

# 중성점을 사용하지 않는 BLDC 전동기 센서리스 제어 기법

## Sensorless Control Method of the BLDC Motor Without Neutral Point

심 광 렬<sup>†</sup> · 안 정 렬<sup>\*</sup>

(Kwang-Ryeol Sim · Jeong-Ryeol An)

**Abstract** - Generally, brushless DC motor(BLDCM) driving system uses hall sensors or encoders as the mechanical position or speed sensor. It is necessary to achieve the informations of rotor position for driving trapezoidal type brushless DC motor without any position sensor. In this paper, the commutation signals are obtained without the motor neutral voltage, multistage analog filters, A/D converters, or the complex digital phase shift circuits which are indispensable in the conventional sensorless control algorithms. In the proposed method, in stead of detecting the zero crossing point of the nonexcited motor back electromagnetic force for the average motor terminal to neutral voltage, the commutation signal are extracted directly from the specific average line to line voltage with low-pass filter, adder and comparators circuit. In contrast to conventional methods, the neutral voltage is not need; therefore, the commutation signals are insensitive to the common mode noise. Moreover, the complex phase shift circuit can be eliminated. The effectiveness of the proposed method is verified through simulation results.

**Key Words** : Neutral voltage, Adder and comparators circuit

### 1. 서 론

최근 산업발전에 따른 전력용 스위칭 소자의 특성개선과 마이크로프로세서, 디지털 기술의 발전에 따라 종래의 정속 운전모드에서 인버터 기술을 이용한 가변속 시스템의 개발 및 적용이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 가변속 시스템에 사용되는 전동기로는 브러쉬 타입의 직류전동기에 비해 수명이 길고 응답성이 빠르며 고속운전 특성이 우수한 브러쉬리스 직류전동기(BLDC)가 주로 사용되고 있다. BLDC 전동기는 직류전동기의 계자와 전기자의 위치를 서로 뒤바꿔 놓은 구조를 가짐으로서 브러쉬와 정류자의 마모로 인한 단점을 보완한 전동기이다[1][2]. 따라서 영구자석을 회전자로 사용하는 BLDC 전동기의 속도는 전압을 가변함으로써 속도를 쉽게 제어할 수 있다. BLDC 전동기의 구동을 위해서는 회전자의 위치 정보를 요구하기 때문에 회전자 위치 센서가 반드시 필요하다. 하지만 센서는 열에 취약하며 가혹한 환경에서는 신뢰성이 떨어지고 가격 상승, 부피증가, 환경적 제약 등 여러 단점이 있다. 이에 따라 위치센서 없이 BLDC 전동기를 구동하는 센서리스 제어 기법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[3].

센서리스 제어를 위한 BLDC 전동기의 회전자 위치검출 방법 중 대표적인 것으로는 전동기의 단자전압 및 중성점을 저역통과 필터로 통과시킨 후 서로 비교하여 회전자의 위치 정보를 찾아 상지연 회로나 저역통과 필터, 밴드패스 필터 등을 이용하여 위상 지연을 시켜 인버터의 정류 시점을 결

정하는 방법이 있다. 이 방법은 센서리스 운전 시 전환 시점을 추가로 계산할 필요가 없으므로 센서리스 드라이브 시스템에 사용되는 주 프로세서의 부담이 적다는 장점을 가지지만 전동기의 중성점을 필요로 하기 때문에 커먼모드 잡음이 발생하여 시스템이 불안정해지는 점과 최근에는 전동기출시 시 중성점이 제거되어 나오기 때문에 가상의 중성점을 생성하기 위한 별도의 하드웨어가 필요한 문제점이 있다. 다른 방법으로는 전동기의 고정자 권선에 유도된 역기전력과 스위칭 소자에 역 병렬로 연결된 프리휠링(Free-wheeling) 다이오드에 흐르는 전류로부터 회전자의 위치를 파악하는 방법이 있다. 이 방법 역시 프리휠링 다이오드에 흐르는 전류를 검출하기 위한 별도의 하드웨어가 필요한 문제점과 고속 운전 시 회전자 위치의 간접 검출 분해능이 저하되는 문제점이 있다[4-7].

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 전동기의 중성점 없이 각 상의 단자전압의 정보만으로 회전자의 위치 정보를 파악하는 기법을 제시한다. 또한 저속영역에서는 역기전력이 작아 회전자의 위치를 검출할 수 없으므로 1000 [rpm] 까지 강제구동 후 센서리스제어 모드로 전환된다. 제시한 알고리즘은 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

### 2. BLDC 전동기 구동원리

#### 2.1 BLDC 전동기 모델링

BLDC 전동기의 상변수를 사용한 3상 고정자 권선의 전압 방정식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다[8].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 울산과학기술대 전기전자학부 교수

E-mail : kysim@uc.ac.kr

<sup>\*</sup> 정 회원 : 동희홀딩스 미래자동차 부품연구소 연구원

접수일자 : 2011년 7월 5일

최종완료 : 2012년 4월 26일

여기서,  $R_s$  : 고정자의 상저항  
 $L$  : 자기 인덕턴스  
 $M$  : 상호 인덕턴스  
 $e_a, e_b, e_c$  : 역기전력

$i_a + i_b + i_c = 0$ ,  $M(i_a + i_b) = -M \cdot i_c$ 라 하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

또한 BLDC 전동기에서 발생하는 토크식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (3)$$

여기서,  $\omega_m$ 은 BLDC 전동기의 기계적인 속도이다.

그림 1은 PWM 인버터 및 BLDC 전동기의 등가회로를 나타낸 것이다.

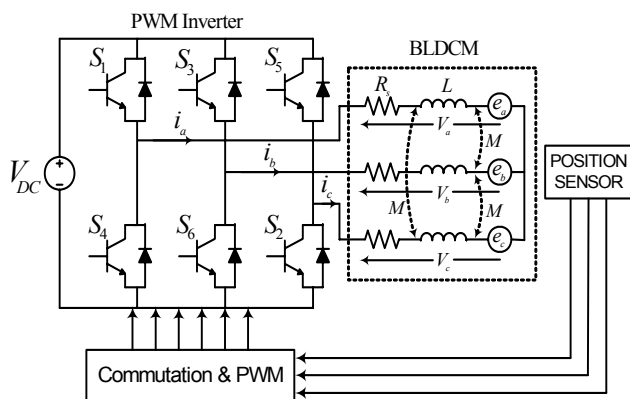


그림 1 PWM 인버터 및 BLDC 전동기 등가회로  
 Fig. 1 Equivalent circuit of inverter and BLDC motor

## 2.2 BLDC 전동기 역기전력 분석

그림 2는 BLDC 전동기의 역기전력, 입력전류 및 홀센서 신호를 나타낸 것이다. 전동기 회전자 위치에 따라 각 상에 구형파 형태의 역기전력이 120° 위상차가 발생하고 그림에 나타낸 홀센서 신호와 같이 3상 2여자 방식으로 전류를 제어한다. 전동기의 발생 토크는 역기전력과 전류의 곱에 비례하므로 역기전력이 평탄한 구간에서 일정한 전류를 흘려주면 일정 토크 제어가 가능하다.

위 식 (2)에서 역기전력을 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = f(\theta_e) \cdot k_e \cdot \frac{2\omega_e}{P} \quad (4)$$

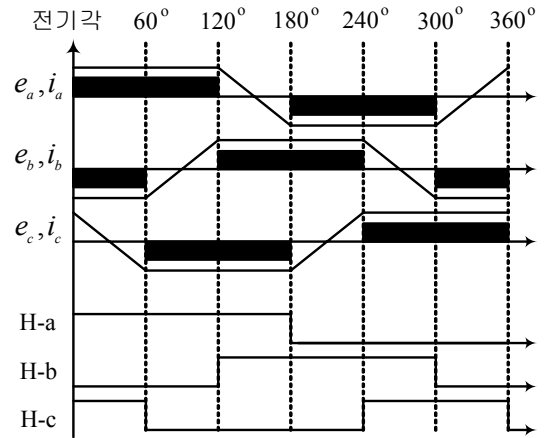


그림 2 BLDC 전동기의 역기전력, 입력전류, 홀센서 신호  
 Fig. 2 Back-emf, current, hall sensor signal of BLDCM

여기서,  $f(\theta_e)$ 는 역기전력의 형태를 결정하는 형태 함수,  $k_e$ 는 역기전력의 크기를 결정하고,  $\omega_e$ 는 전동기의 전기적인 속도를 나타내며,  $P$ 는 전동기의 극수이다. 그리고 역기전력 함수는 각 구간에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\theta_e) = \begin{cases} \frac{6}{\pi} \theta_e & (0 \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{6}) \\ 1 & \frac{\pi}{6} \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{6} \\ \frac{6}{\pi} (\pi - \theta_e) & \frac{5\pi}{6} \leq \theta_e \leq \pi \end{cases} \quad (5)$$

식 (4)에서 역기전력의 크기는 회전자 속도에 비례함을 알 수 있으며, 이를 통해 센서리스 제어를 할 경우 저속영역에서는 역기전력의 크기가 작아 회전자 위치를 파악하는데 문제점이 있다.

## 3. 제안한 BLDCM 센서리스 제어기법

### 3.1 정류신호 발생 알고리즘

그림 3은 전동기의 중성점 없이 역기전력의 정보만으로 3상 정류신호 생성 알고리즘 블록을 나타낸 것이다. 전체 구성은 역기전력에 스위칭 주파수를 제거하기 위한 저역통과 필터(Low pass filter), 가산기(Adder), 반전 증폭기(Inverting Amp.)와 비교기(Comparator)로 구성이 되어있다. 동작순서는 A상의 정류신호를 기준으로 설명한다. A상 역기전력( $e_a$ )과 C상 역기전력( $e_c$ )은 저역통과 필터를 거치고 C상 역기전력은 다시 반전증폭기에 의해 위상이 반전된다. 반전된 C상 역기전력과 저역통과필터를 거친 A상 역기전력은 가산기에 의해 서로 더해지고 다시 반전증폭기를 거친 후 동일한 과정을 통해서 생성된 B상 역기전력(Adder -Back-emf B)과 비교기를 거쳐 정류신호 A(Commutation signal A)를 생성한다. 나머지 두상의 정류신호는 A상 정류신호와 같은 과정을 거쳐 생성하게 된다. 또한 op-amp의 증폭률은 1:1이며, 저역통과 필터의 차단주파수  $f_c$ 는 700 [Hz]이다.

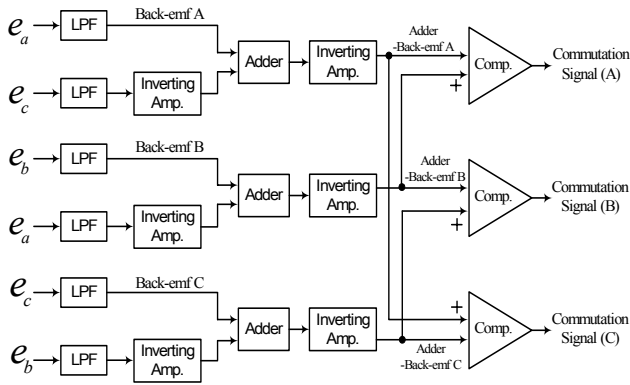


그림 3 제안된 정류신호 발생 블록도  
 Fig. 3 Block diagram of proposed for generation commutation signal

그림 4는 그림 3의 각각의 단계에 대한 파형을 나타낸 것이다. 역기전력의 모양은 저역통과필터를 거쳐 스위칭 노이즈가 완전히 제거된 사다리꼴 형태를 가지게 되며 각각 120°의 위상차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 역기전력을 본 논문에서 제안한 방식에 의해 생성된 새로운 역기전력 파형이 서로 제로크로싱(Zero crossing) 되는 점과 각상의 정류시점과 서로 일치함을 알 수 있다.

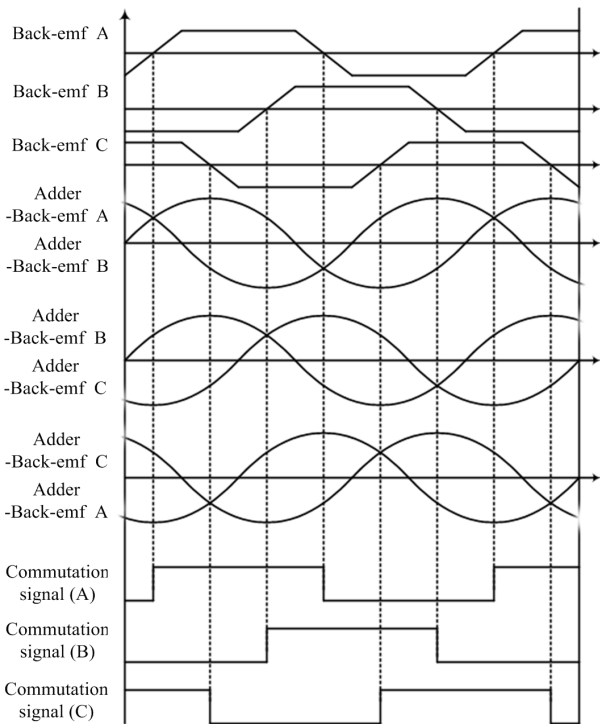


그림 4 정류신호 발생 알고리즘  
 Fig. 4 Algorithm for generation commutation signal

### 3.2 BLDC 전동기 초기 기동 기법

BLDC 센서리스 방법은 전동기가 구동할 때 생기는 역기전력을 감지하여 정류 신호를 만들기 때문에 정지 상태에서

전동기가 스스로 초기 구동을 할 수 없다. 역기전력은 전동기의 속도와 비례하기 때문에 초기 기동 시 전동기의 역기전력이 매우 작아 역기전력을 이용한 회전자의 위치 파악이 어렵다. 따라서 역기전력을 감지하기 위해 전동기를 먼저 강제 정렬 후 2상 강제 여자 방식으로 역기전력 전압을 확실하게 검출할 수 있는 속도인 1000 [rpm] 까지 기동한다.

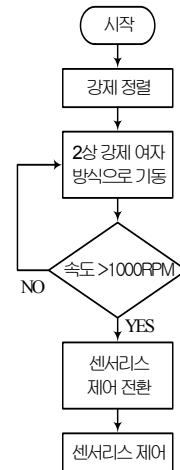


그림 5 기동기법 순서도  
 Fig. 5 Flow chart of starting method

그림 5는 BLDC 전동기 초기 기동 기법 순서도이다. 초기 기동 시에는 오픈루프 방식으로 제어하며 강제 정렬 단계에서는 고정자 권선에 일정 전류를 인가하여 회전자를 특정 위치로 강제 정렬 시킨다. 강제 정렬 전류의 크기는 및 인가 시간은 전동기 부하 특성을 고려하여 실험적으로 결정한다. 전동기 속도가 1000 [rpm]이 될 때까지 강제 기동을 하고 역기전력을 이용하여 얻은 회전자의 위치와 동기화시켜 클로즈루프 방식으로 전환하여 센서리스 속도 제어 루틴에 따라 전동기를 구동한다.

전동기를 정지 상태에서 초기 구동 시 입력을 계단 입력으로 기준 속도를 인가하면 속도가 낮은 회전자가 빠르게 변하는 고정자의 인가 속도를 따라가지 못해 갑작스런 과전류가 흘러 전동기에 무리가 가고 탈조될 위험이 있다. 그러므로 초기 기동할 때 기준 속도를 전동기의 시정수에 맞춰 램프 입력으로 천천히 증가시킬 필요가 있다. 정지 상태에서 전동기의 최저 속도까지 전동기를 구동시킬 때 인버터에 강제적으로 인가하는 정류 신호의 주파수와 PWM 신호의 듀티비를 늘려 속도를 점점 빠르게 한다. 또한 전동기의 속도  $\omega$ 는 주파수  $f$ 에 비례하고 전동기 극수에 반비례한다.

표 1 2상 강제 여자 방식 스위칭 패턴  
 Table 1 Phase exciting pattern

	Step 0	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
여자 상	AB	AC	BC	BA	CA	CB

표 1은 2상 강제 여자 방식의 스위칭 패턴을 나타낸 것이다. 전기각 60° 마다 두상씩 강제로 여자 시키므로 전동기가 한 바퀴 회전하는 데는 6 스텝이 필요하다.

### 3.3 BLDC 전동기 제어방법

그림 6은 BLDC 전동기의 페루프 제어 블록도를 나타낸 것이다. BLDC 전동기의 역기전력을 검출하여 본 논문에서 제안한 방식으로 3상 정류 신호 생성 및 전동기의 실제 속도를 계산한다. 전동기의 실제 속도는 기준속도와 비교 후 속도 제어기(PI제어기)로 입력되어 3상 기준전류를 계산한다. 3상 기준전류와 DC링크 전류와의 오차를 계산하고 다시 전류제어기(PI제어기)를 통해 3상 기준 전압을 계산한다. 3상 기준전압과 3상 정류신호에 따라 6개의 PWM 신호를 생성하여 3상 인버터를 통해 BLDC 전동기를 센서리스 제어한다.

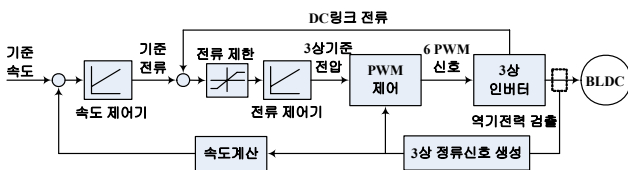


그림 6 BLDC 전동기 페루프 제어 블록도  
Fig. 6 Feedback control block diagram of BLDC Motor

### 4. 시뮬레이션

본 논문에서는 제안된 알고리즘을 PSIM6.0 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션 과정을 통해 그 타당성을 입증하였다. 그림 7은 시뮬레이션 전체 구성도를 나타낸 것이다. 전체 구성은 BLDC 전동기, 3상 PWM 인버터, 전류 및 역기전력 검출부, 정류신호 생성회로로 구성이 되어있다. 제어루틴은 DLL을 통해 C언어로 작성하였다. 표 1은 본 연구에 사용한 전동기의 정격 및 상수의 정보를 나타내었다.

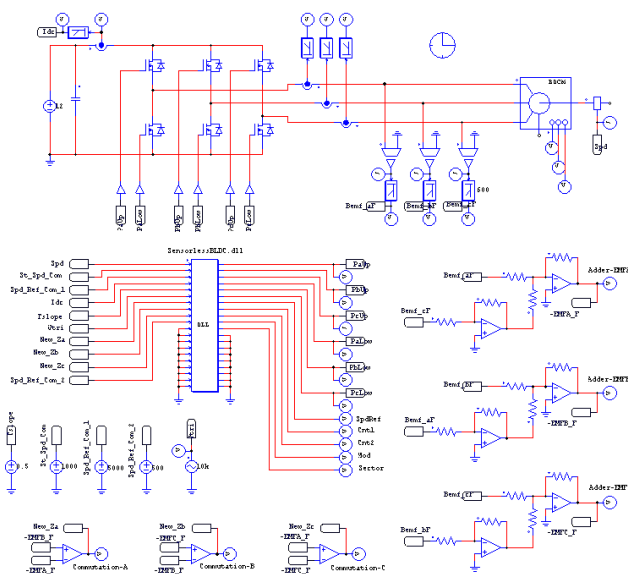


그림 7 시뮬레이션 전체 구성도  
Fig. 7 Configuration of simulation

표 2 BLDC 전동기 정격 및 상수

Table 2 Rating and parameters of BLDC motor

형식/극수	Y결선/4극
정격 출력	60[W]
정격 전압	12[V]
최대 속도	5000[RPM]
고정자 저항	0.115[Ω]
고정자 인덕턴스	0.109[mH]
역기전력 상수	1.3[V/kRPM]

그림 8은 BLDC 전동기가 5000 [rpm]으로 회전할 때 정류신호 발생 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 파형의 순서는 그림 4와 같으며, 3상 정류신호가 각각 역기전력 파형의 제로크로싱(Zero crossing) 지점과 정확히 일치하는 것을 알 수 있다.

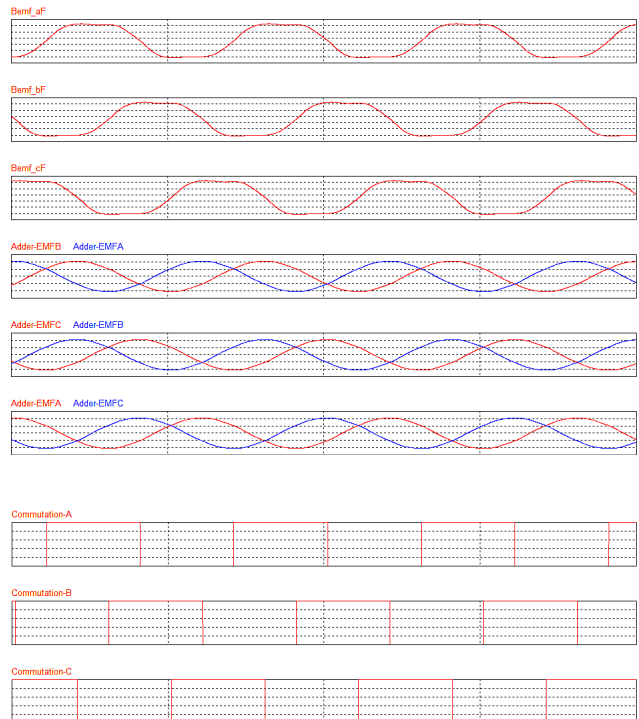


그림 8 정류신호 발생 알고리즘 시뮬레이션 결과  
Fig. 8 Result of Algorithm for generation commutation signal

그림 9는 과도상태 응답특성을 나타낸 것이다. 750[ms] 동안 1000 [RPM]까지 강제 기동 하였으며, 전동기의 정격속도인 5000 [RPM]까지 속도를 증가시킨 후 약 250 [ms] 후에 2000 [rpm]으로 속도를 감소 시켰다. 실제속도가 기준속도를 잘 추종함을 알 수 있어 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

그림 10은 초기 750[rpm]까지 강제 기동 후 1000[rpm]으로 증가 시킬 때, 실제 전동기 속도와 a상 전류 및 역기전력을 나타 낸 것이다. 초기 750[rpm]까지는 100[ms]시간 동안 증가 시켰다. 그 후에는 센서리스 모드로 1000[rpm]까지 변동 시켰으며 오버슈트 없이 부드럽게 전환되었다.

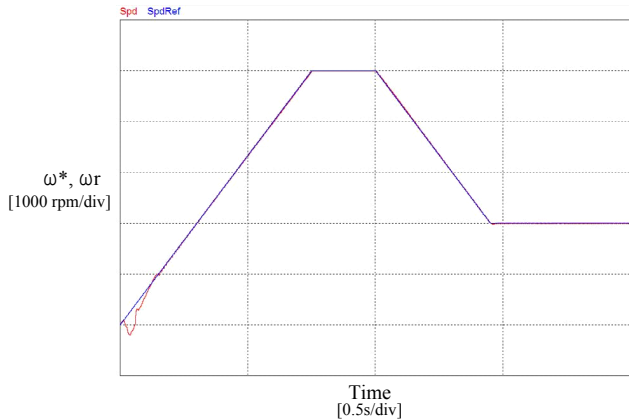


그림 9 과도상태 응답특성  
Fig. 9 Transient response

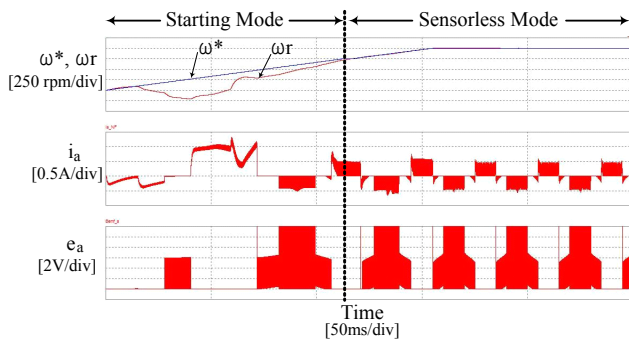


그림 10 과도상태의 역기전력 및 전류 파형  
Fig. 10 Waveform of back emf and current at transient state

### 5. 결 론

본 논문에서는 3상 BLDC 전동기 센서리스 제어시 중성점없이 전동기의 역기전력정보만으로 3상 정류신호를 생성하는 알고리즘을 제시하였다. PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 BLDC 전동기의 속도 응답특성이 우수하며, 역기전력만으로 회전자 자속위치를 잘 추정함을 확인 하였다. 기대 효과는 중성점을 검출하지 않으므로 중성점 없이 출하 되는 전동기에 쉽게 적용할 수 있고 시스템의 커먼모드 잡음을 줄일 수 있는 효과가 있다. 향후 TI사의 DSP를 이용해 실험할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 울산과학대학 교육역량강화사업의 학술연구비 지원에 의해 실시 되었음.

### 참 고 문 헌

[1] J.R. Hendershot Jr and TJE Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Oxford Univ. Press, 1994

[2] T.J.E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Clarendon Press, Oxford 1989  
 [3] M. A. Rahman, "Modern Electric Motors in Electronic World", Proc. of IEEE IECON'93, pp.644-648, 1993  
 [4] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri. "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor". IEEE Trans. on Ind. Appl., IA-21(4):595-601, May/June 1985.  
 [5] S. Ogasawara and H. Akagi, "An approach to position sensorless drive for brushless dc motors", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 27, pp. 928 - 933, Sept./Oct. 1991.  
 [6] R. Becerra, T. Jahns, and M. Ehsani, "Four quadrant sensorless brushless ECM drive", in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. and Expo., 1991, pp. 202-209.  
 [7] J. Shao, D. Nolan, M. Tessier, and D. Swanson, "A novel microcontroller based sensorless brushless (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 6, pp. 1734-1740, Nov./Dec. 2003.  
 [8] P Pillay and R Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part I The brushless dc motor drive", IEEE Trans Indus Appl, vol 25, no 2, pp274-279, March/April 1989

## 저 자 소 개



### 심 광 열 (沈 光 烈)

1961년 5월 27일생. 1983년 2월 경남대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1985년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 1995년 2월 동대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년~1991년 현대중공업 기전연구소 선임연구원, 현재 울산과학대학교 전기전자학부 교수.



### 안 정 열 (安 正 烈)

1976년 11월 8일생. 2002년 원광대 전기전자공학부 졸업. 2004년 울산대 대학원 전기전자정보시스템공학부 졸업(석사). 2009년 동 대학원 졸업(공학박사). 2004년 ~ 현재 울산과학대 전기전자학부 외래강사. 2009년 3월~8월 울산대학교 BK21 e-Vehicle연구인력양성사업단 박사 후 과정. 현재 동희홀딩스 미래자동차 부품연구소 선임연구원.