

# 브러시리스 직류 서보 전동기 및 제어기술

김 광 배

(한국과학기술원 전기제어 연구실장)

## 1. 서 론

서보 전동기는 직류 서보 전동기와 교류 서보 전동기로 분류되며 교류 서보 전동기는 誘導形과 同期形으로 구별된다. 또한 同期形 교류 서보 전동기 중에서 회전자가 영구자석으로 구성된 전동기를 브러시리스 직류 서보 전동기 (Brushless DC Servo Motor, or Permanent Magnet Synchronous AC Servo Motor)라고 한다.

브러시리스 서보 전동기의 특징을 살펴보면 다음과 같다.<sup>1)</sup>

1. 維持, 保守性이 좋다.  
(브러시나 整流子가 없다.)
2. 應答特性이 좋다.  
(회전자의 慣性모멘트가 작다.)
3. 效率이 좋다.  
(브러시 摩擦損 및 회전자 銅損이 없다.)
4. 冷却이 용이하다.  
(회전자에 권선이 없다.)
5. 瞬間許容 최대토크가 크다.  
(정류자가 없다.)
6. 速度制御 및 位置制御가 용이하다  
(회전자 位置검출기 내장)

위와같은 특징때문에 이 전동기는 NC선반, 밀링 등 공작기계와 인쇄기, 압연기, 컨베어, 산업용 로봇 등 산

업용 기계에 사용되고 있다. 또한 브러시 가루에 의한 문제가 발생하지 않으므로 클리인 룸(Clean room)이나 의료기기 등 그 사용범위가 다양하다.

이 전동기의 용량은 주로 2kw급 이하이며 반도체 소자 가격의 하락과 교류 전동기 제어기술의 발달에 따른 서보 시스템의 교류화 추세로 1986년에는 서보 전동기 시장의 약 10%를 차지 하였고 1991년에는 30%이상을 점유할 것으로 예상된다.<sup>3)</sup>

이 전동기의 최대회전수는 대체로 3,000~6,000[rpm]이며 位置精度는 0.1°정도의 제어가 가능하다. 또한 0~3,000[rpm]까지의 速度應答는 약 10ms이다.“ 이렇게 종래의 직류 전동기와 마찬가지로 應答特性이나 制御特性이 좋으며 또한 교류 전동기의 장점도 갖추고 있어 각종 산업기기 및 자동화 기기에 널리 사용되고 있는 브러시리스 직류 서보 전동기의 종류에 따른 구조 및 제어특성을 살펴보고 아울러 문제점 및 그 개선방안 등을 서술하기로 한다.

## 2. 브러시리스 직류 서보 전동기

브러시리스 직류 서보 전동기는 종래의 브러시가 있는 직류 전동기와 달리, 電機子권선이 고정자측에 설치되고 界磁용 영구자석은 회전자측에 설치되어 있다. 그 기본 구조는 그림1과 같다.

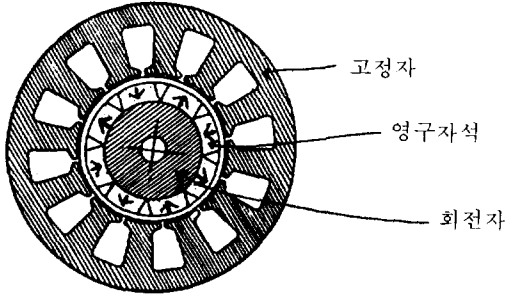


그림 1. 브러시리스 직류 서보 전동기의 기본 구조

브러시리스 직류 서보 전동기에서는 직류 전동기의 기계적인 整流子를 인버터로 대체하여 電機子 전류를 분배해서 전동기의 회전력을 발생한다. 이 때 電機子 起磁力과 界磁起磁力의 상호작용에 의해 발생하는 회전력을 일정하게 하려면, 界子의 자극위치를 기준으로 해서 電機子 전류의 분배 시퀀스를 결정해 주어야 한다. 따라서 고정자측 권선의 전류 방향 및 분배 시퀀스를 바꾸기 위하여 회전자의 절대자극 위치를 검출할 센서가 필요하다. 이 센서로는 홀소자, 레졸버 그리고 포토엔코더 등이 사용된다.

브러시리스 직류 서보 전동기의 특성을 결정하는 가장 중요한 요소는 회전자에 장착되는 영구자석의 재질과 형상이다. 현재, 영구자석형 서보 전동기에 가장 널리 쓰이고 있는 영구자석은 Samarium Cobalt (SmCO<sub>5</sub>, Sm<sub>2</sub>CO<sub>17</sub>) 자석이다. 이 자석은 높은 에너지 밀도(20~30MGOe)를 가지고 있어 전동기의 Power density를 향상시키고, 큰 保磁力(8,000~9,000Oe)으로 減磁의 위험없이 높은 피크 토크(일반적으로 6:1를 낼 수 있게 한다. 이 외에 Linear Demagnetization, 양호한 열적 안정성 등의 우수한 특성을 가지고 있다. 또 저속에서 큰 전류가 흐르는 경우 발생하는 토크 리플도 자석의 투자율이 μ<sub>0</sub>에 근사한 값이어서 電機子 反作用 자속이 미약하므로 억제할 수 있다.<sup>7)</sup>

브러시리스 직류 서보 전동기는 고정자의 역기전력의 파형에 따라 크게 Sinusoidal 브러시리스 직류 서보 전동기와 Trapezoidal 브러시리스 직류 서보 전동기로 나뉘어진다.

## 2.1 Sinusoidal 브러시리스 직류 서보 전동기

일반적으로, Sinusoidal 브러시리스 직류 서보 전동기에서는 회전자에 장착되는 영구자석의 Pole pitch factor를 0.81로 한다. 그리고, 이 때 각 상에 발생하는 토크를 정현파로 만들기 위하여 사용하는 주요 기술로는 다음의 3가지를 들 수 있다.<sup>7)</sup>

- ① 고정자 슬롯의 Skewing
- ② 특수한 권선 분포
- ③ 특수한 형상의 영구자석

고정자 슬롯 또는 회전자의 영구자석을 한 슬롯 피치만큼 Skewing 시켜서 릴럭턴스 토크를 제거하고, 고정자 권선의 분포를 정현적으로 하여 정현파의 역기전력을 발생시켜 토크의 파형이 정현파가 되도록 만든다. 그러나 특수한 모양의 영구자석을 만드는 문제는 希土類 영구자석의 경우 Powdered metal을 Press 하여 만들기 때문에 정현파의 자속을 발생하는 형상으로 만드는 것은 현재의 기술로는 불가능하다.

고정자 권선의 쇄교 자속 분포와 고정자 전류가 정현파라고 가정하고 3상 브러시리스 직류 서보 전동기를 회전자 기준축 d-q 변환에 의해 전압 및 토크 방정식을 구하면 다음 식(1),(2),(3)과 같다.<sup>7),8)</sup>

$$V_{ds} = R \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$V_{qs} = R \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r \cdot \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi_m \cdot i_{qs} \quad (3)$$

단, P : 극수

$\omega_r$  : 회전자의 전기 각속도

$\Phi_m$  : 영구자석에 의한 등가 쇄교자속

$i_{ds}, i_{qs}$  : 고정자의 d,q축 전류

$$\lambda_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + \Phi_m$$

$$\lambda_{qs} = L_s \cdot i_{qs}$$

$L_s$  = 고정자의 동기 인덕턴스

Sinusoidal 브러시리스 직류 서보 전동기의 전류 및 자속의 벡터 다이어그램은 그림2와 같다.<sup>7)</sup>

만일 고정자 전류  $i_s$  중 d축 전류 성분  $i_{ds}=0$ 으로 하면 역기전력과 고정자 전류가 同相이 되어 최대 토크/전류 운

### 2.2 Trapezoidal 브러시리스 직류 서보 전동기

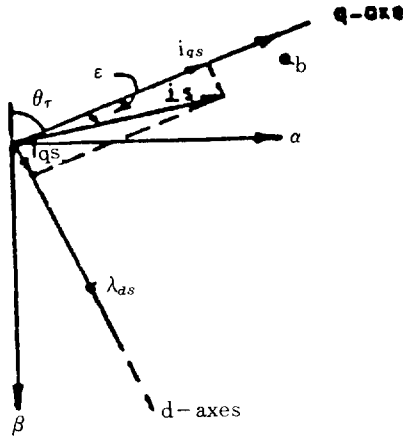


그림 2. 전류 및 자속의 벡터 다이어그램

전을 하게되며, 이 때의 토크는 식(4)와 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi_m \cdot i_s \quad (4)$$

즉, 회전자 위치에 대하여 정현적으로 공급 자속이 분포되고 정현파의 고정자 전류가 인가되면, 그 때 발생하는 토크는 리플이 없고 회전자 위치와 무관한 값이 된다. 여기서 고정자 전류를 회전자 위치에 대하여 정확한 정현파로 만들어 인가하여야 하고 이를 위하여 회전자 위치를 정밀하게 검출하는 것이 중요하다.

다음 그림3은 Sinusoidal 브러시리스 직류서보 전동기의 토크 발생 원리를 도해적으로 보여주고 있다.<sup>9)</sup>

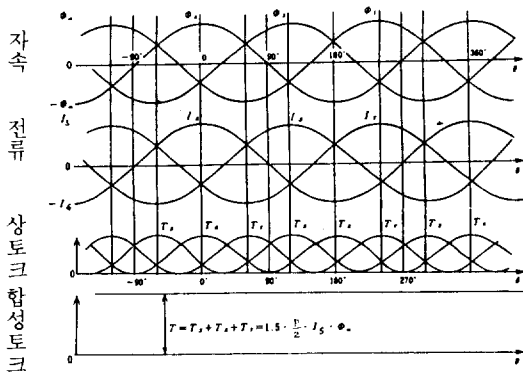


그림 3. Sinusoidal 브러시리스 직류 서보 전동기의 토크 발생 도해

회전자에 장착되는 영구자석의 Pole pitch factor를 1에 가깝게 하고 Magnetic fringing을 고려하면 고정자 권선의 쇄교 자속분포는 Trapezoidal 형태로 된다. 그리고 고정자 슬롯을 Skewing시키면 역기전력 역시 Trapezoidal 형태로 된다.<sup>6)</sup>

고정자 권선의 쇄교 자속 분포가 Trapezoidal 형태이고 각 상전류가 120°(전기각)폭의 구형파인 경우 3상 브러시리스 직류 서보 전동기의 토크식은 아래와 같이 구해진다. 그림4에서 알 수 있듯이 각 상의 발생 토크가 120°구형파 형태를 나타내므로 3상 합성 토크는 다음식(5)와 같다.

$$T_e = 2 \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi_m \cdot i_s \quad (5)$$

위식과 같이 회전 토크를 발생하려면 회전자의 위치 검출기가 전동기 60°회전마다 회전자 위치를 검출하여 해당 고정자 권선에 전류를 흘려 주어야 한다.

식(5)에는 표현되지 않았지만, Trapezoidal 브러시리스 직류 서보 전동기에서 가장 큰 문제는 저속 운전 영역에서의 脈動토크(Pulsating torque)이다. 이 脈動 토크는 전

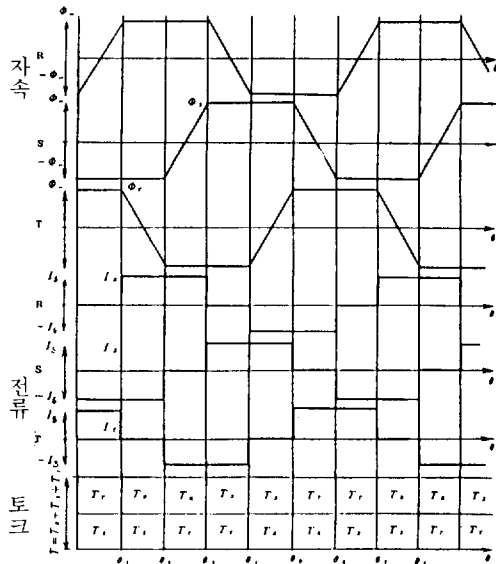


그림 4. Trapezoidal 브러시리스 직류 서보 전동기의 토크 발생 도해



야를 제외하고는 가격이 싸고 성능이 우수한 Trapezoidal 브러시리스 직류 서보 전동기가 계속 널리 쓰일 것이다.<sup>3)</sup>

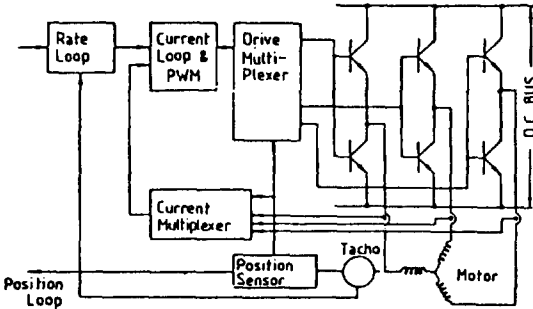


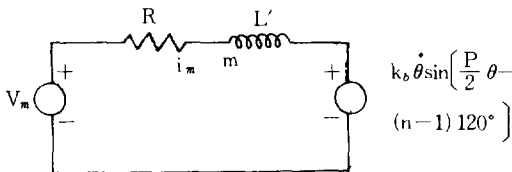
그림 6. Trapezoidal 브러시리스 직류 서보 전동기의 제어 회로

그림 6은 Trapezoidal 브러시리스 직류 서보 전동기의 일반적인 제어 회로의 블록 다이어그램이다.<sup>4)</sup>

고속 영역 운전시 역기전력이 증가하면서 인버터의 전류 제어 능력이 저하되어 발생 토크가 떨어지게 된다. 이 경우 역기전력의 파형(즉 회전자 위치)을 기준으로 인버터의 스위칭 시간을 앞당겨서 발생 토크량을 증대시킨다. 그러나 이 경우 脈動 토크가 증가하고, Phase advance 량이 30° 이상이면 토크/전류비가 상당히 저하된다는 것을 고려하여야 한다. 이에 대해서는 4절에서 다룰 것이다.

#### 4. 切換角 제어에 의한 토크-속도 특성 개선

브러시리스 직류 서보 전동기는 속도가 증가함에 따라



- 단, n : 상 번호
- m : 상호 인덕턴스(고정자)
- $\theta$  : 회전자 위치각
- $K_b$  : 역기전력 상수

그림 7. 등가회로

전동기의 역기전력에 의한 고정자 상전류의 감소로 토크가 현저하게 줄어든다. 본절에서는 切換角 제어(Advanced Commutation Angle Control)에 의한 고속 영역에서의 토크-속도 특성 개선방안을 검토하고자 한다. 여기서 切換角이라함은 인가전압과 역기전력과의 위상각을 말한다.

3상 브러시리스 직류 서보 전동기를 Delta 결선한 경우 한 상에 대한 등가회로는 그림7과 같이 표현할 수 있다.<sup>16)</sup>

그림7에 의하여 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$V_n = Ri_n + L' \frac{di_n}{dt} + m \frac{d}{dt} \sum_{p=1}^3 i_p + K_b \dot{\theta} \sin\left(\frac{P}{2} \theta - (n-1)120^\circ\right) \quad (6)$$

또한 전동기의 토크는 각 상에서 발생된 토크의 합이므로

$$T_e = \sum_{n=1}^3 K_T \cdot i_n \sin\left(\frac{P}{2} \theta - (n-1)120^\circ\right) \quad (7)$$

가 된다.

식(7)에 의하여 전동기의 토크를 구하기 위해서는 먼저 각상에 흐르는 전류를 구해야 하는데 이 고정자 상전류는 각 상의 인가전압과 역기전력의 상호작용에 의하여 복잡한 비선형 미분방정식으로 표현된다.

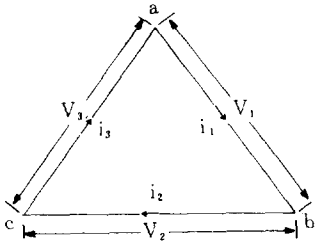
따라서 여기서는 C. K Taft<sup>16)</sup>가 전개한 것과 같이 인가전압을 Fourier Series로 표시한 식으로부터 전류식을 구하여 브러시리스 직류 서보 전동기의 토크식을 속도( $\omega$ )와 切換角( $\phi$ )의 함수로 나타내고자 한다. 3상 전동기의 권선을 Delta 결선 하였을 때 인가전압과 Commutation interval 및 역기 전력을 그림8 및 그림9에 나타내었다.

인가전압을 Fourier Series로 표시할 경우 전동기의 속도에 관계되는 것은 주로 기본항이므로 그림9의  $V_1, V_2, V_3$ 를 Fourier Series의 기본항으로 표시하면 식(8)과 같이 된다.

$$V_n = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_s \cdot \sin\left[\frac{P}{2} \theta + \phi - (n-1)120^\circ\right] \quad (8)$$

$\phi$  : 切換角

식(8)을 식(6)에 대입하면 다음과 같이 된다.



Interval	State	a	b	c	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>
330°→30°	7	g	g	V <sub>s</sub>	0	-V <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>
30°→90°	3	V <sub>s</sub>	g	V <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	-V <sub>s</sub>	0
90°→150°	4	V <sub>s</sub>	g	g	V <sub>s</sub>	0	-V <sub>s</sub>
150°→210°	2	V <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	g	0	V <sub>s</sub>	-V <sub>s</sub>
210°→270°	6	g	V <sub>s</sub>	g	-V <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	0
270°→330°	5	g	V <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	-V <sub>s</sub>	0	V <sub>s</sub>

그림 8. 인가전압 및 Commutation interval

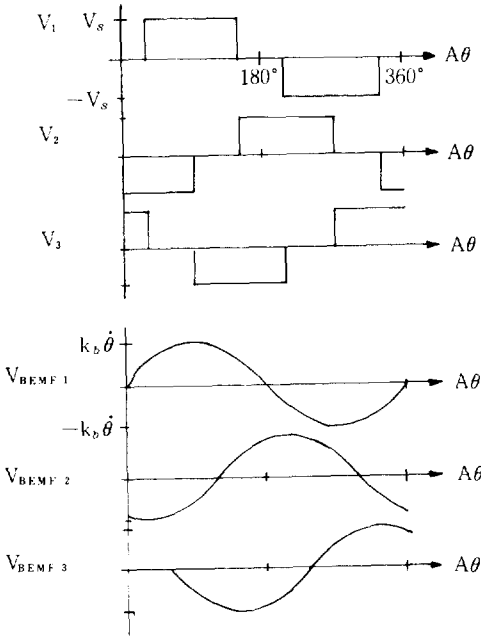


그림 9. 인가전압 파형 및 역기전력 파형

$$= Ri_n + L' \frac{di_n}{dt} + m \frac{d}{dt} \sum_{p=1}^3 i_p + K_b \dot{\theta} \sin \left[ \frac{p}{2} \theta - (n-1) 120^\circ \right] \quad (9)$$

식(9)로부터 전류  $i_n$ 를 구하면 식(10)과 같이 된다.

$$i_n = I_m \left[ \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_s \cdot e^{j[\omega t + \phi - (n-1)120^\circ - \tan^{-1}(\frac{L'-m}{R} \cdot \omega)]} \right]$$

$$\left. \right] \quad (10)$$

식(10)을 식(7)에 대입하면 토크를 구할 수 있다.

$$T_e =$$

$$\frac{3\sqrt{3} V_s}{\pi} \cdot K_T [R \cos \phi + (L'-m) \omega \cdot \sin \phi] - \frac{3k_T k_b \theta R}{2} \frac{R^2 + (L'-m)^2 \omega^2}{\omega^2} \quad (11)$$

식(11)로부터 전동기의 토크  $T_e$ 는 속도  $\omega$ 와 切換角  $\phi$ 의 함수임을 알 수 있다. 따라서 임의의 속도에서의 최대토크를 발생시키기 위한 最適切換角  $\phi^*$ 은 식(11)의  $\phi$ 에 대한 도함수를 0로 하면 구할 수 있으므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3\sqrt{3} k_T \cdot V_s}{\pi [R^2 + (L'-m)^2 \omega^2]} \cdot [-R \cdot \sin \phi + (L'-m) \omega \cdot \cos \phi] \quad (12)$$

$dT_e/dt = 0$  로 부터

$$\phi^* = \tan^{-1} \left( \frac{L'-m}{R} \cdot \omega \right) \quad (13)$$

식(13)으로부터 전동기의 속도가 0일때 최대토크를 발생시키기 위한 最適切換角  $\phi$ 는 0이며 속도의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 그림 10에 속도변화에 따른 最適切換角  $\phi^*$ 의 관계를 나타내었다.

이와같이 전동기의 속도변화에 따라 속도의 함수인 最適切換角  $\phi^*$ 를 구하여 전동기의 상전류를 切換시키면 보다 좋은 토크-속도특성을 얻을 수 있는데 특히 고속영역에

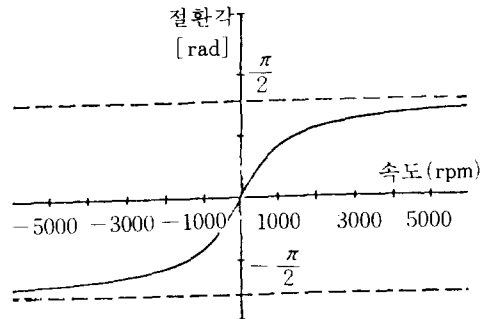


그림 10. 최적切換角 ( $\phi^*$ ) - 속도 특성

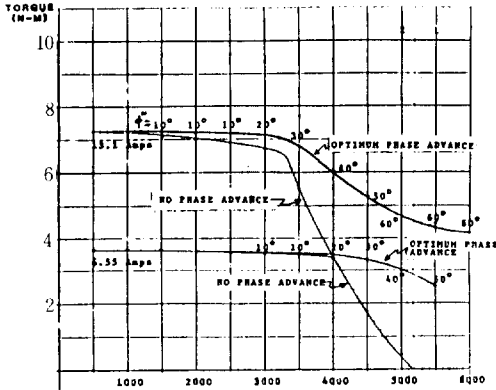


그림11. 토크-속도 특성 곡선(Trapezoidal Drive)

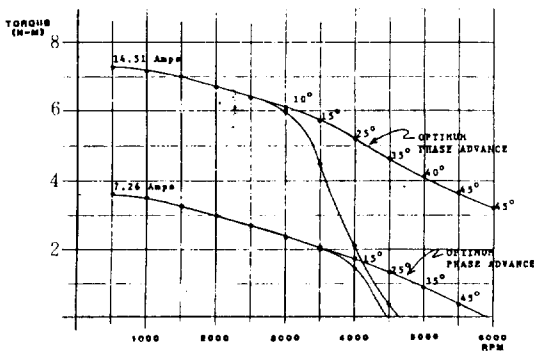


그림12. 토크-속도 특성 곡선(Sinusoidal Drive)

서 월등한 특성개선이 이루어진다.

그림11과 그림12에서 Robert H. Comstock [3]가 제시한 Trapezoidal Drive와 Sinusoidal Drive의 경우 最適切換角에 의한 토크-속도 특성곡선을 예로 나타내었다.

이 그림에서 알 수 있듯이 Trapezoidal Drive와 Sinusoidal Drive 모두 고속영역에서 현저한 토크-속도특성이 개선됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

브러시리스 직류 서보 전동기는 종래의 직류 서보 전동기를 대체하는 차세대 서보 전동기이다.

이 전동기는 브러시와 정류자가 없어 보수 점검이 필요 없고 전동기 설치시 제한이 없기 때문에 기계설계상의 자유도가 크다. 또한 전동기의 회전자를 구성하는 布土類 영구자석의 끊임없는 개발로 많은 성능향상이

예상되며 고분해능의 엔코더출현 및 마이크로 프로세서와 전력전자 응용기술의 발달로 보다 정밀한 속도 및 위치제어가 실현될 것이다.

현재는 제어기의 가격이 다소 비싸나 이에 관련된 전용 IC의 개발 및 제어 기술의 발달로 점차 가격이 인하되어 보편화가 예상된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 小野 忠宏, "브러시리스 DC サーボモータ, 最先端の制御用モータ, pp 54~59, 1984
- 2) R. Krishnan, "Selection Criteria for Servo Motor Driver," IEEE IA-23, NO.2, pp 270~275, Mar./ Apr, 1987
- 3) R. H. Comstock, Trends in Brushless PM Drive and Motor Technology - Overview, Motor-Con., pp 1~15, Oct. 1986
- 4) Hideo Dohmeki, and Mitsuo Nasu, "Development of a Brushless DC Motor", IMCSD, pp 63-71, June, 1985
- 5) T. M. Jahns, "Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE IAS Conference Record, pp 814~823, 1986
- 6) A. C. Stone and M. G. Buckley, "Novel Design and Control of a Trapezoidal Back EMF Moter", Motor-Con, pp86~95, April 1985
- 7) E. K. Persson and S. Meshkat, "Brushless Servo System with Expanded Torque-Speed Operating Range". Motor-Con., pp 96-106, April, 1985
- 8) 김광배 외 2인, "적용제어를 이용한 동기형 교류 서보 전동기의 속도제어," 전기학회 학술대회논문집, pp 351~354, 1987
- 9) 新村佳久, "브러시리스 DC 모터, の制御," 小形モータ設計マニュアル, pp 663~691, 1986
- 10) A. Nabaе, S. Ogasawara and H. Akagi, A "Novel Control Scheme for Current-Controlled PWM Inverters," IEEE IA-22, No. 4, pp 697~701, 1986
- 11) G. Pfaff, A. Weschta and A.F. Wick, "Design and Experimental Results of a Brushless AC Servo Drive," IEEE IA-20, No. 4, pp 814~821, Jul./ Aug., 1984
- 12) J. Holtz, and S. Stadtfeld, A Predictive Conroller for the Stator Current Vector of AC Machines Fed from A Switched Voltage Source, IPEC-Tokyo, pp 1665~1675, 1983
- 13) P. Pillay, R. Krishnan, "Control Characteristics and Speed Controller Design for High Performance Permanent Magnet

- 
- Synchronous Motor Drive," IEEE PESC Conference Record, pp 598~606, 1987
- 14) M. Brosnan and N. T. Barber, "Rare-Earth High Performance Brushless Drives and their Applications," Motor-Con., pp 75~85, April, 1985
- 15) Hoang LE-HUY, R. Perret and R. Feuillet, Minimization of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives, IEEE IAS Conference Record, pp 790~797, 1985
- 16) C. K. Taft and R. Gauthier, Brushless Motor Torque Speed Curves, IMCSD, pp 73~89, June, 1985
- 17) Gary L. Blank and James J. Wrobel, "Commutation Angle Control of A Brushless DC Motor," IMCSD, pp 159~163, June, 1985
-