

# Sensorless BLDC 전동기 구동을 위한 개선된 스위칭 방법

이호형\* · 조 황\*\* · 이기서\*\*\*

Improved switching method for sensorless BLDC motor drive

Ho-hyoung Lee\* · Whang Cho\*\* · Key-seo Lee\*\*\*

## 요 약

브러시리스(brushless) DC 전동기는 회전자의 위치에 따라 3상 중 2상에 전류를 흐르게 하는 방식으로 구동되며, 회전자의 위치를 검출하기 위해서는 홀센서나 엔코더등과 같은 자기식 또는 광학식 위치 검출 센서가 사용되는데, 이러한 센서들은 고온이나 저온에서 원치 않는 동작을 유발할 수 있고 전동기의 가격과 부피를 증가시키는 단점이 있다. 최근에는 전동기의 가격과 부피적 측면 그리고 강건성을 고려하여 센서리스(Sensorless) 전동기 구동에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문은 전동기를 Unipolar PWM 방법으로 고속으로 회전시킬 경우 발생하는 노이즈에 의해 Zero Crossing Point 관측이 어려워 정확한 제어가 용이하지 않은 문제점을 개선하여, 드라이버의 수명을 증대시키면서 고속에서도 노이즈를 최소화 할 수 있는 새로운 스위칭 방법을 제안한다.

## ABSTRACT

In brushless DC motor, current flow should be controlled such that only properly selected 2 out of 3 phases carry current depending on the position of rotor. In order to detect position of rotor, hole sensor, encoder, optical position-detecting sensor, and magnetic position-detecting sensor are frequently employed. These sensors not only often cause malfunction in low and high temperature but they also have disadvantage of increasing cost and size of an motor system. To reduce the cost and size and to increase the robustness of the motor system, recently researches on sensorless motor drive are very active. This paper proposes a novel unipolar PWM switching method that can improve the control problem caused by the difficulty of detecting zero crossing point at high revolution speed by minimizing the switching noise while increasing the lifespan of the drive system.

## 키워드

Brushless Motor, Sensorless, Unipolar PWM, Bipolar PWM, Zero Crossing, Improved Unipolar PWM

## 1. 서 론

BLDC(Brushless DC) 전동기는 DC 전동기에서 브러시와 정류자 대신 전자적인 정류 기구를 설치한 전

동기이다. 높은 효율과 토크, 작은 크기 등을 장점으로 경전철과 열차 내의 자동 문등과 같은 여러 분야에서 사용되고 있다. BLDC 전동기의 구동은 인버터 회로를 이용하여 영구자석 회전자의 위치에 따라 3개의 상 중

\* 광운대학교 제어계측공학과(lhh14306@kw.ac.kr)

\*\*\* 광운대학교 정보제어공학과(kslee@kw.ac.kr)

접수일자 : 2010. 03. 06

\*\* 교신저자 : 광운대학교 정보제어공학과(robot@kw.ac.kr)

심사완료일자 : 2010. 04. 02

항상 두 상의 전류만 흐르게 하여 스위치를 구동하고 한 상은 개방되는 방식으로 이루어진다. 이를 위해 BLDC 전동기는 회전자 위치에 따라 전동기의 상전류를 전환해 주어야 하므로 홀센서나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이며, 이는 시스템의 가격 상승, 부피 증가, 사용 환경의 제약 등의 문제점을 초래한다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 위치센서 없이 BLDC 전동기를 구동하는 센서리스 드라이브 개발에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.[1] 하지만 센서가 없이 구동을 할 경우 고속에서 노이즈에 의한 정밀한 제어가 힘들어지게 되는 문제가 발생한다.[2] 본 논문에서는 가장 보편화된 센서리스 제어방법인 개방된 상의 역기전력을 측정하여 구동하는 방법 중에서 Bipolar PWM 구동 방법의 문제점인 수명 문제와 Unipolar PWM 구동 방법에서 발생하는 노이즈 문제를 Improved Unipolar PWM 구동 방법으로 보완 하였고 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

## II. BLDC 전동기의 구동 방법

### 2.1. BLDC 전동기

BLDC 전동기는 일반 DC 전동기와 달리 정류자가 없기 때문에 이것을 대신하는 전자 정류 회로가 필요하게 된다. 이 회로는 홀소자나 엔코더를 이용하여 로터의 위치를 감지하고, 이 신호를 기초로 전자회로를 제어하여 회전 자기장을 발생 시킨다. 본 논문에서 사용된 인버터는 DC 전압원을 입력전원으로 하고, 인버터는 그림 1과 같이 6개의 스위치로 구성된다.

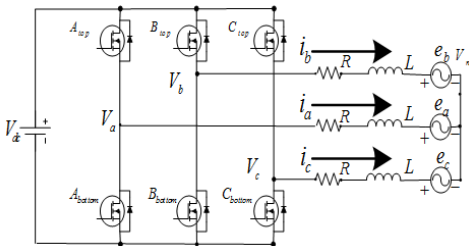


그림 1. 인버터 구성도  
Fig. 1 Configuration of inverter system

전동기의 각 상의 전류 및 전압 방정식은 식 (1)과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0 \\ V_a - V_n &= Ri_a + Li_a + e_a \\ V_b - V_n &= Ri_b + Li_b + e_b \\ V_c - V_n &= Ri_c + Li_c + e_c \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $V_n$ 은 전동기 내부의 중성점 전압이고  $V_a, V_b, V_c$ 는 각 상의 전압으로 모두 DC 전압원의 기준에서 본 것이다.  $i_a, i_b, i_c$ 는 각 상의 전류이다. 역기전력 파형은 그림 2와 같고 식 (2)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} e_a &= k_e w_n f_a(\theta_e) \\ e_b &= k_e w_n f_b(\theta_e) \\ e_c &= k_e w_n f_c(\theta_e) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $k_e$ 는 역기전력 상수이고,  $w_n$ 은 전동기의 영구자석 회전자의 각속도이다.  $f(\theta_e)$ 는 각상의 역기전력을 회전자의 위치에 따라 정규화한 함수이다.[3]

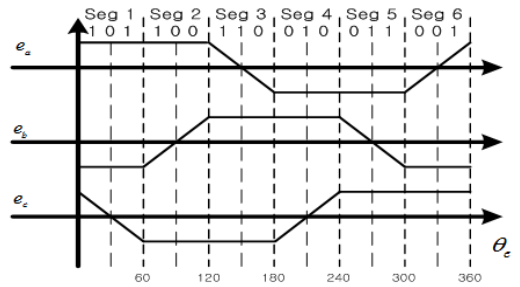


그림 2. 역기전력 파형  
Fig. 2 Back-EMF waveform

각 Segment의 중간지점에서 각 상마다 역기전력의 부호가 양에서 음으로, 음에서 양으로 두 번의 Zero Crossing Point가 생김을 볼 수 있다.

### 2.2. 인버터 구동방법

일반적으로 BLDC 전동기는 영구자석 회전자의 위치에 따라 인버터의 스위치를 PWM 구동함으로 토크 출력 및 속도를 조절한다. 구동방식은 3상의 스위치 중 PWM 구동될 스위치의 선택에 따라 여러 방법이 있는데, 전류가 흐를 두 상 중 한 상의 스위치만

PWM 구동하고, 다른 스위치는 켜 놓는 방법(Unipolar PWM)과 두 상의 스위치를 모두 PWM 구동하는 방법(Bipolar PWM)으로 나눌 수 있다. Bipolar PWM 방법을 사용할 경우 상 전환 시 생기는 노이즈에는 강인하지만 모든 상의 PWM을 사용하므로 FET의 수명이 Unipolar PWM 방법에 비하여 절반밖에 되지 않는다. Unipolar PWM 방법을 사용할 경우에는 Bipolar PWM 방법 보다는 효율이 우수 하지만 3상 중 동작하지 않는 오픈된 상에 누설 전류가 발생하여 Zero Crossing Point를 정확히 측정하는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 Improved Unipolar PWM 구동 방법을 사용하여 FET의 수명과 정확한 Zero Crossing Point를 찾아 낼 수 있는 방법을 제안한다.[4,5,6,7]

2.2.1 Unipolar PWM(Top 구동)

그림 3은 Unipolar PWM 구동 중 상단의 스위치를 PWM 구동하는 것을 나타낸다. A상에서 B상으로 전류가 흐르는 상태(Seg1)를 보면  $A_{top}$  에 있는 스위치를 PWM 구동하게 된다. 이때 스위치나 다이오드로 흐르는 전류로 인한 전압강하는 작은 값이고, PWM 주기 동안 속도의 변화는 매우 작으므로 무시하면, 시간  $t_0$ 에서  $A_{top}$ 의 스위치를 개방할 때 식(3)과 같은 관계식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} V_a &= 0 \\ V_b &= 0 \Rightarrow V_n = 0 \Rightarrow \text{if } e_c < 0 \Rightarrow \text{상태1} \\ i_c &= 0 \quad V_c = V_n + e_c \quad \text{if } e_c \geq 0 \Rightarrow \text{상태2} \end{aligned} \tag{3}$$

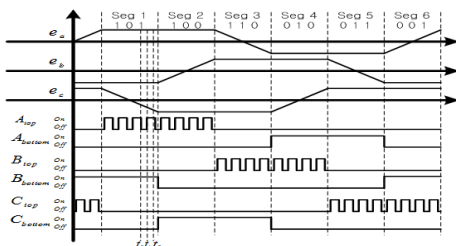


그림 3. 인버터 회로의 유니폴라 Top 스위치 구동방법

Fig. 3 Unipolar Top switching generation for Inverter circuit

식(3)에서 상태 1은  $V_c < 0$ 이므로  $C_{bottom}$ 의 후리휠링 다이오드 (free wheeling diode)를 통해 전류가 흐

르게 되고, 이 전류로 인해  $V_c = 0$ 이고, 중성점 전압과 흐르는 전류는 식(4)와 같다.

$$\text{상태1: } V_n = -\frac{e_c}{3}, i_c(t) = -\frac{1}{R} \left( \frac{2e_c}{3} \right) \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \tag{4}$$

$t \geq t_1$  시간에서  $A_{top}$  스위치를 켜게 되면 상태 1에서 시간  $t_1$  직전까지 식(4)의 전류로 인해 중성점 전압과 C상에 흐르는 전류는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} V_a &= V_{dc}, V_b = 0, V_c = 0 \Rightarrow V_n = \frac{V_{dc} - e_c}{3} \\ i_c(t) &= i_c(t_1)e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{1}{R} \left( \frac{V_{dc} + 2e_c}{3} \right) \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

C상에 흐르는 전류가 0이 될 때까지 시간은 식(6)와 같다.

$$t_2 = -\frac{L}{R} \ln \left| \frac{\frac{V_{dc} + e_c}{3}}{\frac{V_{dc} + e_c}{3} \cdot e^{-\frac{R}{L}t_1}} \right| \tag{6}$$

$t \geq t_2$  시간에서 C상에 전류가 흐르지 않고  $V_n = \frac{V_{dc}}{2}$ 이 된다. 시간  $t_0$ 에서부터 PWM 한 주기 T에 대해  $T - t_1 > t_2$ 일 경우 그림 4의 a -> b -> d -> a의 순서로 인버터에 전류가 흐르게 된다.  $T - t_1 < t_2$ 인 경우에는 a -> b -> d -> b -> d와 같은 흐름을 보이게 된다. 이때 식(4)의 전류가 식(7)의 전류로 흐르게 된다.

$$i_c(t) = i_c(t_0)e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{1}{R} \left( \frac{2e_c}{3} \right) \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \tag{7}$$

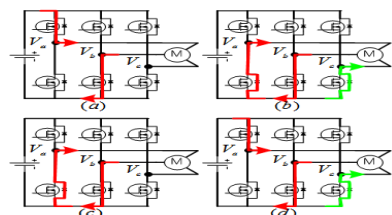


그림 4.  $A_{top}$  스위치 개방시 Fig. 4  $A_{top}$  switch open

상태2 : 식(3)에서 역기전력 전압이 양의 값으로  $V_c \geq 0$ 이므로 시간  $t_1$ 후에도 C상의 전류가 흐르지 않

고, 중성점 전압은  $V_n = \frac{V_{dc}}{2}$ 가 된다. 그림 4에서 a → c → a의 순서로 인버터의 전류가 흐르게 될을 알 수 있다. 살펴본 바와 같이 상단 스위치 구동은 역기전력이  $e_c < 0$ 에서 C상에 전류가 흐르게 된다. 위와 같이 Unipolar PWM 구동 방법에서는 개방된 상에서 역기전력이 개방된 상의 후리휠링 다이오드 (free wheeling diode)를 통해 전류가 흐르는 원인이 된다.

### 2.2.2 Bipolar PWM

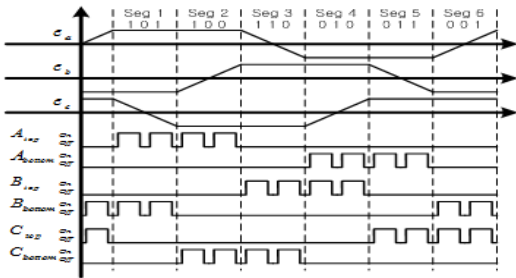


그림 5. 인버터 회로의 바이폴라 스위치 구동방법  
Fig. 5 Bipolar switching generation for Inverter circuit

그림 5는 seg1에 대해서 ( $A_{top}, B_{bottom}$ )의 스위치를 동시에 PWM 구동하는 동작을 한다. ( $A_{top}, B_{bottom}$ )의 스위치를 켜게 되면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{dc} \\
 V_b &= 0 \Rightarrow V_n = \frac{1}{2} V_{dc}, V_c = V_n + e_c \\
 i_c &= 0 \quad \frac{d}{dt} i_a = -\frac{R}{L} i_a + \frac{V_{dc}}{2L} - \frac{e_a}{L}
 \end{aligned} \tag{8}$$

( $A_{top}, B_{bottom}$ )의 스위치를 동시에 개방하게 되면 ( $B_{top}, A_{bottom}$ )의 후리휠링 다이오드 (free wheeling diode)를 통해 식(9)의 전류가 흐르게 되고, 중성점의 전압은 그대로 유지된다.

$$\begin{aligned}
 V_a &= 0 \\
 V_b &= V_{dc} \Rightarrow V_n = \frac{1}{2} V_{dc}, V_c = V_n + e_c \\
 i_c &= 0 \quad \frac{d}{dt} i_a = -\frac{R}{L} i_a + \frac{V_{dc}}{2L} - \frac{e_a}{L}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Bipolar PWM 구동 방법을 사용하게 되면 후리휠

링 다이오드 (free wheeling diode)를 통하여 흐르는 전류는 항상 0으로 유지되어 개방된 상에 누설전류는 생기지 않지만 모든 스위치를 다 켜야 하므로 수명이 감소하게 된다.

### 2.2.3 Improved Unipolar PWM

BLDC 전동기의 센서리스 구동은 대부분 노이즈의 영향이 없는 Bipolar PWM 구동 방법을 사용한다. Unipolar PWM 구동 방법을 사용하게 될 경우 개방된 상의 후리휠링 다이오드 (free wheeling diode)를 따라 원치 않는 전류가 흐르게 된다. 그 전류의 영향으로 생성되는 노이즈 때문에 정확한 Zero Crossing Point를 찾아내기가 힘들어지게 된다. 따라서 본 논문에서는 원치 않는 전류의 흐름을 제거한 Improved Unipolar PWM 구동 방법을 제안한다. Improved Unipolar PWM 구동 방법은 개방된 상의 전류의 흐름을 제거하기 위하여 각 Segment 상황을 두 부분으로 나누어서 개방된 상의 역기전력의 부호가 변화하는 구간을 관찰 후 변화가 이루어졌을 때 스위칭 방식을 변경하는 방법이다. 그림6의 A 구간에서 개방된 상의 역기전력이 양의 값을 가지므로  $A_{top}$  스위치를 구동하고, B구간에서는 개방된 상의 역기전력이 음의 값을 가지므로  $B_{bottom}$  스위치를 구동한다. 개방된 상의 역기전력이 양인 구간에서는 상단 스위치를, 음인 구간에서는 하단 스위치 구동 방법을 사용하므로 누설전류의 흐름을 제거할 수 있다. 이와 같이 제안한 Improved Unipolar PWM 구동 방법을 사용하게 되면 Unipolar PWM 방법의 효율로 Bipolar PWM 방법처럼 개방된 상에서 전류가 흐르지 않도록 개선할 수 있다.[8]

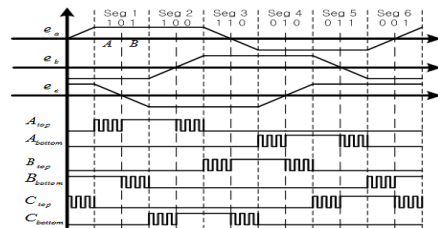


그림 6. 인버터 회로의 개선된 유니폴라 스위치 구동방법

Fig. 6 Improve Unipolar switching generation for Inverter circuit

### III. 실험

실험은 KS 전자의 225W급 전동기로 각 상의 저항은  $0.128\Omega$ 이고 각 상의 인덕턴스는  $0.034mH$ 이다. 실험에는 TI사의 TMS320F28335를 연산기 및 제어기로 사용하여 구동 알고리즘을 구현하였다. 그림 7은 Bipolar PWM 방법으로 그림 8은 Unipolar PWM(Top 구동)방법으로 그림 9는 개선된 Unipolar PWM 방법으로 인버터를 Duty 20%를 주고 구동하였을 때 각각 한상에 흐르는 실제 전류를 오실로스코프를 통하여 측정한 것이다.[9,10]

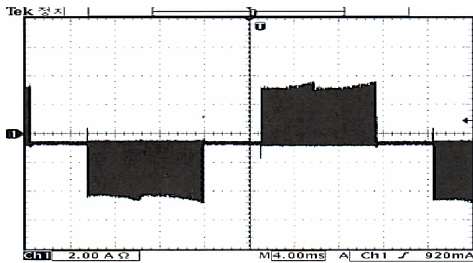


그림 7. 바이폴라 PWM 방법(Duty 20%)  
Fig. 7 Bipolar PWM Method(Duty 20%)

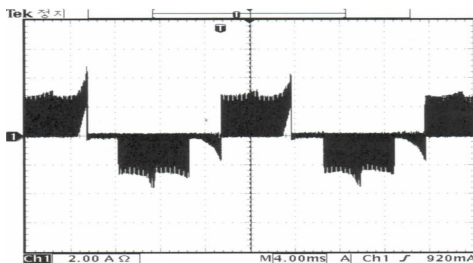


그림 8. 유니폴라 PWM 방법(Duty 20%)  
Fig. 8 Unipolar PWM Method(Duty 20%)

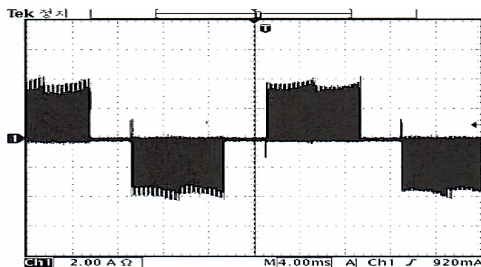


그림 9. 개선된 유니폴라 PWM 방법(Duty 20%)  
Fig. 9 Improve Unipolar PWM Method(Duty 20%)

Unipolar PWM 방법으로 구동을 하였을 경우에는 그림8과 같이 개방된 상에서 원치 않는 전류의 흐름이 관측됨을 볼 수 있다. 개방된 상에 나타나는 원치 않는 전류의 흐름은 Zero Crossing Point에서 노이즈를 유발하여 정확한 관측이 힘들어지게 한다. 하지만 Bipolar PWM 방법이나 Improved Unipolar PWM 방법을 사용하게 되면 위의 그림과 같이 개방된 상에서의 전류의 흐름이 없어 정확한 Zero Crossing Point를 찾아낼 수 있다. 또 그림10과 그림11은 Unipolar PWM(Top 구동)방법과 개선된 Unipolar PWM 방법으로 인버터를 Duty 40%로 구동 시 나타난 전류의 파형이다.

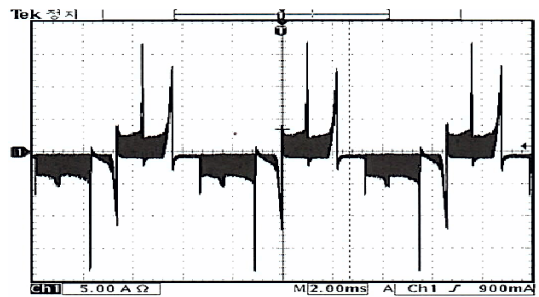


그림 10. 유니폴라 PWM 방법(Duty 40%)  
Fig. 10 Unipolar PWM Method(Duty 40%)

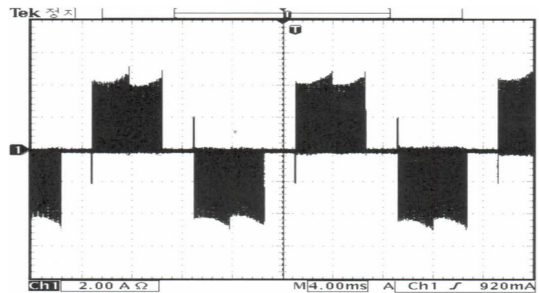


그림 11. 개선된 유니폴라 PWM 방법(Duty 40%)  
Fig. 11 Improve Unipolar PWM Method(Duty 40%)

그림10에서와 같이 일반 Unipolar PWM 방법을 사용하면 Duty의 증가에 따라 개방된 상에서의 원하지 않는 전류의 양도 증가하여 생기는 노이즈로 인하여 Zero Crossing Point를 찾기가 더욱 힘들어 지게 된다. 하지만 Improved Unipolar PWM 방법으로 구동을 하였을 경우에는 그림11과 같이 Duty의 증가에 따

른 개방된 상에서 원치 않는 전류 흐름은 나타나지 않아 쉽게 Zero Crossing Point를 관측 할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기를 Unipolar PWM 구동 방법으로 구동할 때 개방된 상의 후리휠링 다이오드(free wheeling Diode)를 통해 흐르는 누설 전류의 흐름을 제거하여 높은 회전 속도에서도 Zero Crossing Point의 관측을 용이하게 하기 위하여 Improved Unipolar PWM 구동 방법을 제안하였다. 제안된 방식은 Bipolar PWM 구동 방법에 비하여 스위칭 횟수가 절반으로 줄어들기 때문에 드라이버의 수명 연장을 가능하게 한다.

#### 감사의 글

본 논문은 2008년도 광운대학교의 연구비 지원으로 수행되었습.

#### 참고 문헌

[1] 전용호, 조황, 최익, “속도센서가 없는 허브-휠 전동기의 속도추정을 위한 이산시간 칼만필터의 설계 및 구현”, 한국철도학회 논문집, Vol 11, No. 2, pp.203-210, 2008.

[2] 김태성, 박병건, 이동명, 유지수, 현동석, “A New Approach to sensorless Control Method for Brushless DC Motors”, International Journal of Control Automation and Systems, Vol. 6, No. 4, pp.477-487, 2008.

[3] 김길동, 조정민, “철도차량의 Anti-Slip 제어 및 속도센서리스 벡터제어”, 한국철도학회 논문집, Vol. 8, No. 3, pp.216-221, 2005.

[4] Timothy Chang, Chung Wang, Edwin Chhen, “Speed Control of Brushless Motor Using Low Resolution Sensor”, Proceedings of the American Control Conference, 2001.

[5] 배건웅, 이재영, 최경선, “Sensorless BLDC Motor 제어기 개발”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.826-829, 1999.

[6] 설승기, 전기기기 제어론, 브레인코리아, 2002.

[7] Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn and Dong-seok Hyun, “BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 새로운 전류 제어 알고리즘에 대한 연구”, 전력전자학회 논문집, Vol 6, No. 5, pp.416-422, 2001.

[8] Kwang-Woon Lee, Jung-bae Park, Hyeong-Gee Yeo, Ji-Yoon yoo and Hyun-Min Jo, “Current Control Algorithm to Reduce torque Ripple In Brushless DC Motors”, ICPE 국제학술대회논문집, pp.380-385, 1998.

[9] M. A. Rahman, “Modern Electric Motors in Electronic World”, Proc. of IEEE IECON, pp.644-648, 1993.

[10] N.Matsui, “Sensorless PM Brushless DC motor drives”, IEEE trans Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, pp.300-308, 1996.

#### 저자 소개



#### 이호형(Ho-hyoung Lee)

2006년 2월 조선대학교 기계학과 졸업 (공학사)  
 2010년 2월 광운대학교 대학원 제어계측공학과 (공학박사 재학 중)

※ 주 관심분야 : 모터 제어, 로봇 제어



#### 조 황(Whang Cho)

1981년 2월 인하대학교 기계학과 졸업 (공학사)  
 1985년 8월 University of Texas Austin 기계공학과 (공학석사)

1989년 8월 University of Texas Austin 기계공학과 (공학박사)

1990년 ~ 현재 : 광운대학교 정보제어공학과 교수  
 ※ 주 관심분야 : 전기 System 및 제어, 로봇 제어, 의료정보시스템



**이기서(Key-seo Lee)**

1977년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

1979년 2월 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)

1986년 2월 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)

1981년 ~ 현재 : 광운대학교 정보제어공학교 교수

※ 주 관심분야 : RAMS, Digital Control System