

# 정류각 제어에 의한 무정류자 직류 전동기의 운전특성 개선

論 文
4-3-3

(Driving Characteristics Improvement of Brushless DC Motor by Commutation Angle Control)

禹 廣 俊\* · 張 錫 九\*\* · 李 現 彰\*\*\*  
(Kwang-Joon Woo · Suk-Koo Chang · Hyun-Chang Lee)

## 요 약

Sinusoidal구동형 무정류자 직류 전동기에 비하여 컨트롤러의 제작 비용이 저렴하고, 토크가 상대적으로 큰 Trapezoidal 구동형 무정류자 직류 전동기의 정류각을 마이크로프로세서에 의하여, 최대 토크가 발생할 수 있도록 최적제어하는 시스템을 설계, 제작하여 실험하였다.

실험결과 정류각을 전진 시키지 않은 경우에 비하여, 예로서 1000rpm에서 약 265%의 토크가 발생된 것과 같이, 전 운전구간에서 토크가 크게 향상되고, 운전범위가 확대됨을 확인할수 있었다.

## Abstract

In this paper, we design and experiment the microprocessor-based optimal commutation control system of the trapezoidal driving brushless dc motor, which has relatively higher torque and whose controller is relatively inexpensive than those of the sinusoidal driving brushless dc motor.

We confirm that the torque is very increased over all of the operating range, for example up to 265% at 1000rpm, and operating range is enlarged in comparison with the case of unadvanced commutation angle.

## 1. 서 론

사회가 정보화, 자동화 시대를 맞이함에 따라 자동화 설비에 필요한 서보電動機(Servo Motor)의 수요는 더욱 많아지고, 이에 따라 정밀하게 제어되

는 직류 서보電動機 중에서 無整流子 直流電動機 (Brushless DC Motor)의 용도는 더욱 광역화되어 가고 있다.

無整流子 直流 電動機는 동기형 서보전동기로서 유지보수성, 응답특성, 효율 등이 좋고, 냉각이 용이하며, 整流子(Commutator)가 없어 순간 허용 최대 토크가 크고, 속도 및 위치제어가 용이하므로<sup>1),2)</sup> 그 사용범위가 넓어지고 있다.

전압의 크기로 속도가 제어되는 무정류자 직류 전동기의 토크의 크기는 정류위치(Commutation

\*正會員: 檀國大 電子工學科 教授 · 工博

\*\*正會員: 大田工業大學 電氣工學科 教授

\*\*\*正會員: 檀國大 大學院 電子工學科 博士課程

position)로 결정되는데, 이러한 정류문제는 전동기가 최대 토-크를 발생하도록 회전수의 변화에 따라 인버터의 턴-온(Turn on) 위치가 최적이 되도록 한다.

이러한 最適整流에 대한 문제는 그간 많은 연구가 되어 왔으며 특히 Jacob tal<sup>3)</sup>, Alan K. Wallace,<sup>4)</sup> Antonio Fratta,<sup>5)</sup> Robert H. Comstock,<sup>6)</sup> 등에 의하여 이론적인 특성식은 발표되었으나 실제 System을 구성하여 실현시키는 문제는 과제로 남아있었으며, 국내 제조업체에서는 자극위치 검출기의 위치를 일정각 만큼 전진시켜 놓는 방법을 사용하고 있다.

본 연구에서는 Jacob Tal이 제안한 최대토-크를 발생시키기 위한 整流角(Commutation Angle)  $\alpha$ 를 실제 전동기에 적용시키기 위하여, Trapezoidal 구동형 3상 無整流子 直流電動機를 대상으로 마이크로프로세서를 이용한 디지털방식으로 제어 시스템을 구성하고, 이 시스템으로 구동되는 電動機의 특성을 측정하여 그 측정결과를 분석하므로써 最適整流을 실현시키는 문제에 한층 접근해 보고져 한다.

## 2. 최적 정류각(Optimal Commutation Angle)

고찰할 무정류자 직류 전동기는 3상 Y결선형이고 토-크는 위치함수와 같이 정현적으로 변한다고 가정해 볼 때, 그림 1의 Y결선형 3상 전동기 회로도도 대부분의 무정류자 직류 전동기의 근사치에 해당한다.<sup>3)</sup>

최적정류 위치를 결정하기 위하여, 전동기 속도는 일정하고 모든 전압, 전류는 주기적으로 정상상태 값에 정상적으로 도달하게 된다고 가정한다. 각 상의 작용이 동일하므로 a상에 관한 해석은 다음과 같다.

전압 방정식은

$$V_a = RI_a + L \frac{dI_a}{dt} + \frac{K_o}{N} \omega \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

이고

토-크 방정식은

$$T_a = K_o I_a \sin \theta \dots\dots\dots (2)$$

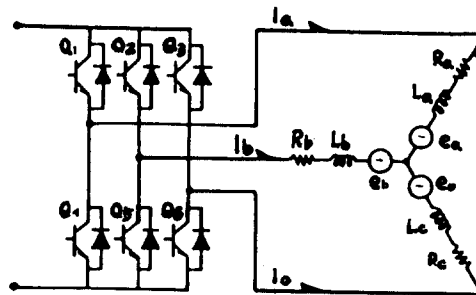


그림 1 3상 전동기의 회로도  
Fig. 1 Circuit of 3 Phase Motors

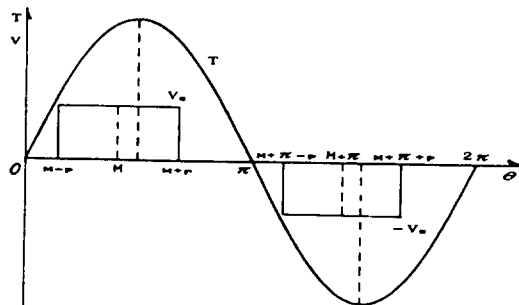


그림 2 전압과 토오크 파형  
Fig. 2 Waveform of Voltage and Torque

이다.

여기서  $R$  : 권선저항.

$V_a$  : a상의 상전압.

$\theta$  : 전동기의 전기각 위치.

$L$  : 권선의 인덕턴스.

$I_a$  : a상의 상전류.

$\omega$  : 전기각 주파수.

$N$  : 자극쌍의 수이다.

토-크 즉 회전자 자속의 파형은 정현파이고, 고정자에 인가하는 전압파형은 그림 2와 같이 구형파라고 가정한다. 이 전압의 펄스폭은  $2p$ 이고 그 중앙을  $M$ 이라 하면, 전류의 상승속도가 전동기의 회전속도에 비해 상대적으로 빠른 저속범위에서는  $M$ 은 대략  $\pi/2$  근처이나, 전류의 상승속도가 상대적으로 느린 고속범위로 갈수록  $M$ 의 위치를 앞쪽으로 이동시키는 것이 유리하다.

이  $M$ 의 위치를 앞쪽으로 이동시키는 것을 위상 전진(Phase Advance)이라 하고 최적  $M$ 의 위치를

알기 위하여 분석해 보면 다음과 같다.

$I_a$ 가 주기함수이므로 푸리에 급수로 전개하면

$$I_a = A_0 + A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta + A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta + \dots \quad (3)$$

이다. 식(3)을 식(2)에 대입하면

$$T_a = K_0 \sin \theta [A_0 + A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta + A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta + \dots] \quad (4)$$

와 같이 된다.

전동기의 속도가 일정하다면 평균 토-크의 값을 최대로 하면 되므로 식(4)에서 평균 토-크에 영향을 주는 항은  $B_1 \sin \theta$ 이며, 이 때의 평균토-크  $\bar{T}_a$ 는 다음과 같다.

$$\bar{T}_a = \frac{1}{2} K_0 B_1 \quad (5)$$

따라서  $\bar{T}_a$ 가 최대로 되려면  $B_1$ 이 최대이면 된다.

다음에  $B_1$ 과  $V_a$ 와의 관계를 전파정류시에 관하여 구하여 보면 다음과 같다.

$$V_a = \begin{cases} V_s : M - P < \theta < M + P \\ -V_s : \pi + M - P < \theta < \pi + M + P \\ 0 : \text{나머지 구간} \end{cases}$$

위의  $V_a$ 도 주기함수이므로 푸리에 급수로 정리하면

$$V_a = C_0 + C_1 \cos \theta + D_1 \sin \theta + C_2 \cos 2\theta + D_2 \sin 2\theta + \dots \quad (6)$$

위 식에서 고려되어야 할 상수는  $C_1$ 과  $D_1$ 이다. 따라서  $C_1$ 과  $D_1$ 을 구해보면 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_a(\theta) \cos \theta d\theta = \frac{4V_s}{\pi} \sin P \cos M \quad (7)$$

$$D_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_a(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{4V_s}{\pi} \sin P \sin M \quad (8)$$

식 (1), (3), (6)으로부터  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$ 의 관계식을 구하면

$$\begin{aligned} RB_1 - \omega LA_1 + \frac{K_0}{N} \omega &= D_1 \\ RA_1 + \omega LB_1 &= C_1 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)로부터

$$B_1 = \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} (RD_1 + \omega LC_1 - \frac{K_0}{N} \omega R) \quad (10)$$

이다. 식 (7), (8)과 (10)에서  $B_1$ 은

$$B_1 = \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[ \frac{4V_s}{\pi} \sin P (R \sin M + \omega L \cos M) - \frac{K_0}{N} \omega R \right] \quad (11)$$

이다. 이  $B_1$ 이 최대값을 가지려면  $(R \sin M + \omega L \cos M)$ 이 최대값을 갖도록 하면 되므로, 식(11)이 최대값을 갖는 조건을 구해보면

$$M = \frac{\pi}{2} - \arctan \left( \frac{\omega L}{R} \right) \quad (12)$$

이다. 식(12)는 최적 정류시의  $M$ 의 위치를 나타내며  $\omega=0$ 에서는  $M=\pi/2$ 이고  $\omega$ 가 증가하면 인버터 구동용 펄스의 위상은  $\arctan \omega L/R$ 만큼 앞서야 한다는 것을 보여준다. 따라서 속도에 따른 최적 정류각  $\alpha$ 는 다음과 같다.

$$\alpha = \arctan (\omega L/R) \quad (13)$$

위에서 구한 최적 정류각을 이용하여 a상에 발생 하는 토-크를 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{T}_a &= \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[ \frac{2V_s K_0}{\pi} \sin P (R \cos M + \omega L \sin M) - \frac{K_0^2}{2N} \omega R \right] \\ &= \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[ \frac{2V_s K_0}{\pi} \sin P (R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha) - \frac{K_0^2}{2N} \omega R \right] \end{aligned} \quad (14)$$

### 3. Microprocessor에 의한 최적정류의 실현

앞에서 본 바와 같이 무정류자 직류전동기는 정류펄스가 전동기의 속도  $\omega$ 에 따라  $\arctan(\omega L/R)$ 만큼 전진(Advance)되어야 최대의 토오크를 발생 할 수 있다. 그림 3에 최적정류회로가 부가된 4극 3상 Y결선 全波(full wave) Trapezoidal 구동형 무정류자 직류전동기의 제어 블럭도를 나타내었다.

무정류자 직류전동기의 제어 시스템은 속도인코더의 속도 감지소자로 부터의 속도  $\omega$ 를 전압으로 변환하는 주파수-전압변환기(그림 3의 「1」)와 속도

정류각 제어에 의한 무정류자 직류전동기의 운전특성 개선

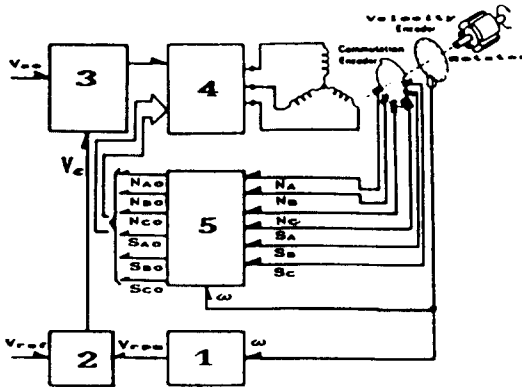


그림 3 제어 블럭도  
Fig. 3 Control Block Diagram

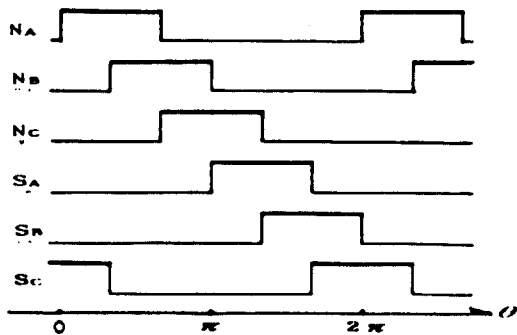


그림 4 정류 펄스파형  
Fig. 4 Waveform of Commutation Pulse

오차 전압을 출력시키는 속도차전압 발생회로(그림 3의 「2」), 차전압에 해당하는 직류전압을 출력시키는 컨버터(그림3의 「3」), 본 연구에서 실현시키려는 최적 정류회로(그림 3의 「5」) 그리고 고정자 코일에 정류펄스를 공급하는 전력스윗칭 회로(그림 3의 「4」)로 구성되며 전동기부는 회전자 위치감지소자 및 회전자터로 구성된 정류 인코더(Commutation Encoder)와 속도감지소자 및 슬릿트 디스크(Slit Disk)로 구성된 속도 인코더(Velocity Encoder), 리고 고정자 코일(Stator Coil) 및 회전자(Rotator)로 구성하였다.

그림 4에 정류인코더의 회전자위치 감지소자인 포토 커플러로부터 발생하는 정류펄스를 4극 3상 全波형 무정류자 직류전동기의 경우를 나타내었다.

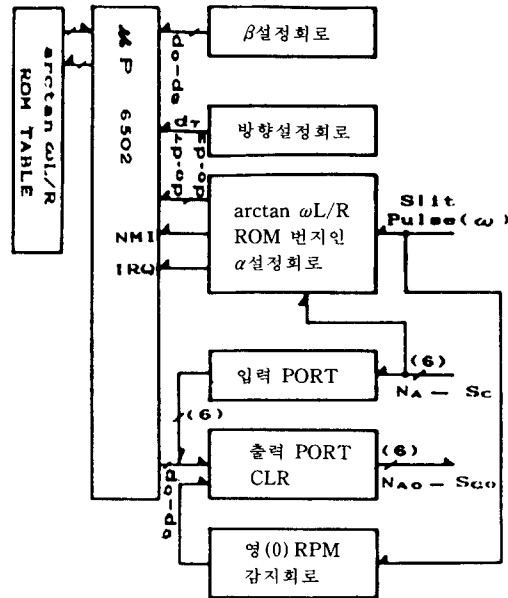


그림 5 최적 정류제어 시스템의 블럭도  
Fig. 5 Block Diagram of Optimal Commutation Control System

이들 6개의 정류펄스( $N_A, N_B, N_C, S_A, S_B, S_C$ )는 최적정류회로(그림 3의 「5」)에 입력되어 전동기의 속도  $\omega$ 에 따라  $\arctan(\omega L/R)$  만큼 위상이 앞서고, 또한 정류펄스의 폭이 최대의 효율이 되도록 조절된 최적정류펄스( $N_{A0}, N_{B0}, N_{C0}, S_{A0}, S_{B0}, S_{C0}$ )로 바뀌어 전력스윗칭회로(그림 3의 「4」)의 전력트랜지스터의 각 베이스단에 각각 가해진다.

그림 5에 최적정류제어 마이크로프로세서에 의하여 실현한 블럭도를 나타내었으며, 그림 6에는 Software의 흐름도를 나타내었다. 마이크로프로세서는 입력 Port를 통해 정류펄스  $N_A \sim S_C$ 의 패턴값을 읽어 들이며, 방향설정회로의 상태를 읽어 이 방향에 맞는 정류펄스 패턴이 되도록 패턴값을 바꿔주는 작업을 수행한다. 정류펄스의 패턴을 결정한 후 프로세서는 출력포트(Port)를 통해 정류패턴값을 출력시키므로써 전동기를 기동시킨다. 이와 같은 정류펄스 패턴값의 출력은 속도가 영(0)에서부터 일정속도가 될 때까지 계속되어 기동을 시킨 후, 정류펄스  $N_A$ 를  $\alpha$ 설정회로 중 불안정 회로에 가하여 정류펄스의 하강모서리(Falling Edge)에서

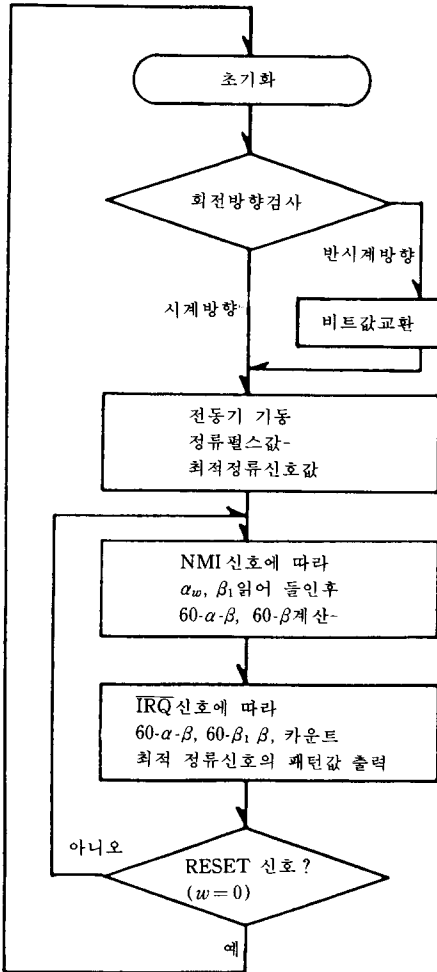


그림 6 소프트웨어의 흐름도  
Fig. 6 Flow Chart of Software

제어하고자 하는 전동기의 최대속도를 고려하여 결정된 일정폭을 갖는 샘플펄스(Sample Pulse)를 생성하고, 또한 정류펄스  $N_A$ 의 상승모서리(Rising Edge)에서 인터럽트 신호를 발생시켜 NMI 단자에 가한다.

한편  $\alpha$  설정회로중 펄스주파수 체배회로는 스릿 펄스를 체배하여 샘플펄스폭 동안의 업카운팅(Up Counting) 값에 따라 전달 테이블(Transfer Table : ROM Table)로부터 이때 각속도  $\omega$ 에 해당하는 전진각  $\alpha$  값을 읽어드린다.

또한 프로세서는 댁스위치(dip SW)로 구성된  $\beta$

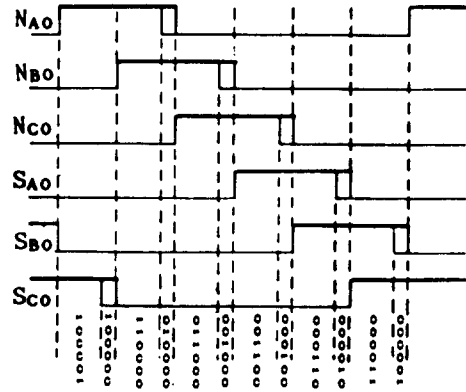


그림 7 출력펄스의 패턴  
Fig. 7 Pattern of Output Pulse

설정회로로부터 정류펄스 절삭각인  $\beta$  값을 읽어드린다.

이와 같이  $\alpha$ ,  $\beta$  값을 읽어 드린 후 NMI 인터럽트 서비스루틴에서는  $60 \cdot \alpha - \beta$  및  $60 \cdot \beta$  값을 계산하며, NMI 신호의 하강모서리에서 인터럽트 신호를 발생시켜 IRQ 단자에 가하며 IRQ 인터럽트 서비스루틴에서는  $60 \cdot \alpha - \beta$ ,  $60 \cdot \beta$ ,  $\beta$ 를 카운트하여 최적정류 신호인 그림 7과 같은 패턴값을 출력시킨다.

그림 7에는 최적정류시에 출력되는 펄스의 패턴 값을 나타내었다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

실험회로에서 전동기의 최대속도는 다이내모메터(Dynamometer)의 최대속도를 고려하여 2500(RPM)으로 설정하였으며, 정류인코더에 사용한 회전서터는 기계각 60도 동안은 ON, 120도 동안은 OFF 상태를 유지하도록 설계제작하였고, 자극위치 센서인 포-토 센서(Photo Sensor)는 각각 30도의 간격으로 6개를 설치하였으며, 또한 회전속도 검출용 스릿판은 120개의 홈을 만들어 PLL IC MC14046을 사용하여 주파수를 체배하여 사용함으로써 고가인 옵티컬엔코더(Optical Encoder)의 대용으로 사용하였다. 프로세서는 MCS6502를 사용하였고, 실험에 사용한 무정류자 직류전동기의 제원은 다음과 같다.

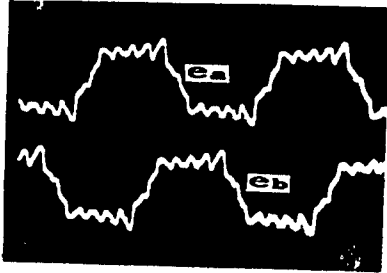


그림 8 고정자 코일의 역기전력  
Fig. 8 Back e.m.f of Stator Coil

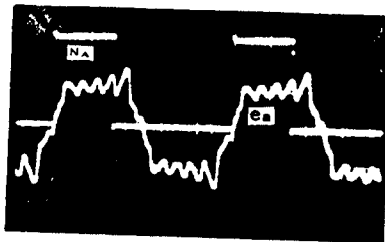


그림 9 정류펄스의 0점 위치  
Fig. 9 Zero-Point of Commutation Pulse

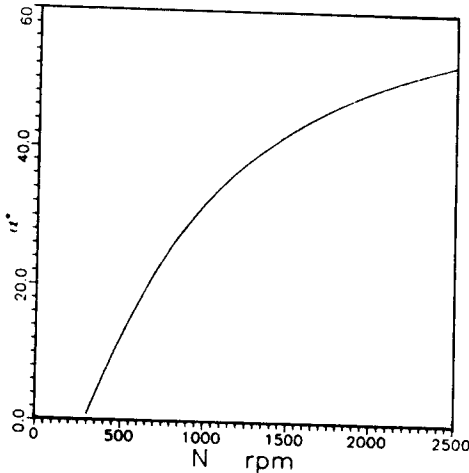


그림 10 전달 테이블의 내용  
Fig. 10 Contents of Transfer Table

권선저항  $R=10.7\Omega$  권선의 인덕턴스  $L=65\text{mH}$   
상전압  $V=130\text{V}$  자극 쌍수  $N=2$   
단위전류당 토크  $K_0=0.72\text{Nm/A}$

사용한 다이내모미터는 일본 Ocean Electric Works사 제품으로 1800rpm, 100KVA의 TYD-3을 사용하였으며 무부하시의 용량은 1800rpm에서 0.49Nm, 92W를 소비한다. 그림 8에는 고정자 코일의 역기전력  $e_a$ ,  $e_b$ 의 형을 표시하였으며 이 파형은 서로 120도의 위상차를 갖고 Trapezoidal 파형인 것을 확인할 수 있으며 리플은 전동기 제작상의 문제로 발생되었다고 생각된다.

자극 위치센서의 고정은 a상의 역기전력  $e_a$ 를 기준으로 하여 고정하였는데 일반적으로 전동기는 300rpm 이상에서 주로 사용되고, 프로세서의 계산 시간을 고려하여 0점의 위치를 20도 미리 전진시켜  $e_a$ 와 정류펄스  $N_A$ 의 파형이 그림 9에 표시된 것과 같이 되도록 하였다. 따라서 회전속도  $n$ 에 의하여 결정되는  $\alpha$ 값은 그림 10에 표시한 바와 같이 ROM 전달 Table에 저장되어 있으며,  $L/R$ 값의 변화에 따른 여러 개의 데이터를 저장시켜, 서로 다른 여러 전동기에 사용가능토록 하였으며, 저장된  $\alpha$ 값의 계산은  $\alpha = \arctan[(\pi n L) / 15R] - 20$ 으로 하여 각 속도에서의 전진시켜야 할 각에서 미리 센서의 위치를 전진시켜 놓은 각 20도를 감한 값으로 저장하였다.

그림 11에는 속도에 따른 정류펄스  $N_A$ 와 최적 정류펄스  $N_{A0}$ 의 파형을 도시하였는데 (a)는 500rpm일 때 12.5도(32.5-20), (b)는 1000rpm일 때 31.8도(51.8-20), (c)는 1500rpm일 때 42.4도(62.4-20), (d)는 2000rpm일 때 48.5도(68.5-20)가 전진된 파형이다.

그림 12에 Trapezoidal 구동형 3상 무정류자 전동기의 역기전력  $e$ , 구동전류  $I$  및 토크  $T$ 의 파형을 도시하였다.<sup>7)</sup> 실제의 Trapezoidal 구동형 직류 전동기의 자속파형은 Trapezoidal Wave이고 전류파형은 구형파이므로 토크의 파형이 그림 12와 같다.

그림 12와 식 (5), (11), (13), (14)를 이용하여 Trapezoidal 구동형 무정류자 직류전동기에서 발생하는 총 토크를 구해보면 다음과 같다.

$$T = 2\bar{T}_a = \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[ \frac{4V_s K_0}{\pi} \sin P (R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha) - \frac{K_0^2}{N} \omega R \right] \quad (15)$$

식(15)에서 첫째 항은 임피던스의 영향을 나타내

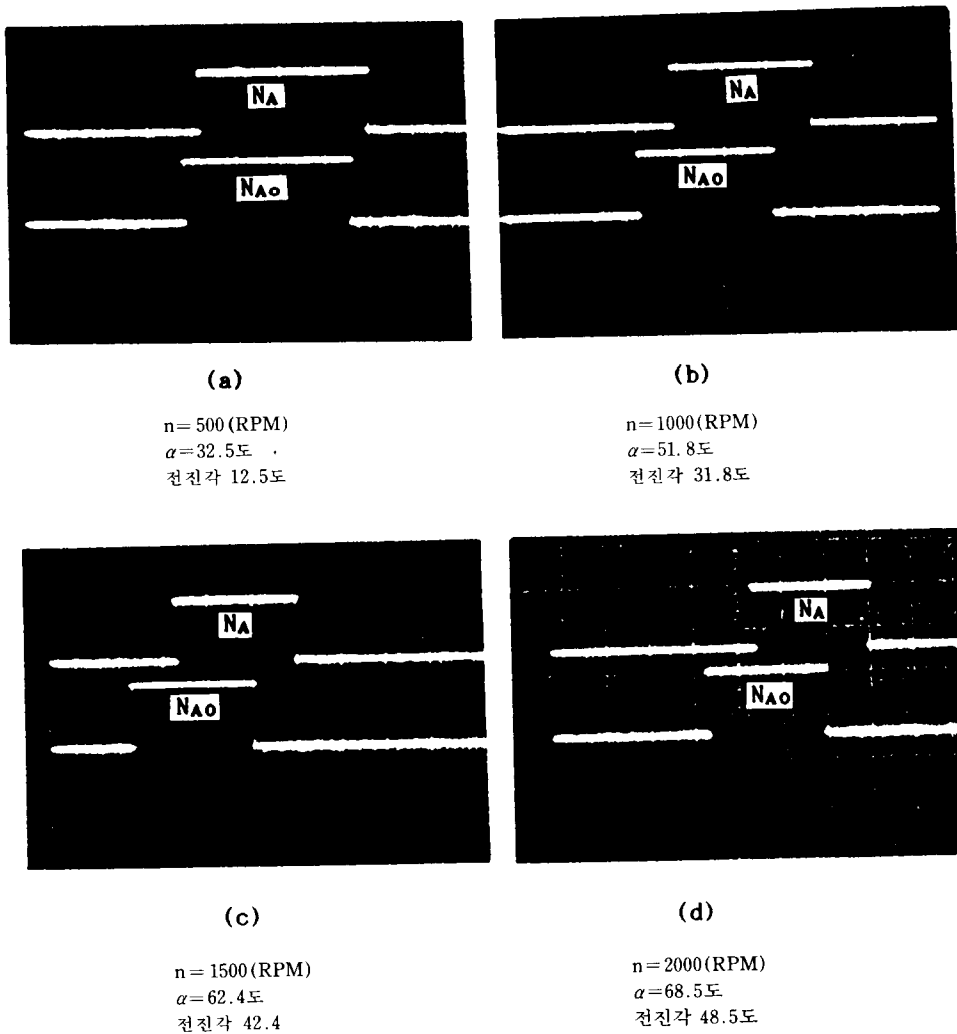


그림 11 최적 정류펄스 파형

Fig. 11 Waveforms of Optimal Commutation Pulse

며 회전속도  $\omega$ 가 증가하고 전류가 감소할 때 토크는 감소하게 되고, 둘째 항은 속도증가에 따라 토크를 방해하는 성분, 즉 역기전력의 영향을 나타낸다.

따라서 최적정류를 실현시키려면 항상  $\alpha = \arctan(\omega L/R)$ 이 되도록 전류의 위상을 전진시키면 된다.

식(15)에서

$R=10.7 \quad L=0.065 \quad N=2 \quad V_s=130 \quad K_0=0.72$ 을 대입하고  $\omega = \pi n/15$ 을, 또 본 시험에서는 정류펄스의 절삭각을  $\beta=1.5$ 도 즉 정류펄스의 폭을 118.5도로 고정하여 실험하였으므로  $P=118.5$ 도를 대입하여 정리하면

$$T = \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[ \frac{457K_0}{\pi} (R \sin \alpha + \omega L \cos \alpha) - \frac{K_0^2}{2} \omega R \right] \quad (16)$$

정류각 제어에 의한 무정류자 직류 전동기의 운전특성 개선

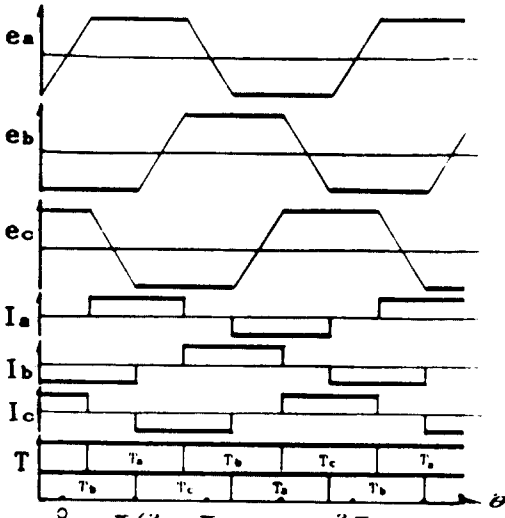


그림 12 역기전력과 전류 및 토크 파형  
Fig. 12 Waveform of Back e.m.f, Current and Torque

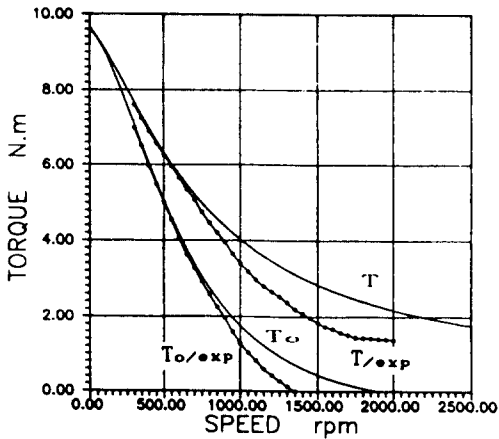


그림 13 실험결과  
Fig. 13 Experimental Result

이 된다. 이 식이 최적정류에 의한 토크를 구하는 식이다.

또한 정류각을 전진 시키지 않은 경우 즉  $\alpha=0$ 로 한 경우의 토크를  $T_0$ 라 하면

$$T_0 = \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[ \frac{457K_0}{\pi} \times \omega L - \frac{K_0^2}{2} \omega R \right] \quad (17)$$

가 된다.

식 17에 의한 정류각을 전진시키지 않은 경우의 이론적 토크  $T_0$ 는 1800rpm에서 영(0)이 되나, 실제 측정에서는 다이내모미터가 부하로 작용하기 때문에 1300rpm 이상의 운전은 불가능 하였으며, 최적 정류각 제어를 하여 운전하는 경우에도 측정범위나 다이내모미터의 정격으로 인하여 300rpm에서 2000rpm까지로 하였다.

그림 13에 실험에 의하여 구한 결과와 이론식에 의하여 계산한 결과를 비교하여 표시하였다. 그림에서 T는 이론식에 의하여 계산한 최적정류를 한 경우의 속도에 대한 토크 값이고  $T_0$ 는  $\alpha=0$ 로 한 경우의 결과이며, T/exp는 최적정류시의 실험에 의한 토크 값이고  $T_0/exp$ 는  $\alpha=0$ 로 했을 때의 실험에 의하여 측정된 결과를 표시한 것이다.

위의 실험결과에서 보면 회전수가 낮은 영역 즉, 토크의 크기가 큰 경우에는 이론 식에 의하여 계산한 값과 측정치가 거의 일치하나 회전수가 높아질수록 즉, 토크의 크기가 작아질수록 발생 토크의 크기에 차이가 많아지는 것을 알 수 있다. 즉 그림 13에서 보는 바와 같이 정류각을 전진시키지 않은 경우의 발생 토크는 각각 500rpm에서 5.01Nm, 750rpm에서 2.91Nm, 1000rpm에서 1.28Nm이나, 최적 정류상태에서의 발생 토크는 각각 500rpm에서 6.25Nm, 750rpm에서 4.74Nm, 1000rpm에서 3.39Nm로 대폭 향상되고 속도가 증가할수록 정류각을 전진시키는데 따른 효과가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 운전범위도 실험 측정가능 한계치인 2000rpm에서도 토크가 1.37Nm로서, 그 운전범위가 대폭 확장될 수 있음을 보여주고 있다.

5. 결 론

4극 3상 Y결선 Trapezoidal 전파 구동형 무정류자 직류전동기를 마이크로프로세서에 의해 정류전진각을 전동기의 속도 n에 따라 제어하므로써 최대 토크를 발생시키는 제어 system을 구성하여 특성 실험을 하였다.

Trapezoidal 구동형 무정류자 직류전동기는 Sinusoidal 구동형 무정류자 직류전동기에 비하여 콘트롤러의 제작 비용이 훨씬 저렴하고, 토크가



상대적으로 크다는 점에서 高精度를 요하지 않는 서보 시스템이나 인버터를 사용하는 교류전동기와 경쟁이 가능하며, 또한 방수, 방폭용 전동기로 사용하기에 적합하다.

실험결과 정류각을 전진시킨 경우가 정류각을 전진시키지 않은 경우에 비해

-발생 토-크가 대폭 증가되며

-운전영역이 고속 범위로 갈수록 그 효과는 더욱 뚜렷해지며

-운전영역 범위가 대폭 확대됨을 확인할 수 있었다.

실험결과에서의 이론값과 실험값의 토-크 차이는 실험용 전동기의 조악한 상태와, 최적 전진정류각의 크기가 전동기 속도 n만의 함수가 아니라 부하량에 따라 영향을 받는 것으로 유추된다.

앞으로, 정류전진각의 크기가 속도와 부하량의 함수로 표시되는 이론식의 고찰 및 초고속 범위에 서도 제어가 가능한 정류제어 시스템의 개발이 요구된다.

### 참고 문헌

1) R. H. Comstock, Trends in Brushless PM Drive and Motor, Technology-Overview, Motor-Con., pp.1-15, October 1986.  
 2) 小野 忠宏, “브라시레스 DC サーボ 모터 最

先瑞の 制御用 モータ”. pp.54-59, 1984.

3) Jacob Tal, “Optimal Commutation of Brushless Motors”, Proc.15th Ann. Sym. Incremental Motion Control B.C. Kuoed, pp.21-25, October 1986.  
 4) Rane Spee & Alan K. Wallace, “Performance Characteristics of Brushless DC Drives”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.24, No.4, pp.568-573, July/August 1988.  
 5) Antonio Fratta & Alfredo Vagati, “DC Brushless Servomotor: Optimizing the Commutation Performances”, Conf. IEEE. Ind. Appl., pp. 169-175, October 1986.  
 6) Robert H. Commstock, “Trends in Brushless PM Drive and Motor Technology”, Proc. 9th Motor-Con., pp.1-15, October 1986.  
 7) E.K. Persson and S. Meshkat, “Brushless Servo System with Expanded Torque-Speed Operating Range”, Motor-Con, pp.96-106, April 1985.  
 8) T. Kenjo & S. Nagamori, permanent Magnet and Brushless DC Motors, Sogo Electronics, September 1984.  
 9) 6500 Microcomputer Family programming Manual, MOS Technology Corp., pp.35-68, Oct. 1983.