

홀센서를 이용한 모노레일 PMSM 견인전동기의 벡터제어

Vector control of Monorail PMSM traction motor using the hall-effect sensor

손동혁†
Dong-Hyeok Son

김명수*
Myoung-Su Kim

최다운**
Da-Woon Choi

조운현***
Yun-Hyun Cho

Abstract

This paper supposes the vector control algorithm to estimate the rotor position of permanent magnet synchronous traction motor using the hall-effect sensor. The hall-effect provides 60 electrical degrees resolution in rotor position sensing and it is very low resolution. The algorithm makes resolution high as optical encoders or electromagnetic resolver. If necessary, the reference rotor position angle is controlled by adjusting the variable. When a rotor position sensor such as either a optical encoder or a electromagnetic resolver is misalignment, it is useful to align with those. The method on adjusting the reference rotor position angle can compensate for misalignment error degrees by 60 electrical degrees.

1. 서 론

철도운송은 오랜 역사와 더불어 추진방식이 변화되고 발전되어 왔다. 철도 추진 장치에 전동기가 사용됨으로써 운송의 다변화, 고속화 등을 이룰수가 있었다. 철도는 대규모 물류와 승객을 수송해야 하기 때문에 추진 시스템의 고토크 출력, 신뢰성 등이 요구된다. 모노레일과 같이 철도차량이 소형화된 경우에는 기존의 철도차량에 비해 전동기의 고속운전, 고토크 영역이 불필요하게 된다. 그러나 모노레일은 차량의 면적이 작기 때문에 전동기의 소형화가 되어 하고, 도심에서 운행되기 때문에 저소음화가 이루어져야 한다. 지하철과 철도차량에 적용된 유도전동기는 그 고유특성 때문에 모노레일 견인전동기로 타당하지 않다. 유도전동기 이외에 다른 회전원리를 갖는 전동기 중 pmsm 전동기를 모노레일 견인전동기로 검토하였다.

영구자석형 동기전동기는 제어 인버터가 회전자 위치를 인지 해야 기동이 가능하다. 그렇기 때문에 회전자 위치 검출 센서를 부착하며 레졸버, 엔코더, 홀센서 등 여러 가지 형태가 있다. 모노레일용 견인전동기에서 회전자 위치 검출용 센서로서 홀센서를 사용하였다. 가격면에서 저렴하고 정밀한 위치제어를 요구하는 것이 아니기 때문에 고가의 센서를 사용하지 않아도 된다. 그러나 홀센서를 사용하면 3상 abc 축과 d-q축의 각도를 마이크로프로세서에서 연산을 해주는 과정이 있어야 한다.

본 논문에서는 홀센서 신호와 역기전력의 관계를 통해 홀센서를 부착 위치를 밝히고, 회전자 위치에 따라 각 θ 의 초기값을 선정하여 d-q 좌표변환에 필요한 계산을 하였다. 주행저항을 극복하는 견인력을 얻기 위해 pmsm제어로 기동하여 벡터제어로 전환하였다.

† 책임저자 : 손동혁
E-mail : orpheusad@nate.com
TEL : (051)200-6952 FAX : (051)200-6388
* 비회원 : SANSystech, 대표이사
** 비회원 : 동아대학교, 전기공학과, 박사과정
*** 교신저자 : 동아대학교, 전기공학과, 교수

2. 본 론

모노레일 견인전동기는 영구자석형 동기전동기이다. pmsm 전동기의 제원은 표1에 나타내었다. 영구자석형 동기전동기 인버터는 전류제어기를 가지며 3개의 홀센서를 정보를 통하여 회전자 위치를 검출한다. 전류제어기는 전류 피드백 값과 회전자 정보를 이용하여 d축, q축 지령전류 값을 계산한다. d축 q축 지령전류를 계산하기 위해서는 d축과 a상 축 사이의 각 θ 에 대한 값이 필요하지만 3개의 홀센서는 각 θ 에 대해 6개의 정보만을 제공할 수 있다. 홀센서의 신호만으로 영구자석형 동기전동기를 벡터제어 할 수 없다. 하지만 홀신호와 회전속도를 이용하여 각 θ 에 대해 연산을 하면 벡터 제어를 구현할 수 있다.

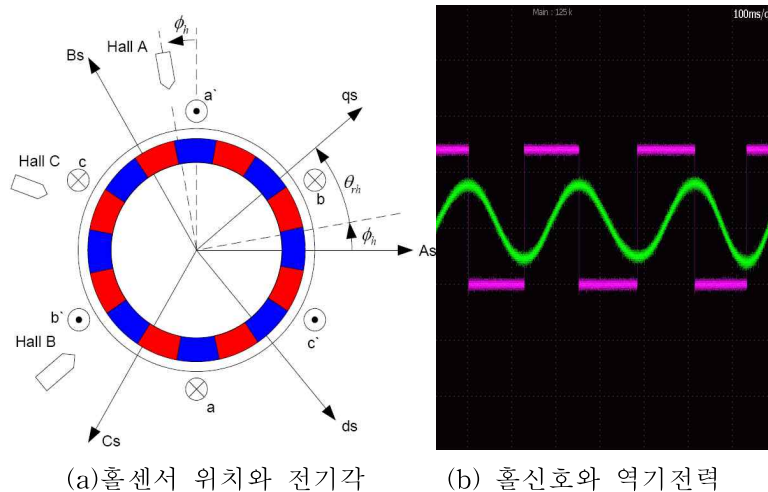
도표 1. 영구자석 AC 동기전동기 사양

| 사양 | 단위 | |
|------|-------|------|
| 정격출력 | kW | 100 |
| 정격전압 | V(dc) | 750 |
| 극 수 | poles | 16 |
| 정격속도 | rpm | 3000 |
| 정격토크 | N·m | 300 |

2.1 회전자 위치 검출

2.1.1 홀센서의 위치

3개의 홀센서는 그림 1과 같은 위치에 있다. 홀센서의 간격은 60도이다. 그림 1은 3상 abc 축, d-q축 그리고 홀센서의 관계를 도시하였다. 3개의 홀센서 A, B, C는 고정자 권선 a, b, c에 정렬되어야 한다. 만약 홀센서 A의 위치가 고정자 권선 a와 ϕ_h 만큼 어긋나 있다면, 3상 abc 축과 d-q축은 ϕ_h 만큼 어긋나게 된다. ϕ_h 의 각도가 크게 되면 전동기는 구동을 못하게 된다. 홀센서 위치는 Hall A edge 상승신호가 전동기의 역기전력보다 전기각 90도 앞선 곳에 고정한다. Hall B, Hall C에 대해서도 이와 같은 방법으로 위치시킨다. 그림 2에서 보는 것과 같이 $\sin(\theta)$ 에 대해 전기각 90도 앞선 곳에서 Hall edge 신호가 상승되는 것을 알 수 있다.



(a) 홀센서 위치와 전기각

(b) 홀신호와 역기전력

그림1. 홀센서의 위치

2.1.2 홀센서 신호를 이용한 좌표변환

3상 abc 축과 d-q축의 각도를 θ 라고 한다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta = \theta_h + \phi_h \quad (1)$$

θ_h 는 홀센서 축과 d-q축과의 각이고, ϕ_h 는 홀센서 축과 3상 abc 축과의 각이다. 이 때의 각은 전기각이다. 사인, 코사인법칙에 의해 다음과 같이 각 θ 의 사인과 코사인 값을 알 수 있다.

$$\sin(\theta) = \sin(\theta_h)\cos(\phi_h) + \cos(\theta_h)\sin(\phi_h) \quad (2)$$

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_h)\cos(\phi_h) - \sin(\theta_h)\sin(\phi_h) \quad (3)$$

그림 2를 보면 $\pi/6$ 에서 $5\pi/6$ 구간에서 Hall B와 Hall C는 일정하지만 Hall A는 신호가 변한다. 이 구간에서 Hall A 값과 상관없이 $\pi/6 \sim \pi/2$ 와 $\pi/2 \sim 5\pi/6$ 의 사인값은 $\pi/2$ 에서 대칭적으로 동일하다. 이것만으로는 홀센서를 이용하여 회전자 위치를 추정할 수 없다. 그래서 홀센서 신호에 따라 초기값을 두어야 한다. 식(5)은 다음과 같이 표현할 수 있다. 홀센서 신호와 상수 A,B 그리고 θ 에 대한 초기값은 다음표와 같다.

$$\sin(\theta) = A\cos(\phi_h) + B\sin(\phi_h) \quad (4)$$

$$\cos(\theta) = B\cos(\phi_h) - A\sin(\phi_h) \quad (5)$$

도표 2. 홀센서 신호에 따른 초기값

| 홀센서 신호 | | | 초기값 | | |
|--------|--------|--------|----------|---------------|--------|
| Hall A | Hall B | Hall C | θ | A | B |
| 0 | 0 | 1 | $4\pi/3$ | $-\sqrt{3}/2$ | $-1/2$ |
| 0 | 1 | 0 | $2\pi/3$ | $\sqrt{3}/2$ | $-1/2$ |
| 0 | 1 | 1 | π | 0 | -1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | $5\pi/3$ | $-\sqrt{3}/2$ | $1/2$ |
| 1 | 1 | 0 | $\pi/3$ | $\sqrt{3}/2$ | $1/2$ |

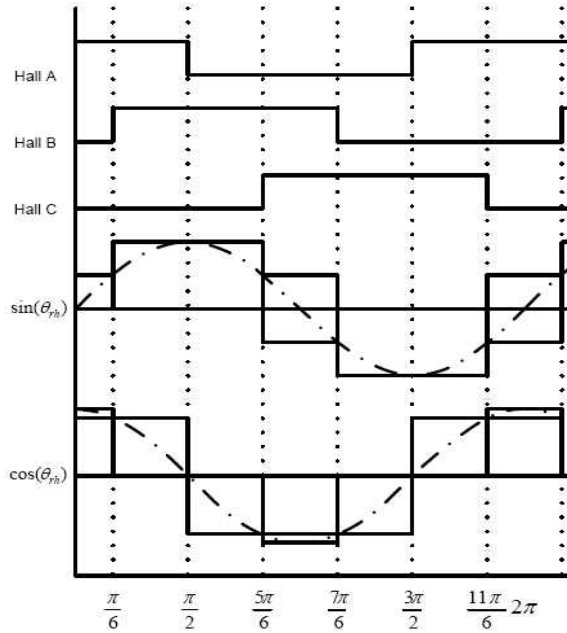


그림 2. 홀신호와 $\sin(\theta)$, $\cos(\theta)$

홀센서 신호를 이용하여 회전자의 속도를 계산할 수 있다. 다음과 같은 식에서 시간에 따른 θ 변위를 알 수 있다.

$$\omega \times \Delta t = \Delta\theta \quad (6)$$

$\Delta\theta$ 의 값으로 홀센서를 이용하여 $\sin(\theta)$ 과 $\cos(\theta)$ 의 값을 알 수 있다.

2.2 전동기 기동 및 운전

견인전동기는 기동 시에 부하상태에 있다. 차량무게, 노면의 마찰력, 노면 기울기 등으로 인하여 견인 전동기에서 초기 기동토크는 매우 커야 한다. 뿐만 아니라 홀센서의 초기값으로 회전자 위치를 파악하는 것은 $\pi/6$ 의 오차가 있으며 회전자가 회전을 해야만 $\sin(\theta)$ 과 $\cos(\theta)$ 값을 정확하게 계산할 수 있다. 전동기를 pmsm 제어로 기동을 하고 기동 후에 BLAC제어로 전환하면 전동기 초기 기동토크 문제와 $\sin(\theta)$ 과 $\cos(\theta)$ 값을 계산하는 문제를 해결할 수 있다. 그림 3은 전동기가 기동할 때의 전류 파형이다. 초기 부하상태보다 큰 기동토크가 발생할 때까지 DC전류를 증가시킨다. 그리고 난 후 pmsm 제어로 전 기각 1주기 동안 기동을 한 후 벡터제어로 전환한다.

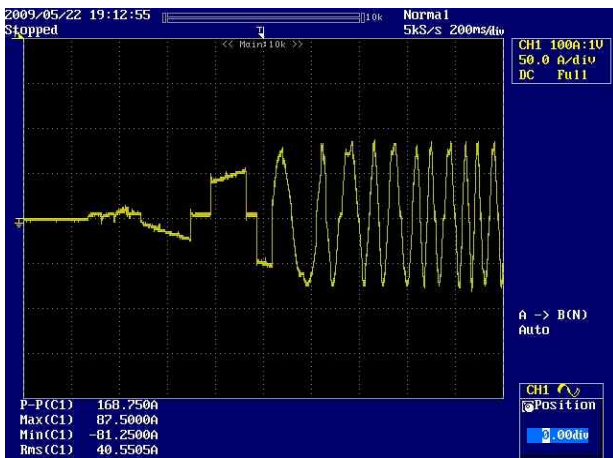


그림 3. 전동기 기동 시 전류파형

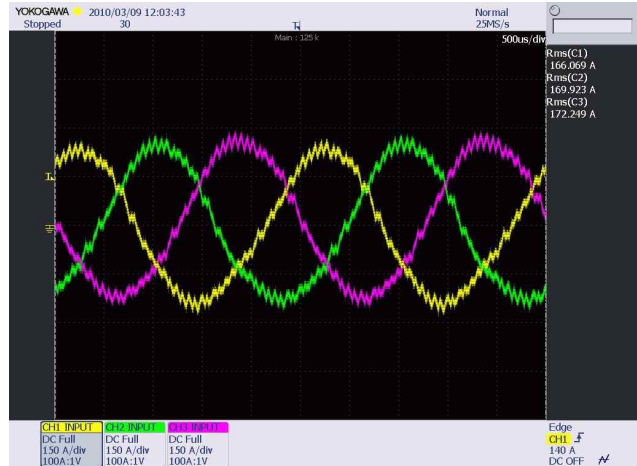


그림 4. 정격부하 시 전류파형



그림 5. PMSM 견인전동기 100kw 부하실험

3. 결 론

본 논문은 영구자석형 동기전동기의 제어에 대해 연구하였다. 초기 회전자 위치의 기준을 정하기 위해 홀센서의 위치와 초기값을 정하였다. 이를 바탕으로 bldc 제어로 기동하고 전기각으로 1주기가 지난 지점에서 벡터제어로 전환하였다. 전동기 회전자 검출 센서는 성능적인 측면에서 분해능이 뛰어나야 하고, 환경적인 측면에서 노이즈에 강해야 하며, 사용적인 측면에서 전동기의 취부가 쉬워야 한다. 이 모든 조건을 만족하는 센서를 선정하기는 쉽지 않다. 센서의 사용과 정확도는 전동기 제어 성능을 좌우하기 때문에 많은 연구가 이뤄지고 있다. 홀센서를 이용해 모노레일 사용환경에 적합한 벡터제어를 구현하고 실험으로 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. A. Corzine, "A Hybrid Observer for high performance brushless dc motor drives", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996
- [2] J. X. Shen, Z. Q. Zhu, D. Howe, "PM Brushless Drives with Low-Cost and Low-Resolution Position Sensors",
- [3] A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbeni, A. Di Napoli, "SVM PMSM Drive with Low Resolution Hall-Effect Sensors"