

영구자석 매입형 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구

呂炯基, 洪昌奭, 李光雲, 朴廷培, 柳志潤

Development of a Sensorless Drive for Interior Permanent Magnet Brushless DC Motors

Hyeong-Gee Yeo, Chang-Seok Hong, Kwang-Woon Lee, Jung-Bae Park, Ji-Yoon Yoo

요 약

본 논문은 영구자석 매입형 브러시리스 직류 전동기를 회전자 위치 센서 없이 구동하는 센서리스 드라이브의 개발에 관한 연구이다. 영구자석 매입형 전동기는 회전자의 위치에 따라 각 상의 인덕턴스가 크게 변화한다. 회전자의 위치를 간접적으로 검출하기 위해 인덕턴스 변화에 따른 단자전압 파형의 특성을 분석하고, 이에 적합한 회전자 위치 간접검출 방법을 제시하였다. 또한 87c196mc 원 칩 마이크로프로세서를 이용하여 실용적이고 경제성 있는 센서리스 드라이브를 제작하여 에어컨 콤프레서의 구동에 적용하였다. 제시된 실험 결과는 본 연구에서 제안한 간접검출 방법의 타당성과 개발된 드라이브의 유용성을 보여준다.

ABSTRACT

This paper describes an indirect sensing method for the rotor flux position of interior permanent magnet (IPM) brushless DC motors. The phase inductances of an IPM motor vary 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 and economical sensorless drive is implemented and tested using a 87c196mc 16-bit one-chip microprocessor. The experimental results show the validity of the proposed method. The drive is applied to drive a compressor of air-conditioner and works well from 1,200 to 6,600 [rpm].

Key Words: brushless DC motor, interior permanent magnet, sensorless drive, indirect sensing, air-conditioner

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(Brushless DC motor, BLDC motor)는 넓은 속도 범위에 대하여 높은 효율을 유지하고 제어 용이하여 가변속 운전이나 높은 효율이 요구되는 팬, 펌프, 콤프레셔와 같은 응용 개소에 최적의 전동기로 각광받고 있다.¹⁾ 일반적으로 BLDC 전동기를 구동하려면 회전자 위치에 동기된 고정자 전류를 인가해야 하므로 회전자 위치 센서가 요구된다. 그러나 위치 센서의 부착은 전동기 부피의 증가와 신뢰성 저하뿐만 아니라 유도기에 대한 가격 경쟁력을 저하시키는 주 요인으로 작용하고 있다. 이에 따라 근래에는 위

치 센서 없이 전동기의 상전압이나 상전류 특성을 이용하여 간접적으로 회전자 위치를 검출하는 센서리스 드라이브 기술이 크게 주목받고 있다.^{2~7)}

현재까지 개발된 센서리스 드라이브는 표면부착 영구자석형(SMPM : Surface Mount Permanent Magnet) 전동기에 대한 것이 대부분이다.^{13~16)} 그러나 근래에 개발되는 전동기는 대부분 회전자 구조가 견고하여 고속 회전이 가능한 영구자석 매입형(IPM : Interior Permanent Magnet) 전동기이다. IPM 전동기는 회전자 위치에 따라 고정자 권선 인덕턴스가 크게 변하기 때문에 기존에 개발된 간접센싱 방법의 적용이 곤란하다. A.B.Kulkarni¹⁷⁾ 등이 IPM 전동기에 대한 간

접 센싱 방법을 제안한 바 있으나 이 방법은 경제성이 요구되는 범용 드라이브에의 적용이 곤란하다.

본 연구에서는 IPM BLDC 전동기의 회전자 구조와 고정자 권선 인덕턴스 특성을 분석하고 IPM 전동기에 적용 가능한 간접센싱 방법을 제안한다. 또한 경제성 있는 센서리스 드라이브를 개발하고 이를 에어컨 콤프레서 구동에 적용함으로써 제안된 간접센싱 방법의 타당성과 드라이브의 유용성을 입증하고자 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

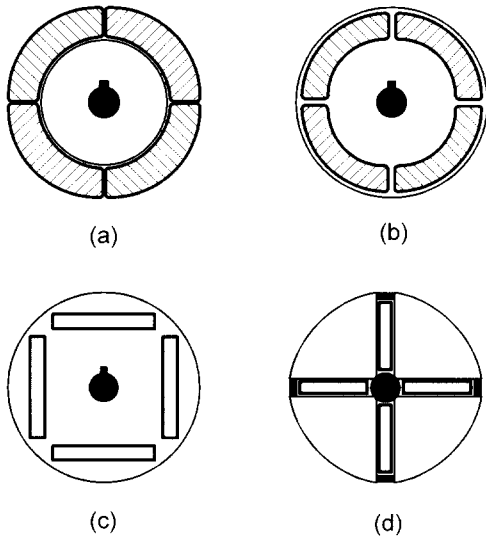


그림 1 회전자 구조
Fig. 1 Rotor structures

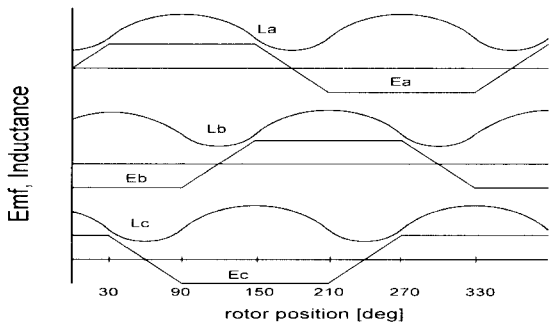


그림 2 회전자 위치에 따른 역기전력 및 인덕턴스 파형
Fig. 2 Waveforms of Emf and inductance

형태에 따른 인덕턴스의 변화를 먼저 고려하여야 한다. 그림 1은 여러 가지 형태의 회전자 형상을 보여 주고 있다. 그림 1(a)는 SMPM 회전자로서 전동기의 유효 공극이 매우 크고 자료가 균일하므로 고정자 권선 인덕턴스가 작고 회전자의 위치에 관계없이 일정한 값을 갖는다. 그림 1의 (b)-(d)와 같은 IPM 전동기는 영구자석이 회전자 철심 코어 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 회전자 위치의 위치에 따라 변화하는 비율 (L_q / L_d)이 2 이상이다. 권선 인덕턴스는 영구자석의 위치 또는 매입 형태에 따라 크기가 크게 다르게 나타나는데, 그림 1의 (b)와 (c)의 구조는 마그네트 자속의 누설을 줄이기 위하여 영구자석 간의 폴 피스 (pole piece)는 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.

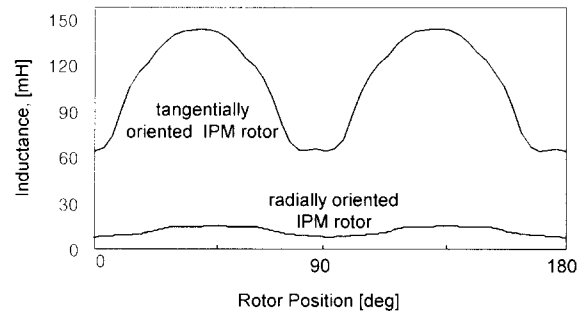


그림 3 인덕턴스 측정 예
Fig. 3 Examples of inductance profile

그림 3은 동일한 고정자에 그림 1의 (c)와 (d) 형상의 회전자 구조를 갖는 전동기의 인덕턴스를 측정한 예를 보여주고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 회전자가 그림 1 (d)와 같은 경우는 인덕턴스의 변화율이 커서 릴럭턴스 토크가 크게 나타나지만 그림 1 (b)와 (c)의 매입형 회전자 구조는 인덕턴스와 그 변화율이 상대적으로 작게 나타난다.

3. 단자 전압 파형과 회전자 위치 검출

인버터와 브러시리스 전동기의 등가회로를 그림 4와 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 전류, L 은 인덕턴스, θ_r 은 회전자 위치, λ_M 은 영구자석에 의한 자속 왜교수이다. 전동기의 토크도 마그네트 토크와 인덕턴스 변화에 의한 릴럭턴스 토크가 동시에 발생하게 된다.

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

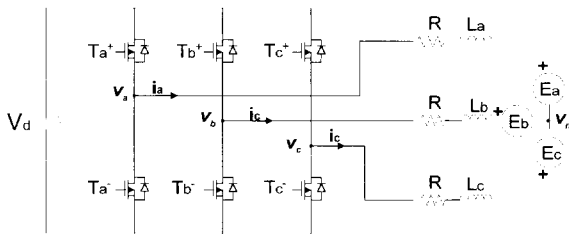


그림 4 브러시리스 직류 전동기의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of BLDC motor and its drive

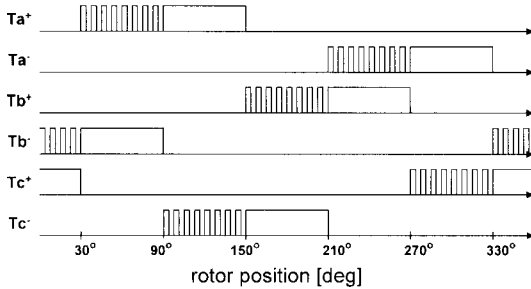


그림 5 PWM 패턴
Fig. 5 PWM pattern

벡터제어가 가능한 영구자석 동기 전동기나 서보 시스템에 주로 사용되는 정현파 구동 브러시리스 직류 전동기의 경우 여자 전류의 위상각을 적절히 제어하면 토크 리플 없이 릴럭턴스 토크를 유용하게 이용할 수 있다. 그러나 범용 전동기로서의 경제성을 갖추고 있는 구형과 구동 전동기는 릴럭턴스 토크를 이용하는 것이 용이하지 않다. 또한 릴럭턴스 토크의 주기는 마그네트 토크의 주기의 절반이므로 두 토크 성분을 적절히 제어하는 것은 매우 어려우며, 릴럭턴스 토크가 클 경우 전동기의 토크 리플이 커져서 기계적 피로와 소음, 진동

등의 원인이 될 수 있다. 따라서 범용 BLDC 전동기는 인덕턴스가 작아 릴럭턴스 토크가 거의 없는 회전자 형상을 쓰는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 릴럭턴스 토크가 마그네트 토크보다 상대적으로 매우 작은 그림 1의 (b) 또는 (c)의 형태를 갖는 전동기에 국한하여 고찰하기로 한다. 이 경우 전동기의 상전압 및 토크 식은 다음과 같이 간략화될 수 있다.

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

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

릴럭턴스 토크의 크기가 작아서 상전압 및 토크식이 간략화된다 하더라도 L_d/L_q 의 비율은 여전히 크게 남으며, 이 비율은 단자 전압 파형에 큰 영향을 미치게 된다. 예를 들어 PWM이 그림 5와 같이 인가되고, 회전자가 210° 에서 270° 사이에 있을 때(a,b상 여자, c상 개방)의 개방된 상의 단자전압 파형을 해석해보자. PWM이 ON 되어 그림 4의 T_b^+ 와 T_a^- 가 ON되어 있다고 가정한다. 그림 2에서 $e_c < 0$ 인 구간 ($210^\circ \leq \theta_r < 240^\circ$)에서는 L_b 가 L_a 보다 크므로

$$L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} + L_b(\theta_r) \frac{di}{dt} \quad (5)$$

이다. 이 구간에서 e_a 와 e_b 는 크기가 같고 부호가 반대이므로 식(5)로부터 a상과 b상의 상전압 관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

또 이 때, 그림 1의 등가회로에 대한 회로 방정식은 다음과 같다.

$$V_d = Ri + L_b(\theta_r) \frac{di}{dt} + e_b - e_a + L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} + Ri \quad (7)$$

(6)과 (7)로부터 중성점 전압 v_n 을 표현하면 다음 결과를 얻게 된다.

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

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

$$v_n = Ri + L_a(\theta_r) \frac{di}{dt} - e_a < \frac{V_d}{2} \quad (9)$$

또한 $e_c = 0$ 일 때, 즉 $\theta_r = 240^\circ$ 일 때는 $L_a = L_b$ 이므로 v_n 은 $V_d/2$ 가 된다. 이상의 결과를 이용하여 단자전압 $v_c = v_n + e_c$ 를 정리하면 다음과 같다.

$$v_c \begin{cases} < V_d/2 & (210^\circ \leq \theta_r < 240^\circ) \\ = V_d/2 & (\theta_r = 240^\circ) \\ > V_d/2 & (240^\circ < \theta_r \leq 270^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

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

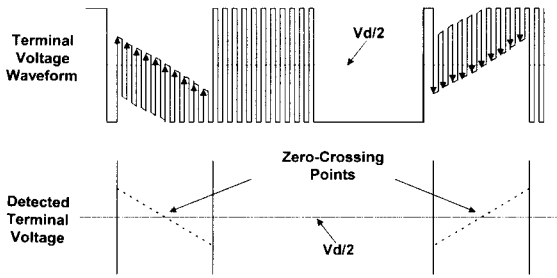


그림 6 단자 전압 파형과 위치 검출 방법
Fig. 6 Waveform of terminal voltage and principle of indirect sensing

4. 센서리스 드라이브 개발과 실험 결과

그림 7은 본 연구에서 개발한 센서리스 드라이브의 구성도이다. 드라이브는 IGBT 인버터 모듈과 87c196mc 원 칩 마이크로프로세서를 이용하였다. 개방된 상의 단자전압을 검출하기 위하여 그림 8과 같은 단자전압 검출회로를 개발하였다. 단자전압 검출회로의 다이오드들은 각 상의 단자전압이 $V_d/2$ 이상일 경우 도통하게 된다. 따라서 프로세서는 PWM이 ON될 때 마다 개방된 상의 센싱회로의 다이오드가 도통이 되었는지를 감시하면 ZCP를 검출할 수 있다. 예를 들어 $210^\circ < \theta_r \leq 270^\circ$ 에서 c상의 역기전력이 상승할 때, 단자 전압이 $V_d/2$ 을 지나는 순간은 D_c 가 도통하지 않다가 처음으로 도통하는 순간이므로, 이때를 ZCP로 판단한다. 또한 $270^\circ < \theta_r \leq 330^\circ$ 에서 b상의 역기전력이 감소할 때는 D_b 가 도통하다가 처음으로 도통하지 않는 순간을 ZCP로 판단한다.

다. 프로세서는 이전에 발견했던 ZCP와 현재 발견한 ZCP로부터 현재의 전동기 속도를 계산하고, 이를 이용하여 현재 발견한 ZCP로부터 전기적으로 30° 지난 시점을 계산하여 그 시점에서 轉流를 행한다.

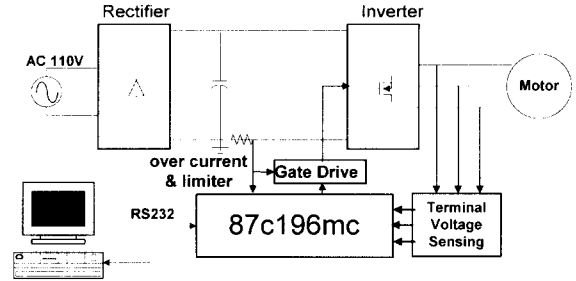


그림 7 센서리스 드라이브의 H/W 구성도
Fig. 7 Schematic diagram of sensorless drive

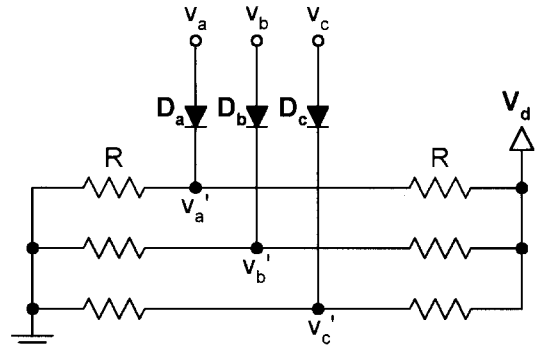


그림 8 단자 전압 검출 회로
Fig. 8 Sensing circuit of terminal voltage waveform

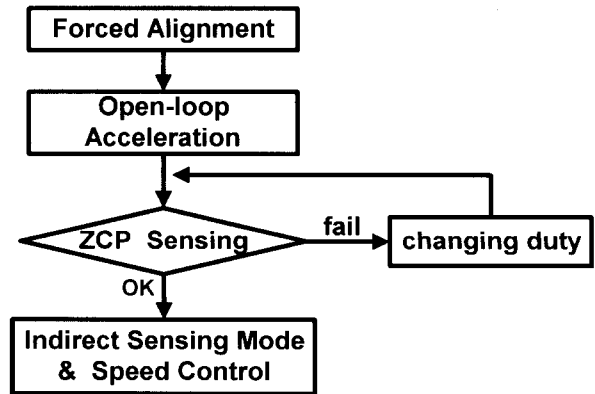


그림 9 S/W 구성
Fig. 9 Flow of software for sensorless operation

그림 9는 프로세서에 내장된 센서리스 운전 S/W의 흐름도이다. 196mc에 내장되어 있는 PWM 인터럽트 기능을 이용하여 PWM이 ON 될 때마다 센싱회로의 다이오드의 도통상태를 검사하도록 하였다. PWM 폭은 최소한 프로세서의 프로그램이 인터럽트로 점프하는데 필요한 시간(latency)보다 커야 한다. 회전자가 정지 또는 초기 기동시에는 PWM 폭이 작아서 단자전압 검출이 불가능하므로 적당한 속도까지 개루프 가속이 필요하다. 본 연구에서는 기동 속도를 높이기 위하여 임의의 2상을 여자시켜서 강제정렬시킨 다음, 1000 [rpm/s]의 가속도로 1,200 [rpm]까지 가속시켰다. 이 속도에서 정속 운전 하면서 ZCP가 검출 되면 간접센싱 모드로 전환하고, 일정 회전수 동안 ZCP가 검출이 되지 않을 경우 펄스 폭을 변화시키면서 다시 검출하도록 하였다. 간접 센싱 모드로 전환되면 곧바로 속도제어를 병행하며 제어 입력 u 는 (11)과 같다.

$$u = k_i \sum (\Delta T_{zcp}^{ref} - \Delta T_{zcp}) \quad (11)$$

위 식에서 k_i 는 제어이득, ΔT_{zcp}^{ref} 는 ZCP 간의 지령 시간, ΔT_{zcp} 는 간접 검출한 ZCP 간의 시간이다.

그림 10과 그림 11은 개발된 드라이브로 3상4극 IPM BLDC 전동기를 에어컨 콤프레서에 장착하여 운전할 때의 단자전압 및 상전류 파형이다. 전동기와 드라이브의 주요 사양은 표 1에 표기하였다. 그림 10은 4,200 [rpm]으로 회전하고 있을 때로서 앞에서 제시했던 회전자 위치 간접검출 방법이 잘 적용되고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 1,200 [rpm]으로 운전할 때의 파형으로, 전동기 속도 및 상전류의 기록이 매우 심하게 나타난다. 이는 실험에 사용된 콤프레서가 그림 12.(a)에 나타낸 것과 같은 single rotary 구조로서 1회전시의 부하 토크가 그림 12.(b)와 같이 매우 심하게 나타나기 때문이다. 전동기를 무부하로 운전할 경우 500 - 7,200 [rpm]의 범위에 걸쳐 이상 없이 작동되었다.

표 1 전동기 및 드라이브 사양

Table 1 Specifications of the motor and the sensorless drive

상 수	3	
극 수	4	
토크 상수	0.26 [Nm]	
권선 저항	0.7 [Ω]	
권선 인덕턴스	최 고	14 [mH]
	최 저	7 [mH]
정격 전류	AC 10 [A]	
정격 전압	AC 220 [V]	
속 도	정 격	4,200 [rpm]
	최 대	6,600 [rpm]
	최 소	1,200 [rpm]
PWM 주파수	15.6 [kHz]	

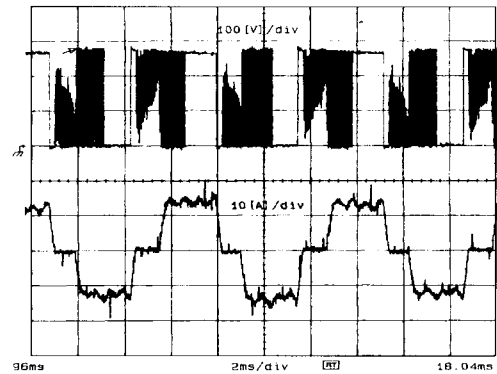


그림 10 정격 속도(4,200 [rpm])운전시의 단자전압 및 상전류 파형
Fig. 10 Waveforms of terminal voltage and phase current at rated speed(4,200[rpm])

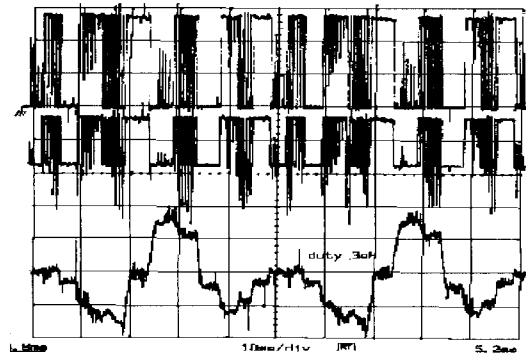
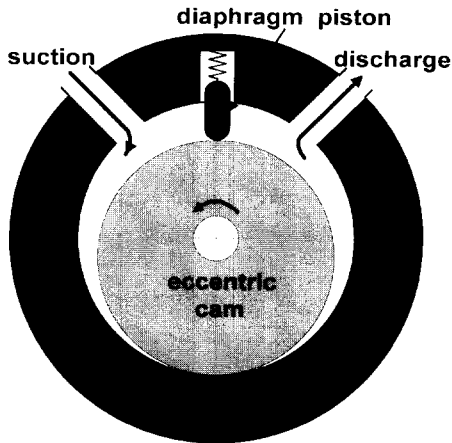


그림 11 최저 속도(1,200 [rpm])운전시의 단자전압, 센싱회로 전압 및 상전류 파형
Fig. 11 Terminal voltage, voltage waveform of sensing circuit and phase current at minimum speed (1,200[rpm])

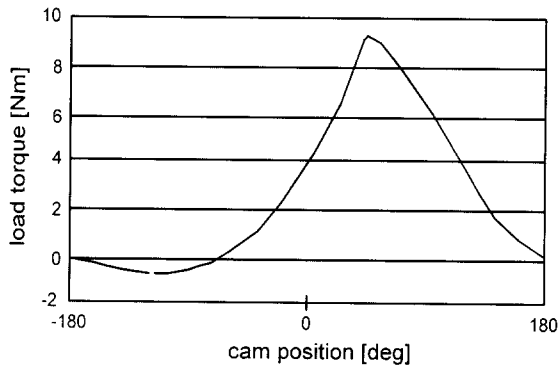
5. 결 론

본 연구에서는 고정자 권선 인덕턴스가 회전자 위치에 따라 변화하는 영구자석 매입형 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. 본 연구에서 개발한 드라이브를 에어컨 콤프레서 구동에 적용한 결과, 만족할 만한 결과를 얻었으나, 저속에서는 콤프레서 구조상 부하 토크의 맥동이 심하여 1,200 [rpm] 이하에서는 운전이 불안전하였는데 차후 이에 대한 보완이 요구된다.

본 논문은 한국과학재단의 '97 핵심전문연구과제 (과제부호 971-0912-071-1) 지원에 의한 연구결과임.



(a) 압축기 단면도



(b) 편심 캠의 위치에 따른 부하 토크

그림 12 압축기 구조와 부하 토크
Fig. 12 Schematic diagram of a compressor and its load torque

참고 문헌

[1] Gordon R. Slemon, "High-Efficiency Drives using Permanent-Magnet Motors", IEEE IECON' 93, pp.725~730, 1993.
 [2] Edited by K.Rajashekara, A.Kawamura and K.Matsuse, Sensorless Control of AC Motor Drives, IEEE Press, pp.259~268, 1996.
 [3] K.Iizaka, H.Uzhashi, et.al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless DC Motor," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-21, No. 4, pp.595~601, May/June 1985.
 [4] S.Ogasawara and H.Akagi, "An Approach to

Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor," Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Twenty fifth IAA Annual Meeting, pp.443~447, 1990.

[5] J.C.Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range," Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Society Twenty Forth IAA Annual Meeting, pp.401~407, 1994.
 [6] R.C.Becerra, T.M.Jahns and M.Ehsani, "Four-Quadrant Sensorless Brushless ECM Drive," 6th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.202~209, 1991.
 [7] A.B.Kulkarni and M.Ehsani, "A Novel Position Sensor Elimination Technique for the Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 28, No. 1, pp.144~150, Jan/Feb 1992.

< 저 자 소 개 >



여형기(呂炯基)

1964년 7월 20일생. 1988년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990~1995년 한국국방연구원 근무. 현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중.



홍창석(洪昌奭)

1970년 10월 30일생. 1992년 순천향대 전기공학과 졸업. 1997년 고려대 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 대한무역투자진흥공사 근무.



이광운(李光雲)

1970년 12월 16일생. 1993년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중.



박정매(朴廷培)

1971년 5월 14일생. 1994년 고려대 공대 전기 공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중.



유지윤(柳志潤)

1955년 2월 25일생. 1977년 고려대 공대 전기 공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1987년 일본 와세다 대학 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1991년 창원대 공대 전기공학과 조교수. 현재 고려대 공대 전기공학과 교수. 당학회 편집위원.