同期機等価回路定数の同定 —直流減衰電流を指数関数の和で近似する方法—

正員 荒 隆 裕 (職業能力開発大)
正員 秋 間 紳 樹 (大阪職業能力開発短期大)
正員 小 田 莊 一 (職業能力開発大)

Identification of Element-Values in the Equivalent Circuit of Synchronous Machine —Method by Approximate Expression of D. C. Decaying Current with Exponential Function—

Takahiro Ara, Member (The Polytechnic University), Tsunaki Akima, Member (Osaka Polytechnic College), Shoichi Oda, Member (The Polytechnic University)

This paper is concerned with a new method that identifies the equivalent circuit constant of synchronous machines using D. C. decaying current. The procedure is as follows;

- (1) D. C. voltage is applied to the armature winding (two terminals with the third one open) of a stationary synchronous machine through a resistance. When two terminals are closed, the winding is short-circuited and the current in the armature winding decays. The whole process of current decay is recorded.
- (2) The current decay is approximated by the exponential function, and values of the index number and coefficient are identified with the least square method.
- (3) The equivalent circuit constant is identified from the relationship which is formed between these constants and the exponential function.

The starting performance of synchronous motor with damper winding is calculated using the method and agrees with actual data.

The test capacity is needed about 0.1% of a starting capacity with 50% voltage.

キーワード：同期機，等価回路定数，始動特性，直流減衰電流

1. ま え が き

同期機の最大出力，同期化力，過渡安定度，自己始動時の始動特性などの動作特性を把握するためには，等価回路定数が必要となる。JEC-114⁽¹⁾ および IEC Pub. 34-4⁽²⁾ には，これら等価回路定数のうち電機子抵抗と直，横軸の同期リアクタンスの測定法が規格化されているが，界磁および始動(制動)巻線の抵抗と漏れリアクタンスなどの定数を測定する方法は見当たらない。また，これら試験法は，交流試験によって測定する方法であり，同期機の単機容量の増大化は，試験設備の大容量化を伴い，製造工場においてその大容量化に十分対応できなくなっている。このため小容量電源を用いた静止試験によって同期機の等価回路定数を精度良く測定する方法の確立が求められている。

小容量電源を用いた静止試験による回路定数の測定法としては，交流電源を用いる場合と直流電源を用いる場合に

大別できる。

交流電源を用いる場合は，可変周波数電源を用いて端子から見た周波数特性を求め，これらを用いて最小二乗法によって回路定数を同定する方法であり，IEEE Std 115A⁽³⁾ に記載されている。この方法によって等価回路定数を精度良く同定するためには，1.0 Hz 以下の非常に低い周波数まで可変できる電源を必要とする。また，低周波数領域での周波数特性を精度良く測定することは一般に困難である。

一方，直流電源を用いる方法としては，電機子巻線二相間に直流電源を接続して電流を流した後，この二相間を短絡したときあるいは二相間に直流電圧をステップ的に印加したときの過渡波形から回路定数を同定する方法が提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これらは，同期機諸定数(T_d' , T_d'' , T_{d0} , X_d , X_q など)を求める理論式に基づき同定を行っている。

これらに対して筆者らが提案する方法は，誘導機にも適

用できる T 形等価回路の諸定数に関して、その理論的な関係式に基づき同定を行っている。この方法は、まず、第 1 段階として端子間短絡時の電機子直流減衰電流を指数関数の和で近似し、この関数の係数および指数を最小二乗法で同定し、第 2 段階としてこれらと上述の端子間短絡時の過渡現象回路⁽⁶⁾との関係式から最小二乗法によって等価回路定数を同定する方法⁽⁷⁾⁽⁸⁾である(以下指数関数法と呼ぶ)。

本論文では、供試機として始動巻線付き突極形同期電動機の等価回路定数を同定している。この同定値を用いて同期電動機が、直流励磁なしで誘導電動機と同じ原理で始動したときの始動特性を計算し、実測値との比較・検討より指数関数法による等価回路定数同定法の妥当性を示している。

2. 理論式の導出

ここでは、静止した始動(制動)巻線付き突極形同期機の等価回路定数を同定するための関係式の導出方法について述べる。

同期機は、電機子回路、回転子回路を直軸回路(直軸成分)と横軸回路(横軸成分)に分解して取り扱われる。これら、直軸および横軸の各回路は、以下の手順で決定することができる。まず、電機子巻線の二相間(U-V)に単相交流電源を接続し、電機子巻線に低電圧を印加する。直軸回路は、回転子を移動させ界磁巻線間に接続した電流計の目盛りが最大となる位置で回転子を固定した場合である。横軸回路は、これが最小となる位置で回転子を固定した場合である。

〈2・1〉 直軸回路の場合 図 1 は、電機子二相間に直流電源を接続した場合の直軸回路である。界磁巻線の回路は短絡されているものとする。まず、スイッチ SW が①のとき、電機子二相間には一定電流 I_{DC} が流れる。次に、SW を②に切り換えると減衰電流 i_1 が流れる。

SW を①から②へ切り換えたときのアーク電圧を無視すれば電圧および電流波形は、図 2 となる。

この過渡状態における各回路の電圧方程式は、

$$r_a i_1(t) + (L_l + M_{ad}) \frac{di_1(t)}{dt} - M_{ad} \frac{di_2(t)}{dt} - M_{ad} \frac{di_3(t)}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$-M_{ad} \frac{di_1(t)}{dt} + r_{kd} i_2(t) + (L_{kd} + M_{ad}) \frac{di_2(t)}{dt} + M_{ad} \frac{di_3(t)}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$-M_{ad} \frac{di_1(t)}{dt} + M_{ad} \frac{di_2(t)}{dt} + r_f i_3(t) + (L_f + M_{ad}) \frac{di_3(t)}{dt} = 0 \quad (3)$$

で表わされる⁽⁶⁾。

ただし、 r_a, L_l : 電機子巻線の抵抗、漏れインダクタンス、 M_{ad} : 直軸励磁インダクタンス、 r_{kd} ,

図 1 直軸回路

Fig. 1. Circuit of direct-axis.

図 2 電圧および電流の変化

Fig. 2. Input voltage and current response.

L_{kd} : 直軸始動(制動)巻線の抵抗、漏れインダクタンス、 r_f, L_f : 界磁巻線の抵抗、漏れインダクタンス

L_1, L_2, L_3 は自己インダクタンスであり、各巻線の漏れインダクタンスとの間には、 $L_1 = L_l + M_{ad}$, $L_2 = L_{kd} + M_{ad}$, $L_3 = L_f + M_{ad}$ の関係がある。また、初期条件は $i_1(0) = I_{DC}$, $i_2(0) = i_3(0) = 0$ である。

次に、(1)~(3)式をラプラス変換し、電機子巻線を流れる電流を求めると、(4)~(7)式で表わされる。

$$I_1(p) = \frac{(xp^2 + yp + z)I_{DC}}{ap^3 + bp^2 + cp + d} \quad (4)$$

$$= \frac{(xp^2 + yp + z)I_{DC}}{a(p-m_1)(p-m_2)(p-m_3)} \quad (5)$$

$$= \frac{A_1}{p-m_1} + \frac{A_2}{p-m_2} + \frac{A_3}{p-m_3} \quad (6)$$

ただし、 p はラプラス演算子である。

$$\left. \begin{aligned} a &= L_1 L_2 L_3 - (L_1 + L_2 + L_3) M_{ad}^2 + 2 M_{ad}^3 \\ b &= r_a L_2 L_3 + r_{kd} L_1 L_3 + r_f L_1 L_2 \\ &\quad - (r_a + r_{kd} + r_f) M_{ad}^2 \\ c &= r_a r_{kd} L_3 + r_{kd} r_f L_1 + r_a r_f L_2 \\ d &= r_a r_{kd} r_f \\ x &= L_1 L_2 L_3 - (L_1 + L_2 + L_3) M_{ad}^2 + 2 M_{ad}^3 \\ y &= r_{kd} L_1 L_3 + r_f L_1 L_2 - (r_{kd} + r_f) M_{ad}^2 \\ z &= L_1 r_{kd} r_f \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(6)式を逆変換すると減衰電流 $i_1(t)$ は、

$$i_1(t) = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t} + A_3 e^{m_3 t} \quad (8)$$

となる。

図 2 の減衰電流を(8)式で近似すれば各指数関数の係数(A_1, A_2, A_3)および指数(m_1, m_2, m_3)は、各時刻における減衰電流の実測値との誤差の二乗和が最小となる方法によ

って同定することができる。

次に各等価回路未知定数を同定するために、これら未知定数を同定した指数関数の係数および指数との関係を求める。まず、(4)式と(5)式の右辺を比較すると、

$$-\frac{b}{a} = m_1 + m_2 + m_3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{c}{a} = m_1 m_2 + m_3 m_1 + m_2 m_3 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$-\frac{d}{a} = m_1 m_2 m_3 \quad \dots\dots\dots (11)$$

の関係が得られる。次に(5)式と(6)式の右辺を比較すると、

$$\frac{x}{a} = (A_1 + A_2 + A_3)/I_{DC} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{y}{a} = -\{(m_2 + m_3)A_1 + (m_1 + m_3)A_2 + (m_1 + m_2)A_3\}/I_{DC} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{z}{a} = (A_1 m_2 m_3 + A_2 m_1 m_3 + A_3 m_1 m_2)/I_{DC} \quad \dots\dots\dots (14)$$

の関係が得られる。

(9)～(14)式は、等価回路未知定数で表現される非線形連立方程式である。これらの式の各右辺は、同定した係数(A_1, A_2, A_3)および指数(m_1, m_2, m_3)を代入することによって決定される。

また、各等価回路未知定数は、(9)～(14)式の左辺に含まれるので、各式の左辺と右辺との差の二乗和が最小になる方法によって同定することができる。

〈2・2〉 横軸回路の場合 直軸回路の場合と同様に図3の横軸回路でスイッチSWを①から②へ切り換えたときの減衰電流を求める。

図3の各回路の電圧方程式は図1と同様にSWを切り換えたときのアーク電圧を無視すれば、

$$r_a i_1(t) + (L_l + M_{aq}) \frac{di_1(t)}{dt} - M_{aq} \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$-M_{aq} \frac{di_1(t)}{dt} + r_{kq} i_2(t) + (L_{kq} + M_{aq}) \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

で表わされる。

ただし、 r_a, L_l : 電機子巻線の抵抗、漏れインダクタンス、 M_{aq} : 横軸励磁インダクタンス、 $r_{kq},$

L_{kq} : 横軸始動巻線の抵抗、漏れインダクタンス

L_1, L_2 は自己インダクタンスであり、 $L_1 = L_l + M_{aq}, L_2 = L_{kq} + M_{aq}$ の関係がある。また、初期条件は $i_1(0) = I_{DC}$,

図3 横軸回路

Fig. 3. Circuit of quadrature-axis.

$i_2(0) = 0$ である。

(15)式および(16)式をラプラス変換して電機子巻線を通る電流を求めると、次式で表わされる。

$$I_1(p) = \frac{(xp + y)I_{DC}}{ap^2 + bp + c} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$= \frac{(xp + y)I_{DC}}{a(p - m_1)(p - m_2)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$= \frac{A_1}{p - m_1} + \frac{A_2}{p - m_2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 $a = L_1 L_2 - M_{aq}^2, b = L_1 r_{kq} + L_2 r_a, c = r_a r_{kq}, x = L_1 L_2 - M_{aq}^2, y = L_1 r_{kq}$

直軸回路の場合と同様に(19)式において、ラプラス逆変換すると電機子巻線を通る減衰電流の式は、

$$i_1(t) = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t} \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。

これら m_1, m_2, A_1, A_2 と a, b, c, x, y の関係を求めると、

$$\frac{b}{a} = -(m_1 + m_2) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\frac{c}{a} = m_1 m_2 \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\frac{x}{a} = (A_1 + A_2)/I_{DC} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\frac{y}{a} = -(A_1 m_2 + A_2 m_1)/I_{DC} \quad \dots\dots\dots (24)$$

が得られる。

直軸回路の場合と同様、 A_1, A_2, m_1, m_2 は横軸回路における減衰電流を(20)式と近似し、実測値から最小二乗法によって同定できる。次に、これら定数を(21)～(24)式の右辺に代入し、横軸等価回路の未知定数を変化させたときの左辺と右辺との差の二乗和が最小になる方法によってこれら未知定数を同定できる。

なお、これら A_1, A_2, m_1, m_2 と未知の等価回路定数との関係式は、(17)～(19)式より容易に求めることができる。これら関係式を(20)式へ代入し、未知定数を変化させたときの各時刻における $i(t)$ と実測値との差の二乗和が最小になる方法によって同定することもできる。

3. 同定手順

等価回路未知定数は、前述したように二段階の手順によって同定している。図4および図5の同定手順は、直軸等価回路の場合を例として示している。

第1段階は、図4に示すように実測した直流減衰電流から(8)式の指数関数の係数(A_1, A_2, A_3)および指数(m_1, m_2, m_3)を同定する。

これは、(8)式により $i_1(t)$ を計算し、その時刻の実測値 $i(t)$ との差の二乗 $(i(t) - i_1(t))^2$ を作り、これを各時刻について加算した誤差評価関数 $\Delta\alpha$ に対して、これが最小となるよう未知定数(A_3 を除き A_1, A_2, m_1, m_2, m_3 , これらを $X(K), K=1 \sim 5$ で表わす)の値を変化しこれを同定する。未知定数は、初期値として十分大きな値を仮定し、

図 4 指数関数の係数の同定手順
Fig. 4. Identification method of values in exponential function.

各定数をつづつ変化させ、各定数 $X(K)$ の一定変化分 ΔX を減じながら $\Delta\alpha$ の最小化を行い、これが一巡したら一定変化分 ΔX の値を 1 桁だけ小さくし、未知定数に対して必要な精度まで ΔX の桁数を下げ同定を終了する。

第 2 段階では、まず、(9)～(14)式の右边に第 1 段階で同定した $A_1 \sim A_3, m_1 \sim m_3$, および I_{DC} を代入する。一方、左边には未知定数 ($M_{ad}, L_{kd}, r_{kd}, L_f, r_f$) および電機子巻線抵抗 r_a , 電機子漏れインダクタンス L_l を (7) 式に適用して得た $a \sim d, x \sim z$ を代入して、各式の $B_i = (\text{左辺} - \text{右辺})^2, (i=1 \sim 6)$ を計算する。さらに重み係数 C_n として、 $C_n = (B_1 \sim B_6 \text{ の最大値}) / B_n, (n=1 \sim 6)$ を定義し、誤差評価関数 $\Delta\beta$ として、 $\Delta\beta = \sum \{(\text{左辺} - \text{右辺})^2 \times C_n\}$ ($\sum$ は (9)～(14) 式の合計の意味) を作り、これが最小となるように未知定数の値を変化し、これを同定する。

$\Delta\beta$ の最小化は、未知定数に対して、第 1 段階と同様な手法を使用するので説明を省略する。重み係数 ($C_1 \sim C_6$) は、(9)～(14) 式の各式の (左辺 - 右辺) の二乗の桁数をそろえ、各式とも同等の重みでの評価ができるので、短い計算時間で精度の向上が計られる。

横軸等価回路についても同様な手順で同定するが、一般に減衰電流は二つの指数関数の和 ((20) 式参照) で表わされるので、同定は容易であり、説明を省略する。

r_a は、図 1 の回路でスイッチが①の状態での電圧・電流より求めることができる。また、 L_l は、ある値に仮定している。これは、同定した $A_1 \sim A_3, m_1 \sim m_3$ が一定であるから L_l の値により一義的に決まる他の定数が存在し、 L_l

図 5 等価回路定数同定手順
Fig. 5. Identification method of constants in equivalent circuit.

は任意の値に仮定できるからである⁽⁹⁾。

4. 等価回路定数の同定例および評価

〈4・1〉 等価回路定数の同定 低減電圧始動時においてインピーダンスを線形と近似できる始動巻線付き突極形同期電動機 (表 1) を供試機として、これの等価回路定数を同定した。

直流減衰電流試験は、回転子を直軸あるいは横軸の位置に固定し、直軸においては界磁巻線を短絡した場合 ($K=1$) および界磁回路の抵抗が界磁巻線抵抗の 10 倍となるよう外部抵抗によって短絡した場合 ($K=10$)、横軸においては界磁巻線を開放した状態で、図 6 に示す直流減衰電流試験回路による試験を実施した。

各、直軸および横軸の直流減衰電流は、試験電流 $I_{DC} = 5.0 \text{ A}$ になるように制限抵抗 R_{dis} を調整し、水銀リレーをオン、オフしたときの $X-Y$ 間の電圧および電流を各々デジタル電圧計およびデジタルオシロスコープで測定した。この直流減衰電流の試験回路の詳細については、著者らが先の論文⁽¹⁰⁾ で記述している。

直流減衰電流は、直軸および横軸いずれの場合も垂直分

表 1 成層磁極突極形同期電動機仕様
Table 1. Specifications of laminated-pole synchronous motor.

相 数	3	極 数	4
定格容量	10 kVA	ギャップ (平等)	5.0 mm
定格電圧	200 V	1 極の界磁巻回数	378 回
定格電流	31.9 A	界磁並列回路数	1
周 波 数	50 Hz	電機子巻線直列有効導体数	177.2 本

図 6 直流減衰試験回路
Fig. 6. Test circuit.

図 7 直軸減衰電流

Fig. 7. DC decaying current of direct-axis.

解能 12 bit, サンプリング時間 $10 \mu\text{sec}$ で測定した。直流減衰電流が零となるまでのデータ数は、直軸において界磁巻線が短絡の場合では 115600 個、外部抵抗短絡の場合では 53700 個である。また、横軸の場合は 36100 個である。電機子巻線抵抗 r_a は、水銀リレーを短絡する前の電圧 V_{dc} および電流 I_{dc} から求めた。また電機子漏れインダクタンス L_l は、著者らが先の論文⁽¹¹⁾で提案した方法での値を用いた。

直軸、横軸の等価回路未知定数は、これら減衰電流の実測値、 I_{dc} , r_a , L_l を用いて、図 4、図 5 の同定手順により同定した。

図 7 は、 $K=1$ における直軸減衰電流の実測値と(8)式による計算値との比較である。実線は、図 4 の同定手順によって同定した A_1 , A_2 , A_3 , m_1 , m_2 , m_3 の値を(8)式へ代入して求めた各時刻における減衰電流の計算値である。×印は、デジタルオシロスコープによって測定した実測値である。減衰が急峻な時刻 $0 \sim 0.08 \text{ sec}$ の間での実測値と計算値の差は 0.64%, $0.08 \sim 0.40 \text{ sec}$ の間では 2.7%であった。

図 8 は、横軸減衰電流の実測値と計算値の比較である。直軸の場合と同様、実線が同定した A_1 , A_2 , m_1 , m_2 の値を

図 8 横軸減衰電流

Fig. 8. DC decaying current of quadrature-axis.

表 2 等価回路定数

Table 2. Constants in equivalent circuit.

単位 (PU)			
		k=1	k=10
電機子巻線直流抵抗		r_a	0.0401
電機子巻線漏れリアクタンス		x_l	0.0843
直	励磁リアクタンス	x_{ad}	0.7445
	界磁巻線抵抗	r_f	0.0157
	界磁巻線漏れリアクタンス	x_f	0.1553
軸	始動巻線抵抗	r_{hd}	0.1564
	始動巻線漏れリアクタンス	x_{hd}	0.3228
横	励磁リアクタンス	x_{aq}	0.4590
	始動巻線抵抗	r_{hq}	0.0519
軸	始動巻線漏れリアクタンス	x_{hq}	0.1745

基準インピーダンス 4.000 Ω

(20)式へ代入して求めた各時刻における電流の計算値、×印が実測値である。実測値と計算値を比較すると、減衰が急峻な時刻 $0 \sim 0.04 \text{ sec}$ の間でのこれらの差は 0.67%, $0.04 \sim 0.20 \text{ sec}$ での差は 1.9%であった。

図 7、図 8 より実測値と指数関数による近似がよく一致していることがわかる。また、 $K=10$ の計算値と実測値の比較については省略するが、 $K=1$ の場合と同様よく一致している。

次に、同定した $K=1$ および $K=10$ における A_1 , A_2 , A_3 , m_1 , m_2 , m_3 を用いて、図 5 の同定手順によって直軸等価回路の未知定数を同定した。これら同定した二相間の値を(9)~(14)式の左辺に代入して、左辺と右辺とを比較すると、六つの関係式の中で差の最大は、 $K=1$ において 0.04%, $K=10$ において 0.01%であった。

直軸の場合と同様な方法によって、横軸等価回路の未知定数を同定した。これら同定した二相間の値を(21)~(24)式の左辺に代入して、左辺と右辺とを比較すると、その差の最大は 0.016%であった。

これより、各等価回路未知定数が精度良く同定されていることが確認される。これら同定した値は、図 6 の端子 U-V 間から見た二相間の値であるので表 2 の等価回路定数ではこれらの同定値に 1/2 を乗じて一相当たりとしている。

図9 トルク-すべり特性
Fig. 9. Torque-slip curve.

図10 電流-すべり特性
Fig. 10. Current-slip curve.

表2の界磁巻線インピーダンスと始動巻線インピーダンスとの識別は、電機子漏れインダクタンス L_l を変化させて同定した $K=1, K=10$ の等価回路定数から行っている⁽¹¹⁾。

指数関数法で用いた直流減衰電流の実測データ(直軸回路では $K=1$)を用いて、先に著者らが提案したフーリエ変換法⁽¹¹⁾の手順によっても直軸および横軸の等価回路定数を同定した。 $K=1$ における指数関数法による同定値とフーリエ変換法によるそれらとを比較すると最大の差は、横軸の始動巻線抵抗で2.3%であった。同じ実測データを用いた二つの手法(指数関数法、フーリエ変換法)がほぼ一致することにより、この同定法の妥当性が確認される。

〈4・2〉 始動特性 同定した等価回路定数を用いて、印加電圧 80 V (0.4 PU)一定とした場合の始動特性を計算⁽¹²⁾し、実測値と比較・検討した(付録参照)。

図9はトルク-すべり特性、図10は電流-すべり特性である。 $K=1$ および $K=10$ いずれの場合も実線は、計算値であり、■印および×印は実測値である。これら実測値の測定方法等については、すでに著者らの論文で述べているのでここでは省略する⁽¹³⁾。

計算値を実測値と比較するとその差の最大は、図9で $K=1$ のとき 7.9% (すべり $s=0.11$)、 $K=10$ のとき 2.7%

(すべり $s=1.0$)である。また図10では、 $K=1$ のとき 7.5% (すべり $s=0.35$)、 $K=10$ のとき 7.3% (すべり $s=0.60$)であった。

電機子漏れインダクタンス L_l を変化させた場合についても、等価回路定数を同定し、始動特性を計算したが、計算値はいずれの場合も一致した。これは、電機子漏れインダクタンス L_l の値により一義的に決まる他の定数値が存在し、 L_l は任意の値に仮定できるので、 L_l に対応する他の定数は図6の端子 $U-V$ から見た回路定数として精密に同定したことになる。

5. まとめ

直流減衰電流を指数関数近似することから同期機の等価回路定数を同定する方法について述べた。ここで得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 本論文で提案した方法は、一次回路と鎖交する複数の二次回路が存在する場合、二乗誤差を最小にする反復計算が複雑にならず、したがってこのような場合の等価回路定数を同定する極めて有力な手法と考えられる。

(2) 始動特性の計算値が、実測値とほぼ一致することから、本論文における等価回路定数の同定法の妥当性を確認した。

なお、直流減衰電流の実測値は、試験電流 5.0 A の値を使用しており、同期電動機が定格電圧の 50% 電圧で始動するとしたときの試験設備に対して、本法は、わずか 0.1% であり、当初の目的を達している。

おわりに本法は、誘導機の等価回路定数の同定にも基本的に適用しうるものであり、その展望が開けた意味も大きいことを付け加えておく。

日ごろ御指導をいただく明治大学理工学部松瀬貢規教授に深く感謝の意を表する次第である。

(平成5年11月24日受付、同6年11月10日再受付)

文 献

- (1) JEC-114: 電気学会電気規格調査会標準規格(昭54)
- (2) IEC Pub. 34-4: "Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Test" (1985)
- (3) IEEE Std 115A: "IEEE Standard Procedures for Obtaining Synchronous Machine Parameters by Standstill Response Testing"
- (4) P. J. Turner, D. C. Macdonald & A. B. J. Reece: The D. C. Decay Test for Determining Synchronous Machine Parameters: Measurement and Simulation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 4, No. 4 (1989)
- (5) E. S. Boje, J. C. Balda, R. G. Harley & R. C. Beck: Time-Domain Identification of Synchronous Machine Parameters from Simple Standstill Tests, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5, No. 1 (1990)
- (6) 電気学会: 電気工学ハンドブック, 電気学会, p. 696(昭56)
- (7) 秋間・荒・小田・松瀬: 「直流減衰電流を用いた同期電動機の等価回路定数算出法」, 電気学会全大, 703 (平4)
- (8) 秋間・荒・小田: 「最小二乗法による同期機等価回路定数の同定」, 電気学会回転機研究, RM-92-33 (平4)
- (9) 山村: 「交流モータの解析と制御」, オーム社, p. 26(昭63)
- (10) 荒・山本・小田・松瀬: 「直流試験法による同期電動機の始動特性推定法」, 電学論 D, 112, 1 (平4)
- (11) 荒・浅野・小田・松瀬: 「直流減衰電流のフーリエ変換による同期機等価回路定数の同定法」, 電学論 D, 113, 6 (平5)

- (12) C. CONCORDIA: Synchronous Machines (book), John Wiley & Son 社, 1951
 (13) 荒・小田: 「始動巻線付き同期電動機の始動特性推定法」, 電学論 D, 110, 8 (平 2)

(a) 直軸等価回路

(b) 横軸等価回路

付図 同期電動機始動時の直軸等価回路
 aap. Fig. Equivalent circuit of synchronous motor for starting.

付 録

1. 始動特性計算式

トルクおよび電流は, 等価回路定数を使用して Park の式から次のように導かれる⁽¹²⁾。

- (1) 直軸, 横軸の電機子巻線全磁束鎖交数 $\phi_d(t)$, $\phi_q(t)$
 $\dot{\Phi}_d = \dot{I}_d X_d(js) \dots\dots\dots (付 1)$
 $\phi_d(t) = Re[\dot{\Phi}_d e^{jst}] \dots\dots\dots (付 2)$
 $\dot{\Phi}_q = \dot{I}_q X_q(js) \dots\dots\dots (付 3)$
 $\phi_q(t) = Re[\dot{\Phi}_q e^{jst}] \dots\dots\dots (付 4)$

(演算子インピーダンス $X_d(js)$, $X_q(js)$ については付図 (a), 付図 (b) 参照, s は回転子のすべりである)

- (2) 直軸, 横軸の始動電流 $i_d(t)$, $i_q(t)$ および相電流 $i_a(t)$

$$\dot{I}_d = \frac{\{r_a - j(1-2s)X_q\} \dot{U}}{(r_a + jsX_d)(r_a + jsX_q) + (1-s)^2 X_d X_q}$$

$$\dots\dots\dots (付 5)$$

$$i_d(t) = Re[\dot{I}_d e^{jst}] \dots\dots\dots (付 6)$$

$$\dot{I}_q = \frac{\{jr_a + (1-2s)X_d\} \dot{U}}{(r_a + jsX_d)(r_a + jsX_q) + (1-s)^2 X_d X_q} \dots\dots\dots (付 7)$$

$$i_q(t) = Re[\dot{I}_q e^{jst}] \dots\dots\dots (付 8)$$

$$i_a(t) = i_d(t) \cos(1-s)t + i_q(t) \sin(1-s)t \dots\dots (付 9)$$

ただし, $X_d = X_d(js)$, $X_q = X_q(js)$, $\dot{U}$ は端子電圧である。

- (3) 始動トルク $m(t)$

$$m(t) = \phi_q(t) i_d(t) - \phi_d(t) i_q(t) \dots\dots\dots (付 10)$$

荒 隆 裕 (正員) 昭和 52 年 3 月職業訓練大学校電気工学科卒業。同年 4 月, 雇用促進事業団に入り, 浜松総合高等職業訓練校勤務を経て, 昭和 55 年 4 月職業訓練大学校助手, 講師を経て, 平成 4 年 4 月同助教授, 平成 5 年 4 月校名変更, 職業能力開発大学校助教授, 現在にいたる。主として, 電気機械の解析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。

秋 間 紳 樹 (正員) 平成 4 年 3 月職業訓練大学校電気工学科卒業。同年 4 月同校研究課程入学。平成 5 年 4 月職業能力開発大学校に校名変更, 平成 6 年 3 月同校研究課程, 電気・情報専攻修了, 同年 4 月雇用促進事業団に入り, 大阪職業能力開発短期大学校専任講師, 現在にいたる。

小 田 莊 一 (正員) 昭和 28 年 3 月東京工業大学電気工学科卒業。同年, 明電舎入社。昭和 48 年 4 月雇用促進事業団に入り, 職業訓練大学校教授, 平成 5 年 4 月校名変更, 職業能力開発大学校教授, 長期課程(工学)部長, 現在にいたる。回転機の解析, 関連技術, 回転機を含む小規模システムのシミュレーションおよび電動応用の研究に従事。技術士, 工学博士。IEEE 会員。