

소프트웨어 PLL 기반 소형 고속 BLDCM의 속도 제어

李東熙[†]

Speed Control of High Speed Miniature BLDCM Based on Software PLL

Dong-Hee Lee

요 약

본 논문은 홀센서를 사용하는 고속 소형 BLDCM의 속도제어를 위해 PLL 방식을 적용하였다. 제안된 방식은 기준펄스 신호와 홀센서 신호와의 위상차를 이용하는 PLL 기반의 속도제어 기법으로, 별도의 속도 계산이 요구되지 않고, 지령전류는 직접 두 신호의 위상차에 의해 결정된다. 전류 지령은 두 펄스 신호의 위상차에 따라서, 전동기의 속도를 일정하게 유지하기 위하여 변화된다. 제안된 방식은 매우 간단하지만 효과적인 속도 제어를 구현할 수 있다. 또한, 부드러운 토크를 발생하기 위하여 지령 전류는 가속 및 감속 패턴을 따라 변동하도록 설계되었다. 제안된 방식은 50W, 40,000[rpm]급의 소형 고속 BLDCM에 적용하여 실험하였다.

ABSTRACT

This paper presents a PLL(Phase Lock Loop) approach for effective speed and torque control of high speed miniature BLDCM(Brushless DC Motor) using hall sensor. The proposed speed control method based on PLL uses only a phase shift between reference pulse signal according to speed reference and actual pulse signal from hall sensor. It doesn't use any speed calculation, and calculates a direct current reference from phase shift. The current reference is changed to reduce the phase shift between reference and actual pulse. So the actual speed can keep the reference speed. The proposed control scheme is very simple but effective speed control is possible. In order to obtain a smooth torque production, the reference current is changed using acceleration and deceleration slope. The proposed control scheme is verified by experimental results of the 50W, 40,000[rpm] high speed miniature BLDCM.

Key Words : High speed miniature motor, BLDCM, Software PLL, Speed control

1. 서 론

소형 고속 BLDCM(Brushless DC Motor)은 의료용 및 로봇 응용 분야에 널리 사용되고 있다. 소형 고속 BLDCM은 효율이 높고, 소음이 적은 특징을 가진다. 운전속도는 40,000rpm의 영역까지 운전이 가능하여 치 의료 분야에서의 활용도가 점점 증가하고 있다. 특히,

출력 대비 전동기의 크기가 매우 컴팩트하고, 각 응용에 적합하게 센서 일체형으로 제작되어 있으므로 핸드 홀드 장비나, 휴머노이드 계열의 로봇 시스템 구성에 매우 유리하다. 소형 고속 BLDCM의 특징은 회전자 관성이 매우 작아서 급가감속 특성이 매우 좋으나, 토크 리플에 대한 속도 변동률이 크게 나타난다. 또한, 고속 운전이 가능하도록 역기전력이 매우 낮으며 전기적 시정수가 매우 작게 설계되는 특징이 있다^[1-2]. 따라서, 저속 운전영역에서는 일반 산업용 BLDCM에 비하여 전류 리플에 의한 토크 리플이 크게 나타나고 이로 인하여 속도 제어가 어려운 단점도 있다.

[†]교신저자 : 정회원, 경성대 전기전자메카트로닉스 조교수

E-mail : leedh@ks.ac.kr

접수일자 : 2008. 8. 18

2차 심사 : 2008. 11. 28

1차 심사 : 2008. 10. 27

심사완료 : 2008. 12. 22

한편, 산업용 제어 시스템에서 고중분형 엔코더를 적용하고 있는 것에 비하여 고속 BLDCM의 경우에는 고속 영역에서 엔코더의 기계적 베어링 마찰 및 진동과 출력펄스의 전기적 주파수 한계로 인하여 적용되기 매우 어렵다. 따라서, 소형 고속 BLDCM의 경우에는 자극을 검출하는 홀센서(Hall sensor)로 회전자 위치와 속도를 검출하며, 이 정보로부터 전동기의 제어를 수행하게 된다^[1-2].

홀센서의 신호는 전기적으로 1 회전당 120°의 위상차를 가지는 위치 정보를 출력하고, 이 신호로부터 전기적으로 1회전당 6개의 펄스 신호를 검출할 수 있다. 따라서, 전기적으로 검출된 60°의 신호로부터 회전자 위치를 확인하고, 이에 따른 스위칭 신호를 발생하게 된다. 하지만, 1회전당 낮은 펄스수로 인하여 중·저속 영역에서 회전자의 속도를 순시적으로 정밀하게 검출하기 어렵고, 이러한 이유로 인하여 중·저속 영역에서의 속도 제어 특성이 감소하게 된다. 특히, 디지털 제어 시스템에서 고정된 제어주기를 가지는 경우에 홀센서의 한 펄스 동안 실제로 속도가 가변하게 되고 이에 따른 제어 이득의 산정이 매우 어려워진다. 특히, 중·저속 영역과 고속 영역에서의 속도 검출 주기가 회전속도에 따라 변하게 되므로 속도 제어를 정확하게 설계하기가 매우 어렵다^[3-4].

본 논문에서는 홀센서가 내장된 소형 고속 BLDCM의 전 운전영역에서의 효과적인 속도 및 토크 제어를 위하여 PLL(Phase Lock Loop) 기법을 적용한 제어 방식을 제안한다. 제안된 PLL 기반의 속도 제어 방식은 홀센서로부터 회전자 위치 정보만을 고려하고, 속도를 별도로 검출하지 않으며, 지령속도에 대한 기준 펄스와 실제 홀센서의 출력펄스 위상차에 대하여 토크 지령을 계산하는 방식이다. 이 방식에서는 주기적으로 속도가 검출되지 않아도, 속도 지령에 따른 기준 펄스와 홀센서와의 펄스 에지에서 연속적으로 속도차에 대한 정보가 갱신되므로, 토크 지령을 두 펄스의 위상차를 감소시키는 방향으로 변경함으로써, 실제속도를 지령속도에 일치시키도록 제어하게 된다. 따라서 간단한 기준 펄스와 비교만으로도 전운전 영역에서 정밀한 속도제어가 가능해진다. 보다 효과적인 PLL 방식의 적용을 위해서 소형 고속 BLDCM의 펄스 위상차에 대한 토크 연산방법을 제시하고, 전류의 급격한 변동을 억제하기 위하여 지령전류에 가감속을 인가하는 방식을 적용하였다. 실제 지령전류는 매 홀센서의 신호와 PLL 기준 신호가 변경되는 부분에서 연산되므로, 속도 제어를 위한 제어주기가 비교적 길어지게 되므로

전류의 지령이 급격하게 변동하지 않도록 가감속 방식을 적용하였다. 제안된 방식은 실제 50W급 40,000rpm의 소형 고속 BLDCM에 적용하여 그 특성을 검증하였다.

2. 소형 고속 BLDCM의 운전

그림 1은 구형과 역기전력을 가지는 BLDCM의 구동 시스템 등가회로를 나타내고 있다. 그림 1에서 BLDCM은 3상 Y-결선으로 되어 있으며, 권선 저항 R_a , 인덕턴스 L_a 및 역기전력 성분 e_{as} , e_{bs} 및 e_{cs} 로 등가화 되었다^[5-6].

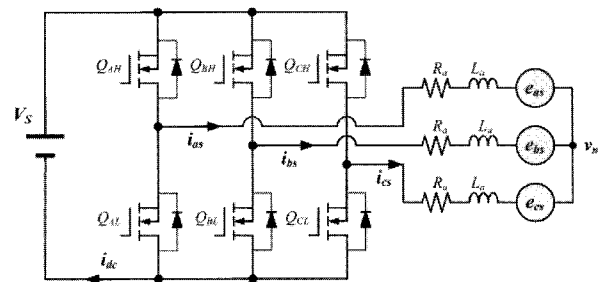


그림 1 BLDCM 구동 시스템 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of BLDCM drive

그림 1의 3상 BLDC 전동기 구동회로에서 BLDC 전동기의 순시 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다^[7-8].

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_a & 0 \\ 0 & 0 & L_a \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

단, v_{as} , v_{bs} , v_{cs} : BLDC 전동기 단자 전압 [V]

R_a : BLDC 전동기 상 저항 [Ω]

L_a : BLDC 전동기 상 인덕턴스 [H]

i_{as} , i_{bs} , i_{cs} : BLDC 전동기 상전류 [A]

e_{as} , e_{bs} , e_{cs} : 상 역기전압 [V]

정현적인 역기전력을 가지는 PMAC와 달리 BLDC 전동기는 통전구간에서 2상의 스위칭에 의해 토크 전류를 공급한다. 일반적인 스위칭은 전류 리플을 억제하기 위한 유니폴라(uni-polar) 스위칭 방식과 응답성을 높이기 위한 바이폴라(bi-polar) 스위칭 방식이 적용될 수 있다. 본 논문에서는 직류 링크단의 전류센서 하나로 전동기의 속도제어를 수행하기 위하여 상전류의 크기를 직접 검출이 가능한 바이폴라 스위칭 방식

을 적용하였다. 유니폴라 스위칭 방식에서 상전류의 프리휠링 모드에서 전류가 상권선으로만 흐르므로, 직류 링크단에 설치된 전류센서 하나로는 토크 전류를 직접 검출하기가 매우 어렵다.

그림 2는 BLDCM의 전기적 1회전에 대한 역기전력과 전류 및 홀센서 신호를 나타내고 있다. 홀센서 출력은 각 상에 대하여 H_a , H_b 및 H_c 로 표기되어 있으며, 3상의 센서 신호의 조합에 의해 전기적으로 60도 간격의 위치 정보를 구할 수 있다.

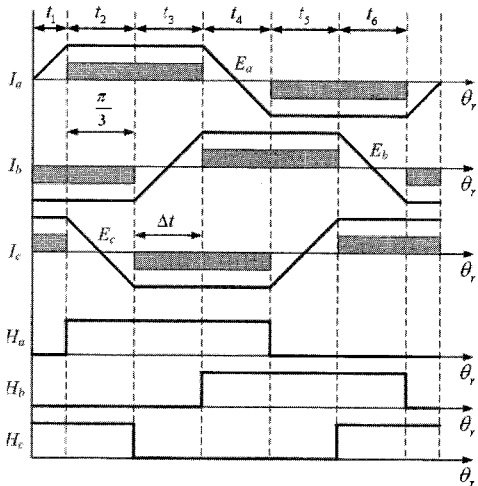


그림 2 BLDCM의 역기전력, 입력전류 및 홀센서 신호
Fig. 2 Waveforms of back e.m.f, input current and hall sensor signals of BLDCM

그림 2에서 BLDCM의 속도는 매 60도 간격의 회전자 위치와 시간 Δt 에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\omega_{re} = \frac{\Delta\theta_{re}}{\Delta t} = \frac{\pi/3}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\omega_{rm} = \frac{\omega_{re}}{p} \quad (3)$$

단, ω_{re} , ω_{rm} 은 회전자의 전기적 및 기계적 속도
 p : 극 쌍수

일반적인 엔코더에 의한 M/T 방식의 속도 계산과 달리, 홀센서에 의한 BLDCM의 경우에는 회전자 위치가 검출되는 홀센서 신호의 변화에 동기하여, 홀센서 신호가 변하는 시간 Δt 에 의해 계산된다. 따라서, 회전자 속도가 주기적으로 검출되는 엔코더와 달리 중·저속 영역에서 회전자 속도가 Δt 동안 가변하게 되므로, 속도 검출 주기가 매번 달라지는 문제가 있다.

3. 제안된 소프트웨어 PLL 기반의 속도 제어

본 논문에서는 홀센서를 적용한 소형 고속 BLDCM의 속도 제어를 위하여, PLL 기반의 제어 방식을 제안한다. 제안하는 제어방식은 먼저 속도 지령에 해당되는 기준 펄스를 디지털 제어기에서 내부적인 타이머를 통해서 발생시킨다. 이 신호와 홀센서의 상승 및 하강에지와 비교하여 기준 신호와의 위상차이를 시간으로 기록하고, 이 시간에 대하여 위상차이가 감소하도록 직접 펄스폭을 변조하는 방식이다.

그림 3은 속도 지령에 따른 제어기의 내부 타이머에 의해 발생된 기준 펄스 신호와 실제 홀센서 신호의 관계를 나타내고 있다. 기준 펄스 신호는 지령속도의 가·감속 또는 속도지령에 대하여 일정 변위각 $\Delta\theta_{rm}^*$ 에 대하여 기준시간 Δt_{ref}^* 를 가지는 신호를 발생시킨다. 이 신호와 비교되는 실제 홀센서의 신호는 동일한 일정 변위각 $\Delta\theta_{rm}$ 에 대한 실제 시간 Δt_{act} 를 가지는 신호로 나타난다. 일정 변위는 홀센서의 1 펄스 기준으로 정해지므로, 속도 지령에 따른 일정 변위각 $\Delta\theta_{rm}^*$ 과 실제 홀센서 출력에 따른 변위각 $\Delta\theta_{rm}$ 은 동일하며, 기준시간 Δt_{ref}^* 는 속도 지령에 따라 변동된다. 또한 실제 시간 Δt_{act} 는 실제 속도에 따라 변동된다.

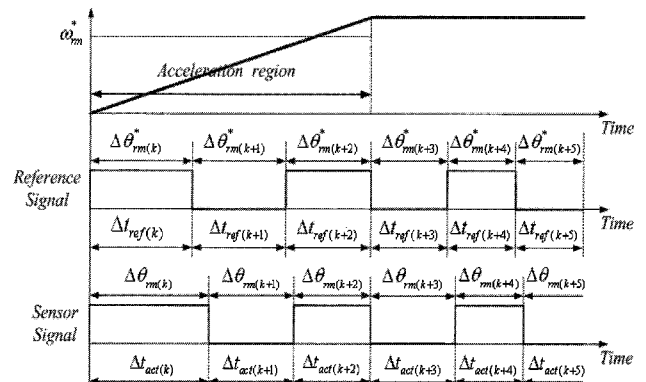


그림 3 속도 지령에 따른 지령 신호와 실제 홀센서 신호
Fig. 3 The reference pulse according to speed reference and actual hall sensor signal

그림 3의 각 신호에서 BLDCM의 극수가 2라고 하면, 위치 및 속도는 다음과 같다.

$$\Delta\theta_{rm}^* = \Delta\theta_{rm}(k) = \frac{\pi}{3} \quad (4)$$

$$\omega_{rm}^*(k) = \frac{\Delta\theta_{rm}^*(k)}{\Delta t_{ref}(k)} \quad (5)$$

$$\omega_{rm}(k) = \frac{\Delta\theta_{rm}(k)}{\Delta t_{act}(k)} \quad (6)$$

또한, 속도 오차는 지령속도와 실제 속도와의 차이로 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\omega_{rm}(k) = \Delta\theta_{rm}(k) \cdot \left(\frac{1}{\Delta t_{ref}(k)} - \frac{1}{\Delta t_{act}(k)} \right) \quad (7)$$

이때, $\Delta\theta_{rm}(k)$ 은 상수이고, $\Delta t_{ref}(k)$ 는 일정 속도 지령일 경우에 상수로 된다. 즉, 지령 펄스 또는 홀센서 신호가 변하는 순간에 검출되는 속도오차는 홀센서 신호의 60도 간격의 시간 $\Delta t_{act}(k)$ 로 결정된다.

그림 4는 부하 등의 변동으로 인하여 속도가 가변되었을 경우에 각 신호의 특성을 나타내고 있다.

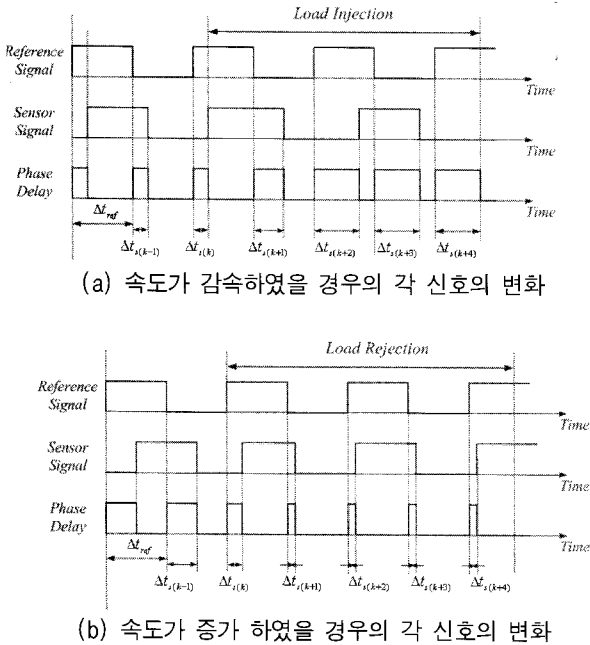


그림 4 속도 변동에 대한 각 신호의 변화
Fig. 4 Waveforms of reference, hall-sensor and phase delays according speed variation

그림 4에서 속도의 변동에 따라 기준 펄스는 동일하게 유지되지만, 실제 센서 신호는 부하의 인가에 의해 속도가 감소하게 되므로, 센서 신호의 간격이 증가하여 위상차가 증가하게 된다. 또한 부하가 감소하였

을 경우에는 속도가 증가하게 되므로, 센서 신호의 간격이 감소하여 위상차가 감소하게 된다. 이때, 그림 4의 $\Delta t_s(k)$ 는 기준 펄스와 실제 센서 신호와의 시간차이며, 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta t_s(k) = \Delta t_{act}(k) - \Delta t_{ref}(k) \quad (8)$$

$$\Delta\omega_{rm} \propto (\Delta t_s(k) - \Delta t_s(k-1)) \quad (9)$$

이때, 속도 변동은 이전의 시간차와 현재의 시간차에 비례하여 나타나게 된다. 하지만, 위상차가 발생하여도, 이전의 위상차와 동일하면 속도는 일정하게 유지된다. 따라서, 이 위상차에 해당하는 시간이 일정하게 유지될 수 있도록 토크를 제어함으로써, 속도를 일정하게 유지할 수 있다.

본 논문에서는 회전자 속도에 따른 역기전력을 고려한 PLL 기반의 속도 제어 방식을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 PLL 기반의 속도 제어에서는 지령펄스와 실제 펄스사이의 위상 차이에 대한 직접 펄스폭을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$d_s(k) = k_m \cdot \frac{\Delta t_s(k)}{\Delta t_{ref}(k)} \quad (10)$$

단, k_m : 비례상수

이때, 소형 고속 BLDCM의 경우에는 다른 상용의 BLDCM과 달리 전류리플이 매우 높기 때문에, 직접 펄스폭을 제어하는 경우에 매우 높은 스위칭 주파수를 필요로 하므로 제어를 구성하기가 매우 어렵다. 또한 비교적 높은 정밀도의 토크 제어를 위해서는 외부에 별도의 전류제어를 구현하는 것이 유리하다.

따라서, 본 논문에서는 이 위상차에 대한 시간을 기준 펄스신호와 실제 센서신호와의 시간차이에 비례하는 토크 지령을 발생하여 지령속도에 추종하는 제어를 설계하였다. 시간차이에 대한 토크 지령이 크게 발생하면, 응답성은 높으나 속도에 진동이 발생할 수 있고, 토크 지령이 낮으면 응답성이 나빠지게 되므로, 본 논문에서는 기준 펄스의 시간에 대한 비율에 대하여 토크 지령이 발생하도록 하였다. 또한, 토크 성분이 전류에 직접 비례하므로, 실제 제어에서는 지령 전류가 가변하도록 다음과 같이 간단히 설계될 수 있다.

$$I_m^*(k) = K_m \cdot \frac{\Delta t_s(k)}{\Delta t_{ref}(k)} \quad (11)$$

K_m 은 제어이득

한편, 소형 고속 BLDCM의 경우에 식 (11)과 같이 결정된 전류 지령에 의해 토크 전류가 급속하게 변동하게 되면, 토크 변동에 따른 속도의 변동이 비교적 크게 나타나게 되므로, 이를 고려하여 전류의 지령치를 부드럽게 변동하는 가감속 패턴을 삽입하였다. 이는 전류의 지령이 홀센서의 신호가 검출되어 지령 펄스와 비교되는 구간에서만 변동하게 되므로 전기적인 60도 구간에서의 토크 변동이 부드럽게 추종하도록 하기 위해서이다.

그림 5는 본 논문에서 제안된 소프트웨어 PLL 기반의 지령속도에 따른 전류 제어특성을 나타내고 있다. 기동 상태에서 지령 전류는 위상차를 나타내는 시간에 비례하여 전기적으로 60도 간격에서 변화하고 이에 따라 실제속도가 지령속도를 추종하도록 제어된다.

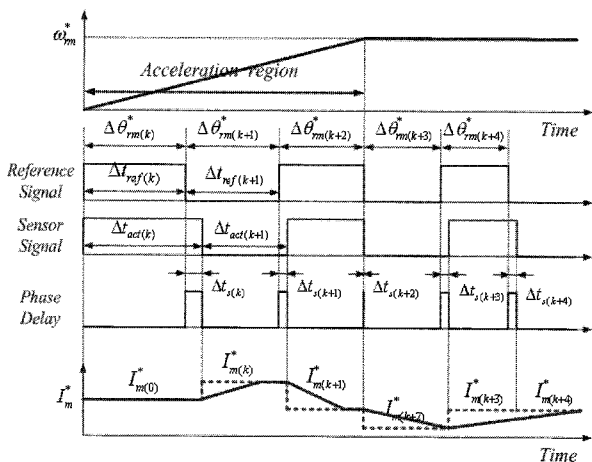


그림 5 제안된 방식에서의 지령속도 변동
Fig. 5 Current variation of the proposed control method

이때, 그림 5에서 본 논문에서 제안하는 PLL 기반의 제어기의 전류 지령 I_m^* 은 점선으로 변동하게 된다. 이때, 실제 지령 전류는 가감속을 고려하여 실선으로 변동하도록 설계하였다.

본 논문에서 전류제어기는 고속 비교기를 사용한 CCC(Current Chopping Controller) 방식을 적용하였다.

4. 실험 결과

제안된 방식의 유효성을 검증하기 위하여 50W, 최고속도 40,000rpm급 소형고속 BLDCM에 대한 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 적용 모델의 사양

Table 1 The specification of adopted BLDC motor

정격 전압	50 [W]	정격 전압	32V
상간 저항	0.36[Ω]	상간 인덕턴스	0.049 [mH]
역기전력상수	1290 [rpm/V]	토크 상수	7.39[mNm/A]
연속최대전류 (10000[rpm])	4.81[A]	연속최대토크 (10000[rpm])	34.5 [mNm]
최고 속도	40,000 [rpm]	회전자 관성	4.6 [gcm ²]

실험을 위한 메인 제어기는 TI(Texas Instrument)사의 TMS320LF2812-150[MHz]를 적용하였고, 고속 스위칭을 위한 인버터 장치는 고속 FET로 구현하였으며, 전류 피이드백은 직류 링크단의 전류를 피이드백하여 제어에 사용하였다. 직류 링크단의 전류를 직접 제어에 사용하기 위해서는 BLDCM의 스위칭 방식을 휠링 전류가 링크단으로 피이드백이 될 수 있는 바이폴라(bi-polar) 스위칭 방식을 적용하였으며, 링크단의 검출전류는 정밀한 정류회로를 통하여 전류제어기로 입력된다. 전류 지령은 12비트 DA 컨버터를 사용하여 비교기로 입력되도록 설계되었다. 고속 응용에 적합한 전류 제어기의 설계를 위해서는 고속의 비교기인 KA319 계열의 비교기가 적용되었으며, FET의 게이트 드라이브도 고속 특성을 유지하기 위하여 HCPL-3180을 적용하였다. 이는 신호의 상승 및 하강 시간이 매우 짧아서 고속 스위칭에 매우 유리하다. 실제 실험에서의 전류제어기의 스위칭은 약 150 ~ 250[kHz]에서 발생하게 된다.

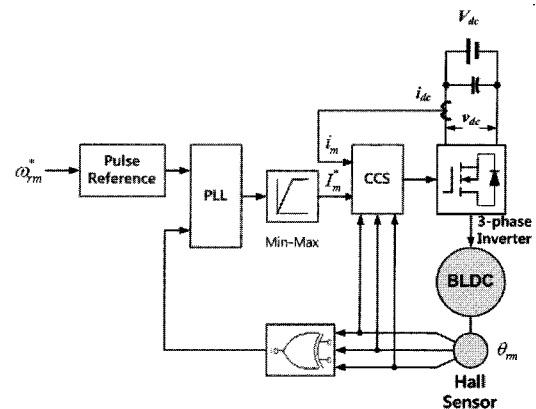


그림 6 제안된 방식의 제어 블록도
Fig. 6 Proposed control block diagram

그림 6은 본 논문에서 제안된 방식의 전체 제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 6의 제어 블록은 매우 단순하게 구성될 수 있으며, 전류 제어기를 제외한 나머

지 부분은 소프트웨어 방식으로 처리될 수 있다. 구성 블록은 지령속도에 따른 기준 펄스를 발생하고, 이를 실제 센서 신호와 비교하는 PLL 제어기로 구성된다. 실제 기준 펄스는 제어기 내부의 타이머에 의해서 구현되므로 별도의 신호발생을 위한 하드웨어는 필요하지 않다.

그림 7은 본 논문의 실험에 적용된 제어기와 전동기를 나타내고 있다. 소형 고속 BLDCM에 실제 시스템을 고려한 20 : 1의 기어가 장착되어 있으며, 기어의 끝단에는 워기어 형태로 회전력을 전달하여 의료용으로 적용되도록 설계되어 있다.

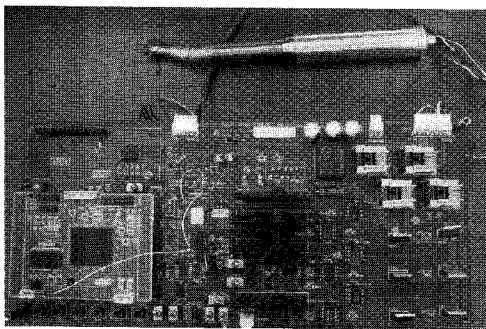


그림 7 실험 환경
Fig. 7 Experimental configuration

그림 8은 2,000[rpm]에서의 실험결과를 나타내고 있다. 기준 신호(Reference Signal)는 DSP의 내부 타이머에 의해 발생하고, 실제 신호(Actual Signal)은 홀센서를 통하여 검출되는 신호를 의미한다. 비교적 낮은 속도 영역에서 안정적인 속도 제어가 가능함을 보이고 있다.

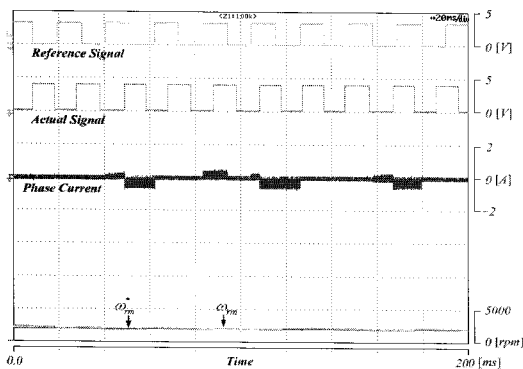


그림 8 2,000[rpm]에서의 실험결과
Fig. 8 Experimental result at 2,000[rpm]

그림 9는 주 운전영역인 5,000[rpm]에서 무부하 상

태의 속도 제어 성능을 보이고 있다. 그림 9에서 부하는 기어 상태로 무부하로 동작하고 있으며, 지령 전류에 대하여 실제 전류가 매우 잘 추종하고 있음을 보인다. 또한 주 운전 영역에서 속도가 간단한 PLL 기반의 제어기로 제어 됨을 보이고 있다.

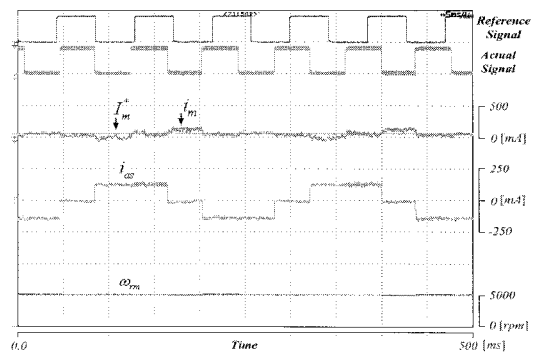
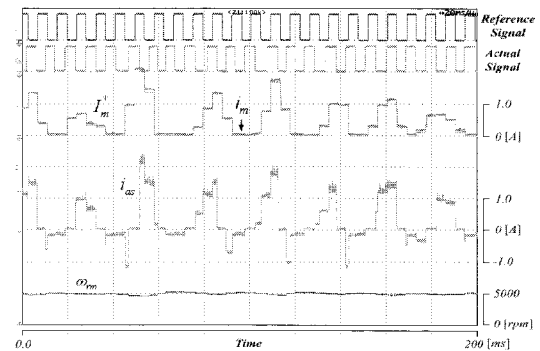
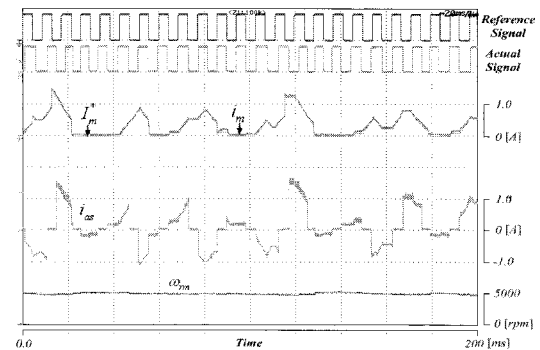


그림 9 정상상태 실험결과(5,000[rpm] 무부하)
Fig. 9 Experimental result in steady state (5,000[rpm] no-load)



(a) 가감속이 없는 경우(5,000[rpm])



(b) 가감속이 있는 경우(5,000[rpm])

그림 10 임의의 부하에서 전류 지령 방식에 대한 속도응답 (5,000[rpm])

Fig. 10 Speed response at random load according current reference(5,000[rpm])

그림 10은 주 운전영역인 5,000[rpm]에서 임의의 부하를 인가하였을 경우에 전류 지령에 가감속이 없는 경우와 있는 경우의 속도 응답 특성을 보이고 있다. 전류 지령에 가감속이 있는 경우에 가감속이 없는 경우에 비하여 부드러운 속도 응답 특성을 나타내었다.

그림 11은 속도 지령이 5,000[rpm]에서 38,000[rpm]으로 가변 되었을 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. 실험 결과에서 전류 제어기 및 속도 제어기가 안정적으로 동작하여 지령 속도를 잘 추종하고 있음을 보이고 있다.

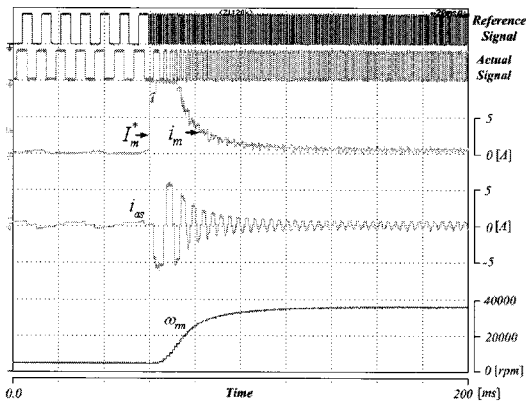
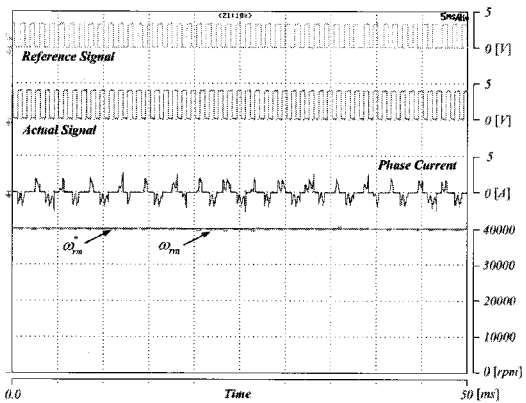
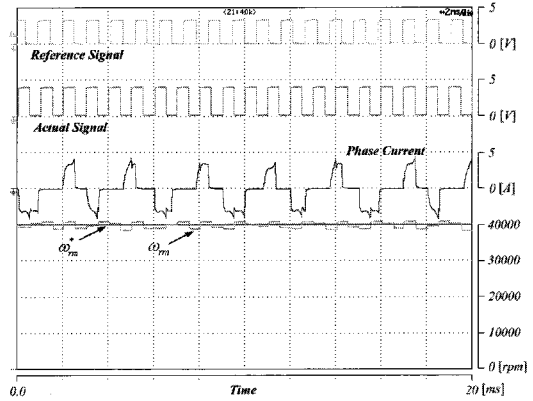


그림 11 속도 지령 변동에 대한 실험결과 (5,000[rpm] → 38,000[rpm])
 Fig. 11 Experimental result according to speed variation(5,000[rpm] → 38,000[rpm])

그림 12는 최대속도인 40,000[rpm]에서의 약 25%의 부하와 정격 부하 인가 상태에서 실험 결과를 나타내고 있다. 최대 속도 정격 부하에서 안정적인 제어가 가능함을 보이고 있다.



(a) 25[%] 부하



(b) 정격 부하

그림 12 부하상태에서의 실험결과(40,000[rpm])
 Fig. 12 Experimental result at 40,000[rpm]

5. 결 론

본 논문에서는 홀센서가 내장된 소형 고속 BLDCM의 전 운전영역에서의 효과적인 속도 및 토크 제어를 위하여 간단한 소프트웨어 방식의 PLL(Phase Lock Loop) 기법을 적용한 제어 방식을 제안하였다. 효과적인 PLL 방식의 적용을 위해서 소형 고속 BLDCM의 펄스 위상차에 대한 전류 연산방법을 제시하고, 전류의 급격한 변동을 억제하기 위하여 지령전류에 가감속을 인가하는 방식을 적용하였다. 실제 지령전류는 매 홀센서의 신호와 PLL 기준 신호가 변경되는 부분에서 연산되므로, 속도 제어를 위한 제어주기가 비교적 길어지게 되므로 전류의 지령이 급격하게 변동하지 않도록 가감속 방식을 적용하였다. 제안된 방식은 실제 50W급 40,000rpm의 소형 고속 BLDCM의 실제 실험에서 안정적인 속도제어가 가능함을 보이고 있다.

이 논문은 2008학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives", *IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 380-390, 1987.
- [2] Renato Carlson, Michel Lajoie-Mazenc and Joao C.dos S. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple due to Phase

- Commutation In Brushless DC machines", *IEEE Conference of IAS Annual Meeting*, pp. 287-292, 1990.
- [3] 윤용호, 이승준, 김영란, 원충연, 최유영, "2 Hall-ICs를 이용한 Slotless PM Brushless DC Motor의 정밀속도제어를 위한 PLL 제어방식" *전력전자학회 논문지*, Vol. 10, No. 2, pp. 109-116, 2005.
- [4] 김종선, 유지윤, 배종표, 서문석, 최옥돈, "전기자동차용 브러쉬리스 직류 전동기의 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", *전력전자학회지*, Vol. 8, pp. 336-343, 2003.
- [5] D. C. Hanselman, "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors", *IEEE Trans. On IE*, Vol. 41, No. 3, pp. 292-300, 1994, June.
- [6] H. Zeroug et al, "Analysis of Torque Ripple in BDCM", *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 38, No. 2, pp. 1293-1296, 2002, March.
- [7] Fang Lin Luo, Hock Guan Yeo, "Advanced PM Brushless DC Motor Control & System for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Application*, Vol. 2, pp. 1336-1340, 2000.
- [8] Ting-Yu Chang, Ching-Tsai Pan, Jenn-Horng Liaw and Shinn-Ming Sue, "A Hall-Sensor-Based IPM Traction Motor Drive", *IEEE Transactions on Industrial Application*, pp. 840-843, 2002.

저 자 소 개



이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2002년~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 전기·전자·메카트로닉스 공학부 조교수. 당 학회 편집위원.