

ている。ただし、その戻る量は周期が進むにつれて衰えている。また、いずれの漏れインダクタンスも、無負荷1.0puと定格負荷において飽和が著しい。

図10(a)のダンパ1d回路自己漏れインダクタンスは、電圧0.1puから既に値の低下が始まっている。電圧が0.25puを超えると低下が著しい。ダンパ2d~4d, 1q~4q回路の自己漏れインダクタンスでも飽和が著しい。これらの変化は、ダンパ電流自身によるダンパスリット近傍の飽和による。同図(b)の界磁自己漏れインダクタンスは、電圧0.5puから低下が始まっている。この変化は、主に界磁極片の飽和による。同図(c)のd軸電機子自己漏れインダクタンスは、電圧0.5puでは低下が少ないが、電圧1.0puになると大きく低下している。q軸電機子自己漏れインダクタンスでも同傾向である。この変化は、固定子歯部の飽和による。

同図(d)に示したのは界磁とd軸電機子間の巻線分布不整合漏れインダクタンス(Winding differential leakage inductances)である。これは、巻線の空間分布が互いに異なることによる漏れインダクタンスである。界磁自己漏れと同様に、電圧0.5puから値が低下している。この変化は、主に界磁極片と電機子歯部の飽和による。

以上のように、どの漏れインダクタンスも大きく変化している。突発短絡電流がこれによって大きな影響を受けていることは明らかである。非線形直接解法ではこれを考慮しており、間接解法では全く考慮していない。

図11に三相突発短絡後の相互インダクタンス変化を示す。ただし、短絡電流に対するこれらの影響は漏れインダクタンスに比べて少ない。電圧0.5puと1.0puのケースでは主磁束の飽和も著しいことがわかる。同図(c)のd軸とq軸間の相互インダクタンスは正負に変動している。負になるときは磁極の飽和部位が回転方向遅れ側に偏り、正になる

(a) Phase B armature currents.

(b) Field currents.

(c) Damper bar #1 currents.

図8 三相突発短絡前の無負荷電圧と突発短絡電流最大値の関係

Fig.8. Relationship between pre-short no-load voltages and maximum short-circuit currents.

ときは進み側に偏っている。この変動の大きさは電機子漏れインダクタンスと同程度になっており、比較的大きい。

〈3・4〉考 察 以上のことから、対象機の初期過渡・過渡時の飽和特性について次のことがいえる。電圧 0.05pu からの突発短絡ではどのインダクタンスも飽和しない。電圧 0.1, 0.25pu ではダンパスリット近傍が飽和し、ダンパ自己漏れインダクタンスのみが低下する。これが原因で電機子電流とダンパ電流が増加し、直接解法と間接解法に差が現れる。ただし、飽和の影響が出るのはダンパ電流が大きい初期過渡時のみである。電圧 0.5pu になると界磁極片（界磁極頭部の両端）も飽和し、界磁自己漏れインダクタン

 (a) x_d''

 (b) x_d'

図9 三相突発短絡前の無負荷電圧と、突発短絡電流より求めた諸定数の関係

Fig.9. Relationship between pre-short no-load voltages and constants.

スと巻線分布不整合漏れインダクタンスが低下し始める。これが原因で、界磁電流でも直接解法と間接解法に差が現れる。電圧 1.0pu になると、界磁の飽和がさらに強くなり、加えて電機子歯部が強く飽和するようになり、全ての漏れインダクタンス値が大きく減少する。このため直接解法と間接解法の差が大きい。電流が大きいために初期過渡時だけでなく過渡時にも飽和の影響が強く現れる。

これらの飽和特性は、突発短絡後に生じる磁気飽和に起因する。突発短絡前の磁気飽和状態からは、これらの特性を全く説明できない。

三相突発短絡時に限らず、擾乱の大きい初期過渡・過渡状態では上記のような漏れ磁束の磁気飽和変動が無視できないと考えられる。また、本論文の対象機に限らず、他の大容量突極形同期機においても、突発短絡などの場合に過大な電流が流れることに変わりないため、飽和によって漏れインダクタンスが変動すると考えられる。したがって、精度の良い解析のためには漏れ磁束の磁気飽和変動を考慮に入れるべきと考える。主磁束のみの飽和を考慮して漏れ磁束の飽和を無視した解析方法では、一般に本論文の間接解法と同様の誤差を生じる可能性があり、注意が必要である。

4. ま と め

大容量突極形同期機の初期過渡および過渡時の磁気飽和

図 10 漏れインダクタンスの三相突発短絡時における時間変化
Fig. 10. Leakage inductance variations after sudden three-phase short circuit.

特性を明らかにするため、三相突発短絡時の電流と漏れインダクタンスを二次元非線形非定常 FEM を用いて計算した。電流は、磁気飽和の時間変化を考慮した直接解法と、インダクタンスを短絡前の値に固定して Park の電圧方程式を解く間接解法の二通りの方法で計算した。これらから、対象機に対して以下の知見を得た。

- 短絡前電圧が 0.25pu の場合に、直接解法が実測と良く一致する。
- 短絡前電圧が大きくなると、突発短絡後に、局所的な磁気飽和によって漏れインダクタンスが大きく変動し、これが突発短絡電流値に大きな影響を与える。
- 短絡前電圧が大きくなるにつれて、まずダンパ自己漏れ、次に界磁自己漏れと巻線分布不整合漏れ、最後に電機子漏れインダクタンスが飽和する。
- 間接解法では、短絡前の磁気飽和状態を考慮しているにもかかわらず、飽和を全く無視した解析とほぼ同じ解析結果となる。

一般に、擾乱の大きな初期過渡・過渡状態を精度良く求めるためには、擾乱による漏れ磁束の磁気飽和を考慮に入れる必要があると考えられる。しかし現状では、系統解析やモータドライブシステムなどの大規模シミュレーションに対して FEM による直接解法を適用することは、単純な

例を除いて計算時間と計算規模的に困難である。したがって、こうしたシミュレーションに対して漏れ磁束の磁気飽和を考慮に入れるための実用的手段の検討が、今後の課題として挙げられる。

最後に、FEM 解析に関してご指導いただいた日立製作所 牧晃司氏、高橋和彦氏、宮田健治氏に謝意を表します。
(平成 14 年 3 月 18 日受付、同 14 年 6 月 12 日再受付)

文 献

- (1) Standard of the Japanese Electrotechnical Committee: *Synchronous Machines JEC-2130*, Denkishoin (2000) (in Japanese)
電気学会電気規格調査会標準規格：同期機 JEC-2130, 電気書院 (2000)
- (2) 同期機諸定数調査専門委員会：同期機諸定数の適用技術, 電学技報, No. 798 (2000)
- (3) T. IEE of Japan: *Electrical Engineering Handbook*, Ohmsha, 6th edition, pp. 990-991 (2001) (in Japanese)
電気学会：電気工学ハンドブック, オーム社, 第 6 版, pp. 990-991 (2001)
- (4) P. J. Turner: "Finite-Element Simulation of Turbine-Generator Terminal Faults and Application to Machine Parameter Prediction", *IEEE T. on Energy Conversion*, Vol. 2, No. 1, pp. 122-131 (1987-1)
- (5) IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses, *IEEE Std 1110-1991* (1991)
- (6) C. Uenosono, Y. Ueda, Y. Inoue, and T. Sakurai: "Transient Behaviour of Magnetic Flux Distribution of a Synchronous

(a) Mutual inductances between field and d -axis armature.

(b) Mutual inductances between q -axis armature and damper.

(c) Mutual inductances between d -axis and q -axis armatures.

図 11 相互インダクタンスの三相突発短絡時における時間変化

Fig. 11. Mutual inductance variations after sudden three-phase short circuit.

Generator at Three-Phase Sudden Short-Circuit", *T. IEE of Japan*, Vol. 102, No. 9 (1982)

- (7) R. Escarela-Perez, and D. C. Macdonald: "A Novel Finite-Element Transient Computation of Two-Axis Parameters of Solid-Rotor Generators for Use in Power Systems", *IEEE T. on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 1, pp. 49-54 (1998-1)
- (8) K. Shima, K. Ide, M. Takahashi, Y. Yoshinari, and M. Nitobe: "Calculation of Leakage Inductances of a Salient-Pole Synchronous Machine Using Finite Elements", *IEEE T. on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, pp. 1156-1161 (1999-4)
- (9) K. Shima, K. Ide, and M. Takahashi: "Analysis Method for Damper Leakage Inductances of Salient-Pole Synchronous Machines Using Finite Elements", *N. Conve. of the IEE of Japan*, Vol. 5, No. 27 (2001) (in Japanese)

島 和男・井出一正・高橋身佳:「磁界解析に基づく突極形同期機の

ダンパ漏れインダクタンス解析」, H13 電学全大, 5, 27 (2001)

- (10) K. Shima, K. Ide, and M. Takahashi: "Analysis of Leakage inductances of a Salient-Pole Synchronous Machine with Damper Circuits", *The Papers of Tech. Meeting on Rotating Mach., IEE Japan*, Vol. RM01, No. 9 (2001-9) (in Japanese)
- 島 和男・井出一正・高橋身佳:「ダンパを有する突極形同期機の漏れインダクタンス解析」, 電学研資 RM01-9 (2001)
- (11) K. Shima, K. Ide, and M. Takahashi: "Calculation of Circuit Parameters for a Salient-Pole Synchronous Machine with Damper Bars", *Ann. Conf. of IEE of Japan, Industry Appl. Society*, No. 234 (2001) (in Japanese)
- 島 和男・井出一正・高橋身佳:「ダンパを有する突極形同期機の回路定数解析」, 電気学会産業応用部門大会, No. 234 (2001)
- (12) 回転機の電磁界数値解析法応用調査専門委員会:「回転機の電磁界数値解析法」, 電学技報 II 部, No. 375, pp. 67-70 (1991)
- (13) K. Shima, K. Ide, M. Takahashi, Y. Yoshinari, M. Yamashina, and K. Saitou: "Variation of Saturated Reactances of a Salient-Pole Synchronous Motor in the Field-Weakening Region", *T. IEE of Japan*, Vol. 117-D, No. 12, pp. 1525-1534 (1997-12) (in Japanese)
- 島 和男・井出一正・高橋身佳・吉成良孝・山品光則・斎藤啓自:「突極形同期機の弱め界磁域におけるリアクタンス変化の考察」, 電学論 D, 117, 12 (1997)
- (14) J. P. Martin, C. E. Tindall, and D. J. Morrow: "Synchronous Machine Parameter Determination using the Sudden Short-Circuit Axis Currents", *IEEE T. on Energy Con.*, Vol. 14, No. 3, pp. 454-459 (1999)

島 和男 (正員) 昭和 45 年 9 月 21 日生まれ。平成 7 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学第 2 専攻博士前期課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所入社。日立研究所勤務。回転電気機械の研究に従事。IEEE Member。平成 9, 12 年電気学会論文発表賞受賞。

井出一正 (正員) 昭和 39 年 1 月 5 日生まれ。昭和 63 年 3 月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所入社。現在、日立研究所主任研究員。回転電気機械の研究に従事。工学博士。日本応用磁気学会会員。IEEE Member。平成 4, 6 年電気学会論文発表賞, 平成 5, 13 年電気学会論文賞, 平成 11 年日本電機工業会奨励賞受賞。

高橋身佳 (正員) 昭和 24 年 5 月 11 日生まれ。昭和 47 年 3 月秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 日立製作所入社。日立研究所勤務。回転電気機械の研究に従事。現在、同所主管研究員。工学博士。日本応用磁気学会, 低温工学会会員。IEEE Senior Member。平成元年, 8, 13 年電気学会論文賞受賞。