

# PM BLDC 모터의 센서리스 정밀 속도 제어

(Sensorless Precision Speed Control of PM BLDC Motor)

김연충 · 윤용호 · 김학성 · 이병국 · 원충연\* · 천장성

(Yuen-Chung Kim · Yong-Ho Yoon · Hack-Seong Kim · Byuong-Kuk Lee · Chung-Yuen Won · Jang-Sung Chun)

## 요 약

본 논문에서는 고정자의 3고조파 전압 성분을 이용하여 브러시리스 직류 전동기의 회전자 위치를 간접 검출하는 방법을 제안하였다. 3고조파 전압 성분은 회전자의 위치 정보를 가지고 있고 이 전압을 이용하여 정류 신호를 만들어 낼 수 있다. 따라서 정류 신호를 이용한 브러시리스 직류 전동기를 센서리스로 운전하는 방식은 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능하다. 또한 정밀 속도 제어를 위해 PLL 회로를 적용함으로써 저속도에서도 높은 분해능을 얻을 수 있다. 따라서 기존에 속도 제어를 위해 필요했던 고가의 속도 센서인 레졸버와 엔코더 역할을 대체하여 전체적인 구동 회로의 가격을 낮출 수 있다.

## Abstract

This paper studies particularly applicable method for sensorless PM BLDC motor 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. Also because of low resolution of estimated signal obtained by the proposed sensorless algorithm, to improve the wide range of speed response characteristic more exactly, we propose the rotor position signal synthesizer using PLL circuit based on estimated signals.. Some experimental results are provided to demonstrate the validity of the proposed control method.

Key Words : PM BLDC Motor, Sensorless Speed Control, Third harmonic, Johnson Counter, PLL

## 1. 서 론

PM BLDC(Permanent Magnet Brushless DC) 전동기는 영구자석 재료의 고 에너지 밀도화와 더불어 산업용 기기 및 가전제품 분야에서 널리 이용되고 있으며, 동일한 체적의 영구자석으로 출력을 증가하기 위한 자기회로 설계 등이 활발히 이루어지고 있

\* 주저자 : 성균관대 정보통신공학부 교수  
Tel : 031-290-7169, Fax : 031-290-7169  
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr  
접수일자 : 2005년 9월 13일  
1차심사 : 2005년 9월 15일  
심사완료 : 2005년 10월 6일

대[1]. 그러나 PM BLDC 전동기는 회전자 위치에 따라 전동기의 상전류를 전환해 주어야 하므로 홀센서나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이다.

이러한 위치 검출 및 속도 센서의 사용은 전체적인 구동 회로의 가격을 증가시킬 뿐만 아니라 열악한 환경에서는 사용하기 어려운 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 여러 가지 센서리스 구동방식 중 고정자의 3고조파 전압 성분을 이용하는 방법을 제안하였다[2]. 이 방법은 필터에 의한 지연에 민감하지 않고, 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능하다. 또한 3고조파 전압 성분을 이용하여 정류 신호를 발생하는 알고리즘이외에 초기구동 알고리즘을 유도하였으며[3], 정밀 속도 제어를 위해 PLL(Phase Locked Loop) 회로를 적용함으로써 저속도에서도 높은 분해능을 얻을 수 있다.

결과적으로 기존에 속도 제어를 위해 필요했던 고가의 속도 센서인 레졸버와 엔코더 역할을 대체하여 전체적인 구동 회로의 가격을 낮출 수 있다[4,5].

## 2. 제안한 센서리스 알고리즘

### 2.1 PM BLDC 전동기의 센서리스 운전 원리

본 논문에서는 고정자의 3고조파 전압 성분을 이용하여 PM BLDC 전동기의 회전자 위치를 간접 검출하는 방법을 제안하였다.

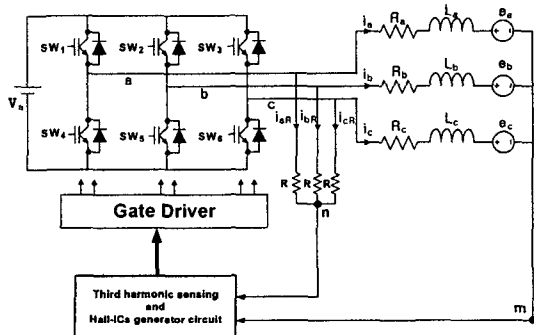


그림 1. 3고조파 검출 회로  
Fig. 1. Third harmonic sensing circuit

3고조파 전압 성분을 검출해 내기 위해서는 그림 1에 보인 바와 같이 3상의 고정자 전압을 동일한 값을 가지는 저항 R을 이용하여 Y-결선으로 연결한다. 이때 전동기 내부의 중성점을 m, 저항 R을 Y-결선으로 연결하여 만들어진 중성점을 n이라고 하면, 두 개의 중성점 간의 전압  $V_{mn}$ 이 3고조파 전압 성분이 된다.

단자 n의 전압  $V_n$ 의 분석을 위해서 키르히호프의 전압방정식(KVL)을 적용하면,

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

또한 식 (1)에서  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

식 (1)과 식 (2)를 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{an} &= R i_{aR} \\ V_{bn} &= R i_{bR} \\ V_{cn} &= R i_{cR} \\ V_{mn} &= -\frac{1}{3} (V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \end{aligned} \quad (2)$$

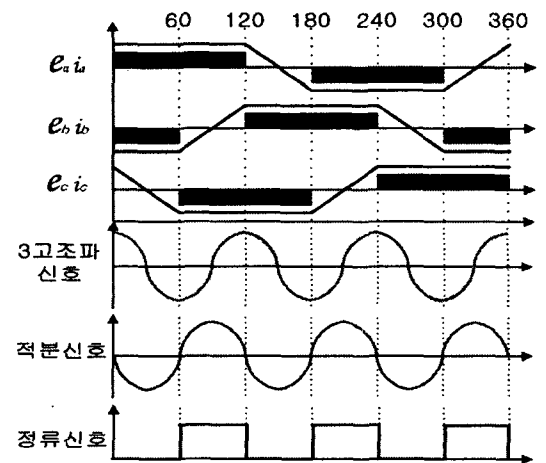


그림 2. 3고조파를 이용한 정류 신호의 생성  
Fig. 2. Commutation signal using third harmonic signals

식 (3)에 정의된 바와 같이 3고조파 전압 성분은 회전자의 위치 정보를 가지고 있다. 따라서 이 전압을 적분하여 90° 지연된 파형을 얻어내고, 이를 영전압 검출 회로(Zero crossing detection circuit)를 거치면 정류 신호(Commutation signal)를 만들어 낼 수 있다.

그림 2와 같은 방법으로 만들어진 정류 신호를 이용하여 PM BLDC 전동기를 센서리스로 운전하는 방식은 상 지연 필터가 필요 없다. 하드웨어적으로 전류의 전환 시점이 결정되고 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능하다.

### 2.2 Hall-ICs 신호발생 알고리즘

일반적으로 PM BLDC 전동기의 경우 회전자 위치 판별을 위해 각 상에 대해 Hall-ICs 신호를 갖는 것이 기본이다. 하지만 본 논문에서는 그림 2와 같은 방법으로 얻어낸 정류 신호를 입력으로 사용하여 3상의 예측된 Hall-ICs 신호를 생성한다. 추정된 Hall-ICs 신호는 전동기에 부착된 실제 Hall-ICs 신호와 동일한 주기와 주파수를 가지고 발생한다.

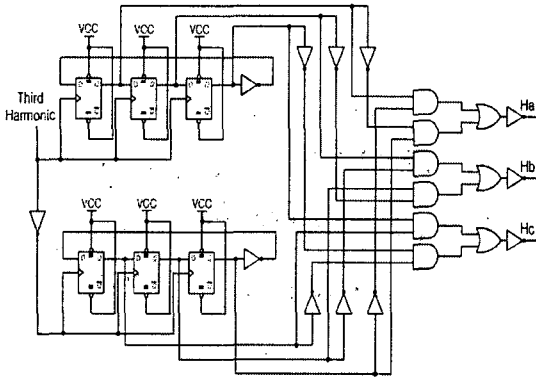


그림 3. 존슨카운터를 이용한 Hall-ICs 생성블록도  
Fig. 3. Hall-ICs creation block using Johnson counter

그림 3은 3고조파 전압성분을 입력으로 하여, 센서리스 운전을 하기위한 각 상의 예측된 Hall-ICs 신호를 생성하는 EPLD 내부 블록으로써 신호 발생은 존슨카운터(Johnson counter)를 사용하여 논리도의

조합에 의해 각상의 신호를 생성하였다.

그림 4는 제안한 3고조파 전압성분을 이용한 센서리스 운전시 각 상의 예측된 Hall-ICs 신호를 추정하는 세부내용으로써 존슨카운터(Johnson counter)를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-ICs 신호의 값을 추정하였다.

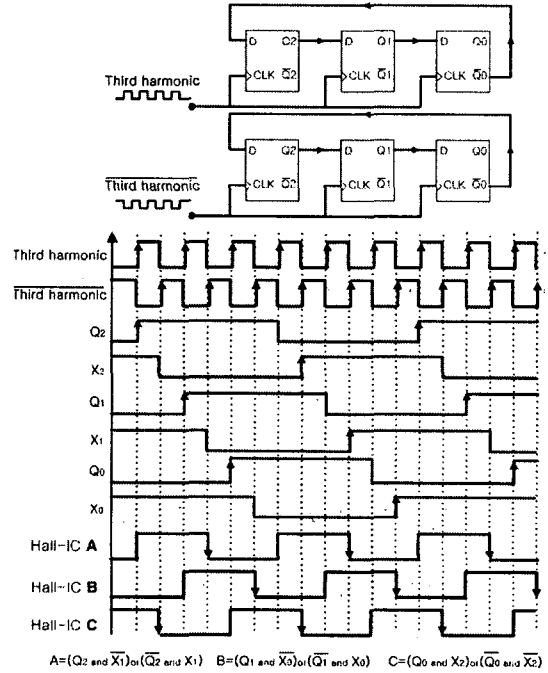


그림 4. EPLD를 이용한 홀센서 신호발생 알고리즘  
Fig. 4. Hall-ICs signal creation algorithm using the EPLD

### 2.3 PM BLDC 전동기의 초기 구동 방법

그림 5는 PM BLDC 전동기의 센서리스 운전시 초기 구동 알고리즘을 나타내고 있다. 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 두 상을 강제로 여자시켜 회전자의 위치에 관계없이 지정된 상으로 정렬하도록 하는 강제정렬모드이다.

mode 2는 동기가속모드로 강제정렬이 정상적으로 수행된 경우 회전자는 지정된 상에 정렬되어 있

으며 제어기는 다음 상을 순차적으로 여자시켜 운전 을 시작하게 된다. 제안한 센서리스 운전에서 일정 속도에 도달하기 전까지는 간접 검출한 신호로 센서 리스 운전을 하는 것이 불가능하기 때문에 신뢰성 있는 회전자 위치정보신호를 검출할 수 있는 영역까 지 가속을 하는 모드이다.

mode 3은 검출된 3고조파에 의해 형성된 정류 신 호에 의해 생성된 Hall-ICs 신호를 이용하여 PM BLDC 전동기를 구동하는 모드이다.

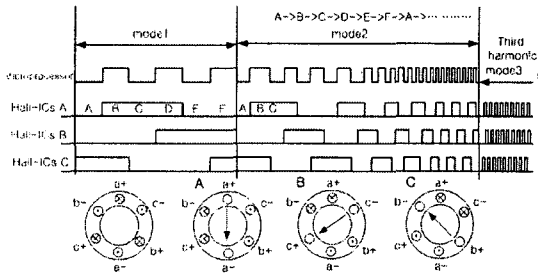


그림 5. PM BLDC 전동기의 초기 구동 알고리즘  
Fig. 5. Proposing starting sequence of PM BLDC Motor

## 2.4 정밀속도 제어를 위한 PLL 알고리즘

일반적으로 속도를 측정하기 위해서는 엔코더나 레졸버와 같은 속도 센서를 사용해야 한다. 그러나 본 논문에서는 3고조파 전압 성분을 이용하여 Hall-ICs 신호를 발생하는 알고리즘을 사용하므로 분해능(Resolution)이 낮다. 따라서 보다 정밀한 속도제어를 위해 회전자 속도에 비례하는 펄스를 만드는 PLL회로를 사용하였다.

그림 6은 Hall-ICs 신호를 이용하여 1회전 당 6 펄스의 신호와 그에 따른 PLL 회로에서 발생하는 펄스의 구성도를 보여주고 있다. Hall-ICs 신호는 120°의 위상차를 가지고 발생하며, 각 상은 서로 60°씩 교차하게 되어있다. 이와 같은 방법으로 EPLD 내에서 60°마다 펄스가 발생하도록 회로를 구현하여 PLL 회로에 적용하면 1회전 당 6 pulse 신호의 주파수에 1~999배의 주파수를 갖는 신호를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 임의로 6 pulse 주파수의 23배인 138개(23×6=138)의 펄스를 얻을 수 있도록 하였다. PLL에서 나오는 신호는 엔코더에서

발생되는 A상과 B상의 펄스를 이용하여 속도 측정을 위한 신호를 합성하는 것과 동일한 역할을 한다.

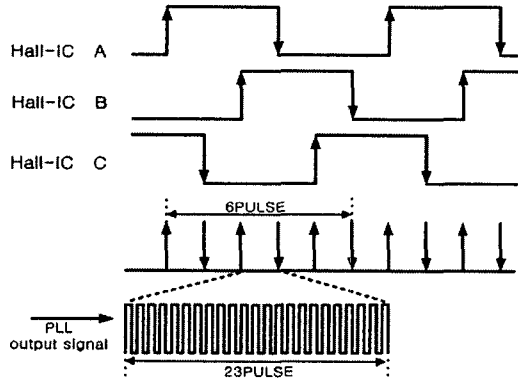


그림 6. 생성된 Hall-ICs 신호와 PLL 신호  
Fig. 6. Creative Hall-ICs Signals and PLL output signal during one period

그림 7은 본 논문에서 정밀 속도 제어를 하기 위해 제안한 PLL 회로를 이용한 회전자 위치 신호 발생 블록도를 보여주고 있다. 회전자 위치 신호는 6 펄스를 발생시킬 수 있도록 하는 EPLD 부분과 회전자 주파수의 변화에 비례하면서 출력 신호의 주파수를 증가시키는 PLL 부분으로 구성되어 있다.

따라서 기존의 Hall-ICs 신호를 사용했을 경우 발생하는 낮은 분해능의 문제점 등을 해결하여 정밀 속도를 요구하는 분야에 적용 가능하다.

이와 함께 기존의 엔코더나 레졸버와 같은 속도센서를 대체하여 전체적인 구동 회로의 가격을 낮출 수 있다.

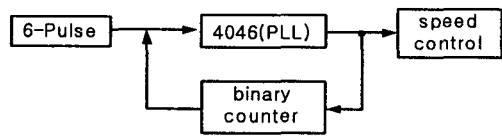


그림 7. PLL을 이용한 제안한 회전자 위치 신호  
Fig. 7. The block diagram of the proposed rotor position signal synthesizer

## 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘을 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

PM BLDC 모터의 센서리스 정밀 속도 제어

그림 8은 고정자의 3고조파 전압 성분과 이 전압의 적분파형, 그리고 이를 영점검출회로를 거쳐 생성된 정류 신호와 각 상의 전류를 나타내고 있다.

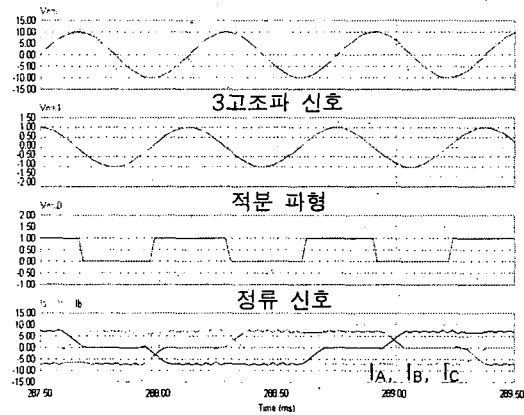


그림 8. 3고조파를 이용한 정류 신호  
Fig. 8. Commutation signal using third harmonic signal

그림 9는 그림 8에서 얻어진 정류신호를 이용하여 예측된 3상의 Hall-ICs 신호들을 나타낸다.

Hall-ICs 신호는 존슨 카운터 2개를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-ICs 신호의 값을 논리도로 조합하여 생성한 신호이다.

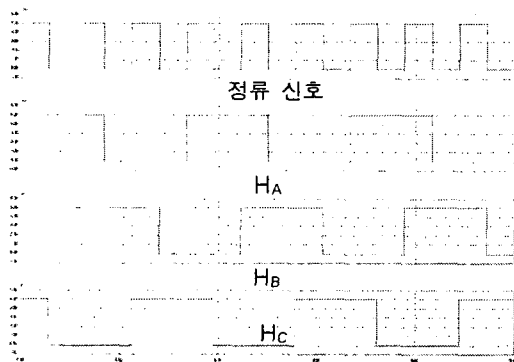


그림 9. 정류 신호를 이용한 Hall-ICs 신호 생성  
Fig. 9. Hall-ICs signal creation using commutation signal

그림 10, 11, 12는 각각 5000, 7000, 10000[rpm]일 때의 6 펄스 신호를 PLL 회로에 입력하여 출력된 신호를 나타낸다.

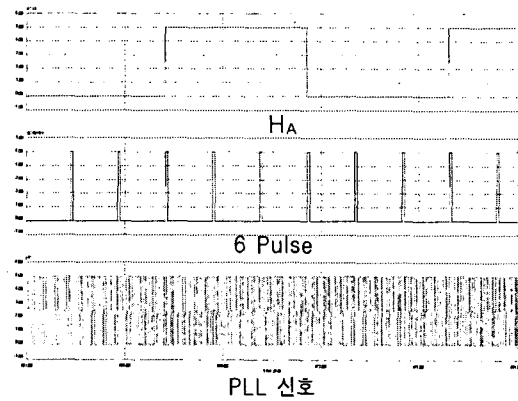


그림 10. 6 펄스 신호와 PLL 신호(5000(rpm))  
Fig. 10. 6 pulse signals and PLL signals

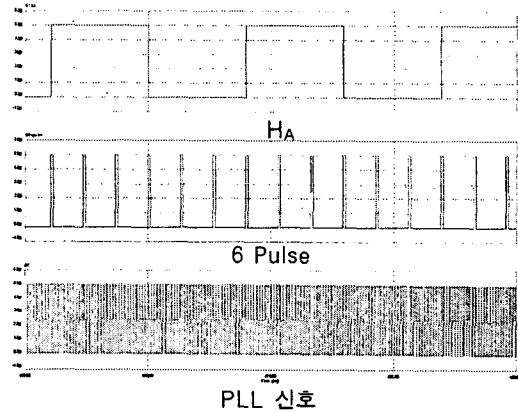


그림 11. 6 펄스 신호와 PLL 신호(7000(rpm))  
Fig. 11. 6 pulse signals and PLL signals(7000(rpm))

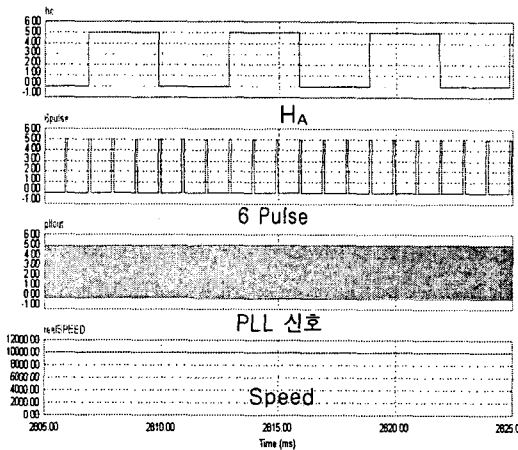


그림 12. 6 펄스 신호와 PLL 신호(10000(rpm))  
Fig. 12. 6 pulse signals and PLL signals

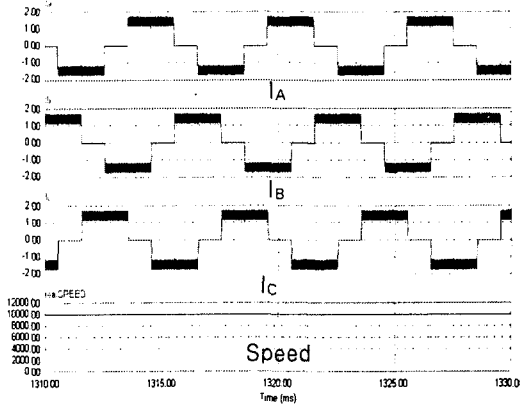


그림 13. 상전류 파형(10000[rpm])  
Fig. 13. Phase Current Waveform

그림 13은 10000[rpm]으로 회전할 때 각 상의 전류를 나타내고 있으며, 속도는 PLL 펄스 중 임의의 펄스 두 개 사이의 시간을 검출함으로써 알 수 있다.

#### 4. 실험 결과

그림 14는 3고조파 전압 성분을 검출하여 EPLD 로직을 통해 Hall-ICs 신호와 동일한 신호를 발생하는 회로가 포함된 PM BLDC 전동기의 센서리스 제

어 시스템의 전체 블록을 나타내고 있다.

본 시스템은 크게 PM BLDC 전동기, 3고조파 전압 검출회로, PLL부분으로 구성되어 있다.

인버터 스위칭 부분과 3고조파 전압 신호를 이용하여 Hall-ICs 신호를 만드는 부분, 생성된 Hall-ICs 신호를 이용하여 60도마다 펄스가 발생하는 6 펄스 부분을 EPLD로 구성하였다.

표 1. PM BLDC 전동기 구동 시스템 사양  
Table 1. Specification of PM BLDC Motor's driving system

입력 전압	90[Vdc] ~ 340[Vdc]
정격 입력 전력	1[kW]
정격 출력 전력	0.9[kW]
정격 속도	33000[rpm]
정격 전류	3.6A at 280[Vdc]
극 수	2

EPLD로부터 검출된 Hall-ICs 신호로 회전자 위치 정보와 속도정보를 추정하여 속도 제어기의 실제 속도( $\omega_r$ )는 입력이 되고, 속도 제어기는 기준 전류( $I_{ref}$ )를 실제 전류( $I_{real}$ )와 비교하여 전류제어를 수

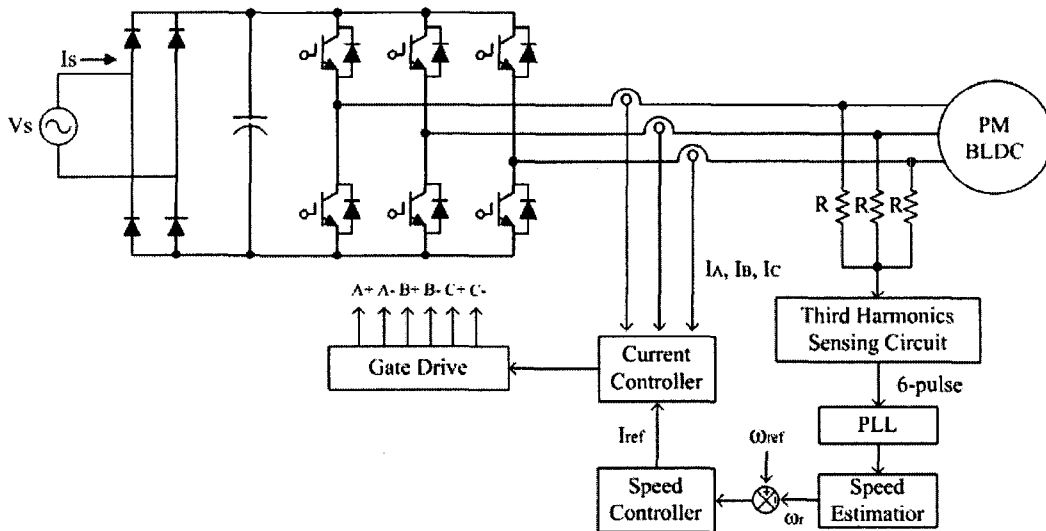


그림 14. PM BLDC 전동기의 구동 시스템  
Fig. 14. PM BLDC Motor driving system

PM BLDC 모터의 센서리스 정밀 속도 제어

행하게 된다. 속도 제어기는 PI 제어, 전류 제어기는 히스테리시스 전류제어방식으로 설계하였다.

실험에 사용된 PM BLDC 전동기는 2극, Y-결선으로 사양은 표 1과 같다.

그림 15는 고정자의 3고조파 전압 성분과 이 전압의 적분파형, 그리고 이를 영점검출회로를 거쳐 생성된 정류 신호를 나타내고 있다.

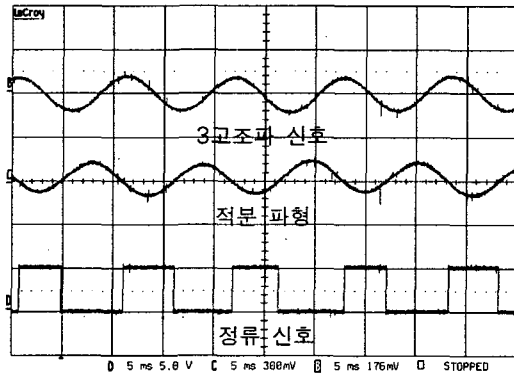


그림 15. 3고조파를 이용한 정류 신호  
Fig. 15. Commutation signal using third harmonic signal

그림 16은 고정자의 3고조파 전압 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.

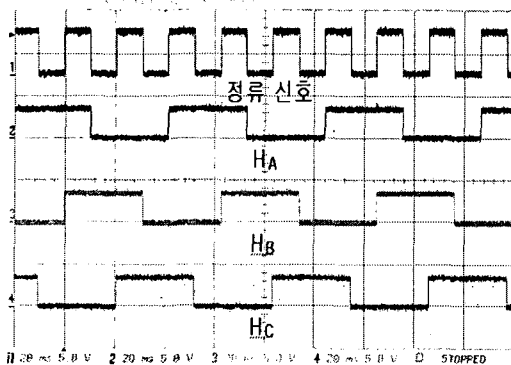


그림 16. 정류 신호를 이용한 Hall-ICs 신호 생성  
Fig. 16. Hall-ICs creation signal using commutation signal

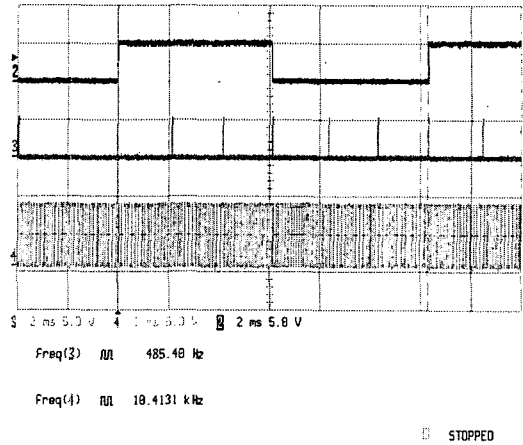


그림 17. 6 펄스 신호와 PLL 신호 (5000(rpm))  
Fig. 17. 6 pulse signals and PLL signals

그림 17과 그림 18은 본 논문에서 PLL 회로를 이용하여 제안한 회전자 위치신호의 파형을 보여주고 있다. 각각 5000, 7000[rpm]일 경우 회전자가 1회전 하였을 때 EPLD에서 발생하는 6 펄스의 주파수를 기준으로 하여 속도가 변화함에 따라 6 펄스의 주파수에 비례하면서 증가된 PLL 회로의 출력파형을 얻을 수 있다.

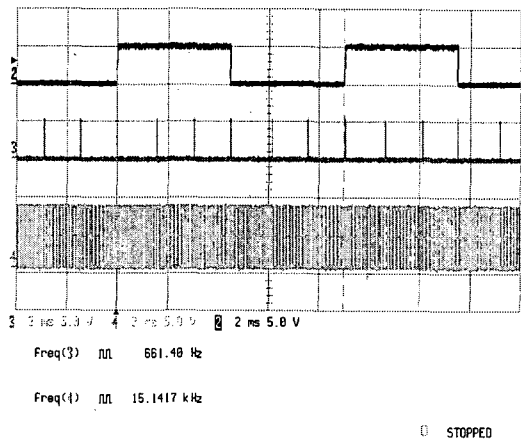


그림 18. 6 펄스 신호와 PLL 신호 (7000(rpm))  
Fig. 18. 6 pulse signals and PLL signals

회전자 위치 센서인 Hall-IC는 저가의 경제성을 가지고 있지만 낮은 분해능으로 인한 단점을 가지고 있어서 정밀제어의 어려움을 가지고 있다. 따라서

PLL 회로를 적용함으로써 정밀속도 제어가 필요로 하는 응용분야에 고가의 엔코더 없이 저가의 회로를 구성할 수 있다.

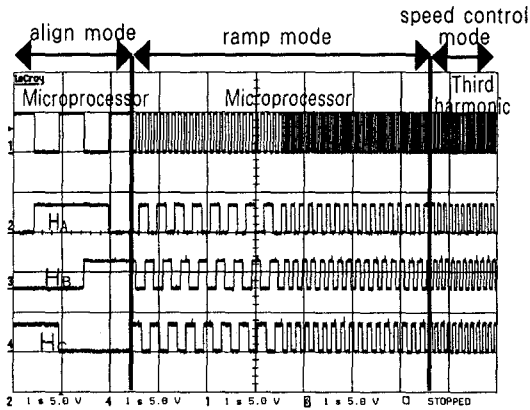


그림 19. 초기 구동 동작 모드  
Fig. 19. Start up operation mode

그림 19는 PM BLDC 전동기의 초기구동신호를 나타내고 있다. 초기구동은 마이크로프로세서를 이용하여 두상을 강제로 여자시켜 회전자가 어떤 위치에 있던 지정한 상으로 정렬하도록 하는 강제정렬 모드 (align mode), 회전자 위치정보신호를 검출할 수 있는 영역까지 가속하여 운전을 시작하는 동기 가속모드(ramp mode)로 구성되어 있다.

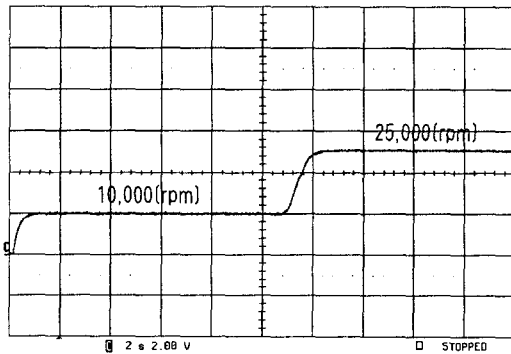


그림 20. 속도 응답 시험(10000 → 25000(rpm))  
Fig. 20. Speed response test (10000 → 25000(rpm))

그리고 강제정렬과 동기가속모드에 의해 일정속도 후 본 논문에서 제안한 3고조파 검출회로와 존슨

카운터를 이용하여 얻어진 전환신호에 의해 생성된 Hall-ICs신호를 이용하여 PM BLDC 전동기를 구동하는 모드(speed control mode)로 구성되어 있다.

그림 20은 기준 속도를 10000[rpm]에서 25000[rpm]으로 변화시킬 때 추종하는 속도파형을 나타내고 있다. 가변 구간에서 기준 속도의 변화에 원활하게 추종함을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 PM BLDC 전동기의 센서리스구동 시스템을 개발함에 있어 Hall-ICs 신호를 사용하지 않고 고정자의 3고조파 전압 신호를 이용하여 회전자 위치를 판별함과 동시에 속도 제어가 가능한 구동 시스템을 개발하였다.

또한 저가의 PLL 회로를 적용함으로써 실제 산업계에서도 정밀한 속도 제어를 요하는 곳의 경우 기존에 PM BLDC 전동기 내부에 있는 위치 센서나 엔코더 대신 속도 센서 역할을 할 수 있다.

3고조파 전압 신호를 이용하여 하드웨어로 구성된 Hall-ICs 신호를 만듦으로써 홀센서를 사용하는데 있어서 제한적인 환경의 문제점들을 해결 할 수 있고, 또한 PLL 회로를 적용하여 속도 분해능을 높임으로써 정상 상태에서의 맥동이 줄어들음을 확인하였다.

이 논문은 에너지관리공단(2005-EL02-P-01-0-000-2005)의 에너지 자원기술개발사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## References

- (1) Pragasen Pillay, Ramu Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part II: The Brushless Dc Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Application, vol.25,1989, pp.274-279.
- (2) 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.
- (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.



## PM BLDC 모터의 센서리스 정밀 속도 제어

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

## ◇ 저자소개 ◇

### 김연충 (金淵忠)

1970년 1월 9일생. 1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 성균관대 신기술에너지센터 연구원.

### 윤용호 (尹溶湖)

1974년 5월 9일생. 2002년 성균관대 메카트로닉스 공학과 졸업(석사). 2002년 LG전자 연구원. 2003년~현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.

### 김학성 (金學成)

1964년 11월 8일생. 1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 한국전기연구원(Post Doc.). 1997년~현재 동양공업전문대학 자동화시스템과 부교수.

### 이병국 (李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 2001년 12월~2003년 1월 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년 4월~2005년 8월 한국전기연구원 전력전자 그룹 선임 연구원. 2005년 9월~2005년 12월 성균관대 정보통신공학부 연구교수. 2006년 1월~현재 성균관대 정보통신공학부 조교수.

### 원충연 (元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문교수. 2003년 1월~2004년 12월 전력전자학회 부회장. 1988년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수.

### 천장성 (千長成)

1968년 12월 13일생. 1992년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1998년 4월~2002년 7월 미래산업(주) 근무. 2002년 8월~현재 세우산전(주) 이사. 2004년 8월~현재 (주)티에스에이 대표.