

분해능이 낮은 위치 센서를 이용한 표면부착형 영구자석 동기전동기의 토크 제어

전미림*, 조관열**, 이용균*, 전병호***, 이재현*, 목형수*

*건국대학교, **충주대학교, ***현대모비스

Torque Control of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Using Low Resolution Position Sensor

M.R Jeon*, K.Y Cho**, Y.K Lee*, B.H Jun***, J.H Lee*, H.S Mok*

*Konkuk Univ., **Chungju Univ., ***Hyundai Mobis

ABSTRACT

자동차의 조향 장치에서 연비 절감과 조향성능의 향상을 위해 연구되고 있는 전동식 파워스티어링 시스템은 기존의 유압식에 비해 소음과 진동이 발생하는 단점을 가지고 있다. 이를 감소시키기 위해 토크 리플을 줄이는 것이 관건이고, 토크 리플을 발생시키는 큰 원인 중 하나가 위치 센서 분해능 제한이다. 본 논문에서는 가격 절감을 위해 낮은 분해능의 위치 센서로 전동식 파워스티어링 시스템의 토크 리플을 저감하기 위해 위치 추정 기법을 제안하고, 실험을 통해 이를 검증하였다.

1. 서론

자동차에 있어 연비를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 최근 기계 혹은 유압으로 제어되던 장치들의 전기전자장치로의 대체가 활발히 연구되고 있다. 이러한 시스템 중 조향장치 부분에 있어 전동식 파워스티어링(EPS : Electric Power Steering) 시스템이 있다.

EPS 시스템은 전동기의 구동을 통해 조향력을 돕는 시스템으로 기존 유압 파워스티어링 시스템에 비해 연비를 감소할 수 있고, 부품수의 감소로 인한 경량화 및 단순화된 구조와 신뢰성 향상 등의 이점을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 EPS 시스템은 유압식 파워스티어링 시스템과 달리 실제 주행 시 진동 및 소음 문제가 발생된다.^[3]

실제 조향감에 큰 영향을 주는 것이 EPS 시스템의 전동기 구동 시 발생하는 토크 리플이다. 때문에 토크 리플 저감 방법이 필요하다는 것을 의미한다. 더구나 최근 EPS 시스템의 저비용화로 인해 위치센서의 분해능 감소, 낮은 가격의 전류센서 사용 등으로 토크 리플 발생의 원인이 심화되고 있다. 따라서 저비용화를 충족시키면서 조향 성능을 향상시키기 위한 연구가 필요하다.^[1,2]

본 논문에서는 저 비용화를 위해 낮은 분해능을 갖는 위치 센서가 사용된 EPS 시스템에서 발생하는 토크리플을 저감하기 위하여 위치추정기법을 제안하였다. 또한 위치 추정 기법을 통하여 고성능 토크 제어를 하고자 한다.

2. EPS 드라이브 시스템의 구성 및 개요

2.1 EPS 시스템의 구성

EPS 시스템의 구성도는 그림 1에 나타내었다. 운전자가 조

향휠을 조작하게 되면 조향휠의 토크가 토크센서로부터 측정된다. 이렇게 입력받은 토크신호가 EPS 제어를 수행하는 전자제어유닛(ECU : Electronics Control Unit)으로 전달된다. ECU에서는 입력토크에 따라 조향력을 보조하기 위한 전동기를 구동하고 전동기의 전류를 피드백 받아 제어하게 된다.

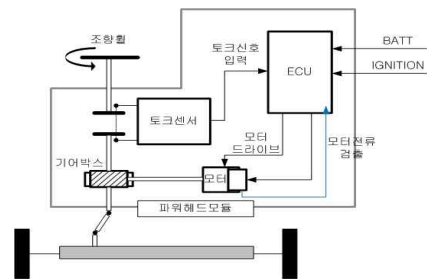


그림 1 EPS 시스템 구성도
Fig. 1. Block diagram of EPS system

2.2 표면부착형 영구자석 동기전동기 모델링

초기의 EPS 시스템은 제어가 편리한 영구자석 직류 전동기(PMDCM : Permanent Magnet DC Motor)가 주로 사용되었으나 PMDCM은 효율이 낮으며, 브러시로 인하여 내구성이 취약한 문제점 등이 있었다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 내구성과 경량화, 제어 성능을 고려한 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM : Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)를 이용하여 EPS 시스템을 구성하였다.^[2]

SPMSM의 모델링을 위한 영구자석형 동기전동기의 일반적인 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{abc} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{v}_{abc} , \mathbf{i}_{abc} 는 각각 고정자 전압과 전류를 나타내고, \mathbf{R}_s 는 상저항을 나타낸다. 또한 쇄교자속 $\boldsymbol{\lambda}_{abc}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\boldsymbol{\lambda}_{abc} = \mathbf{L}_s \mathbf{i}_{abc} + \boldsymbol{\lambda}_m \quad (2)$$

위의 전압 방정식을 동기좌표계로 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d}{dt} (L_q i_{qs}^e) + \omega_r L_d i_{ds}^e + \lambda_m \omega_r \quad (3)$$

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d}{dt} (L_d i_{ds}^e) - \omega_r L_q i_{qs}^e \quad (4)$$

전동기의 전압 방정식을 통해 토크 방정식을 구할 수 있다.

여기서 SPMSM에서는 $L_q = L_d$ 이므로 아래 식과 같다.^[4]

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_m i_{qs}^c \quad (5)$$

2.3 전류 제어 기법

EPS 시스템에서는 고성능 순시 토크 제어를 위해 벡터 제어를 사용한다. SPMSM의 벡터 제어를 위해서는 회전자 위치 및 속도 제어를 위한 센서가 필요하다. 본 EPS 시스템에서는 엔코더(Encoder)가 사용되었다.

엔코더를 이용한 속도측정 방법에는 M 방식, T 방식 그리고 M/T 방식이 있다.^[4] 기존 EPS 시스템에 사용된 2048 PPR(Pulse Per Resolution) 정도의 높은 분해능을 가진 엔코더에서는 M 방식을 사용하여 속도 측정에 사용되어 왔다. 그러나 본 논문에서 사용된 낮은 분해능을 가진 시스템에서는 기존의 M 방식을 사용하게 되면 저속에서의 정확도가 상대적으로 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 T 방식을 이용한 위치 및 속도 측정 방법을 제안한다.

3. 분해능이 낮은 위치센서를 이용한 위치 추정 기법

3.1 분해능에 따른 토크리플의 영향

위치센서의 분해능이 낮을 경우 엔코더 값의 검출 시점에서 실제 회전자 각과 제어기 상 측정값의 오차는 분해능이 높을 경우에 비하여 상대적으로 크게 된다. 만일 θ_d 를 엔코더의 측정각이라고 하면, 모터 극수를 고려한 엔코더 PPR과 측정각의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_d = \frac{2\pi n}{2 \times PPR} P \quad 0 \leq n \leq (PPR-1) \quad (6)$$

이 때 P 는 모터 극수를 의미하며, n 은 엔코더 펄스열의 인덱스를 나타낸다. 엔코더 PPR에 따른 토크 리플 평가 함수를 정의하기 위해 우선 실제각과 엔코더 각 사이의 측정각 오차의 최대값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\theta = \theta - \theta_d \rightarrow \Delta\theta_{\max} = \frac{2\pi}{2 \times PPR} P \quad (7)$$

엔코더 PPR에 따른 토크 리플 평가 함수는 다음과 같다.

$$\eta[p.u] = 1 - \cos\Delta\theta_{\max} \quad (0 \leq \eta \leq 1) \quad (8)$$

이론적으로는 약 120 PPR부터 각 오차에 따른 토크 리플이 1% 미만임을 알 수 있다. 그러나 실제 시스템의 경우 기계 시스템의 불안전성과 낮은 분해능으로부터 발생하는 전류 고조파 성분 등으로 인하여 토크 리플이 이론치 보다 크게 나타낸다.

따라서 정밀한 토크 제어가 요구되는 EPS 시스템의 경우 $\Delta\theta_{\max}$ 의 제한값을 줄이는 것이 필요하다.

3.2 T 방식을 이용한 위치 추정 기법

기존 고 분해능 위치 센서를 가진 EPS 시스템에서는 M 방식을 이용하여 위치 및 속도를 추정하였다. 그러나 본 논문에서는 128 PPR의 낮은 분해능 위치 센서를 사용하여 EPS 시스템을 구성하였으며, 이로 인해 발생하는 위치 오차 및 토크리플을 저감하고자 한다.

본 논문에서는 T 방식을 적용하여 위치 추정을 하였다. T 방식은 엔코더 펄스 사이의 시간을 측정하여 속도를 알아낸다. 이는 엔코더 펄스 보다 높은 주파수의 기준 클럭을 계수하여 속도를 측정하며, 측정된 속도를 적분하여 회전자 위치를 추정

하는 것이다. 이 방식에 대해서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

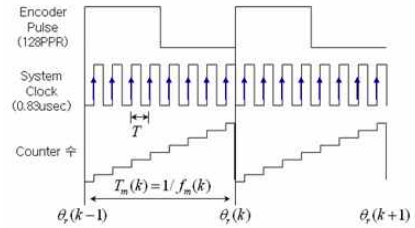


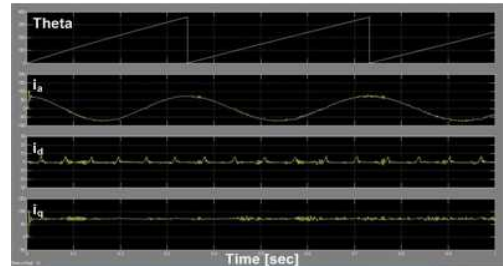
그림 2 회전자 위치 추정 알고리즘
Fig. 2. Rotor position estimating algorithm

$$\hat{\theta}_r(k+nT) = \theta_r(k) + \sum_{i=0}^n \omega_r(k) T \quad (9)$$

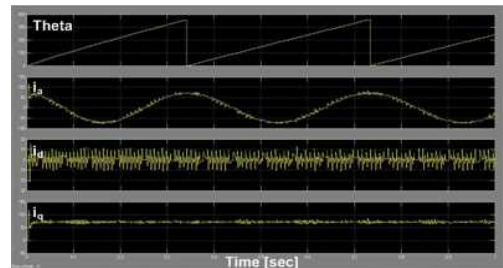
$$\omega_r(k) = 2\pi \times f_m \times pole_pair \quad (10)$$

여기서 ω_r 은 회전자의 각속도, T 는 카운팅하는 펄스의 주기, T_m 은 엔코더의 한 주기를 나타낸다.

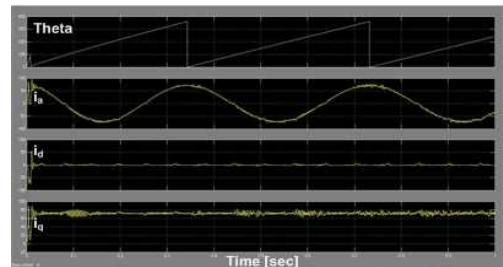
기본적으로 1.2MHz의 펄스를 카운팅하여 속도를 알아낸다. 그러나 저속에서의 펄스 개수가 많아지므로 이때는 전류제어 주기인 1.6kHz의 펄스를 계수하게 된다. 저속과 고속의 클럭 카운팅 변환은 16[rad/sec]에서 이루어지며, 속도 변화 시 안정적인 변환을 위해 히스테리시스 구간을 이용하였다.



(a) 2048 PPR



(b) 128 PPR



(c) 알고리즘 적용된 128 PPR.

그림 3 분해능 및 알고리즘 적용에 따른 회전자 위치 및 상전류, dq축 전류 시뮬레이션

Fig. 3. Simulation of Rotor position, phase current and dq current according to resolution and algorithm

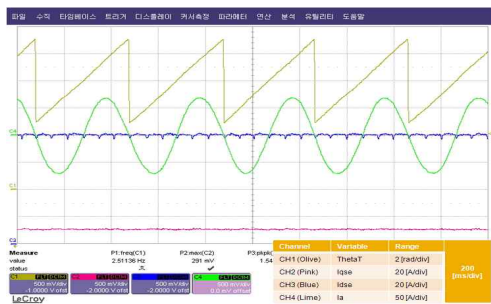
4. 시뮬레이션

본 논문에서는 제안된 알고리즘을 적용하여 EPS 시스템의 SPMSM의 전류 제어를 구현 했을 때의 특성을 해석하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 모의해석을 수행하였다.

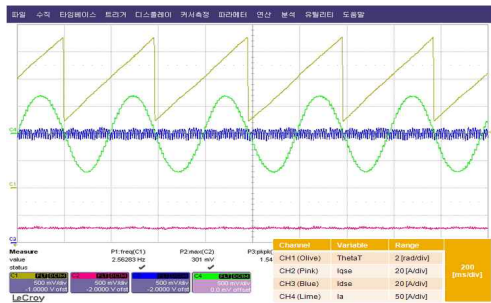
전류명령 발생 주기 및 속도 제어 주기는 420Hz, 전류 제어 주기는 1.68kHz 그리고 PWM 주기는 20kHz로 시뮬레이션 하였다.

그림 3은 2048 PPR, 128 PPR, 그리고 알고리즘이 적용된 128 PPR 전동기의 회전자 전기각, 상전류 및 d축, q축 전류를 나타낸다. 이를 통해 위치 추정 알고리즘의 타당성을 예측할 수 있다.

5. 실험 및 결과



(a) 2048 PPR



(b) 128 PPR



(c) 알고리즘 적용된 128 PPR.

그림 4 분해능 및 알고리즘 적용에 따른 회전자 위치 및 상전류, dq축 전류 파형

Fig. 4. Waveforms of Rotor position, phase current and dq current according to resolution and algorithm

제안된 알고리즘은 다음과 같은 시스템을 이용한 실험에 의해 검증하였다. EPS용 SPMSM에 $i_q = 70A$ 의 전류 제어를 통

해 구동되면, 부하측에서는 서보모터로 50rpm로 속도 제어를 하였다. 이 때 일정한 토크가 발생된다.

본 시스템의 제어기에는 TI(Texas Instruments)사의 32비트 부동 소수점 연산 기반의 고성능 디지털 신호 제어기(DSC : Digital Signal Controller)인 TMS320F28335가 사용되었다.

알고리즘에 대해서 실험을 통하여 검증한 파형은 다음과 같다. 그림 4 (a)는 기존 2048 PPR 모터의 상전류, dq축 전류 파형을 나타내며, 그림 4 (b)는 전동기의 분해능이 128 PPR일 때 제안된 알고리즘을 적용하지 않은 파형이다. 그림 4 (c)는 128 PPR 분해능 전동기에 제안된 알고리즘을 적용하였을 때의 파형이다. 이 때, 파형 중 Θ_{est} 는 위치 추정 알고리즘이 적용된 회전자 위치각을 나타낸다.

전류 파형을 통해 토크 리플을 예측할 수 있기 때문에 위의 세 전류 파형을 비교하여 제안하는 기법이 토크 리플에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

2048 PPR 전동기의 파형을 기준으로 보았을 때, 128 PPR의 낮은 분해능에서의 전류 파형은 리플이 증가됨을 알 수 있다. 위치 추정 기법을 적용하게 되면 128 PPR의 낮은 분해능에서도 2048 PPR과 같이 리플 성분이 거의 없는 전류 파형을 얻을 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 기존 EPS 시스템에 적용된 2048 PPR의 높은 분해능 위치 센서를 대신하여 가격 절감을 위해 사용된 128 PPR의 낮은 분해능 위치 센서를 적용하였다. 이 경우에도 2048 PPR과 같은 성능을 낼 수 있도록 T 방식을 사용하여 위치 및 속도 정보를 얻어 SPMSM을 제어하는 방법을 제안하였다. 이론적 분석과 시뮬레이션, 실험을 통해 위치 추정 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

따라서 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용하여 실제 EPS 시스템에서 낮은 분해능을 가진 위치센서를 사용할 수 있어 시스템의 가격을 절감할 수 있을 뿐 아니라 고성능의 토크 제어가 가능할 것이다.

이 논문은 2009년도 현대모비스의 연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Shaotang Chen, "Controller-Induced Parasitic Torque Ripples in a PM Synchronous Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 5, pp. 1273-1281, 2002, September/October
- [2] 조영훈, "표면부착형 영구 자석 전동기를 이용한 전동기 구동 파워 스티어링 제어 시스템의 개발", 전력전자학회, pp. 85-87, 2006, November.
- [3] 유충주, "전동식 파워스티어링 모터소음 저감을 위한 실험적 연구", 한국동력기계공학회, Vol. 12, No. 6, pp. 83-87, 2008, December.
- [4] 김상훈, DC 및 AC 모터 제어, 북두출판사, 2007.