拡張ダルトーン-カメロン法

—任意の回転子位置における直流試験法—

正員 荒 隆裕 (職業能力開発大)
 正員 山本 修 (職業能力開発大)
 正員 浅野 博 (東京職業能力開発短期大)
 正員 小田 莊一 (小山職業能力開発短期大)

An Expanded Dalton-Cameron Method

— D.C. Decay Testing Method at an Arbitrary Rotor Position —

Takahiro ARA, Member, Shu YAMAMOTO, Member (Polytechnic Univ.) Hiroshi ASANO, Member (Tokyo Polytechnic College), Shoichi ODA, Member (Oyama Polytechnic College)

The Dalton-Cameron method is well-known as a method for determining direct and quadrature axis subtransient reactance (x_d'' and x_q'') by standstill response testing. This method entails calculating x_d'' and x_q'' from the voltage and current measured when a rated-frequency single-phase voltage is applied to each armature winding (U-V, V-W and W-U) in turn. The authors have developed a new method to calculate x_d'' , x_q'' and the impedance loci by means of applying a D. C. voltage instead of a single-phase voltage, and named it the expanded Dalton-Cameron method. This method is a small-capacity standstill test, and is carried out by the following three steps. The first is to short-circuit the U and V terminals while a D. C. current flows between these terminals, to measure the voltage and current (V_{dc} and I_{dc}) when the D. C. current flows between these terminals, and to record the D. C. decay current ($i(t)$) after these terminals are short-circuited. This same procedure is also performed for the V-W and W-U terminals in turn. The second is to draw the impedance loci from the measured V_{dc} , I_{dc} and $i(t)$ by means of Fourier transformation, and to divide it into the direct- and quadrature-axis impedance loci ($Z_d(js)$, $Z_q(js)$). The third is to calculate from $Z_d(js)$ and $Z_q(js)$ values of x_d'' and x_q'' and the starting performance on the basis of two-reaction theory. Experimental and calculation results on starting performance as well as a comparison with calculation results of x_d'' and x_q'' by Dalton-Cameron method clearly show that this method is very useful.

キーワード：同期機、ダルトーン-カメロン法、直流試験法、直流減衰電流、演算子インピーダンス、始動特性

1. まえがき

同期機の諸定数の測定ならびに始動特性の試験については、JEC-114、IEC Pub.34-4などが規格化されている⁽¹⁾⁽²⁾。これらの試験は、一般に商用電源を用いて行われており、中・大容量機になるに従い設備容量が増大し困難となる。

そこで、小容量の静止試験によって同期機の諸定数、始動特性を推定できる等価試験法が望まれる。

筆者らは、既に直流電源を用いた静止試験からこれら諸定数ならびに始動特性を算定できる直流試験法⁽³⁾を提案した。この方法は、回転子を直軸(d軸)あるいは横軸(q軸)の位置に固定して行う試験であり、直、横軸の位置に固定するための試験工数が増加する。また、回転子を直、横軸の位置に固定することは、小容量機の場合には可能であるが、中大容量機では極めて困難となる。

任意の回転子位置での試験法としてはダルトーン-カメロン法⁽¹⁾があり工場などで重用されている。この方法は、回転子を任意の位置に静止させ、電機子巻線のUV、VWおよびWU端子に定格周波数の単相電圧を順次加えて電圧と電流を測定し、直、横軸の初期過渡リアクタンス(x_d'' , x_q'')を算出する方法である⁽²⁾。

筆者らは、単相電圧のかわりに直流電圧を印加して、 x_d'' , x_q'' ならびに演算子インピーダンス $Z(js)$ を算出する方法を開発した⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (以下、拡張ダルトーン-カメロン法と仮称する)。この方法は、小容量の静止試験であり、まず、UV間に一定電流を流した後に端子間を短絡させ、短絡前の電圧 V_{dc} 、電流 I_{dc} および短絡後の直流減衰電流 $i(t)$ を測定する。VW、WUについても順次、同様の試験を実施する。次に、各端子間における V_{dc} 、 I_{dc} 、 $i(t)$ を用いてフーリエ変換を行い、演算子インピーダンスを算出し、直軸および横軸の演

算子インピーダンス $Z_d(js)$ 、 $Z_q(js)$ に分離している。これら $Z_d(js)$ 、 $Z_q(js)$ を用いて、 x_d'' 、 x_q'' ならびに二反作用理論⁽⁶⁾より始動特性を計算している。始動特性の計算値と実測値およびダルトン-カメロン法による x_d'' 、 x_q'' との比較検討より、本方法の有用性を明らかにしている。

2. 拡張ダルトン-カメロン法

まず、回転子を任意の位置に固定し、図1の端子UV間に電圧 V_{DC} を印加し、直流電流 I_{DC} を流す。次にこの端子間を水銀リレーで短絡する。このときの短絡電流 $i(t)$ を測定する。

これら V_{DC} 、 I_{DC} および $i(t)$ を(1)式に代入し、各周波数におけるインピーダンス $Z(\omega)$ を求める。(付録1参照)

$$Z(\omega) = \frac{1}{\frac{\omega}{jV_{DC}} \int_0^{+\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt + \frac{I_{DC}}{V_{DC}}} \quad (1)$$

ただし、 ω :角速度

次に始動時における等価回路を求めるためにUV間における演算子インピーダンス $Z_{UV}(js)$ を次式により計算する。

$$Z_{UV}(js) = \frac{Z(\omega) - 2r_a}{js} \quad (2)$$

ただし、 r_a :電機子巻線一相あたりの直流抵抗、 s :すべり ($=\omega/\omega_0$ 、 ω_0 :商用電源の角速度、 ω :回転子巻線の電気角速度)

以下、同様にVW、WU間についても直流減衰電流試験を実施し、(1)、(2)式を用いて演算子インピーダンス $Z_{VW}(js)$ 、 $Z_{WU}(js)$ を求める。これら $Z_{UV}(js)$ 、 $Z_{VW}(js)$ および $Z_{WU}(js)$ を抵抗、リアクタンスを用いて表現すると、

$$Z_{UV}(js) = X_{UV}(js) - jR_{UV}(js) \quad (3)$$

$$Z_{VW}(js) = X_{VW}(js) - jR_{VW}(js) \quad (4)$$

$$Z_{WU}(js) = X_{WU}(js) - jR_{WU}(js) \quad (5)$$

となる。

(3)～(5)式の実数部($X_{UV}(js)$ 、 $X_{VW}(js)$ 、 $X_{WU}(js)$)、虚数部($R_{UV}(js)$ 、 $R_{VW}(js)$ 、 $R_{WU}(js)$)をダルトン-カメロン法に適用すると、

$$K_X = \{X_{UV}(js) + X_{VW}(js) + X_{WU}(js)\} / 3 \quad (6)$$

$$K_R = \{R_{UV}(js) + R_{VW}(js) + R_{WU}(js)\} / 3 \quad (7)$$

$$M_X = \sqrt{\{X_{VW}(js) - K_X\}^2 + \{X_{WU}(js) - X_{UV}(js)\}^2} / 3 \quad (8)$$

$$M_R = \sqrt{\{R_{VW}(js) - K_R\}^2 + \{R_{WU}(js) - R_{UV}(js)\}^2} / 3 \quad (9)$$

が求められる⁽¹⁾。

次にこれら K_X 、 K_R 、 M_X 、 M_R を(10)～(13)式へ代入し $X_d(js)$ 、 $R_d(js)$ 、 $X_q(js)$ 、 $R_q(js)$ を求める。

$$X_d(js) = (K_X \mp M_X) / 2 \quad (10)$$

$$R_d(js) = (K_R \mp M_R) / 2 \quad (11)$$

$$X_q(js) = (K_X \pm M_X) / 2 \quad (12)$$

$$R_q(js) = (K_R \pm M_R) / 2 \quad (13)$$

(10)～(13)式の符号の決め方については、付録2に示す方法によって決定される。

これら $X_d(js)$ 、 $R_d(js)$ 、 $X_q(js)$ 、 $R_q(js)$ を(14)、(15)式へ代入

図1 直流減衰電流試験回路

Fig.1. Test circuit

図2 d軸等価回路

Fig.2. D-axis equivalent circuit

図3 q軸等価回路

Fig.3. Q-axis equivalent circuit

すると、演算子インピーダンス $Z_d(js)$ 、 $Z_q(js)$ が求められる。

$$Z_d(js) = X_d(js) - jR_d(js) \quad (14)$$

$$Z_q(js) = X_q(js) - jR_q(js) \quad (15)$$

これら $Z_d(js)$ 、 $Z_q(js)$ は、図2、図3に示す始動時の直、横軸の等価回路で端子a'-b'間から見た各すべり周波数におけるインピーダンスである。

図2、図3の各素子は、

x_l : 電機子漏れリアクタンス

x_{ad} 、 x_{aq} : 直軸及び横軸の電機子反作用リアクタンス

r_{kd} 、 r_{kq} : 直軸及び横軸の制動始動巻線の抵抗

x_{kd} 、 x_{kq} : 直軸及び横軸の制動巻線の漏れリアクタンス

r_f : 界磁巻線抵抗

x_f : 界磁巻線の漏れリアクタンス

である。

ダルトン-カメロン法によって求められる直、横軸の初期過渡リアクタンス(x_d'' 、 x_q'')は、(14)、(15)式においてはすべり $s=1.0$ のときの値に相当する。

3. 実施例および考察

供試機として、始動巻線付き成層磁極突極形同期電動機 (10kW-200V-31.9A-50Hz-4P) を用いた。図1の試験回路で回転子を任意の位置に固定、界磁巻線間は短絡して、電機子巻線端子二相間 (UV間) を端子AB間に接続し、試験電流を9Aに調整し、水銀リレーがオフ時のX-Y間の電圧 V_{DC} 、電流 I_{DC} およびオン時の減衰電流 $i(t)$ 、界磁誘導電流 $i_f(t)$ をデジタル電圧計、デジタルオシロスコープ (チャンネル1(ch1)が $i(t)$ 、チャンネル2(ch2)が $i_f(t)$) で測定した。図1のGTOは、GTOサイリスタであり、水銀リレーがオンと同時にオフとなって、 I_{DC} を遮断している。VW間、WU間についても同様の試験を実施した。

表1は、その結果である。界磁誘導電流 i_f は各UV、VW、WU間での試験時において、最も大きく変化した値を示している。

電機子巻線抵抗 r_a は、水銀リレーがオフ時の電圧 V_{DC} 、電流 I_{DC} (I_{DC} については表1に示す1000点のデータの平均値) より算出した。

これら V_{DC} 、 I_{DC} 、 $i(t)$ および r_a を用いて(1)~(5)式より各演算子インピーダンス $Z_{uv}(js)$ 、 $Z_{vw}(js)$ および $Z_{wu}(js)$ を算出し

表1 デジタルオシロスコープの測定条件

Table.1. Measurement conditions of the digital oscilloscope

			UV間	VW間	WU間
サンプリングレート(μs)			10.0	10.0	10.0
アベレージング (回)			64	64	64
水銀リレー	オフ時	試験電流(A)	9.0	9.0	9.0
		オフ時間(sec)	5.0	5.0	5.0
		X-Y間の電圧(V)	2.83178	2.82505	2.83142
	オン時	電流のレコード長	1000	1000	1000
		オン時間(sec)	5.0	5.0	5.0
		電流のレコード長	500,000	500,000	500,000
界磁誘導電流 <i>i_f</i> (A)			0.2804	0.1254	0.4438

た。なお、(1)式の計算に用いたUV間、VW間およびWU間の減衰電流 $i(t)$ は、表1に示すようにサンプリングレート10 μ secで、オン時間の5秒間に測定した500,000点の減衰電流のうち、それぞれ $i(t)$ が零となるまでの72998点、42479点、96950点を用いた。図4は、これらのインピーダンス軌跡である。

次に、(6)~(15)式および付録2より直軸および横軸の演算子インピーダンス $Z_d(js)$ および $Z_q(js)$ を求めた。

図5の実線は、そのインピーダンス軌跡である。図5の破

図4 演算子インピーダンス $Z_{uv}(js)$ 、 $Z_{vw}(js)$ および $Z_{wu}(js)$ の軌跡
Fig.4. Impedance loci of $Z_{uv}(js)$, $Z_{vw}(js)$ and $Z_{wu}(js)$

図5 演算子インピーダンス $Z_d(js)$ および $Z_q(js)$ の軌跡
Fig.5. Impedance loci of $Z_d(js)$ and $Z_q(js)$

図6 実負荷試験回路

Fig.6. Circuit configuration of on-load test

表2 過渡諸定数の推定結果

Table.2. Estimation results of several transient constants

	x_d''	x_q''	x_d	x_q
Method A	0.731	0.849	3.245	2.087
Method B	0.731	0.849	3.420	2.145
Method C	0.746	0.883	3.868	2.375

線は、回転子を直軸および横軸の位置に固定した場合の軌跡である。実線と破線の軌跡を比較すると良好な結果が得られていることが確認できる。横軸の軌跡（実線）が1Hz付近で膨らんでいるがこの理由は、測定精度によるものと考えている。

直、横軸の同期リアクタンス(x_d , x_q)は、図2、図3の等価回路での $s=0$ 時の $Z_d(js)$, $Z_q(js)$ の値、すなわち図5のインピーダンス軌跡で周波数が零となる点であり、また直、横軸の初期過渡リアクタンス(x_d'' , x_q'')は、図2、図3で s が無限大となるときの $Z_d(js)$, $Z_q(js)$ の値、すなわち図5で周波数が無限大となる点であり、各々直軸および横軸のインピーダンス軌跡を補外することによって求められる。

表2は、Method A：回転子を任意の位置に固定した場合（拡張ダルトン-カメロン法）、Method B：回転子をd、q軸の位置に固定した場合（直流試験法）、Method C：商用試験（ x_d ：無負荷飽和・三相短絡特性特性、 x_q ：すべり法、 x_d'' , x_q'' ：ダルトン-カメロン法）における値である。それぞれの定数について異なった試験法による値は良好な値を示しており、拡張ダルトン-カメロン法の妥当性を示している。Method A、BおよびCにおいて x_d , x_q の差は、これらの算定方法の違いによるものと考えている。

次に $Z_d(js)$, $Z_q(js)$ を用いて印加電圧80V（0.4PU単位法、基準インピーダンス4Ω）における始動特性（平均トルクすべり特性、電流（基本波）—すべり特性）を二反作用理論⁶⁾によって求めた。図6は実負荷試験回路であり、供試機、トルク検出器および負荷として蓄電池を接続した直流発電機を接続し、発電機の界磁電流を調整することにより各すべりにおける平均トルクおよび電流（基本波）を測定した⁷⁾。図7、図8はその結果であり、実線が回転子を任意の位置に固定した場合、破線が回転子をd、q軸の位置に固定した場合の算定値（計算値）、●印が実測値である。実

図7 平均トルク—すべり特性

Fig.7. Torque-slip characteristics

図8 電流（基本波）—すべり特性

Fig.8. Current-slip characteristics

線と破線を比較するとほとんど一致していることがわかる。このことは図5のq軸演算子インピーダンス軌跡の1Hz付近での測定誤差は、始動特性にはほとんど影響をおよぼさないことが理解される。

図7のトルクすべり特性の計算値（任意の位置に固定した場合）を実測値と比較すると、すべり $s=1$ から最大トルクとなる $s=0.15$ までの間における差の最大は、実測値を基準にして $s=1$ で16.47%であった。これは、直流減衰電流の測定誤差の影響によって $s=1$ でのトルクが大きく振れているためである。 $1>s>0.5$ からの傾向をもとに $s=1$ でのトルクを推定し、実測値と比較すると10%以下となる。 $0.15>s>0$ の間では $s=0.11$ のときが最大で8.94%であった。

図8の電流-すべり特性の計算値（任意の位置に固定した場合）を実測値と比例すると、 $1.0\geq s\geq 0.15$ の間における差の最大は、 $s=0.27$ で8.08%、 $0.15>s>0$ では、 $s=0.14$ で4.39%であった。

4. まとめ

拡張ダルトン-カメロン法について述べた。まとめると以下のとおりである。

- (1) 同期機の回転子を任意の位置に固定し、各電機子巻線端子の二相間に直流を印加し、各巻線間をオン、オフしたときの電圧、電流をダルトン-カメロン法に拡張して適用することにより直、横軸の演算子インピーダンスが算出できることを明らかにした。この拡張ダルトン-カメロン法は、直、横軸の演算子インピーダンスを用いた始動特性の推定値と実測値がほぼ一致することにより、その妥当性を明らかにした。
- (2) 同期リアクタンス、初期過渡リアクタンスは、演算子インピーダンス軌跡より推定できる。
- (3) 本方法の電流設備容量は、50%電圧で起動（界磁巻線短絡）する場合の三相電源の設備容量に対してわずか0.3%である。

従来のダルトン-カメロン法が単に初期過渡リアクタンスのみを求めるために使用されているが、本論文で提案する拡張ダルトン-カメロン法は、本論文で述べた機械の演算子インピーダンスの算出だけでなく等価回路定数をも決定できる⁽⁸⁾優れた重要な試験法である。

最後に日頃御指導いただく明治大学理工学部教授松瀬貢規先生に深く感謝致します。また、卒業研究として協力された神崎啓太郎（雇用促進事業団ポリテクセンター鹿児島）氏に対して謝意を表す。

（平成 8 年 5 月 27 日受付、平成 8 年 12 月 24 日再受付）

文 献

- (1) JEC-114 : 電気学会電気規格調査会標準規格 (1979)
- (2) IEC Pub.34-4 : "Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Test" (1985)
- (3) 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 (1992)

- (4) 小川・荒・山本・浅野・小田: 拡張ダルトン-カメロン法、電気学会産業応用部門全国大会、T-4 (1995)
- (5) 荒・小川・山本・浅野・小田: 拡張ダルトン-カメロン法、電気学会回転機研究会資料、RM-95-117 (1995)
- (6) C. Concordia : Synchronous Machine (book), John Wiley & Son 社
- (7) 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 (1990)
- (8) 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 (1993)

<付録>

付録1 演算子インピーダンス $Z_{UV}(js)$ と等価回路との関係

UV間を例に、(1)式から(2)式への変換ならびにそれらの等価回路について説明する。

(1)式は、電機子巻線側から見て付図1の等価回路を意味する。付図1では、二次回路を二つ（制動巻線回路と界磁巻線回路の抵抗を各々 r_2 、 r_3 、漏れインダクタンスを各々 l_2 、

付図1 $Z_{UV}(\omega)$ の等価回路

Fig.1a. Equivalent circuit of $Z_{UV}(\omega)$

付図2 $(\omega_0/\omega) \cdot (Z_{UV}(\omega) - 2r_a) / j$ の等価回路

Fig.2a. Equivalent circuit of $(\omega_0/\omega) \cdot (Z_{UV}(\omega) - 2r_a) / j$

付図3 $Z_{UV}(js)$ の等価回路

Fig.3a. Equivalent circuit of $Z_{UV}(js)$

i_s 、相互インダクタンスを M として表示)として表現している。

$Z_{uv}(\omega)$ から電機子巻線抵抗 $2r_a$ を差し引き、電源の電氣的角速度を ω_0 、回転子巻線の電氣的角速度を ω として、全ての素子($2r_a$ を除く) ω_0/ω を乗じて、虚数の単位である j で除すると付図2となる。

次に付図2において、 $s=\omega/\omega_0$ とおくと、 s はいわゆる滑りであり付図3が得られる。

$Z_{vw}(\omega), Z_{wu}(\omega)$ についても同様に考えることができる。

付録2 (12)~(13)式の符号の決め方

直流試験を適用すれば既に説明したようにフーリエ変換により機械のインピーダンスは、

$$Z(\omega) = \frac{1}{\frac{\omega}{jV_{DC}} \int_0^{+\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt + \frac{I_{DC}}{V_{DC}}} = R + jX \quad \text{..... (付1)}$$

で求められる。(付1)式の X の変化は、回転子位置に従って付図4、付図5のように表される。

ここで回転子位置がUV巻線に対してd軸であれば $X=2X_d$ 、 $R=2R_d$ であり、この際、界磁誘導電流 i_f は、誘導過渡電流の最大値である。回転子位置がUV巻線に対してq軸であれば $X=2X_q$ 、 $R=2R_q$ である。 X は回転子のd軸あるいはq軸に共に対称であるため、界磁誘導電流と対応させると、 $X_d > X_q$ の場合は付図1、 $X_d < X_q$ の場合は付図5で表される。

付図4 $X-i_f$ の関係 ($X_d > X_q$)
Fig.4a. Relation of $X-i_f$ ($X_d > X_q$)

付図5 $X-i_f$ の関係 ($X_d < X_q$)
Fig.5a. Relation of $X-i_f$ ($X_d < X_q$)

X_{uv} 、 X_{vw} 、 X_{wu} の関係はそれぞれ回転子位置が $2\pi/3$ ずつづれており、例を図に示す。

回転子位置に対して $X_d > X_q$ の場合は X と i_f の増減が対応しており、 $X_d < X_q$ の場合は対応しない。これが X_d 、 X_q のいずれが大きいかを判定するのに重要である。すなわち例について説明すると、付図4の場合($X_d > X_q$)は X と i_f の大きさの関係は同順($X_{vw} > X_{uv} > X_{wu}$ に対して $i_{fvw} > i_{fuv} > i_{fwu}$)であり、付図5の場合($X_d < X_q$)は X と i_f の大きさの関係は同順とはならない($X_{vw} > X_{uv} > X_{wu}$ に対して $i_{fwu} > i_{fuv} > i_{fvw}$)。この関係によって(10)式および(12)式の符号を決めることができる。

抵抗 R についてもリアクタンス X の場合と全く同様な取扱いができ、 R_{uv} 、 R_{vw} 、 R_{wu} と i_{fuv} 、 i_{fvw} 、 i_{fwu} の大きさの関係より R_d 、 R_q のいずれが大きいかを判定することができる。

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、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。日本産業教育技術学会会員。IEEE会員。

山 本 修 (正員) 平成6年3月明治大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年4月同大学院理工学研究科博士後期課程入学、平成7年3月退学。同年4月、雇用促進事業団に入り職業訓練大学校助手、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。IEEE会員。

浅 野 博 (正員) 昭和63年3月職業訓練大学校電気工学科卒業。同年、雇用促進事業団に入り、浜松職業訓練短期大学校を経て、平成6年4月東京職業能力開発短期大学校専任講師、現在に至る。主として、回転機の回路定数の算出法およびその制御に関する研究に従事。日本産業技術教育学会会員。

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、平成7年4月小山職業能力開発短期大学校校長、現在に至る。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力応用の研究に従事。現在に至る。技術士、工学博士。IEEE会員。