

저심도 도시철도용 PMSM 독립구동형 틸팅력 복원 제어 알고리즘 연구

원준희*, 임종석*, 오승택*, 엄현종*,이주* 김솔**, 김승주***
 한양대*, 유한대***, 한국기계전자시험연구원***

A Research on PMSM Independent Drive Tilting Force Restoring Control Algorithm for Low Depth City Railway

Jun-Hui Won*, Jong-Suk Lim*, Seung-Taek Oh*, Hyun-Jong Eom*, Ju Lee*, Sol Kim*, Ju Lee*
 Hanyang University*, Yuhun University**, Korea Testing Certification***

Abstract - 도시화에 따른 신대중교통 수단 도입과 관련하여 저심도 도시철도에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 저심도 도시철도에 독립구동형 방식을 적용하면, 독립적으로 좌우바퀴를 개별토크제어 할 수 있으나 윤축이 없어 기계적인 복원력이 약하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 전기적으로 횡 변위 복원력을 통한 제어방법을 제시한다. 이를 좌,우륜 각각의 모터를 개별 제어하여 복원력을 강하게 만들어주는 알고리즘을 제안한다. 또한 이러한 알고리즘을 MATLAB/ SIMULINK를 통하여 검증한다.

1. 서 론

최근 전동기의 고효율화 정책으로 인한 가전, 기계, 자동차 및 로봇 응용 산업분야 등에서 기존의 전동기에 비하여 고 출력, 고 효율 및 고 성능의 특징을 가지는 영구자석형 동기전동기(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)의 연구가 늘어나고 있으며, 이를 이용하여 제품의 성능을 개선하려는 연구가 활발히 진행 중 이다. 이에 따른 전동기의 저 소음, 저 진동 등의 요구치가 높아지고 있다. PMSM은 저속 고 토크 또는 고속 영역 에서 운전하는 특징을 가지고 있으며 같은 크기의 유도전동기(Induction motor)대비 부피당 출력밀도가 높다. 그러므로 동일 출력대비 부피가 감소하므로 시스템의 소형화 및 경량화까지 할 수 있기에, 주로 쓰이는 유도전동기보다 이러한 측면만 본다면 PMSM이 저심도 도시철도차량에 더 적합하다.

본 논문에서 연구한 방식은 IC1M의 방식을 채택하여 전동기를 독립적으로 제어하였다. 이는 독립적으로 좌우를 제어가 가능하여 도시의 사거리의 좌회전 구간인 곡선부에서는 좋은 성능을 보이거나 윤축이 없으므로 직선로에서 기계적인 복원력이 약하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 복원력을 강하게 하여 좌우 각각의 모터를 정밀 제어하여 복원력을 강하게 만들어주는 알고리즘을 제안한다.

2. 본 론

2.1.1 PMSM의 Torque equations

영구자석 동기전동기의 토크는 dq축 전압 방정식을 이용한 전동기의 입력 전력으로부터 구할 수 있다. dq축 좌표계에서 입력 전력은 아래와 같다.

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (1)$$

dq축 전압방정식을 (1)에 대입하면 (2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} \left(\left(R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \right) i_d + \left(R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \right) i_q \right) \quad (2)$$

$$= \frac{3}{2} \left(R_s (i_d^2 + i_q^2) + i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \Phi_a i_q + \omega_r (L_d - L_q) i_d i_q \right)$$

여기서 $R_s (i_d^2 + i_q^2)$ 은 고정자 동손, $i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt}$ 은 자계에

너지 변동분 $\omega_r \Phi_a i_q + \omega_r (L_d - L_q) i_d i_q$ 은 기계적 출력 영구자석 동기전동기의 토크는 기계적 출력을 ω_r 로 나누어주면 토크식을 구할 수 있다.

$$T = \frac{3}{2} (\Phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (3)$$

2.1.2 독립구동 차량의 틸팅력 계산

독립구동차량이 경사도에 있는 경우의 영향 받게 되는 틸팅력을 아래의 식과 같이 구현하였다.

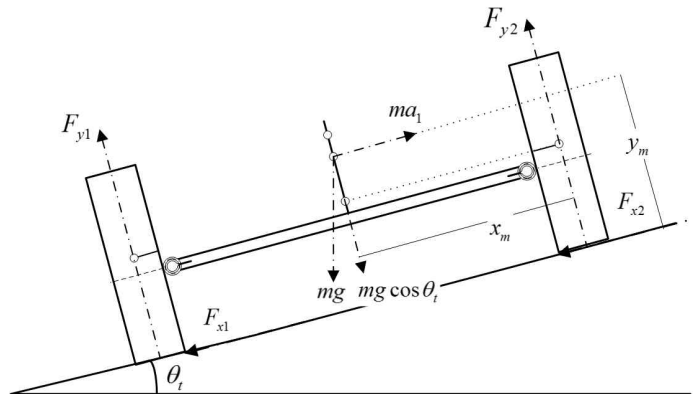
$$\sum F_x = 0, F_{x1} + F_{x2} = ma_1 \quad (4)$$

$$\sum F_y = 0, F_{y1} + F_{y2} = mg \quad (5)$$

$$\sum M = 0, ma_1 y_m + 2F_{y1} \frac{w}{2} = mg x_m \quad (6)$$

이를 통해 힘을 받게되는 가속도 값을 구하면 아래와 같다.

$$a_1 = \frac{mg x_m - 2F_{y1}}{m y_m} \quad (7)$$



<그림 1> 독립구동차량의 틸팅력 계산

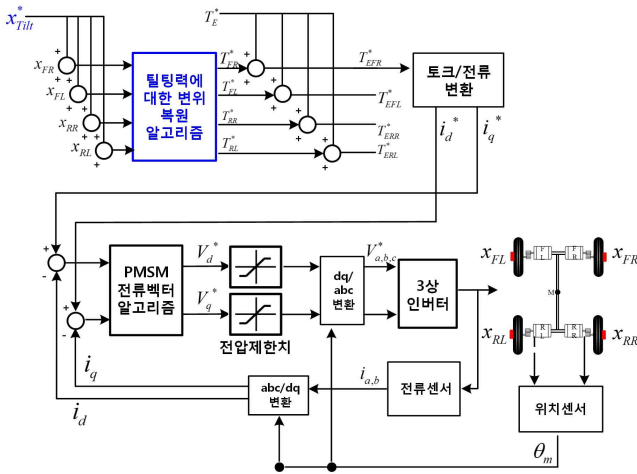
2.2.1 독립구동차량의 횡 변위 복원 Topology 제안

$$F_{Drive-res} = F_{Tilt-res} + F_{Air-res} + F_{Curved-res} + F_{Wheel-res} \quad (6)$$

식(5)에서 구한 토크식에 식(6)에서 구한 주행 마찰력이 영향을 미친다. 주행 마찰력은 공기저항 마찰력, 곡선주행 마찰력, 경사로 마찰력, 휠과 레일사이의 마찰력의 합으로 계산 할 수 있다.

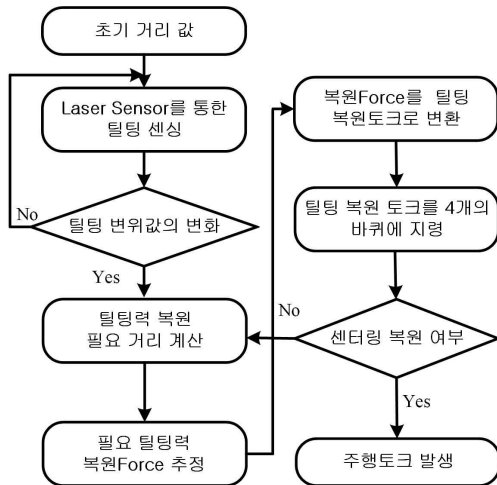
이를 고려하여 토폴로지를 구성하면 <그림2>와 같다.

<그림 2>에서 보듯이 차량의 레이저 센서에서 측정되는 횡 변위를 횡 변위 복원 알고리즘에 입력 시 횡 변위 복원 토크를 만들어낸다. 여기서 생성된 토크는 토크/전류 변환을 통해 PMSM 전류백터알고리즘에 들어가서 지령 전압을 생성하고 이는 2상3상변환을 통하여 3상 전압형 인버터에 들어가게 된다. 그 후 각 4바퀴를 제어한다. 여기서 위치센서를 통해 위치정보를 2상/3상, 3상/2상변환에 입력된다. 또한 전류센서를 통해 지령전류 값과 피드백 값의 차이로 전류제어를 한다.



<그림 2> 독립구동차량의 틸팅력에 대한 복원력 토폴로지

2.2.2 독립구동차량의 틸팅력 복원 알고리즘



<그림 3> 독립구동차량의 틸팅력 복원 알고리즘

<그림 3>는 <그림 2>에서 파란색으로 하이лай트된 독립 구동차량의 틸팅력 복원 알고리즘을 나타낸 그림이다. 여기서 초기 거리값을 받아서 이를 센싱된 값과 비교하여 변했을 경우 복원에 필요한 거리를 계산하여 필요한 복원 힘을 추정한다. 그 후 복원 힘을 통하여 복원 토크로 계산한 다음 계산된 복원 토크값을 4개의 바퀴에 개별적으로 지령을 내려주어 틸팅력에 저항하여 차량의 센터링 유지를 도와준다.

<표 1> 독립구동용 PMSM의 사양

파라미터	값	단위
극수/슬롯수	10/12	
축 길이	60	mm
고정자 외경	80	mm
DC전압	48	V
최대전기자전류	10	
전기자권선 저항	0.06	ohm
전기자권선 인덕턴스	328.5	
쇄교자속	18.6	mWb
기저속도	2400	rpm
최대토크	2.26	Nm

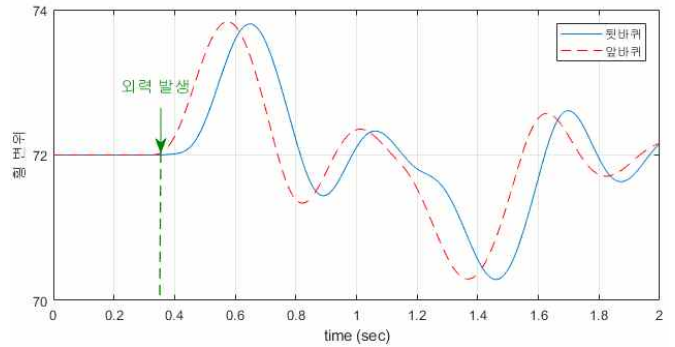
<표 1>은 독립구동용 PMSM의 사양이며 이를 통하여 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 진행하였다.

2.3 시뮬레이션 및 결과

이를 통하여 시뮬레이션 결과 파형을 보게 되면, <그림 4>와 같이 시뮬레이션 결과파형이 도출 된다.

<그림 4> 시뮬레이션결과

<그림 4>에서 외력이 발생하는 0.3초서부터 변화가 시작된다.



이를 통해 외력에 복원하기 위한 토크가 발생하게 되어 원래 센터에 있던 72의 위치에 위치하기 위한 제어를 시작하게 되고 이를 통해 2초정도면 센터링을 완성 시킨다. 기존 외력에 틸팅력까지 포함되어있어 평탄로에서 복원 할 때 보다 더 많은 시간이 소요가 되지만 결국에는 센터로 수렴하게 된다. 보듯이 차량의 레이저 센서에서 측정되는 틸팅 및 횡 변위를 복원 알고리즘에 입력 시 복원 토크를 만들어낸다. 여기서 생성된 토크는 토크/전류 변환을 통해 PMSM전류벡터알고리즘에 들어가서 지령 전압을 생성하고 이는 2상3상변환을 통하여 3상 전압형 인버터에 들어가게 된다. 그 후 각 4바퀴를 제어한다. 여기서 위치센서를 통해 위치정보를 2상/3상, 3상/2상변환에 입력된다. 또한 전류센서를 통해 지령전류 값과 피드백 값의 차이로 전류제어를 한다.

3. 결 론

윤축이 없는 독립구동 모델의 경우 선로 상의 불균일함이 있을 경우 기계적인 복원이 윤축이 있을 때보다 현저히 약하다. 이러한 구조적인 문제를 전기적인 제어방법으로 변위 복원 알고리즘을 제시함으로써 복원력 생성을 통해 센터링을 하였다. 시뮬레이션에서 입증한 바와 같이 틸팅력 복원 알고리즘을 적용하면 전기적인 복원력이 생성되어 틸팅과 같은 경사 외란에도 강인하게 운행할 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016R1A2A1A05005392)
본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2018201010633A)

[참 고 문 헌]

- [1] 안한웅 “독립 차륜형 전동기 설계를 통한 횡 변위 제어에 관한 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 645-646, 2015
- [2] 조연호, “독립 회전 차륜의 토크 제어를 이용한 저상 트램의 주행 성능 개선”, 한국 자동차 공학회 추계학술대회 및 전시회, 3099-3107, 2009
- [3] 박진현, “독립구동 전기자동차의 효율향상을 위한 구동력 배분전략”, 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 1165-1165, 2015