

# 한상의 단자전압을 이용한 BLDC 전동기 센서리스 알고리즘

논문
59P-2-1

## Sensorless Algorithm of Brushless DC Motors Using Terminal Voltage of the One Phase

윤용호\* · 원충연†  
(Yong-Ho Yoon · Chung-Yuen Won)

**Abstract** - This paper presents a sensorless speed control of BLDC Motor using terminal voltage of the one phase. Rotor position information is extracted by indirectly sensing the back EMF from only one of the three terminal voltages for a three-phase BLDC motor. Depending on the terminal voltage sensing rotor position, active filter is used for position information. This leads to a significant reduction in the component device of the sensorless circuit. Therefore this is a advantage for the cost saving and size reduction. With indirect sensing methods based on detection of the terminal voltage that require active filtering, the position information needs the six divider section by PLL circuit, the binary counter and johnson counter by the EPLD. Finally, this algorithm can estimate the rotor position information similar to Hall-sensor sticked the three-phase BLDC motor. As a result, the method described that it is not sensitive to filtering delays, allowing the motor to achieve a good performance over a wide speed range. In addition, a simple starting method and a speed estimation approach are also proposed. Experimental and simulation results are included to verify the proposed scheme.

**Key Words** : BLDC Motor, Sensorless Speed Control, Terminal Voltage of the one Phase, Back EMF

### 1. 서론

BLDC 전동기는 회전자 위치에 따라 전동기의 상전류를 전환해주어야 하므로 Hall-sensor나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이다. 그러나 위치 센서의 부착은 전동기 시스템의 가격상승, 부피의 증가, 신뢰성 저하, 사용환경의 제약, 전자파 장애 등의 많은 문제가 생긴다. 특히 센서 부착으로 인한 전동기 가격의 상승은 BLDC 전동기의 시장 확장에 가장 큰 장애 요소로 작용하고 있다. 이에 따라 최근에는 위치 센서 없이 BLDC 전동기를 구동하는 센서리스 구동 개발이 크게 주목받고 있으며, 이를 기존의 유도 전동기나 직류 전동기를 대체하여 가변속 운전을 하는 응용 분야에 적용하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

BLDC 전동기의 회전자 위치 간접 검출을 위해 기존에 제안된 방법은 비여자 상의 단자전압을 이용하는 방법, 비여자 상의 전류를 검출하는 방법, 제 3 고조파 전압 성분을 이용하는 방법이 있다[1].

본 논문에서는 회전자 위치 간접 검출을 위해 기존에 제안된 방법인 3상의 단자 전압에 대한 동일한 값을 가지는 저항 R을 이용하여 Y-결선으로 연결하고 모터 내부의 중성점간의 전압을 이용하는 방식을 응용한 한 상의 단자전압 성분만으로 회전자의 위치를 판별할 수 있는 방법을 제안하

였다. 한상의 단자 전압을 병렬로 연결된 저항을 통해 분압된 크기로 변환하여 그 신호를 회전자의 위치 정보를 검출하는데 이용하게 된다[2]. 이렇게 검출된 단자전압 정보는 Active Filter를 거쳐 적분회로를 통해 영점검출회로(ZCP)와 비교함으로써 한상의 Hall-sensor 신호와 동일한 신호를 만들어 낼 수 있다. 이것은 기존의 센서리스 방식보다 낮은 비용으로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능함을 제시하였다.

### 2. 제안한 한 상의 단자전압을 이용한 센서리스 방법

#### 2.1 회전자 위치검출신호 발생 원리

그림 1은 제안한 저가형 센서리스 구동을 위한 신호를 추정하는 알고리즘이다.

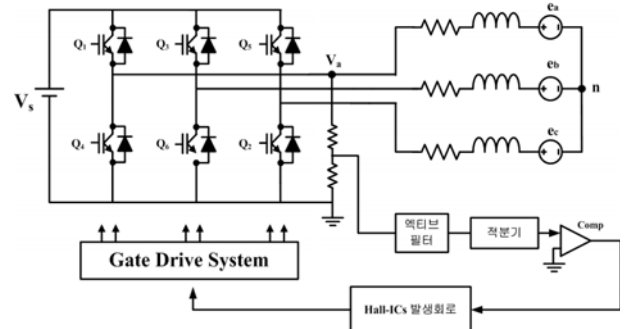


그림 1 제안된 센서리스 제어 알고리즘  
Fig. 1 Proposed sensorless control algorithm

\* 정회원 : 삼성탈레스 전문연구원 · 공박  
† 교신저자 시니어회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 정교수 · 공박  
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr  
접수일자 : 2010년 1월 27일  
최종완료 : 2010년 3월 17일

이 방식은 A상의 단자 전압을 병렬로 연결된 저항을 통해 분압된 크기로 변환하여 그 신호를 회전자의 위치 정보를 검출하는데 이용하게 된다. 이렇게 검출된 단자전압 정보는 Active Filter를 거쳐 적분회로를 통해 영점검출회로(ZCP)와 비교함으로써 A상의 Hall-sensor 신호와 동일한 신호를 만들어 낼 수 있다.

그림 2와 같이 3상 2여자 방식은 120° 통전 방식으로 상 전류는 120° 구간에서 여자되고 60° 구간에서 비여자되는 방식으로 구동하게 된다. 이 때 Hall-sensor 신호는 180° 구간동안 on되고 나머지 180° 구간동안은 off된다. 단자 전압과 Hall-sensor 신호의 관계는 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며 결론적으로 Hall-sensor 신호에 의해 회전자 위치 정보를 검출하여 역기전력의 flat한 부분에 상을 여자 시켜줌으로써 BLDC 전동기를 구동할 수 있다.

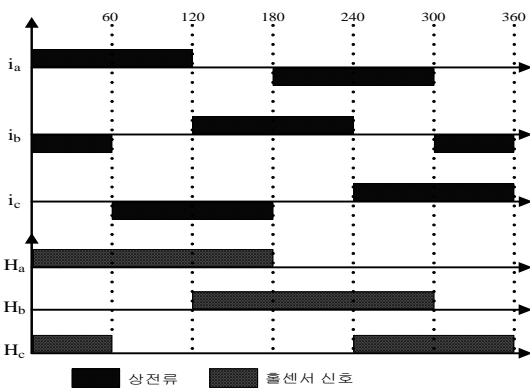


그림 2 3상 2여자 방식의 상전류, Hall-sensor 신호의 관계  
Fig. 2 Relation of phase current and Hall-sensor in method of 3 phase 2 excitation

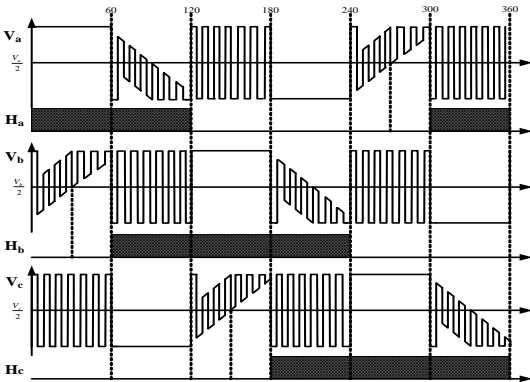


그림 3 3상 2여자 방식의 단자전압, Hall-sensor 신호의 관계  
Fig. 3 Relation of terminal voltage and Hall-sensor in method of 3 phase 2 excitation

또한 그림 4와 같이 a상의 단자 전압을 분압(分壓)하여 액티브 필터를 통해 90° 지연시킨 정현파(Va')를 얻어 낼 수 있다. 이것을 적분회로를 통해 다시 90° 지상(滯相)(Va'') 시킴으로써 영점검출회로(ZCP)의 출력인 A상의 Hall-sensor 신호를 검출할 수 있다. 이 방법은 검출 회로의 구성이 비교적 간단하고, 제어기에 부담을 줄여 실시간 검출

과 제어에 효율적인 장점을 가지고 있으나, 저속과 차단 주파수(cut-off frequency) 이상의 고속에서 검출 파형의 신뢰성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다.

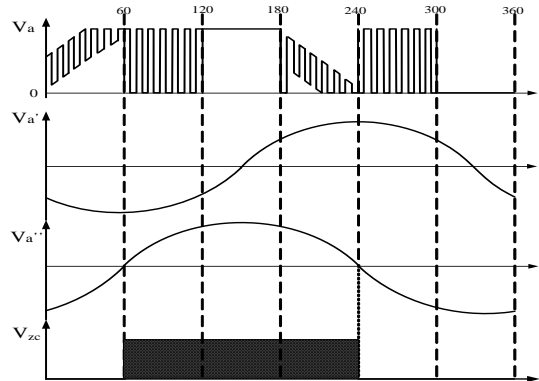


그림 4 단자전압을 이용한 Hall-sensor 신호 검출 알고리즘  
Fig. 4 Hall-sensor signal detection algorithm by terminal voltage

그림 5는 A상 단자 전압의 간접검출회로에 대한 기본적인 회로구성을 보여주고 있다. A상의 단자 전압을 이용하여 A상의 Hall-sensor 신호를 검출할 때에 2극 전동기의 경우 15000 rpm으로 전동기를 구동시킬 때 스위칭 주파수는 250Hz이므로 액티브 필터의 차단 주파수(Cut-off frequency)가 750Hz가 된다.

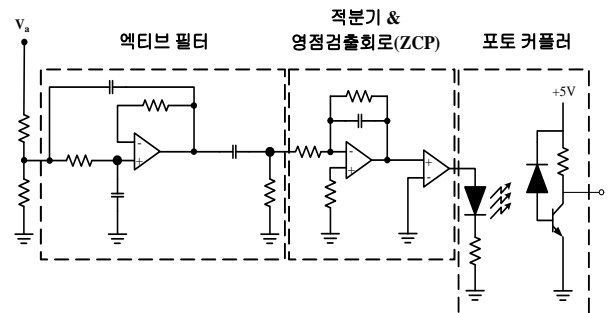


그림 5 단자전압을 이용한 한 상의 Hall-sensor 신호 검출회로  
Fig. 5 Hall-sensor signal detection circuit by terminal voltage

2.2 PLL을 이용한 정류신호 발생 알고리즘

그림 6을 통해 얻은 한 상의 Hall-sensor 신호는 PLL 알고리즘을 적용하여 6체배를 하게 된다. 6체배된 신호는 EPLD내에서 이진카운터를 통한 후 정류신호를 만들게 되고 이렇게 얻어진 정류신호는 Johnson 카운터를 통해 나머지 2상의 Hall-sensor 신호를 만들게 되어 회전자 위치를 간접적으로 검출할 수 있는 알고리즘을 구현할 수 있다.

PLL회로와 이진카운터를 통해 얻은 정류신호는 존슨카운터(Johnson counter) 두개를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-sensor 신호의 값을 논리도로 조합하여 만들 수 있다. 일반적으로 BLDC 전동기의 경우 각 상의 위치 판별을 위해 각 상에 대해 Hall-sensor를 갖는 것이 기본이다. 따라서 본 논문에서는 간단하고 저가의 회로만을 추가하여 한 상의 Hall-sensor 신호를 검출하고 이 신호를 이용하여 나머지 2상의 Hall-sensor 신호를 만드는 알고리즘을 제안하였다.

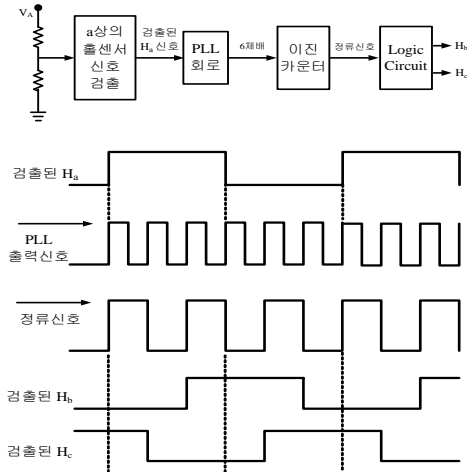


그림 6 회전자 간접위치 신호발생 알고리즘  
Fig. 6 Algorithm of rotor position signal generation

그림 7은 정류신호를 입력으로 하여 나머지 2상(H<sub>b</sub>, H<sub>c</sub>)의 Hall-sensor신호를 추정하는 로직을 구체적으로 설명하였다. 입력단의 정류신호는 PLL회로의 출력을 이진카운터를 통해 만든 것으로 2개의 병렬 연결된 존슨카운터는 각각 Q<sub>0</sub>, Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> 와 X<sub>0</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>로 나타나게 되고 이 결과를 논리조합을 통해 나머지 2상(H<sub>b</sub>, H<sub>c</sub>)의 Hall-sensor 신호를 만들 수 있다.

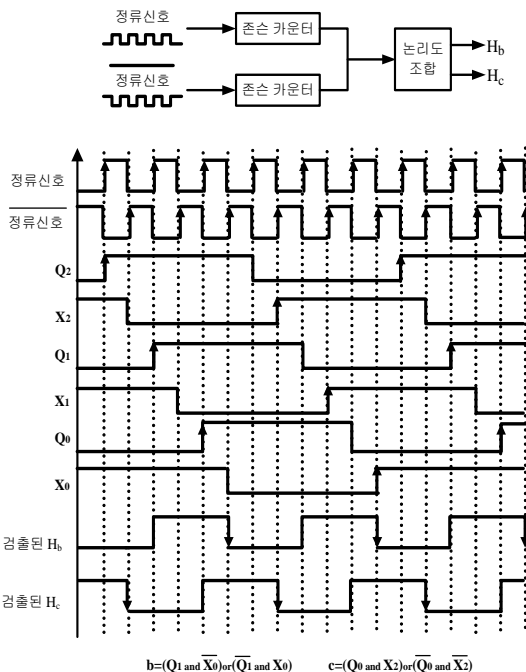


그림 7 Hall-sensor 신호 발생 알고리즘  
Fig. 7 Algorithm of Hall-sensor signal generation

### 3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘을 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션과정을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 전체 구성은 BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, 멀티플렉서를 이

용한 각 상전류 검출회로, 속도 제어를 위한 6펄스, 단자전압 정보 검출회로와 히스테리시스 전류 제어 블록으로 구현하였다.

그림 8은 A상의 단자전압, 액티브 필터 출력, 적분기 출력(Integrator Circuit), 검출된 A상 Hall-sensor 신호를 각각 나타내고 있다. 이것은 단자전압 정보를 검출하여 한 상의 Hall-sensor 신호를 검출한 결과이다.

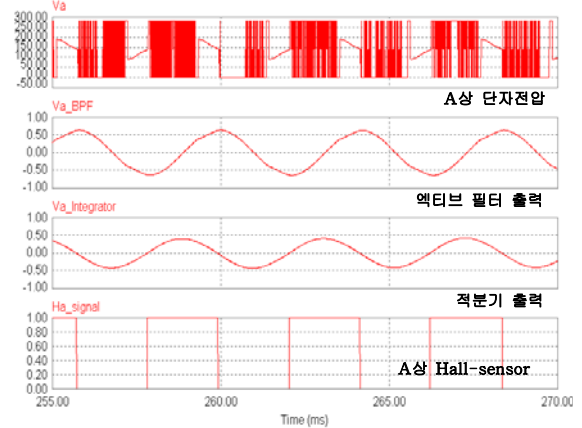


그림 8 한 상의 단자전압을 이용한 A상의 Hall-sensor 신호 검출  
Fig. 8 Hall-sensor signal detection by terminal voltage of one phase

그림 9는 그림 8을 통해 얻은 한 상(A상)의 Hall-sensor 신호를 입력으로 하여 PLL 회로를 이용하여 6체배 신호를 얻을 수 있다. 여기서 6체배한 출력은 다시 이진카운터를 통해 정류신호를 만들어낼 수 있다. 이 정류신호를 이용하여 그림 10과 같은 최종 회전자 간접 위치를 추정할 수 있는 Hall-sensor 신호를 만들므로써 이 논문에서 제안한 센서리스 제어를 가능하게 할 수 있다.

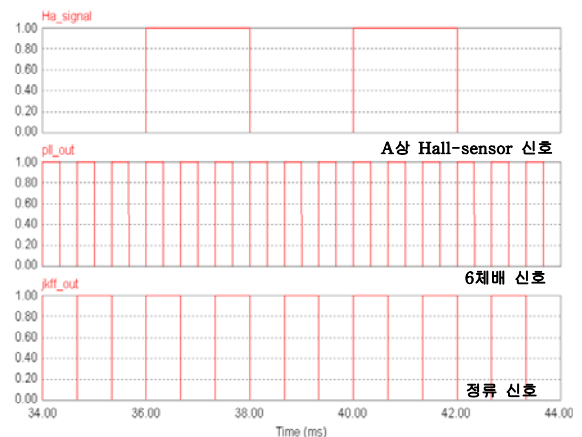


그림 9 한 상의 Hall-sensor 신호를 이용한 정류 신호 검출  
Fig. 9 Commutation signal detection by Hall-sensor signal of one phase

그림 10은 본 논문에서 제안한 한상의 단자전압을 이용한 알고리즘에 의한 결과 파형으로 정류신호와 각상의 Hall-sensor 신호를 나타내고 있으며 이때의 각상의 전류의 파형을 그림 11에서 보여주고 있다.

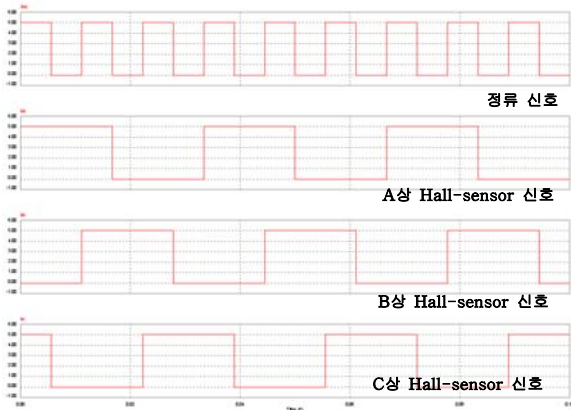


그림 10 Hall-sensor 신호 검출  
Fig. 10 Detection of Hall-sensor signal

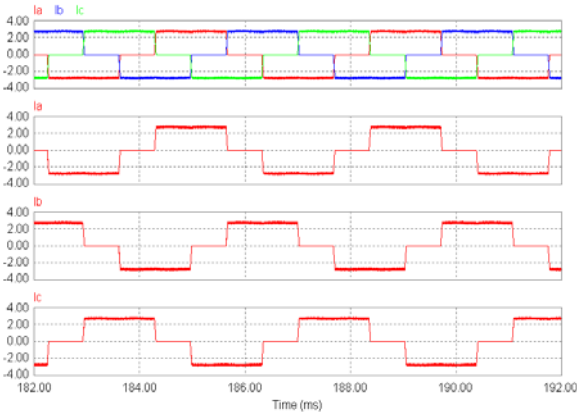


그림 11 각 상의 전류파형  
Fig. 11 Each phase current waveform

#### 4. 실험 결과

본 시스템은 BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, EPLD(Erasable Programmable Logic Device), 그리고 제어 보드로 구성되어 있다. 제어보드는 상전류를 검출하기 위한 전류센서(CT)와 히스테리시스 전류제어 수행을 위한 회로부분, EPLD 부분이 포함되어 있다. EPLD에서는 단자전압 정보를 이용하여 얻은 정류신호로 Hall-sensor 신호를 추정하였고, 스위칭 로직과 속도제어를 위한 6펄스 발생 알고리즘을 구현하였다. 실험에 사용된 BLDC 전동기는 2극, Y결선으로 구성되어 있으며 사양은 표 1과 같다.

표 1 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	3300rpm
정격 전류	3.6Amps at 280Vdc
극수	2

본 논문에서 제안한 하드웨어의 전체적인 구성은 그림 12와 같다. 제어용 프로세서, IPM(인버터 모듈), EPLD회로, Hall-sensor 검출회로, PLL회로 등으로 구성하였다. 전류센서를 이용하여 3상의 전류를 검출하고 히스테리시스 전류제어를 통해 PWM을 수행하였다. 전류검출회로는 비전류 모드 상전류 제어방식에서 60°구간 동안 1상만 검출하면 되므로 아날로그 멀티플렉서와 EPLD로 구성되어 있다.

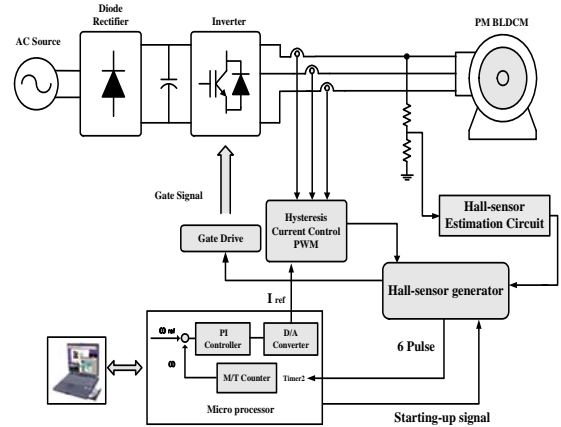


그림 12 제안된 구동시스템  
Fig. 12 The proposed sensorless algorithm configuration of BLDC drives.

멀티플렉서의 입력 단은 전류센서의 출력신호와 연결되어 있고, 출력 단은 히스테리시스 비교기의 입력으로 연결되어 있다. EPLD의 출력 데이터 D1, D2는 멀티플렉서의 어드레스 A0, A1으로 입력되어 이 어드레스에 따라 a상, b상 또는 c상의 전류가 멀티플렉서에 의해 선택되도록 한다.

또한 EPLD는 Hall-sensor 신호에 따른 인버터 스위치의 동작순서와 6펄스 발생 회로로 구성되어 있다.

전원은 AC 220V를 입력받아 정류기에서 정류한 후 캐패시터를 통해 직류로 정류하여 사용한다. 프로그램을 전송하고 데이터를 받기 위해서 직렬포트를 통해 PC와 통신을 한다.

전압원 인버터에 의해 구동되는 BLDC 전동기가 맥동이 없는 토크를 얻기 위해서는 인버터의 각 상전류를 전기 각으로 120° 기간 동안 Hall-sensor 신호에 따라 구형과 전류가 흐르도록 PWM 기법을 사용하며, 전기적으로 1회전 당 6회의 상전류를 정류한다.

히스테리시스 전류제어기법은 전류제어형 전압원 인버터에 사용되는 대표적인 방식으로 마이크로프로세서에서 계산된 기준전류( $I_{ref}$ )명령에서 전류센서로부터 얻어진 실제 전류( $I_{real}$ )를 뺀 전류오차가 이미 설정된 히스테리시스 밴드 아래쪽으로 벗어나 실제 전류가 기준전류보다 작아지면 상전류를 크게 하는 방향으로 인버터를 스위칭 한다.

전류오차가 히스테리시스 밴드 위쪽으로 벗어나 실제 전류가 기준전류보다 커지면 상전류를 작게 하는 방향으로 인버터를 스위칭하고, 전류오차가 밴드 내에 있으면 이전의 스위칭 상태를 유지하는 기법이다.

따라서 본 논문에서는 히스테리시스 전류제어기법을 이용해서 전류 맥동토크를 일정한 크기로 제한한다. 그러나 히스테리시스 전류제어기는 스위칭 주파수가 변동하는 단점이 있다.

그림 13은 한 상의 단자전압을 이용하여 한 상의 Hall-sensor 신호를 추정한 결과 파형이다. A상의 단자 전압, 액티브 필터의 출력, 적분기 출력 그리고 ZCP(영점검출 회로)를 통과한 A상의 Hall-sensor 신호를 추정한 파형을 각각 나타낸다.

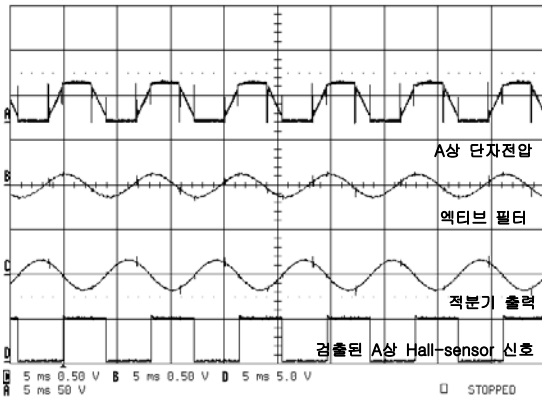


그림 13 한 상의 단자전압을 이용하여 추정된 신호(A상 Hall-sensor신호)

Fig. 13 Hall-sensor signal detection by terminal voltage of one phase

그림 14는 단자 전압을 이용하여 추정된 A상의 Hall-sensor 신호와 실제 전동기에 부착된 Hall-sensor 신호를 비교한 결과파형으로서 동일한 주기와 위상을 가지고 발생함을 알 수 있다. A상의 상전류 파형, 단자 전압을 이용하여 검출한 A상의 Hall-sensor 신호 그리고 실제 A상의 Hall-sensor 신호를 보여주고 있다.

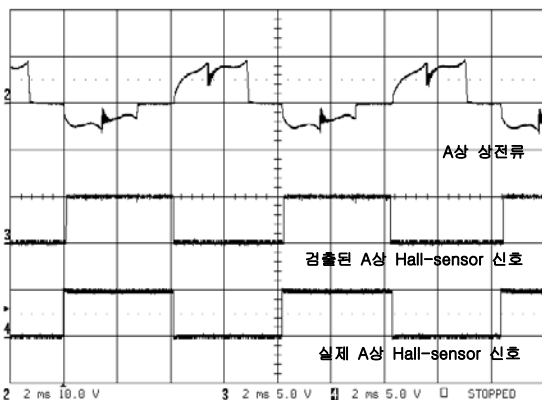


그림 14 단자전압을 이용하여 검출한 Hall-sensor 신호와 실제 Hall-sensor 신호

Fig. 14 Detected Hall-sensor by using terminal voltage and real Hall-sensor

그림 15는 정류신호를 이용하여 추정된 3상 A, B, C상의 Hall-sensor 신호를 나타내고 있다. Hall-sensor 신호는 존슨카운터(Johnson counter) 두 개를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-sensor 신호의 값을 논리도로 조합하여 생성된 신호이다.

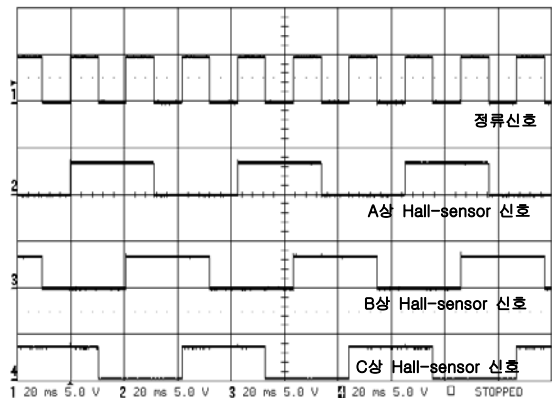


그림 15 정류신호를 입력으로 하는 각 상의 Hall-sensor 생성신호  
Fig. 15 Generated Hall-sensor signal of each phase

### 5. 결 론

본 논문은 BLDC 전동기의 저가형 센서리스 구동을 구현하기 위한 것으로, 한상(A상)의 단자전압을 분석하여 각 상의 여자시점을 검출하는 방법을 제안하였다. 간단한 아날로그 회로를 추가함으로써 3상 BLDC 전동기의 각 상 Hall-sensor 신호를 대신하는 신호를 검출하였고 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 센서리스 기법의 타당성을 입증하였다.

본 논문을 통해 얻은 성과와 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존에 위치 및 속도 제어를 위해 필요했던 Hall-sensor와 엔코더 역할을 대신하여 전체적인 구동 회로의 가격을 낮출 수 있는 구동 시스템을 개발하였다.
- (2) BLDC 전동기의 센서리스 운전을 위해, Hall-sensor 신호와 동일한 형태의 신호를 검출함으로써 회전자 위치를 파악할 수 있는 간접검출기법을 사용하였다. 아울러 저가의 제어기로도 센서리스 운전이 충분히 가능하도록 간단한 제어연산과정을 간략화 하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] N. Ertugul and P. Acarnly, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Ind. Application, vol 30, pp.126-133, Jan./Feb. 1994.
- [2] Gui-Jia Su, John W. McKeever, "Low-Cost Sensorless Control of Brushless DC Motors With Improved Speed Range", IEEE Trans. on Ind. Application, Vol. 19, pp. 296-302, 2004.
- [3] F. Caricchi, F. Giulii Capponi, F. Crescimbin, L.Solero, "Sinusoidal Brushless Drive with Low-Cost Hall Effect Position Sensors", IEEE Trans. on Ind. Application, pp.799-804. 2001.
- [4] Ting-Yu Chang, Ching-Tsai Pan, Jenn-Horng Liaw and Shinn-Ming Sue, "A Hall-Sensor-based IPM Traction Motor Drive", IEEE Trans. on Ind. Application, pp.840-843. 2002.
- [5] Fang Lin Luo, Hock Guan Yeo "Advanced PM Brushless DC Motor Control & System for Electric Vehicles", IEEE

Trans. on Ind. Application, vol.2, pp.1336-1340, 2000.

- [6] N. Matsui and M. Shigyo, "Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors", IEEE Trans. on Ind, Application. vol 28, pp.120-127, Jan./Feb. 1992.
- [7] N. Ertugul and P. Acarnly, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Ind. Application, vol 30, pp.126-133, Jan./Feb. 1994.
- [8] S. Ogasawara, and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor", Conf. Rec. of IEEE IAS, pp. 443-447, 1990.

저 자 소 개



**원 충 연 (元 忠 淵)**

성균관대학교 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988~현재 한국 철도기술연구원 심사위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수.

Tel : 031-290-7115  
Fax : 031-299-4623  
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr



**윤 용 호 (尹 溶 湖)**

2002년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2002년~2003년 LG전자 연구원. 2007년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2007년 2월~현재 삼성탈레스(주) 종합연구소 메카트로닉스그룹 전력전자팀 전문연구원.

Tel : 031-8020-7569  
Fax : 031-8020-7889  
E-mail : yongho.yoon@samsung.com