

브러쉬 없는 직류전동기의 성능개선에 관한 연구

김 대우<sup>o</sup>, 허 옥열, 권 오규  
 인하 대학교 전기 공학과

A study on the characteristic improvement of BLDCM

D.W. KIM, U.Y. HUH, O.K. KWON

DEPT. OF ELECTRICAL ENG., INHA UNIVERSITY

ABSTRACT

In this paper the phase advance method is adopted for torque characteristics improvement of brushless D.C motor and the effect on motor characteristics is investigated. The optimal commutation position is calculated by computer simulation. This paper also implements a driver for brushless D.C motors using single-chip microprocessor, 8751.

I. 서 론

서어보 시스템에서 구동장치로 쓰이는 전동기는 최종적인 힘의 전달자로서 시스템 성능에 많은 영향을 주게된다 [1]. 현재 이러한 서어보 시스템에선, 입력 전압과 속도가 비례관계에 있고 가변속제어가 용이하고 토오크가 전류에 비례하여 선형제어가 가능한 직류전동기가 주류를 이루고 있다 [2]. 그러나 직류전동기는 회전자에 에너지를 공급 해주기 위해 브러쉬와 정류자가 필요한데 이러한 구조적인 단점 때문에 사용에 많은 제한을 받았으며 이와같은 문제점을 해결 하기 위해 브러쉬없는 직류전동기의 개념이 도입되었다.

제 2차 에너지파동 이후 브러쉬없는 직류전동기는 위치센서와 자성물질 및 관련소재의 개발에 힘입어 성능이 향상되면서 고효율이며 부수가 간단하고 무단변속이 가능하다는 장점을 지니게되어 폭발적인 수요를 갖게 되었다. 그러나 서어보 시스템의 설계목표가 고도화됨에 따라, 브러쉬없는 직류전동기의 성능향상을 위한 시도는 계속되고 있다.

최근 우수한 성능을 지닌 마이크로 프로세서가 개발 공급됨에 따라 제어 장치나 계측 장치에 많이 쓰이고 있는데, 이 중 에서 단일칩 마이크로 프로세서는 메모리를 내장하고 있고 주변기기와의 접합장치, 클럭 발생회로 등을 한개의 칩속에 포함하고 있어 소형경량화가 쉽고 사용이 간편하다는 점으로 인해 점점차 사용이 증가되는 추세에 있다. 이 논문에서는 브러쉬없는 직류전동기의 토오크특성을 개선하기 위해 단일칩 마이크로 프로세서를 사용하는 방법을 제시하고, 모의실험을 통해 이방법의 유용성을 확인하여 실제 장치의 실현을 수행한다.

II. 브러쉬 없는 직류전동기의 원리

브러쉬 없는 직류전동기의 운전 특성은 본래 직류전동기와 같으나 실제의 구조는 영구자석으로 되어 있는 동기전동기와 같고 회전자의 위치를 순서적으로 추정하기 위한 센서와 반도체 스위칭소자가 필요하게 된다 [2]. 이러한 스위칭 소자는 반도체소자의 놀라운 발전과 개발에 힘입어 영가로 공급되고 있다. 또한 위치 추정 센서로는 (1) 홀(Hall) 소자, (2) 엔코더(Encoder), (3) 리졸버(resolver) 등 여러 가지가 있다. 이 가운데 성능이 우수하고 또한 제한조건에서 유리한 홀소자의 동작원리를 보면 그림 2.1과 같다.

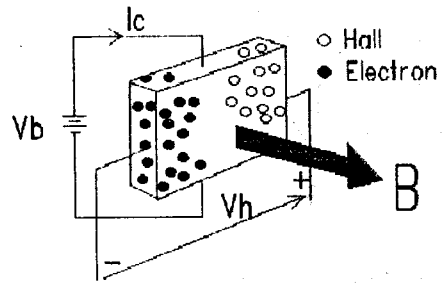


그림 2.1 홀 소자의 동작 원리

홀소자 양단에 그림 2.1 과 같이  $V_b$  를 인가하여  $I_c$  를 흘리고 자계  $B$  를 가하면 다음과같이 홀 전압  $V_h$  가 나타난다.

$$V_h = K \cdot I_c \cdot B \quad (1)$$

K : 홀상수 (const)  
 $I_c$  : 제어 전류  
 B : 자 계

이러한  $V_h$  는 영구 자석으로 되어있는 브러쉬 없는 직류전동기의 위치 추정센서로 적합함을 알수 있다.

브러쉬없는 직류전동기의 회전자계 발생을 위한 논리 순서를 보면 다음과 같다 [3],[5].

그림 2.2 는 기본적인 3상 Y결선 4극 브러쉬없는 직류전동기의 구동회로를 나타낸것이고 그림 2.3 은 기본적인 TR의 구동순서이며 그림 2.4 는 그림 2.3 의 순서에 의해 발생되는 회전자계의 방향을 나타낸 것이다. 만일 그림 2.4 의 회전방향을 거꾸로 하자면 그림 2.3 의 ON-OFF 순서를 반대로 해주면 된다. 따라서 그림 2.5 의 토오크-각 곡선을 보면 전동기의 구동 논리 순서를 4-6-2-3-1-5로 해주면 한 방향으로는 회전 토오크를 얻을수있고 그림 2.6 과 같다.

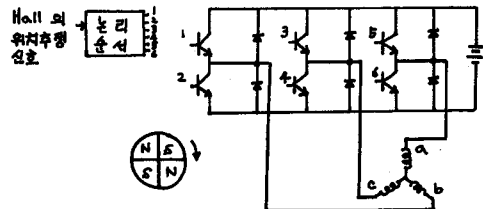


그림 2.2 브러쉬없는 직류전동기의 구동회로

ON-OFF	I	II	III	IV	V	VI
TR 1	/	/	/	0	0	0
2	0	0	0	/	/	/
3	0	0	/	/	/	0
4	/	/	0	0	0	/
5	/	0	0	0	/	/
6	0	/	/	/	0	0

그림 2.3 T.R의 구동순서

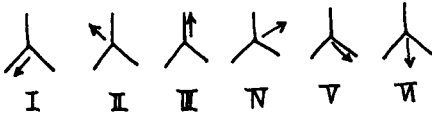


그림 2.4 회전 자계의 발생

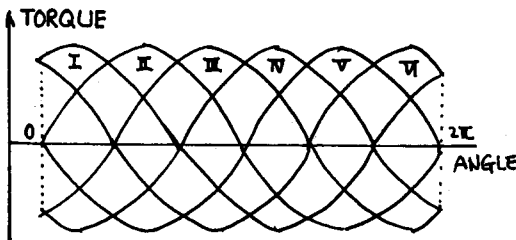


그림 2.5 토오크 - 각. 곡선

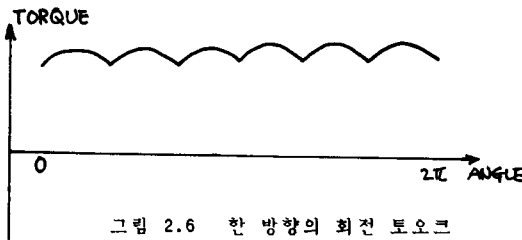


그림 2.6 한 방향의 회전 토오크

그림 2.5에서 알수있듯이 브러쉬없는 직류전동기는 각 순서마다 일정한 토오크가 발생하지 않고 맥동을 하고 있다. 기존의 직류전동기는 이러한 맥동을 정류자의 수를 많게 하여 맥동을 어느정도 줄일수 있지만 브러쉬없는 직류전동기의 특성상 1회전시의 전류수가 적기 때문에 토오크맥동이 크다. 또한 영구자석을 사용하기 때문에 코깅(cogging) 토오크에 의한 회전의 불균일도 문제가 된다 [7]. 이러한 회전 불균일을 줄여주는 방법으로 여러가지가 있지만, 우선 크게 구조적인 대책과 제어에 의한 방법으로 분류될수 있으며 다음과 같다

구조적인 대책

- 보조 돌극의 채용
- 보조자극의 사용

제어에 의한 방법

- PWM ; 매순간 권선의 전류를 감지하여 기준 전류파형과 비교함으로써 전류의 왜형을 줄여주는 방법
- 절환각 제어법 (Phase advance method) ----- C.K Taft

이외에 여러가지 방법이 많지만 이 논문에서는 C.K Taft가 제안한 절환각 제어 방법 (Phase advance method) 3), 4), 6] 을 응용하고 컴퓨터 모의 실험을

통해 결과를 예측 한다음 8751 단일칩 마이크로 프로세서로 이를 실현하고자 한다.

III. 절환각 제어법

이 절에서는 절환각 제어 방법의해 최적의 전류를 위한 위치의 계산법을 다룬다. m 상 전동기에서 1 번째 상의 모델은,

$$V_i = RI_i + L \frac{dI_i}{dt} + K_b w \sin(\theta - \theta_{0i}) \quad (2)$$

단,  $i = 1, 2, \dots, m$   
 $w = \frac{d\theta}{dt}$   
 $\theta_{0i} = \frac{2\pi i}{m}$

이며 토크 방정식은 식 (3) 과 같다.

$$T = \sum_{i=1}^m K_T I_i \sin(\theta - \theta_{0i}) \quad (3)$$

따라서 3 상 전동기의 모델은 식 (4) 와 같고 토크식은 식 (5) 와 같다.

$$\begin{aligned} V_a &= RI_a + L \frac{dI_a}{dt} + K_b w \sin \theta \\ V_b &= RI_b + L \frac{dI_b}{dt} + K_b w \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c &= RI_c + L \frac{dI_c}{dt} + K_b w \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$T = K_T [I_a \sin \theta + I_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + I_c \sin(\theta - \frac{4\pi}{3})] \quad (5)$$

식 (5) 에서 a 상 을 보면 다음과 같고,

$$\begin{aligned} V_a &= RI_a + L \frac{dI_a}{dt} + K_b w \sin \theta \\ T &= K_T I_a \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

이고  $I_a$ 의 푸리(Fourier) 급수 전개식은 (8)과 같다.

$$I_a = a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta + a_2 \cos 2\theta + b_2 \sin 2\theta + \dots \quad (8)$$

(8) 식 고조파중  $b_1$  이  $I_a$  에 가장 큰영향을 미치며 따라서 (7) 식은 근사적으로 (9) 식으로 되어  $b_1$  을 크게하면 토크가 커짐을 알수있다.

$$\bar{T} = \frac{1}{2} K_b b_1 \quad (9)$$

인가 전압은 다음과 같으므로,

$$V_a = \begin{cases} V_s & : y - a < \theta < y + a \\ 0 & : \text{elsewhere} \end{cases}$$

$V_a$  의 푸리 전개식은 (10) 과 같다.

$$V_a = c_0 + c_1 \cos \theta + d_1 \sin \theta + c_2 \cos 2\theta + d_2 \sin 2\theta + \dots \quad (10)$$

계수  $c_1$  과  $d_1$  은 각각 다음과 같다.

$$c_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_a(\theta) \cos \theta d\theta = \frac{V_s}{\pi} [\sin(y+a) - \sin(y-a)] = \frac{2V_s}{\pi} \sin a \cos y \quad (11)$$

$$d_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_a(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{2V_s}{\pi} \sin a \sin y \quad (12)$$

(6) 식과 (8)식, (10)식에서,

$$\begin{aligned} c_0 + c_1 \cos \theta + d_1 \sin \theta &= R(a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta) + L(w_b \cos \theta - a_1 w \sin \theta) + K_b w \sin \theta \\ &= R a_0 + a_1 R \cos \theta + b_1 R \sin \theta - a_1 w L \cos \theta + K_b w \sin \theta \end{aligned}$$

이므로

$$c_1 = R a_1 + w L b_1 \quad (13)$$

$$d = R b_1 - w L a_1 + K_b w \quad (14)$$

(13) 식과 (14) 식 으로부터 다음의 관계를 얻을수 있다.

$$b_1 = \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} (R d_1 + \omega L c_1 - K_b \omega R) \quad (15)$$

11) 식과 12)식, 15)식 으로부터,

$$b_i = \frac{1}{R_s + \frac{1}{\omega L_s}} \left[ \frac{2\sqrt{L_s}}{T} \sin\alpha (RSIN\alpha + \omega L\cos\alpha) \right]$$

이므로 b를 최대로 하기위해 y와 관계되는 부분 즉, RSINy + ωLcosy를 f(y)로 놓으면

$$\frac{d(f)}{dy} = \frac{d}{dy} (RSINy + \omega L\cosy)$$

$$= RCOSy - \omega L\siny = 0$$

b이 최대로 되는 최적의 위치 y는,

$$y = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

이 되며 다음 그림 3.1 과같이 도식적으로 나타낼 수있다.

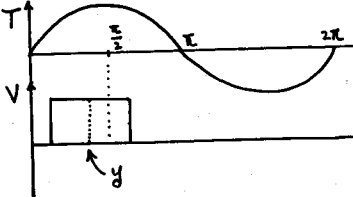


그림 3.1 최적의 위치 y

IV. 컴퓨터 모의 실험

이 절에서는 III 절에서 구한 결과의 유용성을 입증하기 위해 컴퓨터모의 실험을 수행한다. 컴퓨터모의 실험은 다음과같은 가정아래 수치해석적인 방법으로 행하였다 [8].

- 가정 1). 정속 운전
- 가정 2). 각상의 권선은 상호 결합되어 있다.
- 가정 3). 전동기의 특성은 온도가 상승해도 변함없다.

이와같은 가정아래 결과들을보면 그림 4.1-4.3 과 같다. 그림 1)은 전동기의 속도를 가변시키며 절환각을 변화시킨것으로 절환각을 변화시키면서 평균토크의 상승을 보이고 있다.그림 4.2는 토크 리플이 최소가 되는 절환각을 말해주고 그림 4.3은 각 절환각에 따른 리플 항을 보이고 있다.

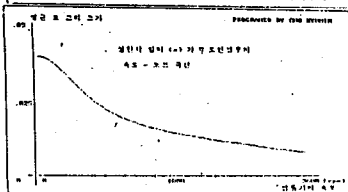
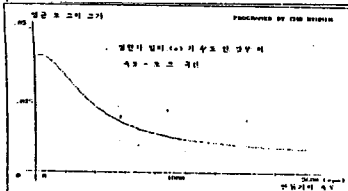
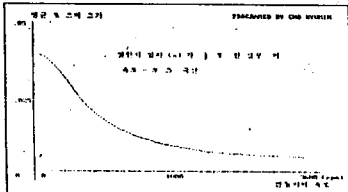


그림 4.1

속도 - 절환각  
- 토크

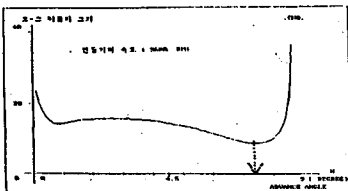


그림 4.2  
절환각 - 토크  
리플

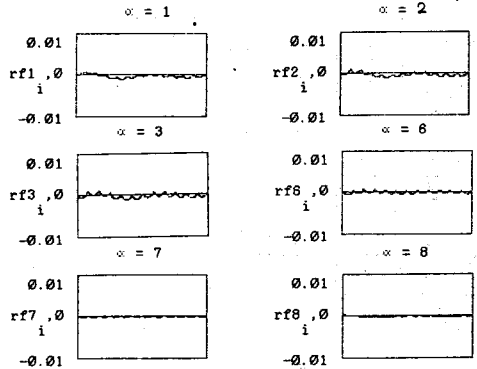


그림 4.3 절환각 - 리플 항

V. 시스템 하드웨어

이 절에서는 III 절과 IV 절에서 고찰한 내용을 실제 시스템을 통해 구현한다. 이 논문에서 사용하는 단일 칩 마이크로 프로세서 8751의 특징은 다음과 같다.

- 1) 제어전용의 8 bit CPU
- 2) 불리안 프로세서(single-bit processor)
- 3) 32 개의 양방향이며 비트조작가능한 I/O Line
- 4) 128 byte의 내장형 DATA RAM
- 5) 두개의 16 bit Timer/Counter
- 6) 전이중 방식의 UART
- 7) 클럭 발생회로 내장
- 8) 4K byte(EPROM)의 프로그램 내장영역
- 9) 64K byte의 프로그램 확장가능영역

또한 32 개의 I/O는 Byte 단위로 4 개의 Port로 구성되어 있으며 각 Port의 기능은 다음과 같다.

P0	AD0 - AD7	general I/O
P1		general I/O
P2	A8 - A15	general I/O
P3	alternate	general I/O

마이크로 프로세서 시스템 개발 장비로는 MICROTECK의 IN-CIRCUIT EMULATOR를 사용하였다.

V.1 시스템 DIAGRAM

이 시스템에서 측정되는 것은 스위칭순서를 정하기 위한 Hall소자의 출력과속도를 측정하기 위한 Hall 소자의 조합된 신호이므로 AD/DA 변환기가 필요없을 뿐만아니라 각 I/O Port는 DATA 래치(Latch)기능이 있으므로 별도의 하드웨어가 필요없이 몇개의 TTL 소자와 구동시켜주기위한 몇개의 스위칭 TR 만이 소요되므로 시스템은 그림 5.1 처럼 간단 해진다.

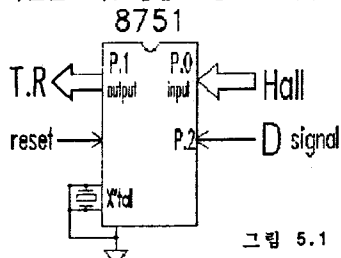


그림 5.1 시스템

실험에 사용된 전동기의 사양은 표 5.1 과 같다.

정격 전압	정격 속도	정격 전류	정격 부하	상수	수명
12 V	2600rpm	350mA	20g.Cm	3	20000시간

표 5.1 전동기의 사양

Hall 소자의 출력은 정방형이 아닌 관계로 프로세서의 입력 Port 에 인가 하려면 그림 5.2 와 같이 TTL Level 로 해주어야 한다.

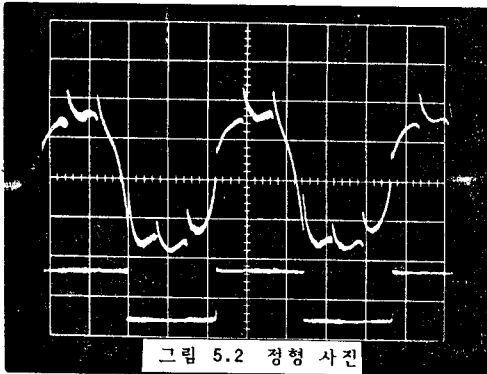


그림 5.2 정형 사진

프로그램을 통해 연산 되어져 나오는 출력은 Port 1 을 통해 나오며 입력 신호와 출력 신호의 순서는 그림 5.3 과 같다.

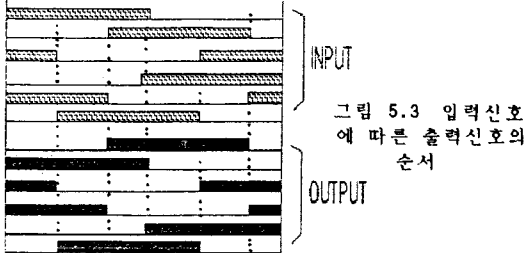
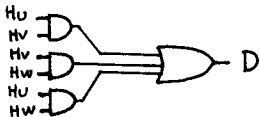


그림 5.3 입력신호에 따른 출력신호의 순서

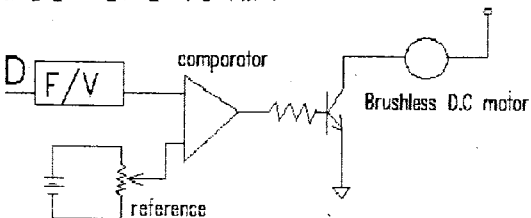
V.2 속도 측정 방법

전동기의 속도를 측정하는 방법은 소프트웨어적인 방법을 택하였고 사용되어진 신호는 홀신호의 조합인 D 신호를 사용하였다. 입력 Port 에서 신호 D의 High 상태를 count 하여 속도를 감지한 다음 COMPUTER의 실험의 결과를 ROM Table 로 부터 읽어내어 제어를 행한다.

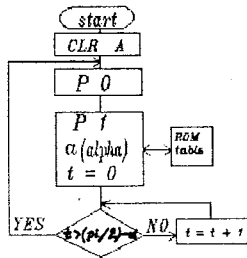
또한 회전 속도를 측정하기 위한 방법 으로는 3 개의 Hall 신호의 조합으로 하면 된다.



이 논문에서의 속도 제어는 비교적 간단한 FG servo 방식을 사용하였다. FG 신호로는 홀 신호의 조합인 D 신호를 사용하였다.



전동기 회전수에 비례하는 주파수신호를 F/V 변환기를 이용하여 직류 전압으로 변환한다. 이것을 기준 전압과 비교하여 그 차동출력이 브러쉬없는 직류전동기에 인가되는 전압을 제어 하도록 함으로써 속도를 일정히 유지시킨다.



흐름선도는 다음과 같다

VI. 결론 및 고찰

이 논문에서는 브러쉬없는 직류전동기의 성능을 개선하는 방법을 제시하고 이를 단일칩 마이크로 프로 세서를 써서 실현시켰다.

제어신호로는 Hall 신호의 조합인 D 신호를 이용하여 속도를 측정한다음 절환각 제어이론에 의한 컴퓨터 모의실험을 토대로 전동기를 제어하여 좋은결과를 얻을수있었다(그림 6.1-6.2). 그러나 D 신호의 분해능(3600 RPM 시 720 H)이 낮은 관계로 엔코더와 같은 고분해능의 기기를 사용 한다면 보다 나은 결과를 얻을 것이다.

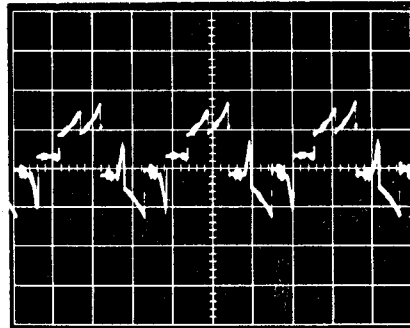


그림 6.1 절환각 제어 방법을 사용하지 않은 경우 (a상 전류파형)

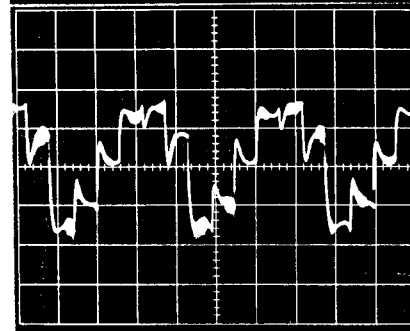


그림 6.2 절환각 제어 방법을 사용한 경우 (a상 전류파형)

VII. 참고 문헌

1. T.Kenjo, S.Nagamori " Permanent Magnet and Brushless D.C motors" SoGo Electronics publishing company. Tokyo 1984
2. Paul C.Krause "Analysis of Electric Machinery" McGrawHill 1987
3. C.K Taft,R.G Gauthier " Brushless Motor Torque-speed curves" Incremental motion control systems and devices
4. C.K Taft,R.G Gauthier " Brushless Motor Torque-speed and Efficiency-speed curves" Incremental motion control systems and devices
5. Walter H.Sakmann " A Brushless D.C Motor controlled by a Microprocessor with examples for a Three phase Motor " IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol IE-34 NO 3 August 1987
6. Jacob Tal " Optimal commutation of Brushless - Motors "
7. Hoang Le-Huy " Minimization of Torque Ripple in Brushless D.C Motor drives " IEEE Transactions on industry Applications Vol IA-22 NO 4 July / August 1984
8. Brice Carnahan " Applied Numerical Method " John Wiley & Sons 1969