2相サーボモータの等価回路定数の一算定法

篠 宮 栄*・岡 田 昌 丈*

A Method to Determine the Equivalent Circuit Parameters of a 2-Phase Servomotor

Sakae SHINOMIYA* and Yoshitomo OKADA*

It is well known that various performance characteristics of a 2-phase servomotor can be investigated by using its equivalent circuit parameters.

In this paper, a method to determine the equivalent circuit parameters (r_1 , x_m , r_2 , x_1) of 2-phase servomotor is described.

In this method, (1) r_1 is determined by measuring the d-c resistance of the reference windings, (2) x_m , r_2 are determined by measuring both the maximum braking torque $[T_{od}]_{\max}$ and the revolving velocity correspond to $[T_{od}]_{\max}$, on the d-c braking torque characteristics of 2-phase servomotor, (3) x_1 is determined by measuring the applied voltage, input current and the tuning current of the reference windings at zero speed.

To check the accuracy of this proposed method, the average torque and the alternating torque characteristics of the sampled 2-phase servomotor are calculated by using the equivalent circuit parameters which is determined by means of this method, and these calculated results are compared with the experimental ones.

The agreement is satisfactory, and this method was found useful.

1. ま え が き

近年、2相サーボモータは制御要素として広く用いられているが、そのサーボモータの使用にあたっては、あらかじめサーボモータの動作特性を予知しておくことが望ましく、現に、2相サーボモータのトルク-速度特性¹⁾、直流制動トルク特性^{2), 3)}、交流制動トルク特性³⁾、単相運転の判別^{4)~6)}、および電圧、位相不平衡時における電源周波数の2倍の振動トルク特

性^{7), 8)}などがモータの等価回路定数を用いて容易に検討できることが知られている。したがって、より信頼度の高い検討結果を得るためには、その等価回路定数をより正確に算定することが重要な要因の一つとなる。

従来、この等価回路定数の算定法に関しては、松塚、渡辺氏ら⁹⁾が2相サーボモータの拘束および無負荷試験より入力インピーダンスとトルクを求め、これらより等価回路定数を算定する方法を提案しており、その後、須藤、横塚氏ら¹⁰⁾が2相サーボモータの拘束時の1次入力と入力インピーダンス、および同期速度運転時の入力インピーダンスをそれぞれ実測し、これらよりインピーダンス比 R/x_0 , X/x_0 , ($x_0 = x_m + x_1$) を求め、次いで前もって作成された k (ステータ巻線による全磁束数とロータへの有効磁束数との比)、 Q (モータの安定性を判別するための定数) とインピーダンス比との関係図より、上記インピーダンス比時の k , Q を決定し、この k , Q と2相サーボモータの等価回路定数との関係より、その等価回路定数を算定する方法を提案している。しかし、上記の算定法はいずれのものも、その算定過程がきわめて複雑であり、精度的にも問題があるように思われる。

また、江尻氏^{11)~15)}は2相サーボモータのトルク特性を交差磁界説に基づいて解析し、そのサーボモータの一般的な特性式を導出するとともに、同式に基づいて各種駆動条件下での2相サーボモータの振動トルク特性の検討を行い、多くの貴重な結果を報告している。しかし、同報告では2相サーボモータの回路定数を定数比の形で求める方法 (たとえば、 $\tau = \omega L/R$) についての提案はなされているが、そのサーボモータの等価回路定数の算定法に関しては述べられていない。ゆえに、従来はメーカなどによりサーボモータの設計時に理論的に求められた等価回路定数を、必要に応じて利用させてもらっているのが現状のようである。

しかしながら、この場合にも、出力10W程度以下

* 群馬大学工学部 桐生市天神町 1-5-1

* Faculty of Engineering, Gumma University, Kiryu
(Received June 13, 1975)

の小型のサーボモータになると、そのモータの磁気回路が把握しにくくなるため、1次漏れリアクタンスや励磁リアクタンスなどの等価回路定数の算定がきわめて困難なものとなる傾向がみられる。

したがって、簡単な試験により、精度ある等価回路定数が容易に算定できるような等価回路定数の算定法が考案されれば、これは2相サーボモータの特性の解析や検討を行ううえで、有用であると思われる。

そこで、筆者らはこのような立場に基づいて、幅広く利用され、精度的にも十分満足できる2相サーボモータの等価回路定数の算定法を考案することを目的に検討を行ってきた結果、以下で詳述するような、簡単な試験により、精度ある等価回路定数を、容易に求められることが明らかになったので、ここにその適用例とともに報告するものである。

2. 等価回路定数の算定

一般に、2相サーボモータではその動作特性を検討する場合、計算の簡易化のため、2次漏れリアクタンス(x_2)や鉄損分等価抵抗などを、前者は2次抵抗(r_2)にくらべてかなり小さく、後者は励磁リアクタンス(x_m)にくらべてかなり大きいという理由により、これらを無視して取扱っている場合(一般の市販のサーボモータはこの場合に相当する。ただし、特殊設計のものにはもちろんこの方式に修正を要する)が多い。

したがって、本文でもこれら2次漏れリアクタンス(x_2)や鉄損などを無視した場合の等価回路定数の算定法について以下述べることにする。

2.1 r_1 の算定

1次抵抗 r_1 は励磁巻線の直流抵抗を DC ブリッジ(たとえば、ホイートストンブリッジ)などを用いて実測することにより容易に求められる。

2.2 x_m, r_2 の算定

励磁リアクタンス x_m および2次抵抗 r_2 は2相サーボモータの励磁巻線を直流励磁し、制御巻線を開放した場合の直流制動トルク特性から最大制動トルク値

Fig. 1 Equivalent circuit for induction motor, where V_0 : revolving velocity ω_0 per synchronous velocity ω_s , $|I_{md}| = I_0/\sqrt{2}$: equivalent a-c current (rms), I_0 : d-c exciting current

ならびにそのときの回転速度を実測することにより容易に求められる。すなわち、このときの制動トルク T_{od} は Fig. 1 の等価回路を参照してつぎのように与えられる^{2),3)}。

$$T_{od} = \frac{10^5}{9.8(4\pi f/P)} \cdot \frac{(I_0 x_m)^2 \left\{ \frac{v_0}{1 + (x_m/r_2)^2 v_0^2} \right\}}{\quad} \quad [\text{g-cm}] \quad (1)$$

ここに、 P : モータの極数

f : 等価回路定数設定時の電源周波数

ここで、(1)式より極値条件 $(dT_{od}/dv_0)=0$ を求めると、制動トルクに最大値を生ずる速度 v_{om} は

$$v_{om} = \frac{r_2}{x_m} \quad (2)$$

制動トルクの最大値 $[T_{od}]_{\max}$ は

$$[T_{od}]_{\max} = \frac{10^5}{9.8(4\pi f/P)} \cdot \frac{I_0^2 x_m}{2} \quad [\text{g-cm}] \quad (3)$$

となり (Fig. 2 参照)、これら(2)、(3)式より x_m, r_2 は次式により与えられる。

$$x_m = 19.6 \times 10^{-5} \left(\frac{4\pi f}{P} \right) \frac{[T_{od}]_{\max}}{I_0^2} \quad [\Omega] \quad (4)$$

$$r_2 = x_m \times v_{om} \quad [\Omega] \quad (5)$$

したがって、供試2相サーボモータの直流制動トルク特性を実測し、その結果より最大制動トルク値 $[T_{od}]_{\max}$ 、ならびに最大制動トルク時の速度 v_{om} を求め、これらの値を上記(4)、(5)式に適用すれば、供試2相サーボモータの x_m, r_2 は容易に求められる。

2.3 x_1 の算定

1次漏れリアクタンス x_1 は停動時(励磁巻線 AC 励磁、制御巻線開放)

の励磁巻線に対する印加電圧、入力電流、および励磁巻線と並列に同調コンデンサを接続した場合の入力電流いわゆる同調電流を実測することにより容易に求められる。すなわち、2相サーボモータの停動時($v_0=0$)の励磁相等価回路は Fig. 3 (a) で表わされるが、

Fig. 2 Braking torque-speed characteristics of 2-phase servomotors

Fig. 3 Equivalent circuit for 2-phase servomotor at zero speed

これを等価抵抗 R 、および等価リアクタンス X_L を用いて Fig. 3(b) のように書き改めると、このときの入力インピーダンス $\dot{Z}_{v_0=0}$ 、位相角 φ は

$$\dot{Z}_{v_0=0} = R + jX_L \quad (6)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} \quad (7)$$

ここに、

$$\begin{aligned} R &\equiv r_1 + \frac{Q_0 x_m}{1 + Q_0^2} \\ &= |\dot{Z}_{v_0=0}| \cos \varphi \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X_L &\equiv x_1 + \frac{x_m}{1 + Q_0^2} \\ &= |\dot{Z}_{v_0=0}| \sin \varphi \end{aligned} \quad (9)$$

$$Q_0 \equiv \frac{x_m}{r_2}$$

となり、上記(8)、(9)式より x_1 は次式により与えられる。

$$x_1 = \frac{|\dot{Z}_{v_0=0}| \cdot (Q_0 \sin \varphi - \cos \varphi) + r_1}{Q_0} \quad [\Omega] \quad (10)$$

他方、(10)式中の入力インピーダンスの大きさ $|\dot{Z}_{v_0=0}|$ や $\sin \varphi$ 、 $\cos \varphi$ などの項は、停動時の励磁巻線に対する印加電圧と入力電流、および Fig. 4 に示すように励磁巻線と並列に同調コンデンサ (C_0) を接続し、このときの入力電流、いわゆる同調電流を実測することにより、容易に知られる。

$$x_1 = \frac{V_m \{Q_0 \sqrt{[I_{x_c}]_\infty^2 - [I_{x_c}]_{c_0}^2} - [I_{x_c}]_{c_0} + r_1 [I_{x_c}]_\infty^2\}}{Q_0 [I_{x_c}]_\infty^2} \quad [\Omega] \quad (16)$$

したがって、Fig. 4 に示すような構成のもとに、停動時の励磁巻線に対する印加電圧 V_m 、入力電流 $[I_{x_c}]_\infty$ 、同調電流 $[I_{x_c}]_{c_0}$ などを実測し、これらの値と前記の r_1 、 Q_0 の値を上記(16)式に適用すれば、供試2相サーボモータの x_1 は容易に求められる。

3. 適用例

ここでは、平衡巻線をもつ2機種(A, B)の供試2相サーボモータについての適用例を示す。ここで取扱う2相サーボモータの仕様はつぎのとおりである。

A機：出力3W、相極数2相2極、電源周波数

Fig. 4
Equivalent circuit for 2-phase servomotors under the tuning condition

(i) $|\dot{Z}_{v_0=0}|$ の場合：Fig. 4 において、 $X_c = \infty$ としたときの印加電圧 V_m とそのときの入力電流 $[I_{x_c}]_\infty$ の大きさを実測することにより、次式より知られる。

$$|\dot{Z}_{v_0=0}| = \frac{V_m}{[I_{x_c}]_\infty} \quad (11)$$

(ii) $\cos \varphi$ 、 $\sin \varphi$ の場合：Fig. 4 において、 $X_c = X_{c_0} (=1/\omega C_0)$ としたとき、すなわち同調時における同調電流 $[I_{x_c}]_{c_0}$ を求めると

$$[I_{x_c}]_{c_0} = \frac{RV_m}{R^2 + X_L^2} \quad (12)$$

ここで、(12)式と上記(11)式との印加電圧 V_m に着目し、その両者を比較すると

$$|\dot{Z}_{v_0=0}| \cdot [I_{x_c}]_\infty = \frac{|\dot{Z}_{v_0=0}|^2}{R} \cdot [I_{x_c}]_{c_0} \quad (13)$$

となり、これより $\cos \varphi$ 、 $\sin \varphi$ は次式により与えられる。

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{R}{|\dot{Z}_{v_0=0}|} \\ &= \frac{[I_{x_c}]_{c_0}}{[I_{x_c}]_\infty} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sin \varphi = \frac{\sqrt{[I_{x_c}]_\infty^2 - [I_{x_c}]_{c_0}^2}}{[I_{x_c}]_\infty} \quad (15)$$

そこで、上記(11)、(14)、(15)式の関係を前記(10)式に適用すると、 x_1 の算定式はつぎのように書き改められる。

Fig. 5] Braking torque-speed characteristics of 2-phase servomotors

格電流 155 mA

3.1 測定事項ならびに測定結果

(i) 1次抵抗 r_1 の測定

A機: $r_1=133.8\Omega$

B機: $r_1=101.4\Omega$

(ii) 直流制動トルク特性を実測し、これより最大制動トルク $[T_{od}]_{\max}$ 、および最大制動トルク時の回転速度 v_{om} を求める。その実測結果は Fig. 5 に示すようであり、 $[T_{od}]_{\max}$ 、 v_{om} はそれぞれつぎのとおりであった。

A機 ($I_0=120$ mA):

$[T_{od}]_{\max}=202$ g-cm, $v_{om}=1.10$

B機 ($I_0=155$ mA):

$[T_{od}]_{\max}=278$ g-cm, $v_{om}=0.78$

(iii) 停動時の励磁巻線に対する印加電圧 V_m とそのときの入力電流 $[I_{xc}]_{\infty}$ 、および同調電流 $[I_{xc}]_{c_0}$ を測定する。その結果はつぎのとおりであった。

A機 ($V_m=81.8$ V):

$[I_{xc}]_{\infty}=120$ mA, $[I_{xc}]_{c_0}=85.8$ mA

B機 ($V_m=77.0$ V):

$[I_{xc}]_{\infty}=155$ mA, $[I_{xc}]_{c_0}=120.8$ mA

ただし、このときの印加電圧 V_m は磁気回路の飽和などを考慮し、 $[I_{xc}]_{\infty}$ が運転時の定格入力電流値と同じになるように設定した。

なお、供試モータの測定時温度はいずれの場合にも、60°C (モータの通常使用時温度) 一定に保った。

3.2 等価回路定数の算定

上記の測定結果を前記(4), (5), (16)式に適用し、供試2相サーボモータの等価回路定数を求めると、 r_1 , x_m , r_2 , x_1 などはそれぞれ、つぎのように与えられる。

A機の場合

(i) $r_1=133.8\Omega$

(ii) x_m , r_2 は(4), (5)式より

$$x_m=19.6 \times 10^{-3} \pi \times 202 / 0.12^2$$

$$=863.3\Omega$$

$$r_2=863.3 \times 1.10=949.6\Omega$$

(iii) x_1 は(16)式より

$$x_1=\{81.8 \times 10^{-2}(7.627-8.580)+1.927\} / 1.31 \times 10^{-2}$$

$$=87.6\Omega$$

B機の場合

A機の場合と同様にして各等価回路定数を求めると、それらはつぎのように与えられる。

(i) $r_1=101.4\Omega$

(ii) $x_m=712.1\Omega$, $r_2=526.9\Omega$

Table 1 Equivalent circuit parameters which is determined by means of this determining method, where

$f=50$ Hz, Temp: 60°C

sample	Ω	r_1	x_1	x_m	r_2
A		134 (132)	87.6 (133)	863 (793)	950 (938)
B		101 (117)	99.8 (104)	712 (690)	527 (517)

(iii) $x_1=99.8\Omega$

Table 1 は上記の等価回路定数の算定結果をまとめて表にして、示したものである。同表中 () 内の値は設計時に理論的に求められた等価回路定数を参考のために示したものであるが、いずれの場合にも、両者間にはかなり良い一致が認められる。なお、供試機Aの x_1 の場合にはその値が設計値のほうが比較的大きな値を示しているが、これは小出力、小型の2相サーボモータになると、スロットやコイル端部などにおける漏れリアクタンスが理論的に把握しにくくなるため、このような現象が生じてきたものと考えられる。

4. 2相サーボモータの平均トルクおよび振動トルク特性の計算結果と実験結果の比較

ここでは供試機 A, B の2機種について前節3で求めた等価回路定数 (Table 1 参照) を使用して、(4.1) では平衡2相電圧印加時のトルク-スピード特性、(4.2) では不平衡2相電圧印加時における振動トルク特性をそれぞれ計算し、その計算結果と実験結果とを比較して示した。

なお、図中では本方法により求められた等価回路定数を用いて計算された結果を実線、実験値を点線、そして設計時に求められた等価回路定数を用いて計算された結果を参考のために1点破線で示した。

Fig. 6 Comparison of the calculated and experimental values, where $V_{m1}=V_c=100$ V, $f=50$ Hz

4.1 平衡2相電圧印加時のトルク-スピード

ード特性

2相サーボモータの平衡2相電圧印加時の平均トルク

トルク T_0 は次式で与えられることが知られている¹⁾。⁷⁾

$$T_0 = \frac{2 \times 10^5}{9.8(4\pi f/P)} \cdot \frac{(x_m V_{m1})^2 \{r_2/(1-v_0)\}}{\{r_1 r_2/(1-v_0) - x_1 x_m\}^2 + \{r_1 x_m + (x_1 + x_m) r_2/(1-v_0)\}^2} \quad (\text{g-cm}) \quad (17)$$

したがって、上記(17)式より各供試機のトルクスピード特性を計算し、この計算結果とトルク計を用いて実測された結果とを比較すると **Fig. 6** に示すようになり、いずれの場合も計算結果と実験結果とはかなりよく一致していることがわかる。

4.2 不平衡2相電圧印加時の振動トルク特性

2相サーボモータの不平衡2相電圧印加時における

電源周波数の2倍の周波数の振動トルク T_v は等価回路定数を用いて次式で与えられることが知られている⁷⁾。

$$T_v = \frac{10^5}{9.8(4\pi f/P)} \cdot V_{m2}^2 C_o(v)(1-K^2) \times v_0 \cos 2\omega t \quad (\text{g-cm}) \quad (18)$$

ここに

$$C_o(v) = \frac{x_m^2}{r_2} \sqrt{\frac{\{r_2/(1-v_0)\}^2}{\{r_1 r_2/(1-v_0) - x_1 x_m\}^2 + \{(x_1 + x_m) r_2/(1-v_0) + r_1 x_m\}^2}} \times \sqrt{\frac{\{r_2/(1+v_0)\}^2}{\{r_1 r_2/(1+v_0) - x_1 x_m\}^2 + \{(x_1 + x_m) r_2/(1+v_0) + r_1 x_m\}^2}}$$

$$K = \frac{V_{e2}}{V_{m2}}$$

 V_{m2}, V_{e2} : 励磁, 制御巻線の印加電圧

したがって、上記(18)式より各供試機の振動トルク T_v の大きさを計算し、この計算結果と加速度計¹⁶⁾を用いて実測された結果とを比較すると、**Fig. 7** に示すようになり、いずれの場合も計算結果と実験結果とはかなり良く一致していることがわかる。

以上の計算結果と実験結果との比較により、本等価回路定数の算定法が妥当なものであることが判明した。

5. む す び

本文では、2相サーボモータの等価回路定数 r_1, x_m, r_2, x_1 を簡単な試験により、実験的に求める方法に

ついて示した。すなわち、(1) r_1 は励磁巻線の直流抵抗を DC ブリッジなどを用いて実測する。(2) x_m, r_2 は励磁巻線を直流励磁し、制御巻線を開放した場合の2相サーボモータの直流制動トルク特性から最大制動トルク値、ならびにそのときの回転速度を実測する。(3) x_1 は停動時の励磁巻線に対する印加電圧、入力電流、および励磁巻線と並列に同調用コンデンサを接続した場合の同調電流を実測する、などにより、それぞれの等価回路定数が容易に求められることを明らかにした。次いで、本等価回路定数の算定法を適用し、出力 3 W, 6 W の2機種の供試機について、その等価回路定数を算定し、この求められた定数を用いて、供試機の平均トルクと振動トルク特性の計算を行い、その実験結果と比較した。その結果、いずれの場合も両者間にはかなり良い一致が示されており、本等価回路定数の算定法が妥当なものであることが確かめられた。

最後に、種々ご教示くださった群馬大学の須藤二全教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) A.E. Fitzgerald and C. Kingsley: Electric Machinery, p. 528, McGraw-Hill
- 2) 須藤, 横塚, 篠宮, 町田: 誘導機の直流制動に関する解析, 昭 41 電連大 424
- 3) 横塚: かご形誘導電動機の制動特性, 計測自動制御学会論文集, 5-5, 82/88 (1969)
- 4) A. Diamond: Effect of Driving Source Impedance on Motor Performance, AIEE, Appl. & Ind. No. 40, 529/531 (1959)
- 5) 沼倉: 2相サーボモータの伝達関数, 計測と制御, 1-1,

Fig. 7
Comparison of the calculated and experimental values, where $V_{m2}=100$ V, $V_{e2}=0$ 120 V, $f=50$ Hz

- 36/42 (1965)
- 6) 須藤, 篠宮: ゼロ制御電圧時における 2 相サーボモータの発生トルクとダンピング係数の検討, 計測と制御, 8-10, 695/700 (1969)
- 7) 須藤, 戸恒: 2 相サーボモータの振動トルクの解析, 計測自動制御学会論文集, 7-2, 106/112 (1971)
- 8) 須藤, 戸恒, 篠宮: 2 相サーボモータの位相制御時における振動トルクの解析, 計測自動制御学会論文集, 8-1, 96/103 (1972)
- 9) 松塚, 渡辺: 2 相サーボモータの等価回路の決定, 昭 35 年電気学会東京支部大会 40 (1960)
- 10) 須藤, 横塚: 2 相サーボモータの等価回路定数の求め方およびその検討, 計測自動制御学会論文集, 3-2, 122/128 (1967)
- 11) 江尻: 2 相サーボモータの交差磁界法による解析, 計測自動制御学会論文集, 1-2, 63/74 (1965)
- 12) 江尻: 2 相サーボモータのトルク変動と振動, 計測自動制御学会論文集, 1-2, 189/198 (1965)
- 13) 江尻: カサーボ機構における 2 相サーボモータの振動問題, 計測と制御, 5-1, 3/11 (1966)
- 14) 江尻: 計器用キャリア形位置サーボ機構の微小振動, 計測と制御, 5-11, 780/790 (1966)
- 15) 江尻: 2 相サーボモータのパラメトリック共振, 計測自動制御学会論文集, 2-1, 53/62 (1966)
- 16) 須藤, 篠宮, 戸恒, 梅沢: 2 相誘導発電機形加速度計の基礎特性の検討, 制御工学, 11-6, 18/23 (1967)
- 17) 茂木: シンクロとサーボモータ, book, 日刊工業新聞社 (1964)
-