

3고조파를 이용한 PM BLDC 전동기 구동을 위한 센서리스 제어

尹溶湖[†], 金淵忠[‡], 元忠淵[†]

Sensorless Control of PM BLDC Motor Drive Using Third Harmonic

Yong-Ho Yoon, Yuen-Chung Kim, and Chung-Yuen Won

요 약

본 논문에서는 고정자의 제 3고조파 전압 성분을 이용하여 브러시리스 직류 전동기의 회전자 위치를 간접 검출하는 방법을 제안하였다. 3고조파 성분은 회전자의 위치 정보를 가지고 있고 이 전압을 이용하여 전환 신호(Commutation signal)를 만들어 낼 수 있다. 따라서 전환 신호를 이용하여 구형파 전류 여자 브러시리스 직류 전동기를 센서리스로 운전하는 방식은 상지연 필터가 필요하지 않고 하드웨어적으로 전류의 전환 시점이 결정되므로 센서리스 드라이브용 프로세서의 부담을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능한 방법이다.

ABSTRACT

In order to increase reliability and reduce system cost, this paper studies particularly applicable method for sensorless PM BLDCM drive system. The waveform of the motor internal voltages(or back emf) contains a fundamental and higher order frequency harmonics. Therefore the third harmonic component is extracted from the stator phase voltage. The resulting third harmonic signal keeps a constant phase relationship with the rotor flux for any motor speed and load condition, and is practically free of noise that can be introduced by the inverter switching, making this a robust sensing method. In addition, a simple starting method and a speed estimation approach are also proposed. Some experimental results are provided to demonstrate the validity of the proposed control method.

Key Words : Permanent Magnet BLDC motor, Sensorless control, Third harmonic, Johnson counter

1. 서 론

PM BLDC 전동기의 구동은 우선적으로 회전자의 위치를 알아야 한다. 따라서 영구자석으로 이루어진 회전자의 위치를 알기 위하여 주로 회전자 위치센서나

엔코더, 레졸버가 사용되어 PM BLDC 전동기의 상전류를 정류하는데 이용된다. 이러한 방식은 비용 상승, 부피증가, 환경적 제약 등 여러 가지 문제점을 가지고 있기 때문에 센서리스 구동방식으로서의 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 PM BLDC 전동기의 고정자전압 특성 중 하나인 3고조파 전압 성분을 이용하여 기존의 위치 검출 센서인 Hall-ICs의 신호를 생성하여 회전자의 위치를 판별함과 동시에 속도 센서를 대신하여 사용할 수 있는 방법을 제안하였다.

이와 같은 방법으로 만들어낸 전환 신호를 이용하여

[†]교신저자 : 정회원, 성균관대 정보통신공학부 교수
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr

[‡]정회원, 성균관대 메카트로닉스공학과 박사과정
정회원, (주)팩테크 기술연구소 소장

접수일자 : 2005. 3. 2 1차 심사 : 2005. 4. 6
2차 심사 : 2005. 5. 19 심사완료 : 2005. 6. 4

PM BLDC 전동기를 센서리스로 운전하는 방식은, 하드웨어적으로 전류의 전환 시점이 결정되므로 센서 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능하다^[1]. 또한 아날로그 증폭회로를 이용하여 정격 30000rpm인 전동기의 저속에서도 충분한 3고조파성분을 검출할 수 있다.

2. PM BLDC 전동기의 센서리스 운전원리

단자전압의 역기전력을 이용하는 방식은 비여자상의 역기전력 성분을 검출하는 것으로 3상의 비여자 구간을 검출하기 위하여 저역통과필터와, 스위칭에 의한 고주파를 제거하기 위하여 고역통과필터를 사용하여 주기적인 삼각파를 얻을 수 있다.

이 방법은 검출회로의 구성이 비교적 간단하고, 아날로그회로구성으로 제어기의 부담을 줄여 실시간 검출과 제어에 효율적인 장점을 가지고 있으나, 저속과 차단주파수 이상의 고속에서 검출 파형의 신뢰성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 그리고 한번의 잡음(noise) 신호에 의해 검출신호가 잘못 입력되는 경우 센서리스 운전이 실패할 수 있다는 문제점을 가지고 있다.

반면에 본 논문에서 사용한 단자전압의 3고조파를 이용한 방식은 모터 내부의 중성점과 저항 R을 Y-결선으로 연결하여 3고조파 전압 성분을 검출할 수 있고, 이 성분을 적분하여 영점과 비교하면 정류구간을 검출할 수 있다. 이 방법은 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능하다. 하지만, 저속 영역에서 단자전압의 크기가 매우 작아 3고조파를 검출하기가 어려우며, 전동기 내부 중성점을 이용해야하는 단점이 있다.

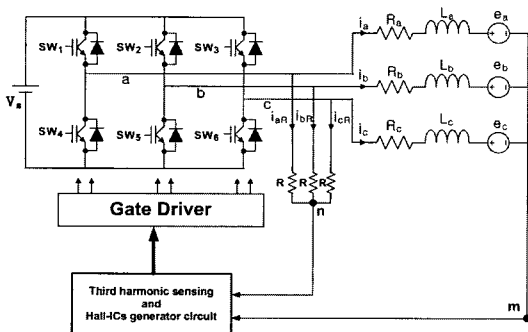


그림 1 3고조파 검출 회로
Fig. 1 Third harmonic sensing circuit

그림 1은 제 3고조파 전압 성분을 검출해 내기 위한 회로로써 전동기 내부의 중성점을 m, 저항 R을 Y-결선으로 연결하여 만들어진 중성점을 n이라고 하면, 두개의 중성점 간의 전압 V_{mn} 이 제 3고조파 전압 성분이 된다. 단자 n의 전압 V_n 의 분석을 위해서는 키르히호프의 전압방정식(KVL)을 적용하면^[2]

$$\begin{aligned} V_{am} + V_{mn} + V_{an} &= 0 \\ V_{bm} + V_{mn} + V_{bn} &= 0 \\ V_{cm} + V_{mn} + V_{cn} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

위 식의 좌변과 우변을 합하여 정리하면

$$\begin{aligned} (V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) + 3V_{mn} \\ + (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) = R(i_{aR} + i_{bR} + i_{cR}) \quad (3)$$

Y-결선이므로

$$i_{aR} + i_{bR} + i_{cR} = 0 \quad (4)$$

따라서 식 (2)로 부터 다음의 식을 얻어낼 수 있다.

$$V_{mn} = -\frac{1}{3} (V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \quad (5)$$

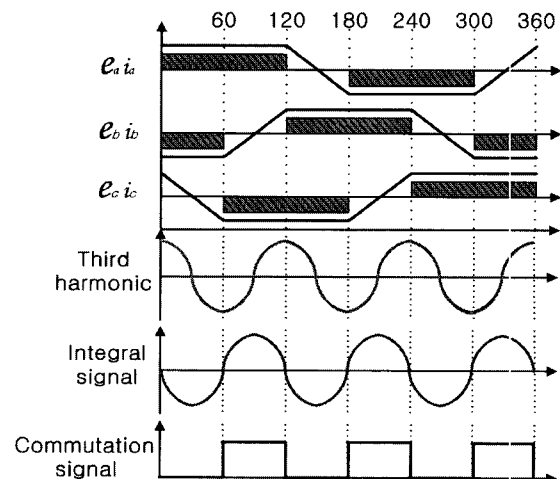


그림 2 3고조파를 이용한 전환 신호의 생성
Fig. 2 Commutation signal using third harmonic signals

그림 2는 3고조파 전압성분을 이용하여 회전자의 위치에 따른 전환신호를 생성하기 위한 방법을 나타내고 있다. 단자전압으로부터 검출된 3고조파 전압을 적분하여 90° 지연된 파형을 얻어내고, 이를 영 전압 검출 회로(Zero crossing detection circuit)를 거치면 전환 신호(Commutation signal)를 만들어 낼 수 있다.

3. 제안한 Hall-ICs 신호 발생 알고리즘

그림 3은 제 3고조파 성분을 입력으로 하는 각상의 Hall-ICs 신호를 생성하는 EPLD 내부 블록을 나타내고 있다. 제안한 Hall-ICs 신호 발생은 존슨카운터(Johnson counter)를 사용하여 논리도의 조합으로 각상의 Hall-ICs 신호를 생성하였다.

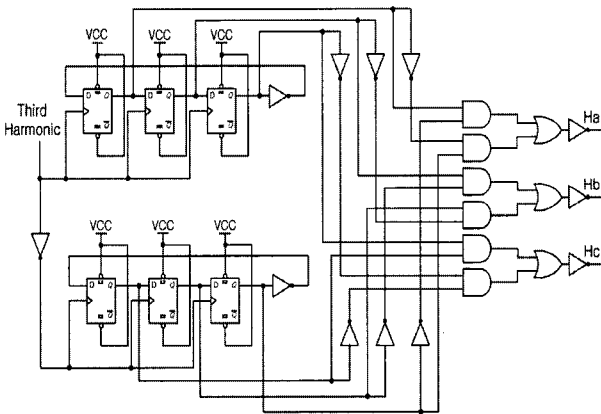


그림 3 존슨카운터를 이용한 Hall-ICs 생성 블록도
Fig. 3 Hall-ICs creation block using Johnson counter

그림 4는 각 상의 Hall-ICs 신호를 추정하는 내용을 나타낸 것이다. Hall-IC 신호는 존슨카운터를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-ICs의 값을 논리도로 조합하여 생성하였다. 존슨카운터의 각 플립플롭의 출력 파형은 전단 플립플롭을 쉬프트한 파형이 되고 각 단의 출력 파형의 조합으로 N-1카운터 변환 회로로서 동작하게 된다.

일반적으로 PM BLDC 전동기의 경우 각 상의 위치 판별을 위해 각 상에 대해 Hall-ICs를 갖는 것이 기본이다. 본 논문에서는 3고조파 신호를 직분회로에 입력으로 사용하여 직분회로로부터 얻어진 결과를 영점(0)과 비교하여 구형파 펄스를 만들어낸다.

이 구형파 펄스를 EPLD 내의 Hall-ICs 신호 발생 로직에 입력으로 사용하여 3상의 Hall-ICs의 신호를 만들어 낸다. 추정된 Hall-ICs 신호는 전동기에 부착

된 Hall-ICs 신호와 동일한 주기와 주파수를 가지고 발생한다.

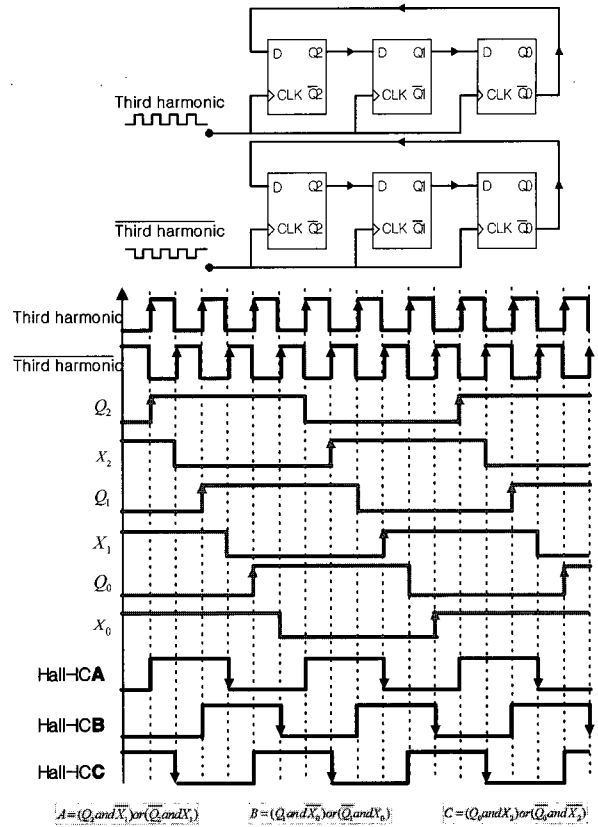


그림 4 EPLD를 이용한 Hall-ICs 신호 발생 알고리즘
Fig. 4 Hall-ICs signal algorithm using the EPLD

3.1 PM BLDC 전동기의 초기구동 방법

3.1.1 강제정렬

PM BLDC 전동기의 센서리스 운전에서 가장 큰 단점은 정지상태에서 초기 회전자의 위치를 알 수 없다는 것이다. 초기 회전자 위치를 검출하기 위한 몇몇 방법들이 제안되었으나, 본 논문에서는 두상을 강제로 여자시켜 회전자가 어떤 위치에 있는지 지정한 위치로 정렬하도록 하는 강제정렬의 방법을 사용하였다.

강제 정렬시 주의해야할 점은 전동기의 관성, 부하의 크기 등을 고려하여 필요시 충분한 정렬시간을 할당해 주어야 다음 단계를 진행할 수 있게 된다. 그러나 자칫 필요 이상으로 오랫동안 강제정렬을 수행시키거나, 고정자 권선에 과도한 전류가 흘러 영구자석 회전자가 감자될 소지가 있으므로 실험을 통해 적절한 강제정렬 지속시간을 선정해야한다.

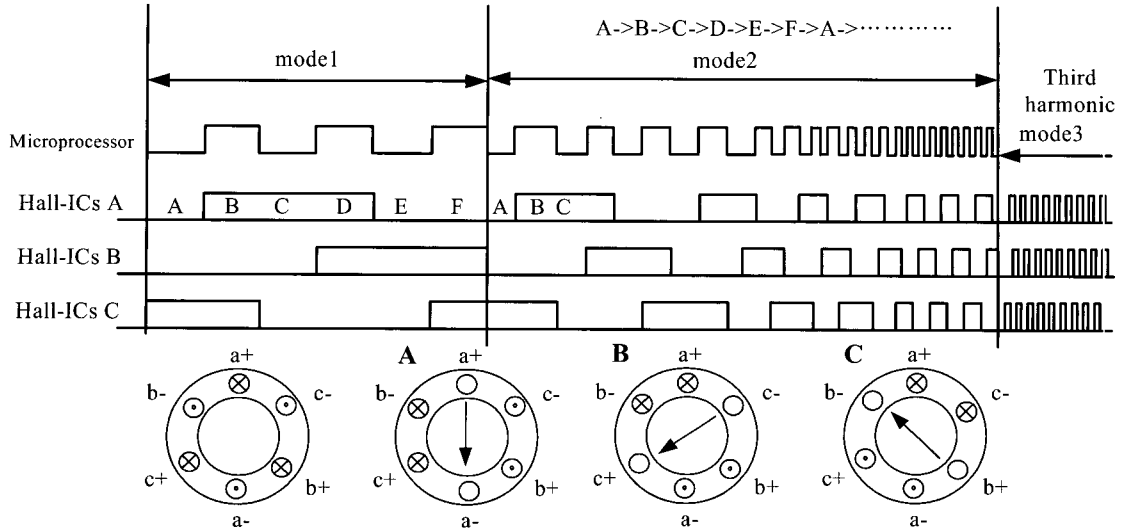


그림 5 PM BLDC 전동기의 초기 구동 알고리즘
Fig. 5 Proposed start up algorithm of PM BLDC motor

3.1.2 동기가속

강제정렬이 정상적으로 수행된 경우 회전자는 지정된 상에 정렬되어 있으며 제어기는 다음 상을 순차적으로 여자시켜 줌으로써 운전하게 된다. 제안한 센서리스 운전에서 일정 속도에 도달하기 전까지는 검출된 신호로 센서리스 운전을 하는 것이 불안정하기 때문에 안정된 회전자 위치정보신호를 검출할 수 있는 영역까지의 가속은 필수적이다. 이러한 가속행위를 동기가속 (synchronous acceleration)이라고 하며, 최초의 동기가속은 강제정렬 상을 기준으로 진행되고, 가속도의 상태 및 속도에 따라 증가해 주어야하는 입력전압은 실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 사용자가 미리 지정해 주어야 한다. 특히 동기 가속 중 부하의 급격한 변화가 발생하는 경우 동기가속이 실패하거나 동기가속 자체가 불가능해지는 경우가 발생할 수 있다.

따라서 다양한 환경에서 실험을 반복하여 최대한 넓은 부하영역을 극복하도록 가속 알고리즘이 작성되어야 한다^[3].

그림 5는 PM BLDC 전동기의 초기구동 알고리즘을 나타내며 초기구동은 3개의 동작모드로 구성되어있다.

- 1) mode 1. align mode
- 2) mode 2. ramp mode
- 3) mode 3. closed-loop speed control mode

mode 1은 초기 정렬 모드로 두상을 강제로 여자시켜 회전자가 어떤 위치에 있던 지정된 상으로 정렬하도록 하는 강제정렬의 모드이다.

mode 2는 동기가속모드로 강제정렬이 정상적으로 수행된 경우 회전자는 지정된 상에 정렬되어 있으며 제어기는 다음 상을 순차적으로 여자시켜 줌으로써 운전을 시작하게 된다. 제안한 센서리스운전에서 일정 속도에 도달하기 전까지는 간접 검출한 신호로 센서리스 운전을 하는 것이 불가능하기 때문에 신뢰성 있는 회전자 위치정보신호를 검출할 수 있는 영역까지 가속을 하는 모드이다.

mode 3은 검출된 3고조파에 의해 구해진 전환신호에 의해 생성된 Hall-ICs 신호를 이용하여 PM BLDC 전동기를 구동하는 모드이다.

3.2 PM BLDC 전동기의 제어방법

그림 6은 슬롯리스 영구자석 브러시리스 직류전동기의 전체 제어 블록도를 나타내고 있다. EPLD (Hall-ICs generator)로부터 검출된 Hall-ICs 신호는 회전자 위치 정보와 속도 정보를 추정하기 위하여 속도 제어기의 실제 속도(w_{real}) 입력이 되고, 속도 제어기는

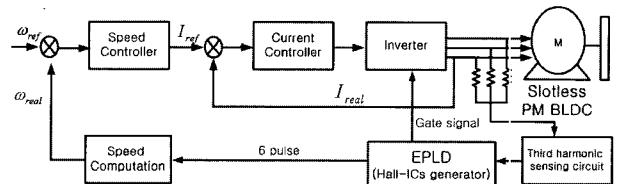


그림 6 PM BLDC 전동기의 폐루프 제어 블록도
Fig. 6 Feedback control block of PM BLDC Motor

기준 전류(I_{ref})를 실제 전류(I_{real})와 비교하여 전류제어를 수행하게 된다. 속도 제어기는 PI 제어, 전류 제어기는 히스테리시스 전류제어방식으로 설계하였다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘을 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션과정을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

그림 7은 고정자의 제 3고조파 전압 성분과 이 전압의 적분파형, 그리고 이를 영점 검출회로를 거쳐 생성된 전환신호, 각상의 전류 파형으로써 고정자의 3고조파 전압성분을 이용하여 전환신호를 생성하는 과정을 보여주고 있다. Op-Amp를 이용한 적분회로를 통해 위상이 90° 지연된 고정자의 3고조파 성분을 영점 검출회로를 통해서 전환신호를 만들 수 있다. 그리고 이 전환신호를 이용하여 PM BLDC 전동기의 정류되는 시점을 찾을 수 있다.

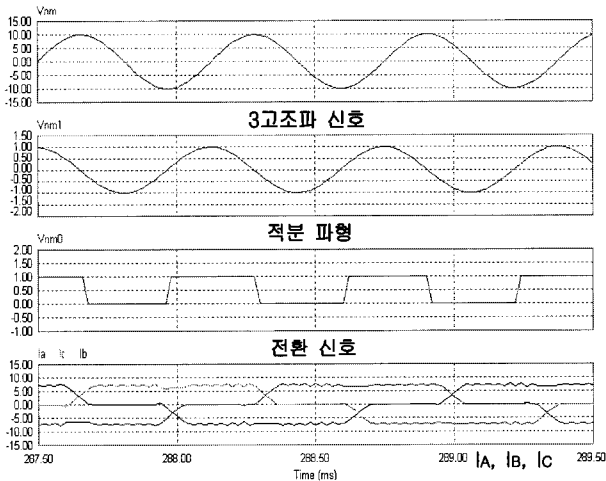


그림 7 3고조파를 이용한 전환 신호의 생성
Fig. 7 Commutation signal using third harmonic

그림 8은 제 3고조파 신호를 이용하여 생성된 전환신호와 이 전환신호를 입력으로 하여 만들어진 3상의 Hall-ICs 신호를 나타내고 있다. Hall-ICs 신호는 존슨 카운터 두개를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-ICs의 값을 논리적으로 조합하여 생성되었고 그림 3의 블록도와 같다.

그림 9는 본 논문에서 제안한 제 3고조파를 이용하여 PM BLDC 전동기를 20000rpm 센서리스 운전시 각상의 전류파형을 나타내고 있다.

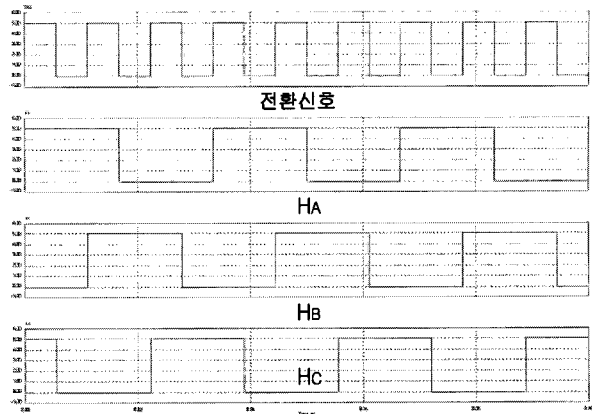


그림 8 Hall-ICs 신호와 전환신호
Fig. 8 Hall-ICs signal and commutation signal

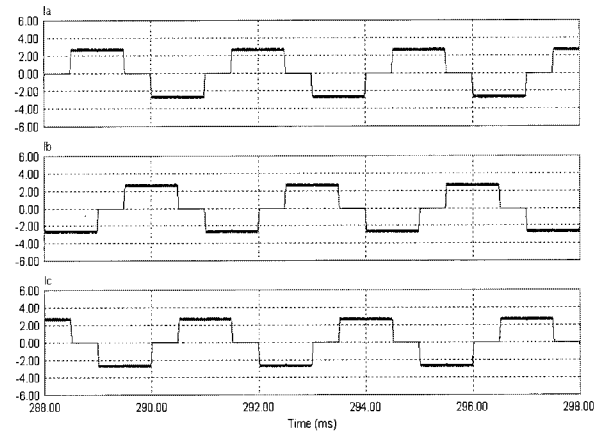


그림 9 각 상의 전류 파형 (2A/div, 20000rpm)
Fig. 9 Each phase current

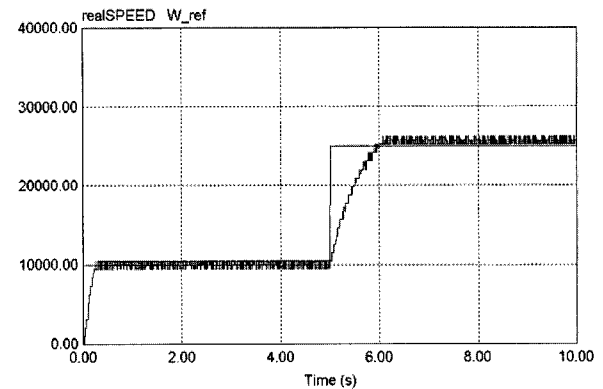


그림 10 기준속도 변화에 대한 응답속도(2s/div, 10000/rpm)
Fig. 10 Speed response of reference speed change

그림 10은 10000rpm과 25000rpm때의 기준속도 변화에 따른 응답속도를 나타내고 있다. 본 논문에서 사용

된 BLDC모터는 1회전시 발생하는 6개의 펄스를 이용하여 속도제어를 하기 때문에 속도응답에 대한 오차가 발생하지만 기준속도를 추종함을 알 수 있다.

5. 실험 결과

그림 11은 3고조파를 검출하여 EPLD 로직을 통해 Hall-ICs 신호와 동일한 신호를 만듦으로써 PM BLDC 전동기의 제어 시스템의 전체 블록도를 나타내고 있다. 본 시스템은 PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, EPLD 그리고 PI 제어 부분으로 구성되어 있다. EPLD에는 인버터 스위칭 부분과 3고조파 신호를 이용하여 Hall-ICs 신호를 만드는 부분, 생성된 Hall-IC 신호를 이용하여 60° 마다 펄스가 발생하는 6펄스 부분으로 구성되어 있다.

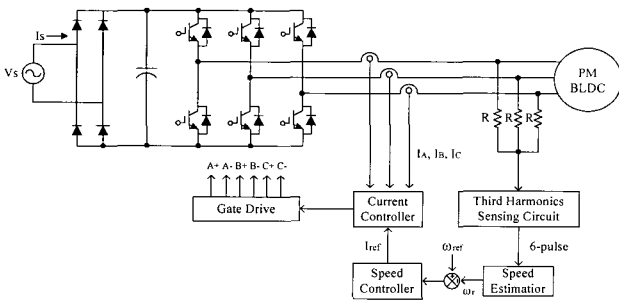


그림 11 PM BLDC 전동기의 구동 시스템
Fig. 11 PM BLDC Motor driving system

표 1은 본 논문에서 사용된 PM BLDC전동기 구동 시스템 사양을 나타내고 있다.

표 1 PM BLDC 전동기 구동 시스템 사양
Table 1 Specification of PM BLDC Motor

고정자 저항	0.88
입력 전압	90Vdc ~ 340Vdc
정격 입력 전력	1kW
정격 출력 전력	0.9kW
정격 속도	33000rpm
정격 전류	3.6Amps at 280Vdc
극수	2
정격 Torque	0.245Nm(2.5KgfCm)
고정자 인덕턴스	1.5mH
Inertia	$15.067 \times 10^6 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$
토크 상수	0.07433

그림 12는 그림 3과 같이 EPLD에서 설계한 로직을 시뮬레이션 한 결과로서 제 3고조파 신호를 이용하여 검출된 Hall-ICs 신호를 보여주고 있다.

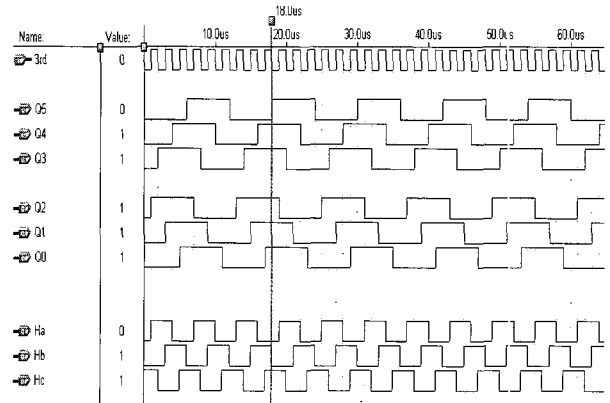


그림 12 Hall-ICs 신호의 시뮬레이션 결과
Fig. 12 Hall-ICs signal of simulation result

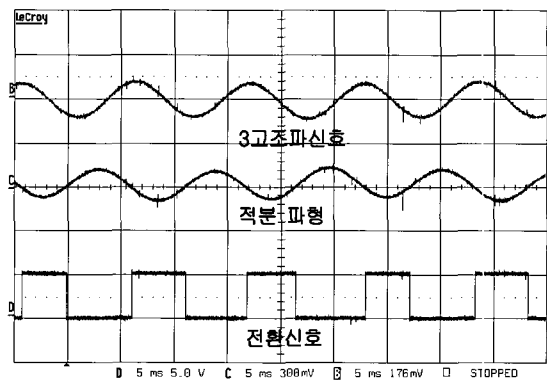


그림 13 제 3고조파를 이용한 전환신호
Fig. 13 Commutation signal using third harmonic

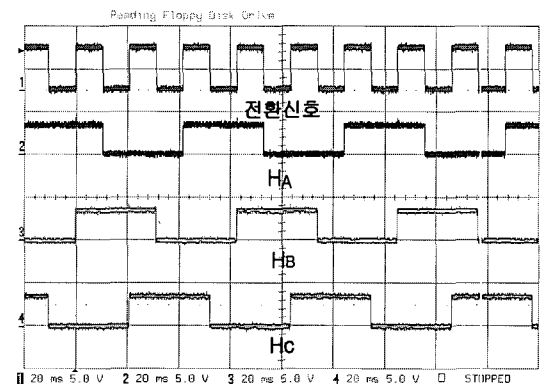


그림 14 전환신호를 이용한 각 상의 Hall-IC 신호
Fig. 14 Each phase Hall-IC signal using commutation signal

그림 13은 그림 7에 대한 실험 결과로서 고정자의 제 3고조파 전압 성분과 이 전압성분을 입력으로 하여 얻은 적분파형, 그리고 이를 영점 검출회로를 거쳐 생성된 전환신호를 나타내고 있다.

그림 14는 3고조파 신호를 이용하여 3상의 Hall-ICs 신호를 추정한 실험결과이다. Hall-ICs 신호는 존슨카운터(Johnson counter)를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-ICs신호의 값을 논리도에 의한 조합으로 생성된 신호이다.

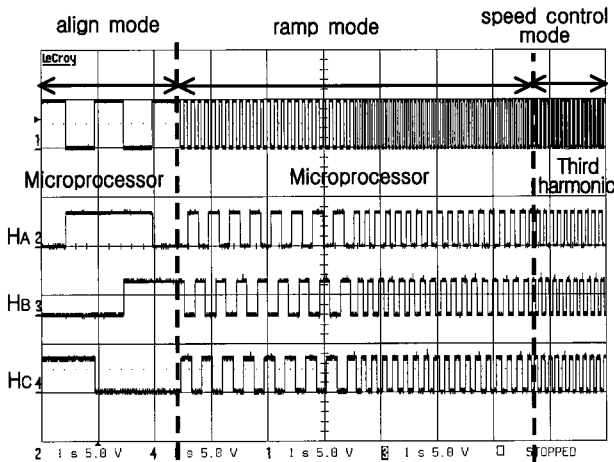


그림 15 초기구동 동작모드
Fig. 15 Start up operation mode

그림 15는 슬롯리스 영구자석 브러시리스 직류전동기의 초기구동신호를 나타내고 있다. 초기구동은 마이크로프로세서를 이용하여 두상을 강제로 여자시켜 회전자 위치가 어떤 위치에 있던 지정된 상으로 정렬하도록 하는 강제정렬 모드(align mode), 회전자 위치정보신호를 검출할 수 있는 영역까지 가속하여 운전을 시작하는 동기 가속모드(ramp mode)로 구성되어 있다. 그리고 강제정렬과 동기가속모드에 의해 일정속도 후 본 논문에서 제안한 3고조파 검출회로와 존슨 카운터를 이용하여 얻어진 전환신호에 의해 생성된 Hall-ICs 신호를 이용하여 PM BLDC 전동기를 구동하는 모드(speed control mode)로 구성되어 있다.

그림 16과 17은 본 논문에서 3고조파를 이용한 PM BLDC 전동기를 각각 20000, 25000rpm의 센서리스 운전시 각상의 전류파형을 보여주고 있다.

그림 18은 10000rpm과 25000rpm의 센서리스 운전시 기준속도 변화에 따른 응답속도로서 1회전시 발생하는 6개의 펄스를 이용하여 60° 마다 회전자 위치를 검출

하기 때문에 속도제어를 하는데 있어서 속도응답에 대한 속도리플이 크게 나타난다.

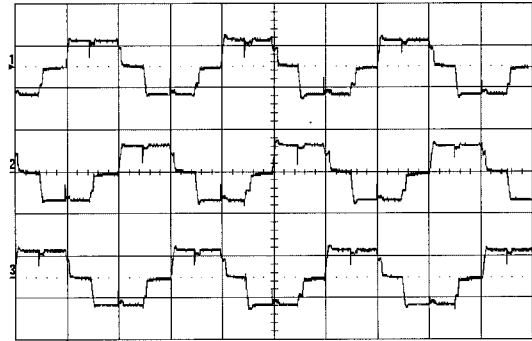


그림 16 각 상전류 (20000rpm, 2A/div, 1ms/div)
Fig. 16 Each phase current

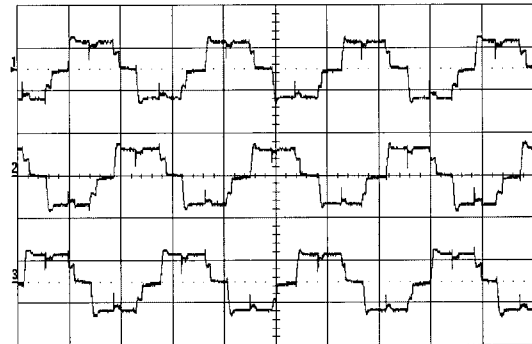


그림 17 각 상전류 (25000rpm, 2A/div, 1ms/div)
Fig. 17 Each phase current

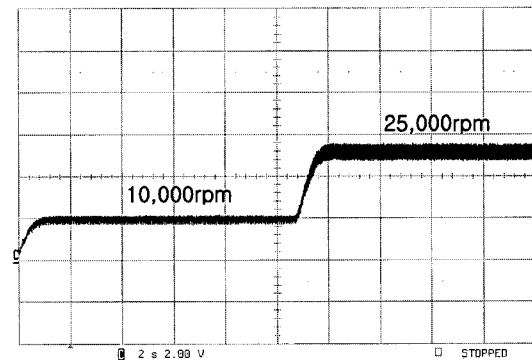


그림 18 기준속도변화에 대한 응답속도
(2s/div, 10000rpm/div)
Fig. 18 Speed response of reference speed change

그림 19는 제 3고조파 신호를 이용한 PM BLDC 전동기 센서리스 구동 시스템의 전체 실험 세트를 나타내고 있다.

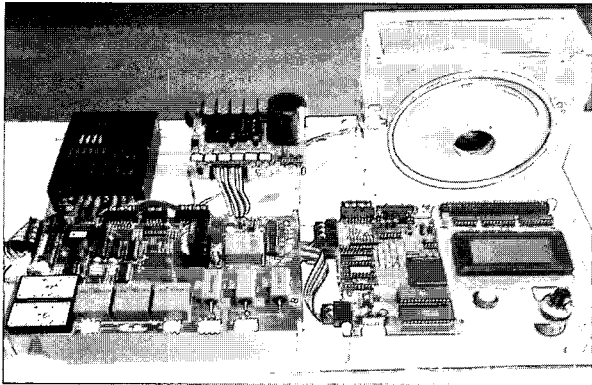


그림 19 실험 세트
Fig. 19 Experimental test setup

5. 결 론

본 논문에서는 슬롯리스 영구자석 브러시리스 직류 전동기의 센서리스구동 시스템을 개발함에 있어 Hall-IC 신호를 이용하지 않고 3고조파 신호를 이용하여 회전자 위치를 판별함과 동시에 속도제어가 가능한 구동 시스템을 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존에 속도 제어를 위해 필요했던 Hall-ICs를 대신 하여 센서의 장착이 어려운 분야 및 온도나 습도의 제한이 따르는 곳에 적용할 수 있다.
2. 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능하다.
3. 검출된 3고조파를 이용하여 전환신호를 만들어주기 위해서 2개의 존슨 카운터를 병렬로 연결하는 방식을 사용하였다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] Moreira, J. C. "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motors operating over a wide speed range", *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 32, pp. 1394-1401, 1996.

[2] 장항재, 이용순, 김종신, 유지윤, 이광운, 여형기, 박정배, "브러시리스 직류 전동기용 새로운 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구," *전력전자학회지*, Vol. 6, pp.223-230, 2001.

[3] Hung-Chi Chen, Chang-Ming Liaw, " Current-mode control for sensorless BDCM drive with intelligent commutation tuning", *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 17, pp. 747-756, 2002.

[4] F.Caricchi, F.Giulii Capponi, F.Crescimbin and L. Solero, " Sinusoidal Brushless Drive with Low-Cost Hall Effect Position Sensors", *IEEE Trans. Ind. Application*, pp. 799-804, 2001.

[5] Volpe G, "A phase-locked loop control system for a synchronous motor", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 15, pp. 88-95, Feb. 1970.

[6] Wakasa T., Hai-Jao Guo., Ichinokura O., "A simple position sensorless driving system of SRM based on new digital PLL technique", *Industrial Electronics Society, IECON*, 28th Annual Conference of the IEEE, Vol. 1, pp. 502-507, 2002.

[7] 윤용호, 이승준, 김영란, 원충연, 최유영, "2Hall-ICs를 이용한 Slotless PM Brushless DC Motor의 정밀속도제어를 위한 PLL 제어방식," *전력전자학회지*, 제 10권 제2호, pp. 109-116, 2005.

[8] 윤용호, 우무선, 김덕규, 원충연, 최유영, "2Hall-ICs를 이용한 저가형 PM Brushless DC Motor 속도 제어," *전력전자학회지*, 제 9권 제 4호, pp. 311-318, 2004.

저 자 소 개



윤용호(尹溶湖)

2002년 성균관대 메카트로닉스 공학과 졸업(석사). 2002년 LG전자 DDM사업부 입사. 2003년~현재 성균관대 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.



김연중(金淵忠)

1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박). 현재 (주)팩테크 기술연구소 소장.



원충연(元忠淵)

1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수.