

2相 서보전동기에 관한 고찰

임 달 호

(한양대 공대 전기공학과 교수)

1. 序 言

1970년대 初부터 製造 및 應用技術이 급격히 發展한 小形制御用 電動機는 현재 産業用 Robot, NC工作機械 및 電子計算機 周邊入出力裝置 등과 같은 Mechatronics (Mechanics + Electronics) 機器에 있어서 電子의 制御를 機械的 動作으로 變換하는 Actuator로서 매우 많이 사용되고 있다. 이러한 電動機는 工場이나 事務室에서 이용되는 여러 種類의 機器에 있어서 各 機器들의 機能에 따라 가장 적합한 特性을 갖는 電動機가 선택되어 사용된다.^{1), 3)~4)}

精密한 位置制御를 필요로 하는 Mechatronics 機器들에 있어서는 Step Motor와 直流 Servo電動機가 주로 이용되어 왔다.^{2), 5)} 한편 交流電動機가 이용되는 應用分野에 있어서는 電力用 半導體素子の 進歩와 Microprocessor 技術의 發達에 따라 Inverter에 의한 可變速制御技術이 매우 發達하였다. 이러한 制御技術의 高度化에 의해 誘導電動機의 制御性能이 直流電動機와도 견주어질 수 있게 되어 과거 Step Motor나 直流電動機가 담당하던 位置制御Servo System의 驅動源이 誘導電動機로 대체되는 추세에 있다.^{2), 5)}

이에 따라 本稿에서는 交流Servo 중 가장 많이 이용되는 2相交流 Servo System에 대하여 간단히 알아보고 여기에 사용되는 電動機의 磁束驅動 (Flux-Forced)

및 電流驅動 (Current-Forced) 特性에 대하여 記述하기로 한다.

2. 2相 Servo 電動機

Servo 電動機는 一般電動機의 基準에서 보면 좋은 機械라고는 할 수 없다. 사실 Servo 電動機의 Goodness Factor는 1 미만이며, 그 主機能은 임의의 Torque를 갖는 負荷를 원하는 位置에 도달하도록 位置制御를 하는 것이다. 이러한 Servo 電動機는 籠型回轉子가 주로 사용되지만 Drag-Cup回轉子도 종종 사용된다. 또한 보통의 小形 Servo 電動機는 定電壓源보다는 定電流源으로 구동하는 것이 制御特性 面에서 有理하다.^{1), 5), 6)}

그런데 誘導機의 制御는 電源의 全部 또는 一部를 직접 制御하여야 하지만 直流機의 경우에는 勵磁電源만을 制御하면 되므로 같은 出力에서는 直流 Servo System보다 交流 Servo System이 더 커지게 된다. 그러나 이런 點은 電力用 半導體素子和 制御理論의 發展에 힘입어 문제되지 않게 되었으며, 誘導機가 直流機보다 經濟的이며, 견고하다는 등의 長點으로 해서 2相 Servo 電動機가 低電力 Servo System에 널리 사용되게 되었다. 그 理由는 첫째 2相으로 하면 相順의 변경, 나아가 回轉方向의 變更이 容易하며, 둘째 한 相은 직접 電源에 연결하고 나머지 한 相만을 Servo Loop에 연결하므로 System

構成이 매우 간단하다는 長點을 갖기 때문이다. 또 다른 長點은 直流機는 短點인 界磁時定數를 갖는다는 短點이 誘導機에는 없다는 점이다.^{3),4)}

이러한 2相誘導機의 Torque를 制御捲線으로 制御하는 方法으로는 다음과 같은 것들이 있다.^{1),5),6)}

(1) 基準相에 대한 制御信號의 時位相을 變化시키는 方法.

(2) 基準捲線에 대한 制御捲線의 位置를 變化시켜 制御信號의 空間位相을 變化시키는 方法.

(3) 制御信號의 크기를 變化시키는 方法.

이 方法들 중 方法(3)이 가장 간단하며, 制御特性이 우수하며 가장 널리 사용되고 있다.

한편 Servo 電動機 設計時 고려해야 할 點은 機械 그 자체의 特性을 좋게 하는 것 보다는 Servo System 전체의 特性이 最適이 되도록 해야 한다는 點이다. 또한 電動機가 가져야 하는 特性은 制御捲線에 信號가 없을 때의 驅動 Torque는 速度에 관계없이 零이 되어야 한다는 것이다. 制御信號가 界磁捲線에 공급되는 直流機는 殘留磁氣를 제외하고는 이 條件이 自動적으로 만족된다. 交流機에 있어서는 이 零信號條件은 静止 및 同期速度 부근을 제외한 모든 速度에서 Torque를 發生하도록 設計된 單相誘導機에서는 精確하게 만족되지만 電流驅動 電動機에 있어서는 零制御信號에서 零Torque가 되는 條件은 $G < 1$ 에서만 만족된다. 따라서 零Torque條件을 만족하면서 G 가 1에 가까워 지도록 設計하는 것이 필요하다.

3. 磁束驅動(Flux-Forced) 特性

대부분의 小形 Servo System은 電流驅動形이며, 大形 機는 定電壓條件에 가깝게 운전되기도 한다. 磁束驅動의 경우에 있어서는 空隙磁束이 捲線에 가해지는 電壓에 의해서만 決定되도록 하기 위하여 固定子 各相의 Impedance는 零으로 假定한다. 따라서 基準 및 制御電壓에 의한 空隙磁束波는 時間에 따라 交番하는 正弦波이며, 그 크기는 電壓에 比例하는 것으로 생각하면 된다.

基準捲線과 制御捲線이 空間적으로 90°의 位相差가 나도록 配列되어 있다면 基準磁束은 $b_1 = B_1 \cos(\pi x / p)$ $\sin \omega t$ 이고, 制御磁束은 $b_2 = -B_2 \sin(\pi x / p) \cos \omega t$ 가 되므로 總空隙磁束은

$$b = \frac{1}{2} (B_1 + B_2) \sin(\omega t - \pi x / p) + \frac{1}{2} (B_1 - B_2) \sin(\omega t + \pi x / p) \tag{1}$$

가 된다. 이를 複素式으로 表現하면

$$b = \frac{1}{2} (B_1 + B_2) e^{j(\omega t - \pi x / p)} + \frac{1}{2} (B_1 - B_2) e^{j(\omega t + \pi x / p)}$$

이다. 따라서 이에 對應되는 固定子表面 電流密度 j_s 는

$$j_s = J_s' e^{j(\omega t - \pi x / p)} + J_s'' e^{j(\omega t + \pi x / p)}$$

가 된다. 여기서 J_s' 와 J_s'' 는 位置 x 와 時間 t 에는 무관한 複素量이다.

空隙에서의 磁束密度와 固定子表面電流密度를 알면 機械의 發生Torque는 쉽게 計算된다. 즉, 複素表現式에 있어서 n 極機의 軸方向 單位길이당 Torque T 의 定常成分은 式(2)에 의해서 구할 수 있다.

$$T = \frac{np}{4\pi} \int_0^{2\pi p} \text{Re} \left[\frac{1}{2} (B_1 + B_2) J_s' + \frac{1}{2} (B_1 - B_2) J_s'' \right] dx \tag{2}$$

따라서 b 의 進行波成分 및 反射波成分으로부터 J_s' 와 J_s'' 를 구하여 式(2)에 代入하면 2相誘導電動機에서의 發生Torque를 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} J_s' &= \frac{1}{2} (B_1 + B_2) (v_s / \rho_r) (\sigma - j / G) \\ J_s'' &= \frac{1}{2} (B_1 - B_2) (v_s / \rho_r) [(j / G) - (2 - \sigma)] \\ T &= B_1^2 (v_s n^2 p^2 / 8 \pi \rho_r) [2 (B_2 / B_1) - (v_r / v_s) \{1 + (B_2 / B_1)^2\}] \end{aligned} \tag{3}$$

가 된다. 여기서 G 는 Goodness Factor이다. 式(3)에서 보면 磁束驅動의 경우 Torque / 制御信號 曲線은 回轉子抵抗과는 무관한 特性을 가짐을 알 수 있다.

式(3)을 利用하여 여러가지 速度에서의 Torque / 制御信號 曲線을 그린 것이 그림 1이다. 여기서 Torque는 $B_1 = B_2$ 일 때의 静止Torque에 대한 p.u.로 나타내었다. 그림에서 曲線은 거의 線形으로서 기울기는 回轉子表面 抵抗에 逆比例한다. 이러한 特性은 多相誘導電動機의 Torque方程式에서 2次Reactance X_2 를 무시하여 얻은 경우와 꼭같이 된다. 그리고 $B_2 = 0$ 인 경우의 Torque-速度 曲線은 모든 速度區間에서 Braking Torque가 存

在하는 單相誘導電動機의 運轉 Mechanism을 나타내고 있다. $B_2=0$ 인 경우 Braking Torque만 存在하므로 單相誘導電動機에 있어서의 正方向 Torque成分은 回轉子電流와 回轉子에 의해 생성되는 交叉磁束사이의 相互作用에 의해 發生된다.

制御特性을 고려해 보면 速度가 零인 경우는 理想的인 特性을 갖지만, 다른 모든 速度에 있어서는 非線形性을 가질뿐만 아니라 正-負 制御信號에 있어서 對稱이 되지 않는다. 그러나 同期速度의 $\frac{1}{3}$ 以下の 速度에서는 線形으로 보아도 무방하다.

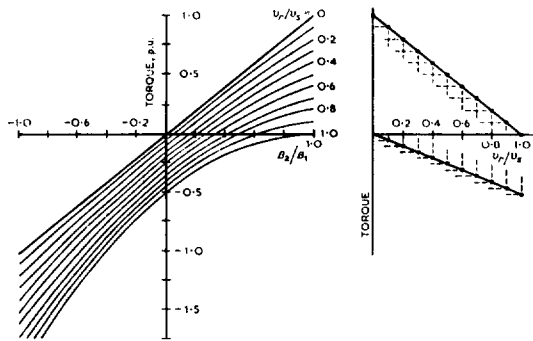


그림 1. 磁束驅動 2相誘導電動機의 Torque / 制御信號 曲線

4. 電流驅動 (Current-Forced) 特性

이 경우에 있어서는 制御電流의 位相은 基準捲線의 電流와 90° 의 位相差가 나며 基準電流는 一定하다고 假定한다. 그리고 J_{s2} 의 크기만을 變化시킴으로써 制御하게 된다.

基準勵磁電流 j_{s1} 과 制御勵磁電流 j_{s2} 는

$$j_{s1} = J_{s1} \cos(\pi x/p) \sin \omega t,$$

$$j_{s2} = -J_{s2} \sin(\pi x/p) \sin \omega t$$

이므로 固定子의 總表面電流密度는

$$j_s = \frac{1}{2} (J_{s1} + J_{s2}) \sin(\omega t - \pi x/p) + \frac{1}{2} (J_{s1} - J_{s2}) \cdot \sin(\omega t + \pi x/p)$$

가 된다. 따라서 驅動電流를 複素式으로 쓰면

$$j_s = j_1 + j_2 \quad (4)$$

가 된다. 여기서 j_1, j_2 는 각각

$$j_1 = \frac{1}{2} (J_{s1} + J_{s2}) e^{j(\omega t - \pi x/p)},$$

$$j_2 = \frac{1}{2} (J_{s1} - J_{s2}) e^{j(\omega t + \pi x/p)}$$

이다. 따라서 Torque는

$$T = \frac{\rho r n^2 p^2}{8\pi v_s}$$

$$\left[\frac{(J_{s1}^2 + J_{s2}^2) u (1-u^2 - 1/G^2) + 2J_{s1}J_{s2} (1-u^2 + 1/G^2)}{\{(1-u)^2 + 1/G^2\} \{(1+u)^2 + 1/G^2\}} \right] \quad (5)$$

가 된다. 여기서 $u = (V_r / V_s)$ 이다.

式(5)의 특별한 경우에는 (i) 多相驅動($J_{s1}=J_{s2}=J_s$)인 경우의 標準Torque表現式과 (ii) 보통의 單相運轉($J_{s1}=J_s, J_{s2}=0$)의 경우가 있다. 첫째 경우의 Torque는

$$T = J_s^2 (\rho r n^2 p^2 / 4\pi v_s) [\sigma / (\sigma^2 + 1/G^2)] \quad (6)$$

가 되며, 둘째 경우에는

$$T = \frac{1}{2} J_s^2 (\rho r n^2 p^2 / 4\pi v_s) [\sigma / (\sigma^2 + 1/G^2) - (2-\sigma) / \{(2-\sigma)^2 + 1/G^2\}] \quad (7)$$

가 된다.

3가지 G값의 경우에 대하여 式(5)로부터 구한 Torque / 制御電流 曲線을 그림 2,3 및 4에 나타내었다. 이 세 경우 모두에 있어서 極間격, 空隙 및 電源周波數는 一定이며, G값은 回轉子表面抵抗으로 결정한 것이다.

그림2의 特性은 $G < 1$ 으로 매우 높은 回轉子抵抗을 갖는 경우로서 磁束驅動 System의 特性과 매우 비슷하다. 이 경우의 回轉子電流는 驅動電流에 비하여 매우 작으며 空隙磁束에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 誘導電動機에 있어서 Goodness Factor G를 작게 하면 電流驅動과 磁束驅動 사이의 制御特性은 그리 차이가 없다.

그림3의 特性은 그림2보다 훨씬 우수하다. 이 경우에는 Torque / 制御信號 特性이 $\frac{1}{2}$ 同期速度까지는 原點을 지나는 直線으로서 線形特性을 가지며 最大出力을 얻을

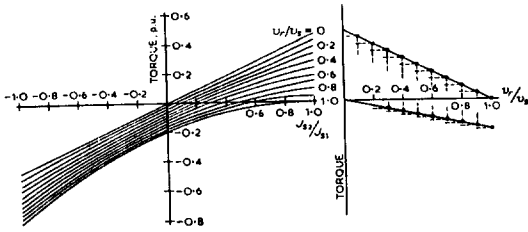


그림 2. $G=0.25$ 인 2相 誘導 電動機의 Torque / 制御信號 曲線

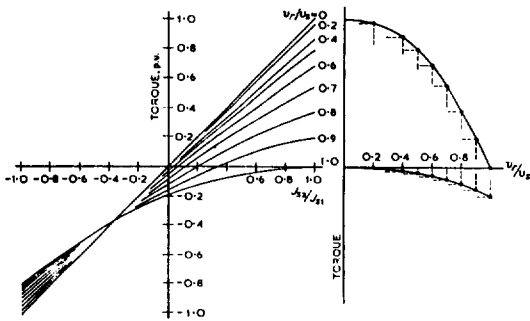


그림 3. $G=1.0$ 인 2相 誘導 電動機의 Torque / 制御信號 曲線

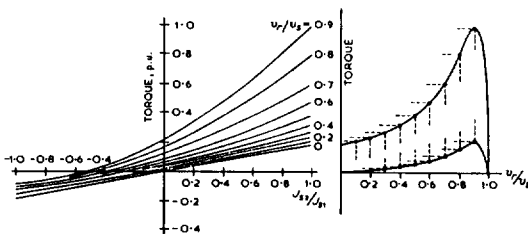


그림 4. $G=10.0$ 인 2相 誘導 電動機의 Torque / 制御信號 曲線

수 있다. 그리고 單相 Torque-速度 特性, 즉 零制御信號의 경우에는 Braking Torque가 存在하지만 $\frac{1}{2}$ 同期速度에서의 Braking Torque는 最大静止 Torque의 5% 정도에 지나지 않는다. 따라서 $G=1$ 인 경우의 特性이 거의 理想的인 特性이라 할 수 있다.

그림4는 $G=10$ 인 2相電動機의 制御特性이다. 이 경우에는 静止Torque가 最大Torque보다 작게 된다.

誤差動作 System에 있어서는 보통의 運轉狀態가 静止狀態이므로 이 點에서 最大Torque가 發生되도록, 즉

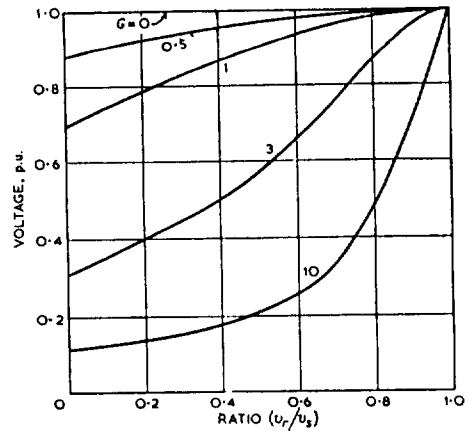


그림 5. 誘導電動機를 定電流로 驅動하기 위해 필요한 電壓에 미치는 G의 영향.

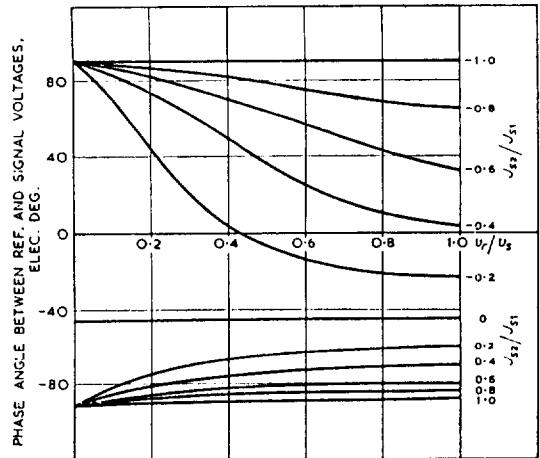


그림 6. $G=1.0$ 인 2相 機械를 電流 驅動할 경우의 基準 및 制御電壓의 位相差

$G=1$ 이 되도록 電動機를 設計한다.

한편 誘導電動機를 電流驅動하기 위해 필요한 電壓에 미치는 Goodness Factor G의 영향을 구해보면 그림5와 같이 된다. 또한 $G=1.0$ 인 2相機械를 90° 의 位相差로 電流驅動할 경우의 基準電壓과 制御電壓 사이의 理論的인 位相差 및 磁束 / 電壓比를 그림6 및 7에 나타내었다.

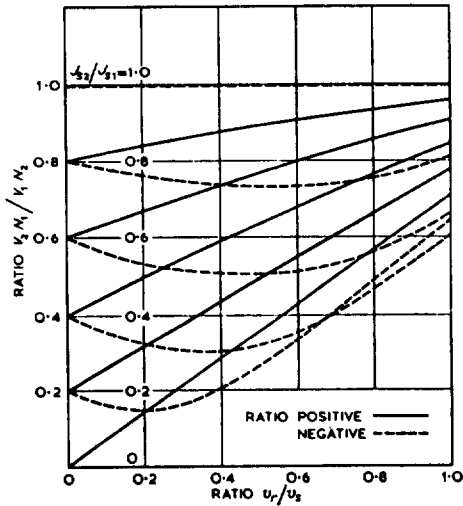


그림 7. $G=1.0$ 인 2相 機械를 電流驅動할 경우의 磁束 / 電壓比

5. 맺음 말

本稿에서는 2相交流Servo電動機의 특징과 이의 磁束驅動 및 電流驅動 特性에 대하여 扼要하였다. 이에 關한 더욱 상세한 내용은 參照문헌을 參照하면 될 것이다.

앞으로는 이러한 交流Servo電動機의 設計技法의 開發 및 制御特性의 解析 및 Microprocessor의 應用에 의한 制御技術의 發展에 더욱 깊은 研究가 있어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) E.R.Laithwaite, "Induction Machines for Special Purposes," George Newnes Ltd., 1966.
- 2) 李允鍾, "小形電動機의 現況과 展望," 大韓電氣學會 電氣機器研究會 第23回 春季 Symposium 論集, 23-1-8, pp.38~39, 1986.
- 3) 見城 尙志, 他, "AC サーボモータとマイコン制御," 總合電子出版社, 1983.
- 4) 見城 尙志, "小形モータの基礎とマイコン制御," 總合電子出版社, 1982.
- 5) 三宅 博, "小形 ACモータの設計と制御~ BASIC からCADまで~," 總合電子出版社, 1984.
- 6) 山田 博, "精密小形モータの基礎と應用," 總合電子出版社, 1975.