

## 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구

여형기\* 이광운\* 박정배\* 김태형\* 黃健\*\* 유지윤\*  
\*고려대학교 전기공학과 \*\*延邊大學校(中國) 理工學院 電子工科系

### Development of a Sensorless Drive for Brushless DC Motor

H.G. Yeo\*, K.W. Lee\*, J.B. Park\*, T.H. Kim\*, Jian Huang\*\*, Ji-Yoon Yoo\*  
\*Dept. of Elec. Engr. Korea Univ., \*\*Dept. of Sci. & Engr., YanBian Univ.

**Abstract** - This paper describes a indirect sensing method for the rotor flux position of interior permanent magnet (IPM) brushless DC motors. The phase inductance of an IPM motor varies appreciably according to the rotor position. The waveform characteristics of the terminal voltage of IPM brushless DC motors is analysed and a simple and practical method for indirect sensing of the rotor position is proposed. A compact sensorless drive is implemented and tested using a 87c196mc 16-bit microcomputer. The experimental results show the validity of the proposed method and the drive works well from 500 to 7,200 rpm..

#### 1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(BLDC motor)는 넓은 속도 범위에 대하여 높은 효율을 유지하고 제어가 용이하여 가변속 운전이 요구되는 응용 개소에 최적의 전동기로 각광받고 있다. 일반적으로 BLDC 전동기를 구동하려면 회전자 위치에 동기된 고정자 전류를 인가해야 하므로 위치 센서가 요구된다. 그러나 위치센서의 부착은 전동기 부피의 증가와 신뢰성뿐만 아니라 유도기에 대한 가격 경쟁력을 저하시키는 주 요인으로 작용하고 있다. 이에 따라 근래에는 BLDC 전동기를 위치센서 없이 전동기의 상전압이나 상전류 특성을 이용하여 간접적으로 회전자 위치를 검출하는 센서리스 드라이브 기술이 크게 주목받고 있다. 현재까지 개발된 센서리스 드라이브는 표면부착 영구자석형 (SMPM : Surface Mount Permanent Magnet) 전동기에 대한 것이 대부분이다. 그러나 근래에 개발되는 전동기는 대부분 회전자 구조가 견고하여 고속 회전이 가능한 영구자석 매입형(IPM : Interior PM) 전동기이다. IPM 전동기는 회전자 위치에 따라 고정자의 인덕

턴스가 크게 변하기 때문에 기존에 개발된 간접센싱 방법의 적용이 곤란하다. 본 연구에서는 IPM BLDC 전동기의 회전자 구조와 고정자 권선 인덕턴스 특성을 분석하고 IPM 전동기에 적용 가능한 간접센싱 방법과 센서리스 드라이브를 개발하고자 한다.

#### 2. 회전자 구조와 고정자 권선 인덕턴스

회전자 형상은 고정자 권선 인덕턴스 파형에 큰 영향을 미치며 이 영향은 전동기의 단자전압 파형에 그대로 전달된다. 따라서 단자전압으로부터 회전자 위치를 검출하려면 회전자 형태에 따른 인덕턴스의 변화를 먼저 고려하여야 한다. 그림1은 여러 가지 형태의 회전자 형상을 보여 주고 있다. 그림1(a)는 SMPM 회전자로서 전동기의 유효 공극이 매우 크고 자로가 균일하므로 고정자 권선 인덕턴스가 작고 회전자의 위치에 관계없이 일정한 값을 갖는다. 그림1의 (b)-(d)와 같은 IPM 전동기는 자석이 회전자 철심 코아 내부에 매입되어 있어서 기계적으로 견실하여 고속 회전이 가능하기 때문에 근래에 개발되는 대부분의 전동기는 IPM 구조로 개발되고 있다. 그러나 IPM 전동기는 SMPM 전동기와는 달리 유효 공극이 일정치 않기 때문에 회전자의 위치가 변함에 따라 고정자 권선 인덕턴스가 크게 변화한다. 그림 2는 IPM 전동기의 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 변화 형태를 보여주고 있다.

일반적으로 IPM 전동기의 고정자 권선 인덕턴스는 회전자의 위치에 따라 변화하는 비율( $L_q/L_d$ )이 2 이상이다. 권선 인덕턴스는 영구자석의 위치에 따라 크기가 크게 다르게 나타나는데, 그림1의 (b)와 (c)는 마그네트 자석의 누설을 줄이기 위하여 영구자석의 폴 피스는 가능한 한 얇게 설계되므로 인덕턴스의 크기는 SMPM에 비하여 약간 큰 정도이다. 반면 (d)와 같은 구조는 유효공극이 기계적 공극에서 자석 두께 만큼 변화하는 형상으로 인덕턴스가 매우 크며 변화율도 높다. 그림3은 그림1의

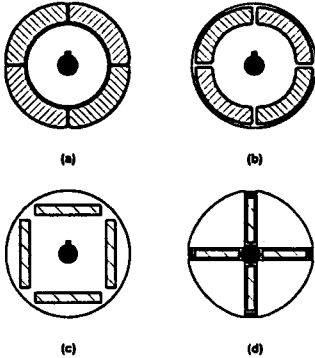


그림 1. 회전자 구조

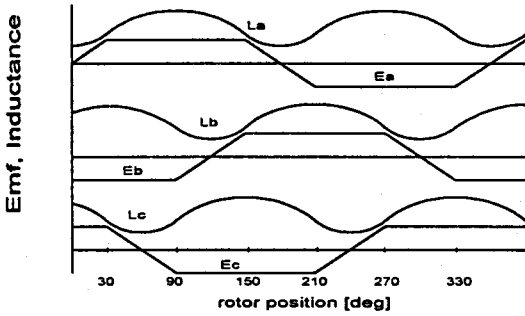


그림 2. 회전자 위치에 따른 역기전력 및 인덕턴스 파형

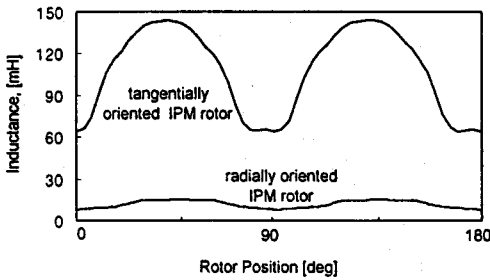


그림 3. 인덕턴스 측정 예

(c)와 (d)형상의 전동기의 인덕턴스를 측정 한 예를 보여주고 있다. 그림3에서 보는 바와 같이 그림1 (d)의 회전자는 릴럭턴스 토크가 크게 나타나지만 그림1 (b)와 (c)의 매입형 회전자 구조는 고정자 권선 인덕턴스의 크기가 작아서 릴럭턴스 토크는 무시할 수 있다.

### 3. 단자 전압 파형과 회전자 위치 검출

인버터와 브러시리스 전동기의 등가회로를 그림4와 같이 표현할 때, 인덕턴스 변화를 고려한 상전압은 다음과 같이 표현된다.

$$v = Ri + \frac{d}{dt}[L(\theta_r)i + \lambda_M] \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 상전압,  $R$ 은 권선저항,  $i$ 는 여자

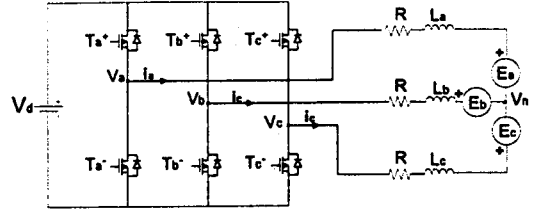


그림 4. 브러시리스 직류 전동기의 등가회로

전류,  $L$ 은 인덕턴스,  $\theta_r$ 은 회전자 위치,  $\lambda_M$ 은 영구자석에 의한 자석 쇄교수,  $e$ 는 영구자석에 의한 역기전력이다. 전동기의 토크도 마그네트 토크와 인덕턴스 변화에 의한 인덕턴스 토크가 동시에 발생하게 된다.

$$T_e = i \frac{d}{d\theta_r} \lambda_M + i^2 \frac{d}{d\theta_r} L(\theta_r) \quad (2)$$

본 연구에서는 릴럭턴스 토크가 매우 작은 그림 1의 (b) 또는 (c)의 형태를 갖는 전동기에 국한하여 고찰하기로 한다. 이 경우 전동기의 상전압 및 토크 식은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$v = Ri + L(\theta_r) \frac{di}{dt} + e \quad (3)$$

$$T_e = i \frac{d}{d\theta_r} \lambda_M \quad (4)$$

릴럭턴스 토크의 크기가 작아서 상전압 및 토크 식이 간략화 된다 하더라도  $L_d/L_q$ 의 비율은 여전히 크게 남으며 이 비율은 단자 전압 파형에 큰 영향을 미치게 된다. 예를 들어 회전자가  $210^\circ$ 에서  $270^\circ$  사이에 있을 때 (a,b상 여자, c상 개방)의 개방된 상의 단자전압 파형을 해석해보자. 그림4의  $T_a^+$ 와  $T_a^-$ 가 ON되어 있다고 가정한다. 그림 10에서  $e_c < 0$ 인 구간 ( $210^\circ \leq \theta_r < 240^\circ$ )에서는  $L_b$ 가  $L_a$ 보다 크므로

$$L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} < L_b(\theta_r) \frac{di}{dt} \quad (4)$$

이다. 식(1)로부터 a상과 b상의 상전압 관계를 다음과 같은 얻을 수 있다.

$$Ri + L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} - e_a < e_b + L_b(\theta_r) \frac{di}{dt} + Ri \quad (5)$$

또 이때의 회로 방정식은 다음과 같다.

$$V_d = Ri + L_b(\theta_r) \frac{di}{dt} + e_b - e_a + L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} + Ri \quad (6)$$

(6)로부터 중성점 전압  $V_n$ 을 표현하면 다음 결과를 얻게 된다.

$$V_n = Ri + L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} - e_a < \frac{V_d}{2} \quad (7)$$

$e_c < 0$ 인 구간 ( $240^\circ < \theta_r \leq 270^\circ$ )에서는 앞서와는 반대로  $L_a$ 가  $L_b$ 보다 크다. 따라서 앞의 유도과정을 따르면 다음 결과를 얻을 수 있다.

$$V_n = Ri + L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} - e_a > \frac{V_d}{2} \quad (8)$$

또한  $e_c=0$  일 때, 즉  $\theta_r=240^\circ$  일 때는  $L_a=L_b$  이므로  $V_n=0$ 이 된다. 이상의 결과를 이용하여 단자 전압  $V_c' = V_n + e_c$ 를 구해보면 다음과 같다.

$$V_c' \begin{cases} < V_d/2 & (210^\circ \leq \theta_r < 240^\circ) \\ = V_d/2 & (\theta_r = 240^\circ) \\ > V_d/2 & (240^\circ < \theta_r \leq 270^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

(6)은  $210^\circ \leq \theta_r \leq 270^\circ$  에서 단자전압  $V_c'$ 가 단조 증가함을 나타낸다. 전동기의 역기전력은 크기가 회전자 속도에 비례하여 변하더라도 역기전력이 0이 되는 위치(ZCP : Zero Crossing Point)는 속도에 관계없이 일정하다. 따라서 개발된 상의 단자 전압을 측정하여 역기전력이 0이 되는 곳을 검출하면 그때의 회전자 위치를 알 수 있다. 즉 그림6과 같이 PWM이 ON일 때의 전압을 검출하여 그 전압이  $V_d/2$ 와 같을 때를 찾아내면 회전자의 위치를 알 수 있다.

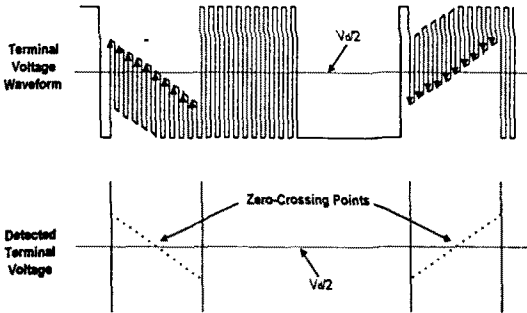


그림 5. 단자 전압 파형과 위치 검출 방법

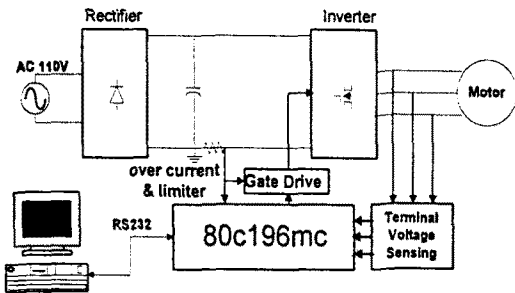


그림 6. 센서리스 드라이브의 H/W 구성도

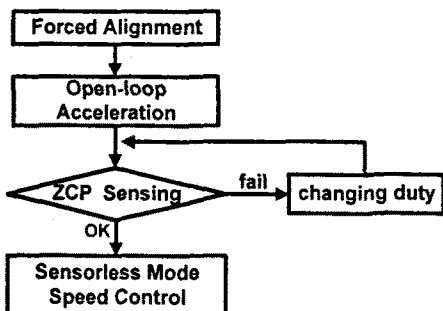


그림 7. S/W 구성

#### 4. 센서리스 드라이브 개발과 실험 결과

그림6은 본 연구에서 개발한 센서리스 드라이브의 구성도이다. 드라이브는 IGBT 인버터 모듈과 87c196mc 마이콤을 이용하였다. 그림7은 마이콤에 내장된 센서리스 운전 S/W의 흐름도이다. 그림8은 개발된 드라이브로 3상4극 IPM BLDC 전동기를 정격 부하(1.5[kW], 4,200[rpm])에서 운전할 때의 단자전압 및 상전류 파형이다. 앞에서 제시했던 회전자 위치 간접검출 방법이 잘 적용되고 있음을 알 수 있다. 개발된 드라이브는 500 - 7,200 [rpm]의 범위에 걸쳐 이상없이 작동되었다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 고정자 권선 인덕턴스가 회전자 위치에 따라 변화하는 영구자석 매립형 브러시리스 직류 전동기를 위치센서 없이 구동하기 위하여 간접검출 방법과 센서리스 드라이브를 개발하였다. 이를 위하여 영구자석의 위치에 따른 고정자 권선의 인덕턴스 특성을 분석하였고, BLDC 전동기에 적합한 회전자 구조를 제시하였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] K.Iizaka, et.al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless DC Motor," *IEEE Trans. on IA*, vol. IA-21, No. 4, pp.595-601, May/JUN 1985
- [2] S.Ogasawara and H.Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor," *Conf. Rec. of 1994 IEEE IAS'90*, pp. 443-447, 1990
- [3] J.C.Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range," *Conf. Rec. of 1994 IEEE IAS'94*, pp. 401-407, 1994
- [4] R.C.Becerra, T.M.Jahns and M.Ehsani, "Four-Quadrant Sensorless Brushless ECM Drive," *IEEE APEC'91*, pp.202-209, 1991

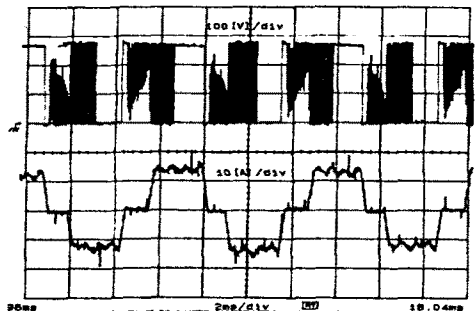


그림 8. 정격 운전시의 단자전압 및 상전류