A Calculation Method of Equivalent Circuit Constants with Mutual Leakage Reactance on Synchronous Machine with Damper Winding

Takashi Kano Member (Nagoya University)

Hiroki Nakayama Member (Polytechnic University)

Takahiro Ara Senior Member (Polytechnic University)

Toshiro Matsumura Member (Nagoya University)

Keywords: synchronous machine, field current, mutual leakage reactance, d-axis transient reactance, DC decay testing method, equivalent circuit

The mutual leakage reactance between the d-axis damper and field windings is ignored in the conventional d-axis equivalent circuit. It has been pointed out that the calculated value of the field transient current differs considerably from the measured value when this reactance is not taken into account. A method to determine this reactance has been reported previously, but this method has problems concerning the measurement precision. The authors have previously presented a calculation method of equivalent circuits, adapting a standstill test with a small-capacity DC power supply (DC decay testing method), using two synchronous machines of the same specifications (one with damper winding, the other without). Yet, this method is not practical because of the use of two machines.

This paper presents a calculation method of equivalent circuit constants taking into account the mutual leakage reactance to accurately represent the field transient current using a single machine.

Figure 1 shows an equivalently-transformed d-axis equivalent circuit considering the mutual leakage reactance x_{23} . The proposed method involves three steps. First the DC decay testing method, previously reported by the authors, is carried out to obtain three d-axis operational impedances ($X_{do}(js)$: when the field winding is opened; $X_{ds}(js)$: when the field winding is shorted; and $X_{dk}(js)$: when the field winding is shorted with an external resistance). The d-axis synchronous reactance x_d , the d-axis subtransient reactance x_d'' , and the d-axis transient reactance with open field winding x_d''' are obtained from $X_{ds}(js)$ and $X_{do}(js)$. The d-axis transient reactance x_d' cannot be measured by the DC decay testing method because the damper winding cannot be opened. So x_d' uses the extrapolated point from $X_{ds}(js)$ for its initial value.

Secondly x_d' is determined from x_d , x_d'' , x_d''' and x_d' by letting x_{23}' be zero by equivalent transformation. The d-axis damper winding impedance (r_{kd}' , x_{kd}') is determined from $X_{do}(js)$. The field winding impedance ($R_{f1}' (= r_f')$, x_f') is determined from $X_{ds}(js)$. The field winding impedance with an external resistance (R_{fK}' , x_{fK}') is determined from $X_{dk}(js)$.

Finally, x_d' is determined. x_d' is a physically-correct value when the field winding constants converge to $x_f' = x_{fK}'$ and $R_{fK}'/R_{f1}' = K$ with x_d' . Under this condition, the d-axis equivalent circuit constants taking into account the mutual leakage reactance are determined.

The proposed method was implemented on a 10kVA-200 V-319A-4P-50Hz salient-pole machine. Figure 2 shows the obtained operational impedances. Figure 3 shows r_{kd} for x_d' . Table 1 shows the circuit constants for the converged x_d' . Figure 4 shows the measured and calculated field currents for the sudden three-phase short-circuit test. In Fig. 4, the calculated value agrees with the measured value, demonstrating the validity of the proposed method.

Fig. 1. D-axis equivalent circuit considering x_{23}

Fig. 2. D-axis operational impedances

Fig. 3. x_d' - R_{fK}' characteristics

Table 1. D-axis equivalent circuit constants [Ω]

r_a	x_f'	x_{23}'	x_{ad}'	r_{kd}'	x_{kd}'	r_f'	x_{fK}'
0.160	0.221	0	3.34	0.595	1.72	0.051	0.860

Fig. 4. Measured and calculated field currents

相互漏れリアクタンスを考慮した 制動巻線付き同期機の等価回路定数算出法

正 員 狩野 隆志* 正 員 中山 大樹**
上級会員 荒 隆裕** 正 員 松村 年郎*

A Calculation Method of Equivalent Circuit Constants with Mutual Leakage Reactance on Synchronous Machine with Damper Winding

Takashi Kano*, Member, Hiroki Nakayama**, Member, Takahiro Ara**, Senior Member, Toshiro Matsumura*, Member

The mutual leakage reactance between the d-axis damper and field windings is ignored in the conventional d-axis equivalent circuit. It has been pointed out that the calculated value of the field transient current differs considerably from the measured value when this reactance is not taken into account. A method to determine this reactance has been reported previously, but this method has problems concerning the measurement precision. The authors have previously presented a calculation method of equivalent circuits, adapting a DC decay testing method, using two synchronous machines of the same specifications (one with damper winding, the other without). Yet, this method is not practical because of the use of two machines.

This paper presents a calculation method of equivalent circuit constants taking into account the mutual leakage reactance to accurately represent the field transient current using a single machine. The proposed method determines equivalent circuit constants by calculating the physically-correct d-axis transient reactance from the operational impedances when the field winding is shorted and when the field winding is shorted with an external resistance. The validity of the proposed method is demonstrated by comparing the measured values with the calculated values of field and armature currents at sudden three-phase short-circuit.

キーワード：同期機，界磁電流，相互漏れリアクタンス，直軸過渡リアクタンス，直流試験法，等価回路

Keywords: synchronous machine, field current, mutual leakage reactance, d-axis transient reactance, DC decay testing method, equivalent circuit

1. はじめに

同期機の等価回路定数は，三相突発短絡時，線間短絡時，非同期投入時などにおける電機子電流，界磁電流を算出するために必要となる。このためには，等価回路定数をいかに精度良く算出するかが重要な要素となる。一般に，直軸および横軸の等価回路定数は，電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-2130 や国際規格 IEC60034-4 などに規定されている試験から測定できる諸定数 ($x_d, x'_d, x''_d, T'_d, T''_d, x_q, x'_q, T'_q, T''_q$) を用いて算出している^{(1)~(3)}。これらの諸定数から算出する

直軸等価回路定数には界磁巻線と制動巻線との間の相互漏れリアクタンスを含んでいない。このため，突発短絡時における界磁電流に誤差を生じることが指摘されている⁽⁴⁾。この相互漏れリアクタンスを算出する方法として，三相突発短絡時の界磁電流の包絡値から直軸制動巻線の時定数を求める方法が提案されている⁽⁵⁾。この方法は，電機子時定数の小さい小容量機においては振動分が少ないので，中・大容量機に比べて包絡値を得ることが困難であるという問題がある。

以上の背景のもと，著者らは小容量機においても界磁過渡特性を精度良く表すことができる等価回路定数の算出法を検討している。これまで，基礎的検討として制動巻線の有無のみ異なる同一仕様の2台の同期機に直流試験法⁽⁶⁾を適用し，相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数を算出する方法を述べた⁽⁷⁾。また，従来の界磁過渡特性の検討⁽⁸⁾では，界磁巻線を開放した時の直軸過渡リアクタンスを定めていないことに起因して界磁電流の計算値が変化することを明らかにした⁽⁷⁾。しかし，本算出法は，供試機と

* 名古屋大学
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

** 職業能力開発総合大学校
〒229-1196 相模原市橋本台 4-1-1
Polytechnic University
4-1-1, Hashimoto-dai, Sagami-hara 229-1196

は別に制動巻線なしの回転子を製作しなければならず、実用的ではない。

そこで本論文は、1 台の同期機から相互漏れリアクタンスの効果を考慮した等価回路定数を算出する方法について述べている⁽⁹⁾。この方法は、等価変換⁽¹⁰⁾を施すことで相互漏れリアクタンスを等価的に零とした等価回路⁽¹¹⁾に対して、直流試験法によって得られる界磁巻線短絡時および界磁巻線外部抵抗短絡時の直軸演算子インピーダンスから直軸過渡リアクタンスを算出することにより、その等価回路定数を決定するものである。よって、得られる等価回路定数は、等価変換された同期機等価回路に対する値であるため、スロット寸法等から定まる等価回路定数値とは異なる⁽¹²⁾。しかしながら、従来から広く用いられているシンプルな（相互漏れリアクタンス要素を含まない）等価回路モデル⁽⁸⁾⁽¹³⁾を用いて、相互漏れリアクタンスの効果を精度良く加味した界磁特性を算出できる特徴がある。

本方法の妥当性については、三相突発短絡時における界磁電流の計算値および実測値との比較検討により明らかにしている。

2. 直軸等価回路定数の算出法

〈2・1〉 等価回路と演算子インピーダンスの関係 図 1 は、直軸および横軸等価回路である。ここで、 r_a ：電機子巻線抵抗、 x_ℓ ：電機子漏れリアクタンス、 x_{ad} 、 x_{aq} ：直軸および横軸電機子反作用リアクタンス、 x_{kd} 、 x_{kq} ：直軸および横軸制動巻線漏れリアクタンス、 r_{kd} 、 r_{kq} ：直軸および横軸制動巻線抵抗、 x_f ：界磁巻線漏れリアクタンス、 r_f ：界磁巻線抵抗、 x_{23} ：界磁巻線と制動巻線間の相互漏れリアクタンス、 s ：すべり、 $X_d(js)$ 、 $X_q(js)$ ：直軸および横軸演算子インピーダンスである。 $X_d(js)$ および $X_q(js)$ は、小容量の直流電源を用いた静置試験法として著者が既に提案する直流試験法から求めることができる⁽⁹⁾。

図 2 は、直軸演算子インピーダンス $X_d(js)$ の軌跡例である。図中の $X_{ds}(js)$ は界磁巻線抵抗短絡時 ($K = 1$)、 $X_{do}(js)$ は界磁巻線開放時における図 1(a) の端子 $a'-N'$ から見た演算子インピーダンスである。

次に、図 1(a) の直軸等価回路と図 2 の x_d 、 x_d'' 、 x_d''' および x_d' との関係について述べる。 x_d は、図 1(a) において $s = 0$ としたときの端子 $a'-N'$ 間から見た合成リアクタンスであり、直軸同期リアクタンスと呼ばれる。 x_d'' は、図 1(a) において $s = \infty$ としたときの端子 $a'-N'$ 間から見た合成リアクタンスであり、直軸初期過渡リアクタンスと呼ばれる。 x_d''' は、図 1(a) において界磁巻線が開放時に $s = \infty$ としたときの端子 $a'-N'$ 間から見た合成リアクタンスであり、界磁巻線開放時の直軸過渡リアクタンスと仮称する。 x_d' は、図 1(a) において制動巻線が開放時に $s = \infty$ としたときの端子 $a'-N'$ 間から見た合成リアクタンスであり、直軸過渡リアクタンスと呼ばれる。

横軸演算子インピーダンス $X_q(js)$ についても直軸の場合と同様に、直流試験法により算出することができる。 $X_q(js)$

図 1 相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路
Fig. 1. Equivalent circuits with mutual leakage reactance x_{23} .

図 2 直軸演算子インピーダンス軌跡例
Fig. 2. Example of d-axis operational impedances.

から $s = 0$ および $s = \infty$ の横軸同期リアクタンス x_q および横軸初期過渡リアクタンス x_q' を求めることができる。 x_q は、図 1(b) において $s = 0$ としたときの端子 $a'-N'$ 間から見た合成リアクタンスである。 x_q'' は、同様に $s = \infty$ における端子 $a'-N'$ 間から見た合成リアクタンスに対応する。

〈2・2〉 直軸等価回路と過渡リアクタンスの関係 図 1 (a) の直軸等価回路において、これら端子 $a'-N'$ 間から見たリアクタンス (x_d , x_d' , x_d'' , x_d''') と等価回路定数との関係を示すと (1)~(4) 式となる。

$$x_d = x_\ell + x_{ad} \dots \dots \dots (1)$$

$$x_d' = x_\ell + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{23} + \frac{1}{\frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_{kd}}}}} \dots \dots \dots (2)$$

$$x_d'' = x_\ell + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{23} + x_{kd}}} \dots \dots \dots (3)$$

$$x_d''' = x_\ell + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{23} + x_f}} \dots \dots \dots (4)$$

(1)~(4) 式の右辺の定数 (x_ℓ , x_{ad} , x_{23} , x_{kd} , x_f) は、すべて未知数である。また、左辺の定数 (x_d , x_d' , x_d'') は、直流試験

図3 等価変換した直軸等価回路

Fig. 3. Equivalently-transformed d-axis equivalent circuit.

法によって求めることができる。しかし、 x_d' については、制動巻線を開放した状態で直流試験法を実施することができないので、この試験から求められない。したがって、(1)～(4)式の未知数は、6つ(x_{ℓ} , x_{ad} , x_{23} , x_{kd} , x_f , x_d')となるためにこのままでは連立方程式の解を得ることができない。

〈2・3〉直軸等価回路の等価変換 図3は、文献(10)を参考に図1(a)を等価変換した直軸等価回路である。 α は、変換係数である。 α を変化すれば等価回路定数も変化する。よって、相互漏れリアクタンス x_{23}' が零でありながら、図1と等価な回路モデルも存在する⁽¹¹⁾。しかしながら、このときの同期機諸定数の値は α には依存しない。例えば、(5)式は、三相突発短絡時における界磁電流 i_f の計算式として広く知られている⁽⁸⁾。

$$i_f = i_{f0} + \frac{x_d - x_d'}{x_d'} i_{f0} \left\{ \varepsilon^{-t/T_d'} - \left(1 - \frac{T_{kd}}{T_d''}\right) \varepsilon^{-t/T_d''} - \frac{T_{kd}}{T_d''} \varepsilon^{-t/T_a} \cos \omega_0 t \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 i_{f0} : 短絡前界磁電流値、 T_d' : 直軸短絡過渡時定数、 T_d'' : 直軸短絡初期過渡時定数、 T_a : 電機子時定数、 T_{kd} : 直軸制動巻線の時定数、 ω_0 : 同期速度である。

(5)式の右辺において、 T_{kd} を図3の等価回路定数から求めると、

$$T_{kd} = \frac{x_{kd}'}{\omega_0 r_{kd}'} = \frac{\alpha^2 x_{kd}}{\omega_0 \alpha^2 r_{kd}} = \frac{x_{kd}}{\omega_0 r_{kd}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、 α に依存しないことがわかる。同様に(x_d , x_d' , T_d' , T_d'' , T_a)についても図3から求めることができ、 α に依存しない。

以下、本論文では、図3において x_{23}' を零とする後述の図4に示す反復計算により、相互漏れリアクタンス $x_{23}' = 0$ 、かつ、相互漏れリアクタンスの突発短絡時界磁電流への影響を考慮した等価回路定数を算出する。

〈2・4〉直軸等価回路定数の算出法 (1)～(4)式において、 $x_{23} = 0$ とすること、および直流試験法から求められない x_d' を仮定することで、その他の未知数を解くことができる。図4は、提案する直軸等価回路定数の算出法である。以下、その方法を述べる。

始めに、直流試験法から界磁巻線開放時、界磁巻線短絡時、および界磁巻線外部抵抗短絡時の直軸演算子インピー

図4 直軸等価回路定数の算出法

Fig. 4. Calculation method of d-axis equivalent circuit constants.

ダンス $X_{do}(js)$, $X_{ds}(js)$, および $X_{dk}(js)$ を算出する。これら直軸演算子インピーダンスから、定数(x_d , x_d' , x_d'')を求める。 x_d' は、直流試験法から求めることができないので、 $X_{ds}(js)$ の軌跡から補外(図2)によって求める⁽¹⁴⁾。これを初期値 x_{d1}' として、(4)式の x_d' に代入する。これより、(1)～(4)式の左辺定数(x_d , x_d' , x_d'' , x_d')が定まる。

次に、直軸等価回路定数を求める。 $x_{23}' = 0$ とする電機子漏れリアクタンス x_{ℓ}' を(1)～(4)式より求めると、

$$x_{\ell}' = \frac{(x_d x_d'' - x_d' x_d''') - \sqrt{(x_d - x_d''')(x_d - x_d')(x_d' - x_d'')(x_d' - x_d''')}}{(x_d - x_d''') - (x_d' - x_d'')} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

直軸電機子反作用リアクタンス x_{ad}' は、(1)式により x_d から x_{ℓ}' を差し引くことで求まる。

直軸制動巻線インピーダンス(r_{kd}' , x_{kd}')は、前述より求める定数(x_{ℓ}' , x_{ad}')を用いて界磁巻線開放時の直軸演算子インピーダンス $X_{do}(js)$ から最小二乗法によって同定する。ここでは同定精度を高めるために直軸制動巻線回路を2回路において同定し、同定した値を合成することにより r_{kd}' , x_{kd}' を同定している。同定方法については文献(6), (14)に詳述している。

界磁巻線短絡時のインピーダンス($R_{f1}' (= r_f')$, x_f')は、前述より求める定数(x_{ℓ}' , x_{ad}' , r_{kd}' , x_{kd}')を用いて界磁巻線短絡時

の直軸演算子インピーダンス $X_{ds}(js)$ から最小二乗法によって同定する。

以上の方法によって求めた直軸等価回路定数は、 x'_d を仮定した場合であるので、界磁巻線外部抵抗短絡時のインピーダンスを用いてこれら定数の良否判定を行う。界磁巻線外部抵抗短絡時のインピーダンス ($R'_{fK}(=K \cdot r'_f)$, x'_{fK}) は、前述より求まる定数 (x'_ℓ , x'_{ad} , r'_{kd} , x'_{kd}) を用いて界磁巻線外部抵抗短絡時の直軸演算子インピーダンス $X_{dk}(js)$ から最小二乗法によって同定する。同定した界磁巻線短絡時および外部抵抗短絡時の界磁巻線インピーダンスにおいて、 $R'_{fK}/R'_{f1} = K$ および $x'_f = x'_{fK}$ の関係を判別する。この関係が成り立たない場合は、初期値 x'_{d1} を $\Delta x'_{d1}$ だけ変化させ、成り立つまで同定を繰り返す。なお、電機子巻線抵抗 r_a については、直流電圧降下法から算出する。

x'_d は、図3の直軸等価回路より、

$$x'_d = x_\ell + (1 - \alpha)x_{ad} + \frac{1}{\frac{1}{\alpha x_{ad}} + \frac{1}{\alpha^2(x_{23} + x_{ad}) - \alpha x_{ad} + \alpha^2 x_f}} \quad (8)$$

$$= x_\ell + \frac{x_{ad}(x_{23} + x_f)}{x_{ad} + x_{23} + x_f} \dots \dots \dots (8)$$

となり、 α とは無関係となっている。すなわち、 x'_d は仮定した α によらず一つの値に定まる。

横軸等価回路定数については、直軸等価回路と同様に求める。まず、直流試験法から横軸演算子インピーダンス $X_q(js)$ を算出し、 $s = 0$ における横軸同期リアクタンス x_q を求める。横軸電機子反作用リアクタンス x'_{aq} は、(1) 式と同様に x_q から直軸等価回路で算出した x'_ℓ の値を差し引くことで求まる。横軸制動巻線インピーダンス (x'_{kq} , r'_{kq}) は、算出した定数 (x'_ℓ , x'_{aq}) を用いて横軸演算子インピーダンス $X_q(js)$ から最小二乗法によって同定する。なお、直軸の場合と同様に横軸制動巻線回路は、並列2回路として同定した後に合成する。以上の方法により直軸および横軸等価回路定数が算出される。

3. 実施例と考察

〈3・1〉 直軸過渡リアクタンスおよび等価回路定数の算出

結果 供試機は、積層磁極突極形同期機 (10kW, 200V, 31.9A, 50Hz) を用いた。表1は、供試機の仕様である。演算子インピーダンスは、文献(6)に示すように直流試験法を実施した。図5は、回転子を直軸の位置に固定したときの界磁巻線開放時、界磁巻線短絡時 ($K = 1$)、および外部抵抗短絡時 ($K = 10$) における直軸演算子インピーダンス $X_{do}(js)$, $X_{ds}(js)$, $X_{dk}(js)$ の軌跡である。これより、 $x_d = 3.56 [\Omega]$, $x'_d = 0.706 [\Omega]$, $x''_d = 1.32 [\Omega]$ であった。

図6は、界磁巻線を開放した状態で、回転子を横軸の位置に固定したときの横軸演算子インピーダンス $X_{qo}(js)$ である。これより、 x_q および x'_q は、それぞれ $2.20 [\Omega]$, $0.766 [\Omega]$ であった。

これら x_d , x'_d , x''_d , x_q , x'_q , $X_{do}(js)$, $X_{ds}(js)$, $X_{dk}(js)$, および $X_{qo}(js)$ を用いて2章の方法により、直軸および横軸

表1 供試機の仕様

Table 1. Specifications of the tested machine.

Number of phases	3	Gap (equal)	5.0mm
Rated capacity	10kW	Number of poles	4
Rated voltage	200V	Frequency	50Hz
Rated current	31.9A	Interval of damper bar (ele.deg.)	14
Number of turns of the field winding per pole		378	
Number of parallel circuits of the field winding		1	
Number of effective serie conductors of armature winding		177.2	
Number of damper bars per pole		7

図5 直軸演算子インピーダンス

Fig. 5. D-axis operational impedances.

図6 横軸演算子インピーダンス

Fig. 6. Q-axis operational impedance.

図7 x'_d に対する x'_f の値

Fig. 7. x'_d - x'_f characteristics.

の等価回路定数を算出した。 x'_d の初期値 x'_{d1} は、 $X_{ds}(js)$ の軌跡を用いて補外によって求めた結果 $0.790 [\Omega]$ を用いた。

図7および図8は、 x'_d を変化させたときの界磁巻線抵抗 (R'_{f1} , R'_{fK})、およびリアクタンス (x'_f , x'_{fK}) の関係である。図7および図8の実線と点線の交わる点が $R'_{fK}/R'_{f1} = 10$ および $x'_f = x'_{fK}$ の関係を満たす x'_d であり、 $x'_d = 0.901 [\Omega]$ となった。このとき x'_ℓ は、 $0.221 [\Omega]$ となり、等価回路定数の算出結果は表2のとおりである。

〈3・2〉 直軸過渡リアクタンスの比較 表3は、各種算出法から求めた直軸過渡リアクタンス x'_d である。表3の(1)は、本方法より算出した値である。表3の(2)は、

図 8 x'_d に対する R'_{fK} の値
Fig. 8. x'_d - R'_{fK} characteristics.

表 2 等価回路定数 [Ω]
Table 2. Equivalent circuit constants [Ω].

D-axis		Q-axis	
r_a	0.160	r_a	0.160
x'_j	0.221	x'_j	0.221
x_{23}'	0		
x_{ad}'	3.34	x_{aq}'	1.98
r_{kd}'	0.595	r_{kq}'	0.295
x_{kd}'	1.72	x_{kq}'	0.868
r_f'	0.051		
x_f'	0.860		

表 3 直軸過渡リアクタンス x'_d
Table 3. D-axis transient reactance x'_d .

No.	determination method of x'_d	x'_d
(1)	method of <2・4>	0.901
(2)	sudden three-phase short-circuit test	0.902
(3)	DC decay testing method (machine without damper)	0.897

JEC-2130 に記載される三相突発短絡試験より算出した値である。表 3 の (3) は、制動巻線を配置していないことのみ異なる同一仕様の供試機を用いて直流試験法を実施し、界磁巻線短絡時の直軸演算子インピーダンスから算出した値である。

表 3 の (3) における x'_d は、制動巻線の影響を受けずに算出できることから、この値を基準に本方法の値と比較すると 0.45% ($= ((0.901 - 0.897)/0.897) \times 100$) の差となった。このことから、本方法による x'_d は精度よく算出されたことが確認できる。

〈3・3〉 三相突発短絡電流の実測値と計算値の比較検討

三相突発短絡試験は、図 9 に示すように原動機であるベクトル制御誘導電動機 (IM) と被試験機である同期発電機 (SG) を直結し、JEC-2130 の手順により行った。三相突発短絡のためのスイッチとして水銀リレーを使用し、短絡時の界磁電流および電機子電流をアナライジングレコーダ (サンプリング間隔 20 [μs]) を用いて測定した。短絡前の無負荷電圧は、44.9 [V] (線間電圧の実効値)、界磁電流 1.05 [A]、短絡前後の回転速度 1495 [min^{-1}] であった。また、シミュレーションも実施した。そこでは、電圧・磁束鎖交方程式をシミュレーション用ソフト ACSL⁽¹⁵⁾ を用いて解くことに

図 9 三相突発短絡回路
Fig. 9. Sudden three-phase short-circuit.

図 10 界磁電流の実測値と計算値
Fig. 10. Measured and calculated field currents.

図 11 電機子電流の実測値と計算値
Fig. 11. Measured and calculated armature currents.

より、界磁電流および電機子電流の計算を行った。

本算定法で等価回路定数を算定すれば、 $x_{23} = 0$ としたシンプルな等価回路モデルを用いても、従来法で相互漏れリアクタンス x_{23} を考慮しないために生じていた誤差を低減できる。例えば、図 10 は、三相突発短絡時の界磁電流である。実線が実測値、鎖線が表 2 の等価回路定数を用いた計算値である。界磁過渡電流の第 1 番目のピーク (図 10 の時刻 $t = t_1$ の

ポイント)における計算値は5.16 Aであり、実測値(5.05 A)を基準としたときの差は2.2% ($= ((5.16-5.05)/5.05) \times 100$)である。よって、計算値と実測値は良く一致していることから、本方法による相互漏れリアクタンスの効果を考慮した等価回路定数算出法の妥当性が確認できる。

図11は、三相突発短絡時の電機子電流である。実線が実測値、鎖線が表2の等価回路定数を用いた計算値である。計算値と実測値を比較するとよく一致していることが確認できる。

4. まとめ

界磁巻線および制動巻線間の相互漏れリアクタンスを考慮した直軸等価回路定数および横軸等価回路定数の算出法について述べた。まとめると以下のとおりである。

(1) 直流試験法から求まる界磁巻線短絡時および外部抵抗短絡時の直軸演算子インピーダンスを用いて、相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数を算出する方法を示した。

(2) 本論文の算出結果は、相互漏れリアクタンスを零とした等価回路モデルの形をとるが、相互漏れリアクタンス x_{23} を考慮しないために生じていた誤差が低減できた。

(3) 本論文の算出法による等価回路定数を用いた界磁過渡特性は、三相突発短絡時における界磁電流の計算値と実測値との比較検討から精度良く計算できることを明らかにした。

最後に、日頃、御提言いただく(株)東芝平松大典様に感謝の意を表します。

(平成18年10月13日受付, 平成19年2月9日再受付)

文 献

- (1) 電気学会電気規格調査会:「電気学会 電気規格調査会標準規格同期機 (JEC-2130-2000)」, 電気書院 (2001)
- (2) International Electrotechnical Commission Standard: "Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Test (IEC 60034-4)", International Electrotechnical Commission (IEC) (1985)
- (3) R.H. Park: "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines Part I", AIEE (1929)
- (4) I.M. Canay: "Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagrams of the Synchronous Machine", *IEEE Trans.*, Vol. PASS-88, No. 7 (1969)
- (5) Y. Takeda and B. Adkins: "Determination of synchronous machine parameters Allowing for unequal mutual inductances", *PROC. IEE*, Vol. 121, No. 12, pp. 1501-1504 (1974)
- (6) T. Ara, T. Akima, and S. Oda: "A Method to Predict Transient Constant for Synchronous Machine", *IEEJ Trans. IA*, Vol. 115, No. 6 pp. 694-701 (1995-6)
荒 隆裕・秋間紳樹・小田莊一:「同期機の過渡諸定数推定法」, 電学論 D, **115**, 6, pp. 694-701 (1995-6)
- (7) T. Kano, S. Yamamoto, and T. Ara: "A Calculation Method of Field Current of Synchronous Machines at Sudden Short-circuit", *IEEJ Trans. IA*, Vol. 124, No. 3, pp. 304-311 (2004-3)
狩野隆志・山本 修・荒 隆裕:「同期機の突発短絡時における界磁電流算出法」, 電学論 D, **124**, No. 3, pp. 304-311 (2004-3)
- (8) 猪狩武尚: 電気機械理論, コロナ社 (1977)
- (9) H. Nakayama, T. Kano, S. Yamamoto, and T. Ara: "A Calculation Method of Equivalent Circuit Constants with Mutual Leakage Reactance", *IEEJ RM-05-141*, pp. 7-11 (2005-10)

中山大樹・狩野隆志・山本 修・荒 隆裕:「同期機の相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数算出法」, 電学回転機研資 RM-05-141, pp. 7-11 (2005-10)

- (10) 山村 昌: 交流モータの解析と制御, オーム社 (1988)
- (11) I.M. Canay: "Determination of model parameters of synchronous machines", *IEE Proc.*, Vol. 130, Pt. B, No. 2, pp. 86-94 (1983-3)
- (12) J. Tamura, R. Takahashi, T. Takazawa, Y. Tada, and A. Kurita: "Characteristics of Canay Inductance of Synchronous Machines and Its Effects on Transient Stability", *IEEJ Trans. IA*, Vol. 124, No. 7, pp. 706-715 (2004-7)
田村淳二・高橋理音・高澤 毅・多田泰之・栗田 篤:「同期機における Canny インダクタンスの特性と過渡安定度に対する影響について」, 電学論 D, **124**, 7, pp. 706-715 (2004-7)
- (13) C. Concordia: *Synchronous Machines*, Wiley, New York (1951)
- (14) T. Ara, A. Hiraga, and S. Yamamoto: "Determination of Equivalent Circuit Constants of Synchronous Machine from the Extended Dalton-Cameron Method", *IEEJ Trans. IA*, Vol. 121, No. 1, pp. 66-73 (2001-1)
荒 隆裕・平賀 章・山本 修:「拡張ダルトン-カメロン法による同期機の等価回路定数算出法」, 電学論 D, **121**, 1, pp. 66-73 (2001-1)
- (15) 連続型シミュレーションソフトウェア「ACSL」, MGA Software

狩 野 隆 志 (正員) 1977年11月30日生。2003年3月, 職業能力開発総合大学校研究課程工学研究科電気・情報専攻修了。同年4月, 雇用・能力開発機構に入り岡山職業能力開発促進センター(現:岡山センター)勤務。2006年4月, 名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期に社会人入学。2007年4月職業能力開発総合大学校講師, 現在に至る。

中 山 大 樹 (正員) 1981年3月13日生。2004年3月職業能力開発総合大学校電気システム工学科卒業。2006年3月, 同校研究課程工学研究科電気・情報専攻修了。同年4月, 富士電機システム(株)に入社, 現在に至る。

荒 隆 裕 (上級会員) 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)に入り浜松総合高等職業訓練校勤務を経て, 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。講師, 助教授を経て, 2000年4月教授。2007年4月学生部長, 現在に至る。主として, 電気機械の解析と制御に関する研究に従事。工学博士。日本産業技術教育学会会員。IEEE 会員。

松 村 年 郎 (正員) 1951年5月1日生。1979年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。同年4月同大学助手。1987年2月同大学講師。1989年3月京都大学講師。1992年1月名古屋大学助教授。1995年4月同大学教授, 現在に至る。工学博士。主として, 大電流遮断, 電気エネルギーの有効利用に関する研究に従事。IEEE 会員。