

구형파 2-Hall Sensor를 이용한 영구자석형 동기전동기의 벡터 제어

(Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Using Rectangular 2 Hall Sensors)

공태웅 · 이정호 · 유재성 · 이원철 · 김재형 · 원충연*

(Tae-Woong Kong · Jung-Hyo Lee · Jae-Sung Yu · Won-Cheol Lee · Jae-Hyung Kim · Chung-Yuen Won)

요 약

본 논문은 고가의 위치 측정 센서인 엔코더나 레졸버를 사용하지 않고 구형파를 발생시키는 2개의 홀센서를 사용하는 벡터 제어방식을 제안하였다. 이 방식은 엔코더 출력 펄스 신호 대신에 2개의 홀센서에서 발생되는 구형파 신호를 4채배한 신호를 이용하여 속도와 위치를 추정한다. 구형파를 발생시키는 2개의 홀센서로서 영구자석형 동기전동기의 벡터 제어를 구현하였을 때 정격속도 범위 내에서 안정적으로 제어되는 것을 실험과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 2개의 홀센서를 이용한 벡터 제어는 전체 시스템의 비용을 절감시킬 뿐 아니라, 협소한 공간에도 취부 할 수 있으므로 엔코더나 레졸버의 장착이 어려운 곳에 적용될 수 있다.

Abstract

This paper proposes a new vector control method using two rectangular hall sensors instead of using the expensive encoder and resolver. The proposed method estimates the speed and rotor position by using the quadruple of two hall sensors signals instead of encoder signal. The proposed new speed estimation method is stable under the rated speed range. This algorithm will be able to moderate prices of the whole system and apply to the condition unfitted with encoder and resolver.

Key Words : Permanent magnet synchronous motor, Hall sensor, Vector control

1. 서 론

영구자석형 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)의 벡터 제어를 구현하기 위해서는 전동기의 속도와 위치 정보가 필요하다. 벡터 제어를 구현할 때 회전자의 위치는 고정자의 여자시점을 결정하기 위해 반드시 필요한 정보이며,

* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
Tel : 031-290-7115, Fax : 031-290-7179
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr
접수일자 : 2007년 11월 9일
1차심사 : 2007년 11월 13일
심사완료 : 2007년 11월 27일

속도 제어 및 토크 제어를 위한 시스템을 구현하려면 전동기의 정확한 속도 측정이 필요하다[1-3].

전동기의 속도와 위치 측정을 위해서 엔코더 또는 레졸버와 같은 위치 센서를 사용하고, M 방식, T 방식 또는 M/T 방식을 사용하여 속도를 추정하는 것이 일반적인 방법이다. 전동기의 회전자가 회전함에 따라서 일정한 간격으로 펄스를 발생시켜주는 증분식 엔코더와 회전자의 절대 위치를 판별하여 검출하는 절대식 엔코더가 주로 사용되고 있다.

하지만 엔코더와 레졸버는 고가이므로 실제 산업 현장에서 전동기의 위치 센서로 적용하기 힘들다. 특히 세탁기와 같은 저가의 가전제품에는 가격 상승의 원인이 되므로 적용이 불가능하다. 또한 엔코더와 레졸버와 같은 광학식 위치센서는 그 크기와 내구성에 있어 약점이 있기 때문에 취부 할 때에도 어려움이 있다[4].

이러한 문제를 해결하기 위해서 저가의 홀센서를 이용한 센서리스 벡터제어에 관한 연구가 계속 진행되고 있다. 기존의 연구 결과는 센서리스 방법을 사용하여 전동기를 벡터 제어할 때 저속에서 위치 추정이 불가능한 단점을 보완하기 위해서 홀센서를 사용한다[4-6].

그러나 이러한 방법은 복잡한 센서리스 알고리즘을 사용하며 속도에 따라서 홀센서를 이용하는 방식과 센서리스 알고리즘을 이용하는 방식의 절환이 필요한 단점을 갖는다.

따라서 본 논문은 기존의 구형파를 발생하는 2개의 홀센서와 T 방법을 응용한 간단한 속도 및 위치 추정 방법을 사용하여 PMSM을 벡터제어 하는 방법에 대하여 제안하였다.

2. 구형파 2-Hall Sensor를 이용한 속도 측정과 벡터제어

벡터 제어를 위해서는 전동기의 정확한 위치와 속도 측정이 필요하다.

기존의 속도 측정 방법인 M 방법, T 방법 그리고 M/T 방법은 고속, 저속 그리고 고속과 저속에서 각각 장점을 갖는 속도 측정 방식이다[1].

그러나 이 방법들은 모두 엔코더나 레졸버와 같은

고가의 속도 측정 장비를 사용하여야 하기 때문에 전체적인 시스템의 가격 상승을 가져오게 된다.

본 장에서는 엔코더나 레졸버를 대신해 구형파를 발생시키는 2개의 홀센서를 사용하여 속도와 위치를 추정하고 벡터 제어를 구현한다.

2.1 구형파 2 홀센서를 이용한 속도 측정 방법

2개의 홀센서를 이용한 속도 측정 방법은 2개의 홀센서에서 90° 간격으로 발생하는 구형파를 이용한 속도 측정 방법이다.

기존의 속도 측정 방법인 T 방법은 엔코더의 한 주기가 클럭 펄스를 계수할 주기가 된다.

그러나 제안하는 속도 측정 방법은 그림 1에서와 같이 홀센서의 신호가 상승 또는 하강하는 부분을 검출하여 그 신호를 속도 측정 주기로 결정한다. 이 때 검출된 신호는 T 방법에서 엔코더 입력 신호의 rising edge와 같은 역할을 한다. 그리고 그림 2에서와 같이 각각의 검출 신호마다 EPLD에서 발생시킨 20[kHz]의 일정한 펄스들을 계수하여 속도를 측정한다.

이 때 DSP로 처리할 수 있는 20[kHz]의 펄스 수는 32,767개이므로 펄스 수가 32,767개가 되면 초기화가 된다.

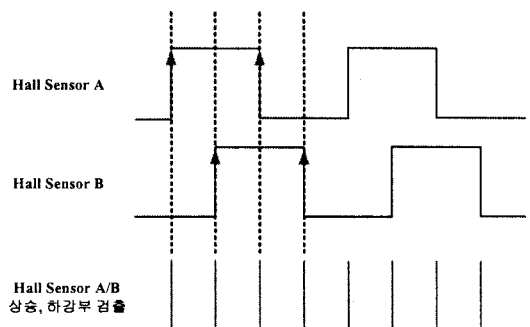


그림 1. 홀센서 A/B의 신호와 상승, 하강 검출 신호
Fig. 1. Hall sensor A/B signal, Edge capture signals

예를 들면 홀센서 A의 상승 신호와 홀센서 B의 상승 신호사이, 그리고 홀센서 B의 상승 신호와 홀센서 A의 하강 신호사이가 속도 측정 주기가 된다.

구형파 2-Hall Sensor를 이용한 영구자석영 동기전동기의 벡터 제어

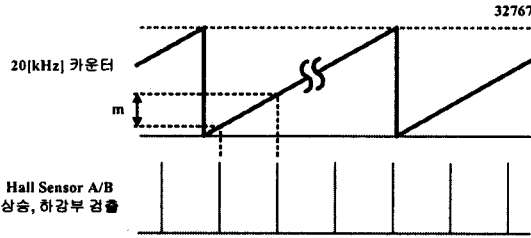


그림 2. 홀센서 A/B의 상승, 하강 검출 신호와 20[kHz] 신호를 사용한 속도 측정
 Fig. 2. Speed measurement that using hall sensor A/B edge capture signal and 20[kHz] signal

그림 3은 홀센서 A와 홀센서 B 신호의 상승 또는 하강하는 시점을 검출하는 EPLD 내부의 논리 회로를 나타낸다.

홀센서 신호와 D-Flipflop에 의해 지연된 신호가 논리 연산자 XOR에 의해 연산되면 홀센서 A와 홀센서 B의 상승 또는 하강시의 검출 신호를 얻을 수 있다.

그리고 속도 측정을 위한 카운터 신호는 EPLD를 이용하여 2[MHz]의 발진기 신호를 20[kHz]로 분해하여 사용하였다.

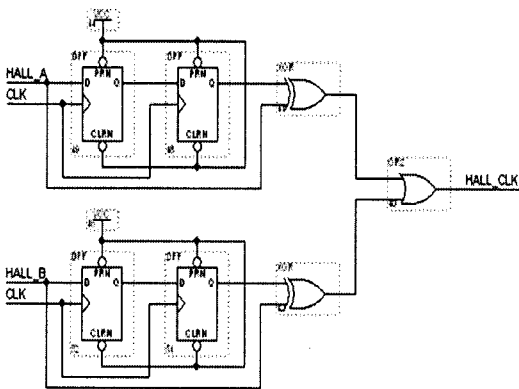


그림 3. 홀센서 A, B 신호의 상승, 하강 시점 검출회로
 Fig. 3. Edge signal of hall sensor A/B detection circuit

홀센서 A와 B의 신호가 상승 또는 하강하는 시점을 검출한 신호의 주기는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{m}{20[kHz]} \quad (1)$$

여기서 m은 속도 측정을 위한 홀센서의 상승, 하강 신호 사이에 계수된 20[kHz]의 펄스 수를 나타낸다. 주기에 관한 식을 주파수에 관한 식으로 바꾸어 주면 식 (2)와 같이 바꿀 수 있다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{20[kHz]}{m} \quad (2)$$

식 (2)에서 구한 주파수(f)를 사용하여 전동기의 회전 속도를 구하면 식 (3)과 같다.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot \frac{20[kHz]}{m} \quad [rad/sec] \quad (3)$$

식 (3)에 $\frac{60}{2\pi}$ 을 곱하여 주면 식 (4)와 같이 [rpm]으로 표현되는 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi \cdot \frac{20[kHz]}{m} \cdot \frac{60}{2\pi} \\ &= \frac{20[kHz] \cdot 60}{m} \quad [rpm] \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 이 때 식 (4)는 일반적인 2극기일 경우이다. 따라서 구하고자 하는 전동기의 속도를 계산하기 위해서는 식 (4)에 PMSM의 쌍극수로 나누어 주어야 한다.

이 점을 고려하여 식으로 정리하면 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\omega = \frac{20[kHz] \cdot 60}{m \cdot P_{pair}} \quad [rpm] \quad (5)$$

본 논문에서는 식 (5)를 사용해서 PMSM의 속도를 구하고 이 속도를 적분해서 회전자의 위치를 구하게 된다.

2.2 구형파 2-홀센서를 이용한 벡터제어

PMSM 벡터제어를 위해서는 3상의 전압과 전류에 대해서 d-q 정지 좌표계, d-q 동기 좌표계로의

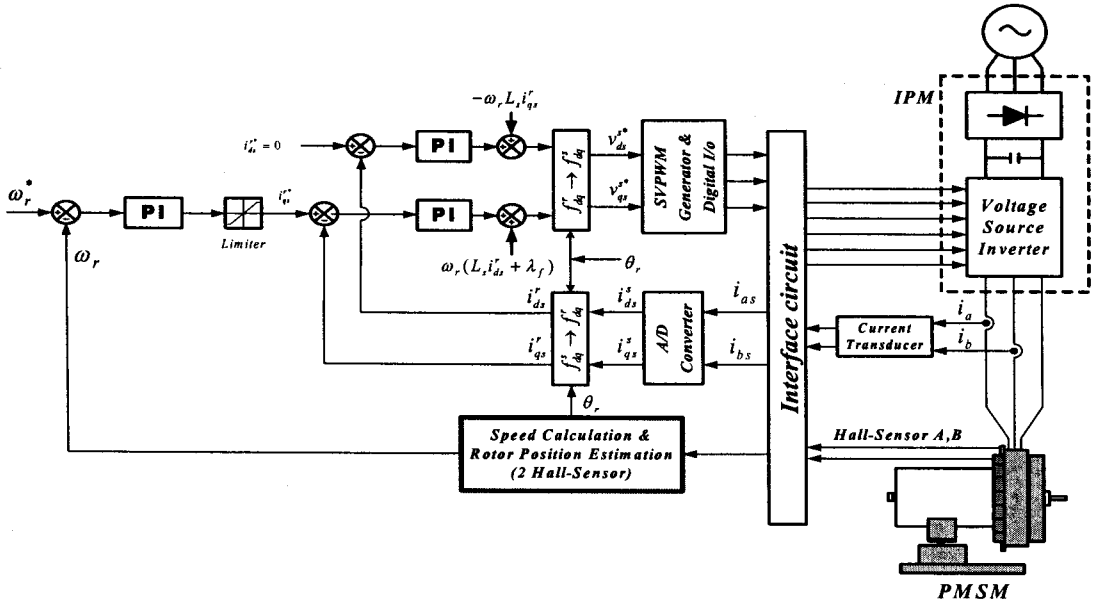


그림 4. PMSM의 전체 제어 블록도
Fig. 4. Control block diagram of PMSM

변환이 필요하다.

이 때 정지 좌표계에서 동기 좌표계로 변환하기 위해서는 회전자의 속도와 위치 정보가 필요하다.

그리고 속도 제어 및 토크 제어를 하기 위해서는 전동기의 정확한 속도 측정이 필요하다[1, 9].

앞 절에서 고가의 엔코더나 레졸버를 사용하는 대신 2개의 홀센서를 사용하여 속도를 측정하는 방법에 대하여 제안하였다. 그림 4는 본 논문에서 제안하는 속도 측정 방법을 이용하여 PMSM의 벡터제어를 구현하기 위한 전체 제어 블록도이다.

그림 4와 같이 d축 전류와 q축 전류를 분리하여 제어함으로써 PMSM의 빠른 과도응답을 갖는 토크 제어가 가능하도록 하였다[1, 7-8].

PMSM의 벡터 제어시 엔코더나 레졸버를 이용하면 이득값을 높게 설정하여 빠른 응답을 얻을 수 있다.

그러나 2개의 홀센서를 이용할 경우에는 회전자의 위치 정보를 전기각 90°마다 보정하므로 엔코더나 레졸버보다 동적 응답특성이 저하된다.

그림 5는 PMSM의 전체 제어 블록도 중에서 속도 계산과 회전자 위치 추정을 하는 부분의 세부 블록도이다. 입력받은 홀센서 A/B의 신호와 20[MHz]의

클럭을 내보내는 발진기의 신호를 EPLD에 입력시켜준다.

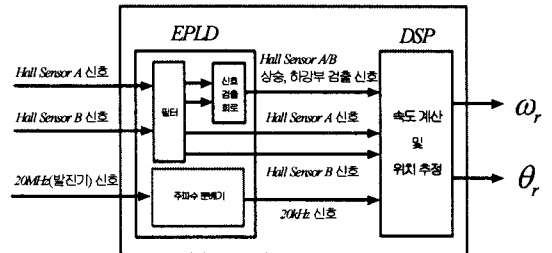


그림 5. 속도 계산과 회전자 위치 추정을 위한 세부 블록도
Fig. 5. Speed calculation and rotor position estimation block diagram

EPLD의 내부논리회로는 그림 3과 같이 홀센서 신호의 상승 또는 하강하는 시점을 검출 하는 부분과 홀센서 신호의 노이즈를 제거하기 위한 필터와 20[MHz]의 클럭을 20[kHz]로 변환해 주는 회로로 구성되어 있다. EPLD를 통해서 나온 신호들은 DSP에서 연산되어 회전자의 속도와 위치를 추정하게 된다.

구형파 2-Hall Sensor를 이용한 영구자석형 동기전동기의 벡터 제어

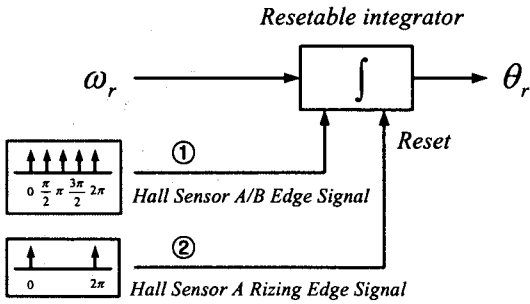


그림 6. 회전자의 위치 보정을 위한 블럭도
Fig. 6. Block diagram for rotor position correction

그림 6은 식 (5)를 사용하여 구한 속도를 적분하여 회전자의 위치 정보를 얻는 방법에 대해서 나타내는 그림이다.

이 때 ①번 Reset신호의 경우 홀센서 A와 홀센서 B 신호의 상승 또는 하강하는 시점을 검출한 신호가 전기각 90° 간격으로 입력되면 적분의 출력을 초기화시킨다.

그리고 ②번 Reset신호의 경우는 홀센서 A의 신호가 상승하는 시점을 검출한 신호가 전기각 360° 간격으로 입력되면 적분의 출력을 초기화시킨다.

이는 각각 전기각 90°와 360° 마다 회전자의 위치를 보정해 주기 위해서 이다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 2개의 홀센서를 사용하여 PMSM의 벡터제어를 구현하였을 때의 특성에 대해서 알기 위해 PSIM 프로그램 6.0을 사용하여 시뮬레이션하였다.

PSIM 프로그램으로 앞에서 설명한 홀센서를 사용한 속도 측정 방식을 구현하기 위해서 DLL 블록을 사용하였다.

표 1은 시뮬레이션과 실험에 사용된 PMSM의 정격 및 파라미터를 나타내는 표이다.

그림 7은 홀센서 A와 그와 90°간격을 갖는 홀센서 B, 그리고 그 신호의 상승과 하강시점을 검출한 시뮬레이션 파형이다.

앞에서 설명한 것과 같이 홀센서 A와 홀센서 B는 90° 간격을 갖고 반복되고 있다. 그리고 시뮬레이

션 상에서 홀센서 A와 홀센서 B의 신호가 상승 또는 하강하는 시점에서 신호가 검출되는 것을 확인할 수 있다.

표 1. PMSM의 정격 및 파라미터
Table 1. Specification of PMSM

Specification of PMSM	
Rated speed	400[rpm]
Rated current	5.0[A]
Back EMF constant	450[V _{pk} /krpm]
Number of Poles	24
Phase resistance	3.1[Ω]

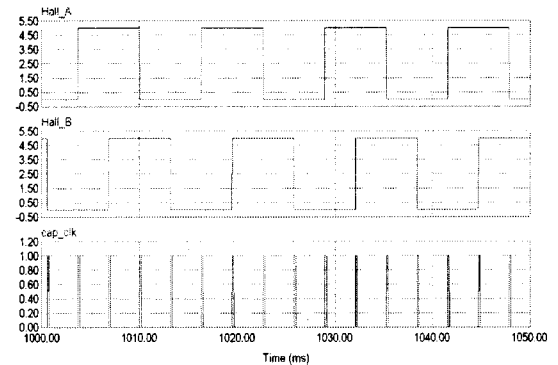


그림 7. 홀센서 A, B와 상승/하강 시점 검출 신호
Fig. 7. Hall sensor A/B and Edge capture signals

그림 8은 홀센서 A와 홀센서 B와 전동기의 회전자 위치를 나타내는 시뮬레이션 파형이다.

정회전시 홀센서 A를 기준으로 θ가 발생하는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 300[rpm]의 속도 지령을 주었을 때의 속도 응답, 그리고 d축과 q축의 전류를 나타내는 시뮬레이션 파형이다.

그림 9에서 2개의 홀센서를 사용하여 추정된 속도 정보를 사용하여 PMSM 벡터제어 운전을 하면 저속 영역에서 속도가 상승하다가 하강하여 다시 상승을 시작하는 것을 볼 수 있다.

이는 초기에 저속으로 회전할 때 속도를 측정하는 주기인 홀센서 A와 홀센서 B의 상승 또는 하강 신호가 지령 속도에 도달했을 때보다 천천히 발생한다.

이러한 이유로 회전자의 속도 정보를 측정하는 주기가 길어져서 속도 정보의 업데이트가 늦어지게 된다.

따라서 일정 속도에 도달하기 전까지는 속도의 오차가 발생하게 된다.

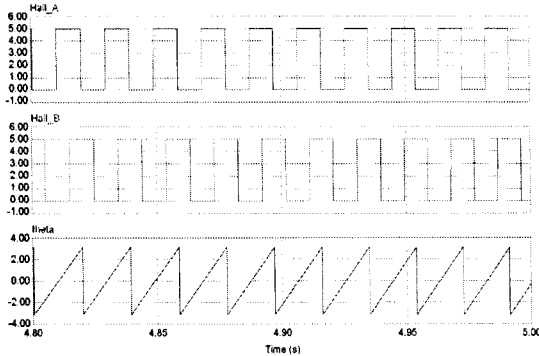


그림 8. 홀센서 A, B와 회전자의 위치 (θ) 파형
Fig. 8. Hall sensor A/B and theta waveforms

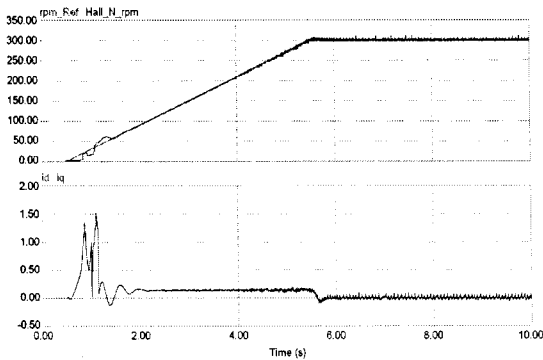


그림 9. 속도 지령, 속도 응답 그리고 회전자 위치 (θ) 파형
Fig. 9. Speed reference, Speed response, Theta waveforms

4. 실험 결과

4.1 실험 시스템의 구성

제안하는 알고리즘에 대해서 아래와 같은 실험을 통하여 검증하였다. 그림 10은 실험에 사용된 PMSM에 홀센서를 취부한 모습을 나타낸다.

그림 11은 실험에 사용된 제어용 인버터와 홀센서를 사용하여 속도 측정을 하기위한 EPLD 회로이다.

실용용 인버터는 전류제어, 속도제어의 원활한 수행을 위해서 Texas Instrument사의 고성능 32비트 DSP소자인 TMS320F2811을 사용하였다.

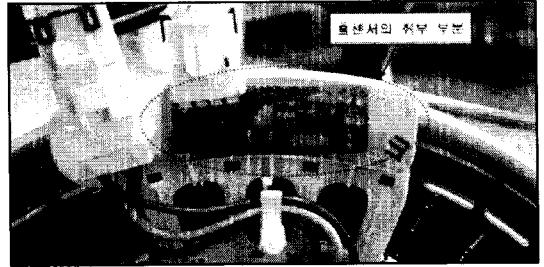


그림 10. 외전형 PMSM의 홀센서 취부부분
Fig. 10. Outrotor type PMSM and Hall sensors

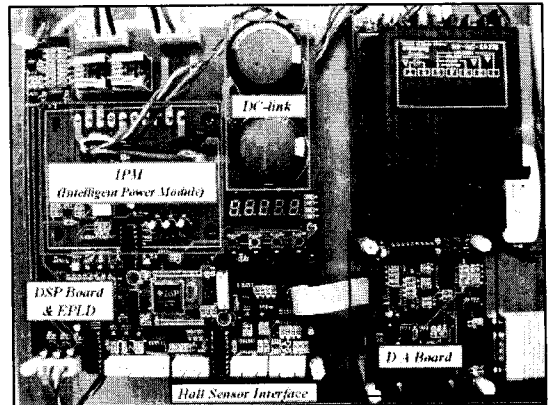


그림 11. PMSM 구동용 제어용 인버터와 EPLD 회로
Fig. 11. Inverter and EPLD circuit for control of PMSM

그리고 DC-link 전압을 생성할 수 있는 정류기와 가변전압, 주파수를 생성할 수 있는 인버터를 하나의 모듈에 내장하고 있는 미쓰비시사의 IPM (Intelligent Power Module)을 사용하여 하드웨어를 가볍고 작게 설계하였다.

그리고 실험 결과는 D/A를 사용하여 오실로스코프로 확인하였다.

4.2 실험 결과

제안하는 알고리즘에 대해서 아래와 같은 실험을 통하여 검증하였다.

구형파 2-Hall Sensor를 이용한 영구자석형 동기전동기의 벡터 제어

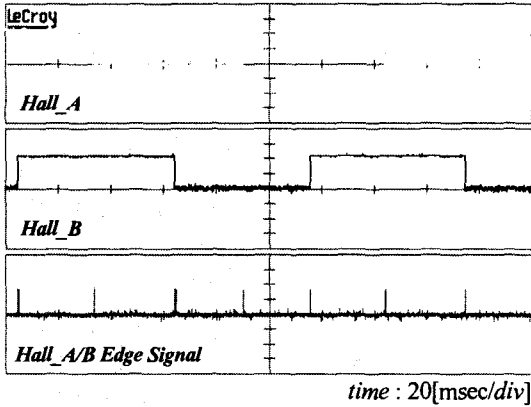


그림 12. 홀센서 A/B 신호, 홀센서 신호의 상승 및 하강신호 검출 파형
Fig. 12. Hall sensor A/B signal, and Edge capture signal

그림 12는 홀센서 A와 홀센서 B의 신호와 그 신호들의 상승 또는 하강 시점을 검출한 파형이다.

홀센서 A와 홀센서 B의 파형이 90°의 간격을 갖고 홀센서 신호의 상승 및 하강 신호가 잘 검출되는 것을 볼 수 있다.

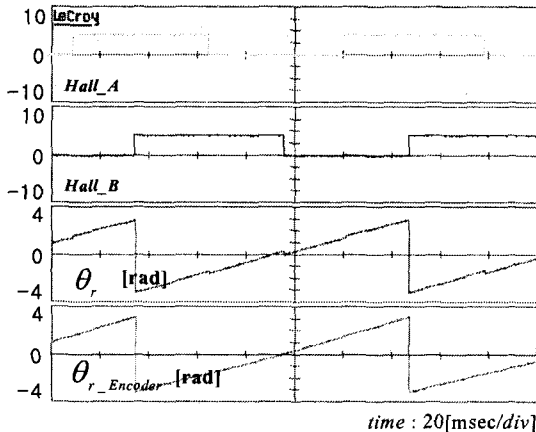


그림 13. 홀센서 A/B 신호, 회전자 위치 (θ) 파형(홀센서 A/B 신호:2[V/div], 회전자 위치:1[V/div])
Fig. 13. Hall sensor A/B signal, rotor position (theta) waveform

그림 13은 홀센서 A와 홀센서 B의 신호와 2개의 구형파 홀센서를 사용해서 얻은 회전자 위치 (θ),

와 엔코더를 사용해서 측정된 실제 회전자 위치 ($\theta_{r_Encoder}$)를 나타내는 파형이다.

홀센서를 사용해서 얻은 회전자의 위치 파형은 엔코더로 측정된 회전자의 위치와 다르게 일정 간격을 두고 약간씩 수정되는 것을 확인할 수 있다.

이는 속도를 적분하여 회전자 위치를 구할 때 홀센서 A/B의 상승, 하강 구간을 검출한 신호가 입력되는 전기각 90°마다 회전자의 위치가 보정되는 것을 보여준다.

정방향으로 속도 지령을 인가하였을 경우에 회전자의 위치 (θ_r)는 홀센서 A의 신호를 기준으로 발생하여야 한다. 그러나 본 논문의 실험에 사용된 전동기의 경우 제작할 때 발생한 오차로 인해서 회전자의 위치를 90° 만큼 선행시켰다.

따라서 정방향으로 속도 지령을 인가하였을 경우에 홀센서 A의 신호를 기준으로 θ_r 이 90° 만큼 앞서서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 역방향으로 속도 지령을 인가하였을 때에도 홀센서 B의 신호와 90° 만큼 차이를 두고 θ_r 이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

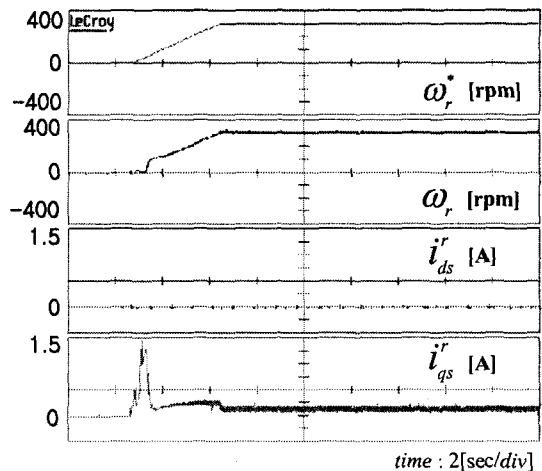


그림 14. 속도지령과 속도 응답, d축/q축 전류 파형
Fig. 14. Speed reference, Speed response, d-axis, q-axis current waveforms

그림 14는 0[rpm]에서 300[rpm]으로 속도 지령을 인가하였을 때의 속도 응답 파형과 그때의 d축 전류

와 q축 전류를 나타내는 파형이다.

저속에서는 속도 응답 파형이 속도 지령에서 조금 벗어나지만 그 이후에는 속도 지령을 잘 추종하여 제어가 잘 되는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 엔코더나 레졸버를 사용하여 속도 정보를 얻는 대신 저가의 구형과 홀센서 2개를 사용하여 속도를 측정하고 그 속도 정보를 사용하여 벡터 제어를 구현하는 방법에 대해서 제안하였다.

실험용 전동기인 PMSM의 정격 속도를 지령속도로 하였을 때에는 고가의 엔코더나 레졸버를 사용하지 않고 저가의 홀센서를 사용하여 속도 추정기능을 구현할 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다.

제안하는 알고리즘을 사용하면 전체 시스템의 가격을 낮출 수 있을 뿐 아니라 엔코더나 레졸버를 장착하기 어려운 곳에서도 벡터 제어를 적용할 수 있다.

본 논문은 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

References

- [1] 설승기, "전기기기 제어론" 도서출판 브레인 코리아, 2002.
- [2] B. K. Bose, "Power electronics and variable frequency drives-Technology and application", IEEE Press, 1996, 9.
- [3] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, 1986.
- [4] Hyunbae Kim, Robert D. Lorenz, "Using Low Resolution Position Sensors in Bumpless Position/Speed Estimation Methods for Low Cost PMSM Drives", Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting, Volume 4, 2-6 Oct, 2005.
- [5] Fabio Giulii Capponi, Giulio De Donato, Luca Del Ferraro, Onorato Honorati, Michael C. Harke, Robert D. Lorenz, "AC Brushless Drive with Low-Resolution Hall-Effect Sensors for Surface-Mounted PM Machines", IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 42, No. 2, March/April, 2006.
- [6] Salih Baris Ozturk, Bilal Akin, Hamid A. Toliyat, Farhad Ashrafzadeh, "Low-Cost Direct Torque Control of

Permanent Magnet Synchronous Motor Using Hall-Effect Sensors", APEC '06. Twenty-First Annual IEEE, 19-23 March, 2006.

- [7] P. Vas, "Vector Control of AC Machines", Clarendon Press, 1990.
- [8] I. Boldea, S. A. Nasar, "Electric Drives", CRC Press, Florida, USA, 1999.
- [9] 목형수, 이정민, 최규하, 김상훈, 조영훈, "PMSM의 벡터 제어시 위치센서 오차에 의해 발생하는 토오크 리플에 대한 해석과 그 보상 방법", 전력전자학회논문지 Vol.12, No.6, pp. 449~455, 2007.

◇ 저자소개 ◇

공태용 (孔泰雄)

1980년 12월 30일생. 2006년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 현재 성균관대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정.

이정호 (李稹孝)

1982년 9월 20일생. 2006년 2월 건국대학교 전기공학과 졸업. 현재 성균관대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정.

유재성 (柳在成)

1975년 9월 2일생. 2002년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2004년 2월 성균관대학교 대학원 에너지시스템공학과 졸업(석사). 현재 성균관대학교 대학원 메카트로닉스협동과정 박사과정.

이원철 (李元喆)

1977년 4월 9일생. 2003년 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2004년 2월 동대학원 전자전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 현재 동대학원 전자전기컴퓨터공학부 박사과정.

김재형 (金宰亨)

1975년 12월 3일생. 2000년 2월 동의대학교 전기공학과 졸업. 2002년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 성균관대학교 대학원 태양광협동과정 박사과정.

원충연 (元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월 ~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006~2007년 한국조명전기설비학회 편수위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2007년~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년~현재 월간 전기설비 편집자문위원. 2008년~2009년 한국조명·전기설비학회 평의원. 현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.