

論文99-36T-9-8

# 회전자극 위치센서 없는 Brushless DC전동기의 운전에 관한 연구

## (Operation of Brushless DC Motor without a Rotor Magnet Position Sensor)

徐碩焄\*, 嚴于鎔\*\*

(Suhk Hoon Suh and Woo Yong Ohm)

## 요약

브러시 없는 직류전동기(BLDCM)는 일반 직류전동기에 비해 유지, 보수성, 응답특성, 효율이 좋으며, 구조상의 특성으로 냉각이 용이하다. 이러한 장점으로 여러 분야의 산업용 기계에 사용되고 있으며, 특히 브러시에서 나오는 전기 스파크가 없고 브러시 가루에 의한 문제가 발생하지 않으므로 화재나 폭발의 위험성이 있는 공정과 의료기기 등 정밀함과 청결함이 요구되는 곳에 사용될 수 있다. 그러나 이러한 형태의 전동기는 회전자의 자극을 검출하기 위한 위치센서가 필요하므로 전동기의 제어가 매우 복잡해진다. 특히 전동기가 외부와 완전히 차단되어 높은 온도나 낮은 온도 등의 극한 환경에서 사용되는 경우에는 반도체 소자로 구성되는 위치센서로 인해 그 신뢰도가 떨어지게 된다.

본 연구에서는 BLDCM의 회전자를 검출하기 위한 센서를 사용하지 않고 BLDCM의 특성에 의해 발생되는 역기전압을 검출하여 회전자의 위치정보로 사용하여 BLDCM을 운전하는 방법을 연구하였으며, 역기전압 검출회로와 마이크로컨트롤러를 이용한 제어부를 구성하여 실험을 통해 가능성을 입증하였다. 운전방법은 최초구동을 위해서 비동기 구동명령을 인버터에 인가하여 강제로 BLDCM을 구동시켰다. 구동된 후 알고리즘 적용 속도범위(300rpm~500rpm)에 이르면 전력선으로부터 검출한 역기전압을 이용해 회전자의 위치정보를 생성하고 이 위치정보에 동기를 맞추어 인버터에 구동명령을 인가하였다. 실험을 통해 최초 비동기 구동명령 모드에서 정상운전 모드로의 전환이 부드럽게 이루어지는 것을 확인할 수 있었으며, 알고리즘 적용 최고 속도인 500rpm까지 정상적으로 운전되는 것을 확인하였다.

## Abstract

Brushless DC Motor(BLDCM) has high efficiency. But this type of motor needs a rotor sensor which complicates the motor configuration. Rotor position sensor degrades system reliability in the severe environmental condition.

In this paper, we study a controller which permits the determination of the rotor position by the back EMF to eliminate the rotor position sensor. Also, since the back EMF is zero at standstill, a starting technique which permits the starting of an asynchronous motor without a sensor is described. The controller is implemented using microcontroller for minimal external component.

\* 正會員, 檀國大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Dankook University)

\*\* 正會員, 仁荷工業專門大學 電子科

(Dept. of Electronics, Inha Technical Junior College)

接受日字: 1999年5月27日, 수정완료일: 1999年9月13日

## I. 서론

브러시 없는 직류전동기(BLDCM)는 일반 직류전동기에 비해 유지, 보수성, 응답특성, 효율이 좋으며, 구조상의 특성으로 냉각이 용이하다. 이러한 장점으로 여러

분야의 산업용 기계에 사용되고 있으며, 특히 브러시에서 나오는 전기 스파크가 없고 브러시 가루에 의한 문제가 발생하지 않으므로 화재나 폭발의 위험성이 있는 공정과 의료기기 등 정밀함과 청결함이 요구되는 곳에 사용될 수 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 이러한 형태의 전동기는 회전자의 자극을 검출하기 위한 위치센서가 필요하므로 전동기의 제어에 매우 복잡해진다. 특히 전동기가 외부와 완전히 차단되어 높은 온도나 낮은 온도 등의 극한 환경에서 사용되는 경우에는 반도체 소자로 구성되는 위치센서로 인해 그 신뢰도가 떨어지게 된다.<sup>[2,3]</sup>

본 연구에서는 BLDCM에서 회전자극 위치센서를 사용하지 않고 전동기의 역기전압을 검출하여 회전자의 위치를 판단하고 이 정보를 이용해 전동기를 제어하는 것을 목적으로 했다.

## II. 알고리즘

### 1. BLDCM의 수식적 표현

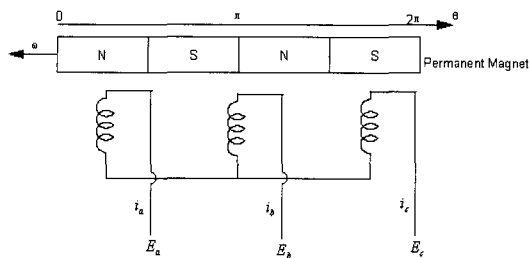


그림 1. 전동기의 해석적 모델  
Fig. 1. Analytic model of motor.

BLDCM의 등가회로는 그림 1과 같다. 그림 1에서 전기자 전류  $i_a$ 의 방향은  $E_a$ 와  $i_a$ 가 모두 정이고 전력이 전기자 권선에 유입되도록 선택하였으며, 전동기 축에서 발생하는 토크  $T$ 의 방향은 손실 토크  $T_{loss}$ 와 부하 토크  $T_L$ 의 방향과 반대가 되도록 정하였다. 인가전압  $E_a$ 는 식 (1)로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_a &= e_a + L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \\ &= K\Phi\omega + L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \end{aligned} \quad (1)$$

이때 축에서 발생하는 토크는 식 (2)와 같다.

$$T = K\Phi i_a \quad (2)$$

따라서 부하에 공급되는 토크  $T_L$ 은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_L = K\Phi i_a - J \frac{d\omega}{dt} - T_{loss} \quad (3)$$

식 (1)에서 전동기가 정상상태, 즉  $i_a$ 와  $\omega$ 가 일정할 경우에는 시간 도함수가 영이 되므로 전동기가 정상상태인 경우의 인가전압  $E_a$ 와 부하에 공급되는 토크  $T_L$ 은 식 (4)와 (5)로 표현된다.

$$E_a = K\Phi\omega + R_a i_a \quad (4)$$

$$T_L = K\Phi\omega - T_{loss} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서  $K\Phi\omega$ 를 역기전압(Back Electro-Motive Force)이라 한다. 역기전압의 방향은 인가해 주는 전압과 반대로 나타나며 회전속도  $\omega$ 에 비례한다. 여기에서 비례상수  $K\Phi$ 를 역기전압 상수라고 한다.

### 2. 역기전압의 검출

3상의 BLDCM은 인버터에 의해 전기각  $60^\circ$ 간격으로 ON, OFF가 되며 Y결선일 때 항상 2개의 코일이 ON되며 나머지 1개의 코일은 Floating 상태가 된다. 이때 Floating된 코일에서 역기전압을 검출할 수 있다.<sup>[4]</sup>

Y결선된 전동기의 터미널 전압을  $V_A, V_B, V_C$ 라 하고 코일의 중점 전압을  $V_N$ 이라고 하면 각 코일들은 그림 2와 같이 역기전압  $e_a, e_b, e_c$ 와 코일의 임피던스 성분인  $Z_A, Z_B, Z_C$ 로 표현될 수 있다.<sup>[5]</sup> 이때 인버터에 인가되는 전압은  $V_{CC}$ 이다. 터미널 전압은 Trapezoidal 형태의 파형이며 각각의 위상차는  $120^\circ$ 이다. A 상의 전압  $V_A$ 를 살펴보면  $60^\circ$ 에서  $180^\circ$ 사이와  $240^\circ$ 에서  $360^\circ$ 사이에서 전류가 흐르며,  $0^\circ$ 에서  $60^\circ$ 사이와  $180^\circ$ 에서  $240^\circ$ 사이에서는 전류가 흐르지 않는다.<sup>[6]</sup> 그림 2는  $180^\circ$ 에서  $240^\circ$ 기간 동안의 A 상의 등가회로이다.

등가회로에서 트랜지스터가 포화되었을 때의 전압강하를 무시하면 각 터미널의 전압은 식 (6), (7), (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$V_A = V_N + E_a \quad (6)$$

$$V_B = V_{CC} \quad (7)$$

$$V_C = 0 \quad (8)$$

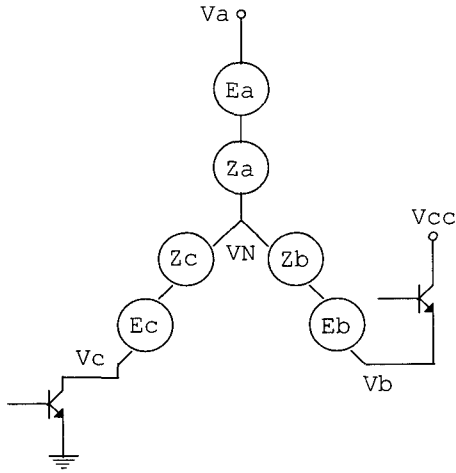


그림 2. 등가회로  
Fig. 2. Equivalence circuit.

이때 전동기에 흐르는 전류 I와 중점의  $V_N$ 의 전압은 식 (9), (10)과 같다.

$$I = \frac{V_{CC} - (E_b + E_c)}{Z_b + Z_c} \quad (9)$$

$$V_N = V_{CC} - E_b - I \times Z_b \quad (10)$$

일반적으로 역기전압은 대칭적이며 각상 코일의 임피던스가 같다고 가정한다면 각상의 역기전압은 식 (11), (12), (13)과 같이 표현된다.<sup>[7]</sup>

$$E_a = f(\theta) \quad (11)$$

$$E_b = f\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (12)$$

$$E_c = f\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (13)$$

식 (6)~식 (13)을 사용해 A 상의 터미널 전압을 구하면 식 (14)와 같이된다.

$$V_A = V_N + E_a \quad (14)$$

$$= \frac{V_{CC} - E_b - E_c}{2} + E_a$$

결과적으로 A 상이 Floating되어 있을 때 중점  $V_N$ 을 기준으로 한 A 상의 터미널에는 역기전압인  $e_a$ 가 나타난다.

그림 3 (a)는 A 상에 실제로 인가되는 전압을 나타내고있으며 (b)는 역기전압이 검출되는 위상을 나타내었다.  $0^\circ \sim 120^\circ$ ,  $180^\circ \sim 300^\circ$ 구간에서는 A 상에 전압이 인가되며  $120^\circ \sim 180^\circ$ 구간에서는 전압이 인가되지 않는다. 역기전압은 전압이 인가되지 않는  $120^\circ \sim 180^\circ$ 구간에서 검출된다.

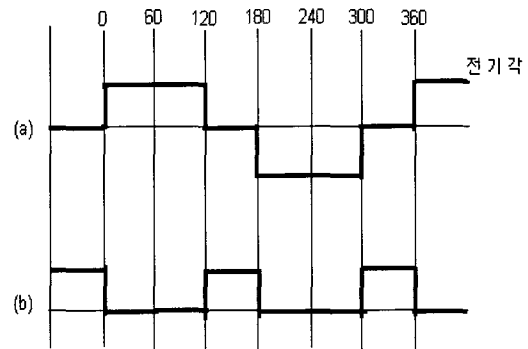


그림 3. 역기전압의 검출  
Fig. 3. Detection of back EMF.

### 3. 정지상태에서의 기동

정지상태에서는 역기전압이 영이므로 최초에는 마이크로 컨트롤러에서 6개의 인버터 구동 펄스를 출력하여 비동기 방식으로 전동기를 구동하고, 정상상태에 이른 후에는 역기전압을 이용해 검출한 회전자의 자극과 동기를 맞추어 인버터 구동 펄스를 인가한다.

## III. 실험장치 구성

본 장에서는 실험을 통해 본 논문에서 제안한 방식으로, 역기전압을 이용해 BLDCM을 회전자극 위치센서 없이 운전하여 성능을 검증하고자 한다.

그림 4는 실험장치의 구성을 보이고 있다. 그림 4의 블럭도와 같이 회전자극 센서대신 역기전압을 검출하기 위한 회로가 필요하며 최초 기동과 정상상태 운전은 8bit 마이크로컨트롤러인 MC68705R3을 사용하여 소프트웨어적으로 처리하였다. 그리고 운전속도범위는 최저 300rpm에서 최고 500rpm으로 정했다.

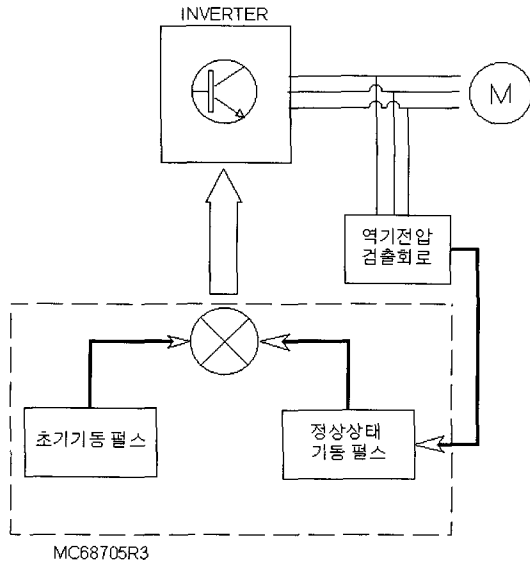


그림 4. 실험장치  
Fig. 4. Experimental construction.

1. 인버터 회로

실험에 사용된 인버터는 6개의 트랜지스터로 구성된 전압형 인버터이다. 트랜지스터는 베이스 신호에 의해 주 전원을 ON, OFF하기 위해 사용되며 다이오드를 트랜지스터에 병렬로 접속하여 트랜지스터가 OFF될 때 생기는 과전압으로부터 트랜지스터를 보호하도록 구성하였다. 또한 포토커플러와 별도의 직류전원을 사용하여 제어부와 파워부의 전원을 분리하였다.

2. 역기전압 검출 회로

그림 5는 Floating된 한 상으로부터 역기전압을 검출해 내기 위한 회로의 블럭도를 나타내었다. 회로의 입력신호는 인버터의 베이스단자 구동펄스이며 이 신호가 조합논리회로에 의해 A, B, C 각 상이 Floating 되었을 때 코일에서 발생하는 역기전압이 가산기의 입력으로 인가될 수 있도록 아날로그 스위치의 Enable 단

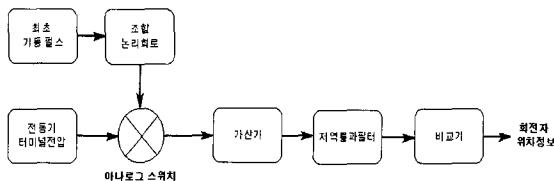


그림 5. 역기전압 검출회로의 블럭도  
Fig. 5. Block diagram of back EMF detection circuit.

자를 제어하는 신호를 만들어낸다. 가산기에 의해 연속적인 파형으로 나타나게된 역기전압은 차단 주파수 1KHz인 저역통과 필터를 통과하면서 트랜지스터의 스위칭에 의해 발생하는 고주파 펄스가 제거되며 이 신호는 비교기를 통과하면서 디지털 처리가 용이한 구형파로 바뀐다.

3. 제어부

제어부는 모토롤라사의 MC68705R3 마이크로컨트롤러를 사용해서 구성했다. 그림 6은 전체 실험장치의 블럭도이다.

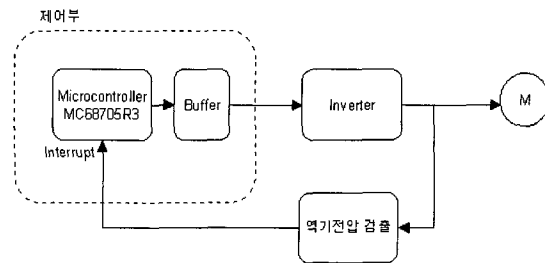


그림 6. 실험장치 전체 블럭도  
Fig. 6. Total experimental construction block diagram.

마이크로컨트롤러에서 출력되는 구동패턴이 버퍼를 거쳐 인버터에 인가되며 전동기에서 추출된 역기전압은 인터럽트로 마이크로컨트롤러에 입력된다. 입력되는 신호를 이용해 구동패턴의 출력과 비동기모드에서 동기모드로의 전환이 소프트웨어적으로 이루어진다.

최초 전원이 인가되면 초기화 작업을 통해 프로그램의 재배치와 변수들을 초기화하며, 소프트웨어 타이머를 설정한다. 메인부의 최초 구동 루틴에서는 회전자의 자극이 고려되지 않은 비동기 구동패턴을 출력한다. 이렇게 기동된 전동기는 목표 제어 범위인 300rpm에 도달할 때까지 비동기패턴에 의해 구동된다. 회전수가 300rpm이상이 되면 마이크로컨트롤러는 인터럽트신호를 입력으로 받아들이고 소프트웨어 타이머를 이용해 속도를 계산하며 이러한 정보를 이용해 회전자의 자극과 구동패턴의 위상을 동기 시킨다. 이때부터 전동기는 동기모드로 구동된다.

IV. 실험 결과

실험에 사용된 전동기의 내부인덕턴스는 65mH 이며,

권선저항은  $10.7\Omega$ 이다. 그림 7은 고정자 코일의 역기전압  $e_a, e_b$ 이다. 역기전압은 Trapezoidal 형태이며  $120^\circ$ 의 위상차를 가지고 있다. 그림에 나타난 리플은 전동기의 Teeth에 의한 영향이 나타난 것이다. 그림 8은 고정자 코일의 역기전압 파형  $e_a$ 와 A상이 floating 되었을 때 역기전압 검출회로의 가산기 출력의 파형이며 그림 9는 추출된 역기전압이 저역통과 필터를 통과한 후의 파형이다. 그림으로부터 추출된 파형의 zero crossing되는 지점이 회전자 자극의 위치가 바뀌는 지점이라는 것을 알 수 있다. 그림 10에서는 추출된 역기전압이 비교기를 통과하여 구형파로 바뀐 모습을 나타내고 있으며, 그림 11은 고정자 코일의 역기전압 파형과 인버터내의 트랜지스터  $Q_1$ 의 베이스에 인가되는 구동패턴의 위상이 동기되어 출력되는 것을 나타내고 있다. 그림 12는 마이크로컨트롤러의 인터럽트로 입력되는 회전자의 위치정보를 담고있는 신호와 위상이 동기되어 구동패턴이 인버터로 출력되는 것을 나타내고 있다. 그림 12로부터 인버터로 출력되는 구동패턴이 회전자의 위치와 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 회전자극 센서의 정보를 이용하여 구동패턴을 인버터에 인가하는 것과 동일하다.

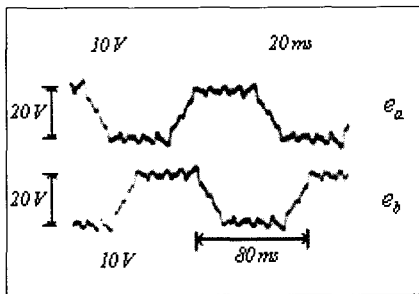


그림 7. 고정자 코일의 역기전압 파형  
Fig. 7. Back EMF waveform of amateur coil.

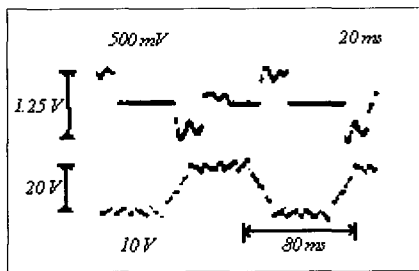


그림 8. 추출된 역기전압 파형  
Fig. 8. Waveform of detected back EMF.

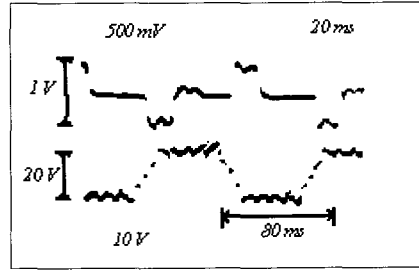


그림 9. 저역통과필터를 거친 후의 파형  
Fig. 9. Waveform of after LPF.

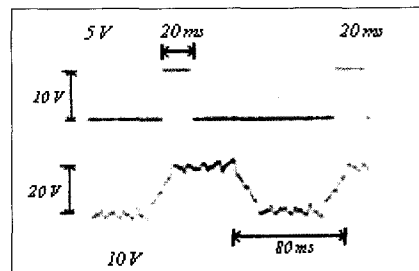


그림 10. 비교기를 통과한 후의 파형  
Fig. 10. Waveform of after Comparator.

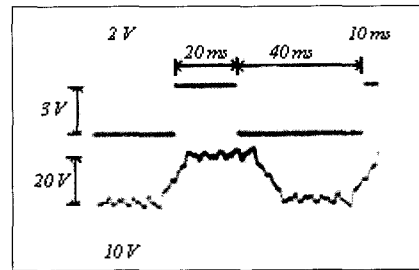


그림 11. 인버터에 인가되는 파형  
Fig. 11. Inverter trigger signal.

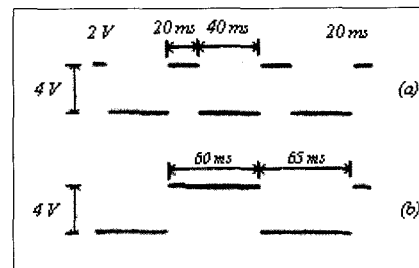


그림 12. (a) 인버터에 인가되는 구동패턴, (b) CPU에 입력되는 인터럽트 신호  
Fig. 12. (a) Inverter trigger Signal  
(b) CPU Interrupt Signal.

V. 결 론

본 논문에서는 BLDCM의 회전자극 위치센서를 사용하지 않고 고정자 코일에서 발생하는 역기전압을 검출하여 회전자의 극에 대한 정보를 만들고, 만들어진 정보를 이용해 전동기를 구동할 수 있다는 것을 보였다.

전동기는 최초 정지상태에서부터 알고리즘 시작 구간인 300rpm까지는 비동기 구동패턴에 의해 구동되며 300rpm이상에서부터는 역기전압을 이용해 만들어지는 회전자극정보를 이용하여 동기 구동패턴을 만들고 이 패턴을 이용해 구동하였다. 실험결과 초기 비동기 모드에서 동기모드로의 전환이 부드럽게 이루어지며, 우수한 구동성능을 확인했다.

앞으로 고속영역에서의 구동방법과 더욱 효과적인 초기구동 알고리즘에 대해 연구가 계속 진행될 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김광배, "브러시리스 직류 서어보 전동기 및 제어 기술", 전기학회지 37권 1호, pp.21-27, Jan. 1988.

[2] K.IIZUKA, et al, "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor", IEEE IAS Annual Meeting, pp.618-624, 1984.  
 [3] J. DAVOINE, et al, "Operation of a Shaft Controlled Synchronous Motor Without a Shaft Position Sensor", IEEE Trans. vol. IA-19, no. 2, March 1983.  
 [4] A. B. PLUNKETT, et al, "Load-Commutated Inverter/Synchronous Motor Drive Without a Shaft Position Sensor", IEEE Trans. vol. IA-15, no. 1, JAN. 1979.  
 [5] JACQUES, et al, "Operation of a Self-Controlled Synchronous Motor Without a Shaft Position Sensor", IEEE Trans. IAS vol. IA-19, no. 2, March/April 1983.  
 [6] ELCTRO-CRAFT CORPORATION, U. S. A., DC MOTORS SPEED CONTROLS SERVO SYSTEMS, 1977.  
 [7] HAOANG LE-HUY, et al, "A Self-Controlled Synchronous Motor Drive Using Terminal Voltage System", IEEE Trans. vol. IA-18, no. 1, JAN/FEB, 1982.

저 자 소 개



徐碩焘(正會員)  
 1967년 9월 22일생. 1990년 2월 단국대학교 전자공학과 공학사. 1992년 2월 단국대학교 대학원 전자공학과 공학석사. 1998년 8월~현재 단국대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 모터제어, 추정이론 및 응용 등임.

嚴于鎔(正會員) 第 36卷 A編 第 8號 參照