

차세대 고속철도차량용 IPMSM 의 온라인 파라미터 추정을 통한 강인제어기법 연구

Robust Control Algorithm with Online Parameter Estimation of IPMSM for Next-generation high-speed rail vehicle

원준희*, 이주*†, 신원진**, 강동우***, 안한웅****, 김솔*****

Jun-Hui Won*, Ju Lee*†, Won-Jin Shin**, Dong-Woo Kang***, Han-Woong Ahn****, Sol Kim*****

Abstract Recently, Due to the increasing adoption of energy-saving policy, IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) is used as machinery, home appliance, automotive and robotic applications. The features of IPMSM are high power, high efficiency and high performance. To obtain a high performance in a direct vector controlled IPMSM, it is essential to obtain robust control system of railway vehicle. But there is a disadvantage that more reliability of the induction motor being used conventionally, to enhance these reliability, it is necessary to control algorithm that can improve the reliability of IPMSM. The proper control scheme possesses a prominent aspect in that it can force the systems to follow the desired reference model. This simulation is composed of several blocks. Those are IPMSM, PWM three-phase inverter, current controller and speed controller. The validity of proposed technique is verified through the MATLAB/SIMULINK simulation results

Keywords : New generation train, high-speed train, parameter estimation, robust control

초 록 최근 들어 에너지 절약 정책으로 인하여 고효율, 고효율 및 고성능 등의 요구치가 높다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)이 각광 받고 있다. IPMSM은 고속 운전 또는 저속 고투크에서 운전하는 특징을 가지고 있고 높은 출력밀도를 갖고 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 기존에 사용하고 있는 유도전동기의 신뢰성보다 떨어지는 단점이 있으므로 이러한 신뢰성을 높이기 위해 IPMSM의 신뢰성을 높일 수 있는 제어기법이 필요하다. 본 논문에서는 IPMSM의 신뢰성을 높이기 위한 알고리즘을 제안하여 차세대 철도차량에 알맞은 강인한 제어방법을 제시한다.

주요어 : 차세대 철도, 고속철도, 영구자석동기전동기, 파라미터 추정, 강인제어

1. 서 론

에너지 절약 정책으로 인하여 기계, 가전, 자동차 및 로봇 응용 산업분야 등에서 구동원으로 사용되는 전동기는 기존의 전동기에 비하여 고효율, 고효율 및 고성능의 특징을 가지

† 교신저자: 한양대학교 공과대학 전기공학과(julee@hanyang.ac.kr)

* 한양대학교 공과대학 전기공학과

** 한양대학교 공학대학원 철도시스템공학과

*** 계명대학교 공과대학 전기에너지공학과

****전자부품연구원 메카트로닉스센터

*****유한대학교 전기과

는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM:Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 채택이 늘고 있으며 이를 이용하여 제품의 성능을 개선하려는 시도가 활발하다. 이에 따른 전동기의 저소음, 저진동 등의 요구치가 높다. IPMSM은 고속 운전 또는 저속 고토크에서 운전하는 특징을 가지고 있으며 같은 크기의 유도전동기(Induction motor)대비 출력밀도가 높다. 그러므로 충분한 용량 확보를 할 수 있어 시스템의 소형화까지 할 수 있기에, 주로 쓰이는 유도전동기보다 이러한 측면만 본다면 IPMSM이 차세대 고속철도에 더 적합하다. 하지만 유도전동기에 비해 신뢰성이 낮으므로, 이러한 단점을 보완하기 위해서 IPMSM의 신뢰성을 높일 수 있는 제어 알고리즘을 제시한다.

본 논문에서는 파라미터 추정을 통하여 철도차량에서 4대의 전동기 중에 1대의 전동기가 실제로 일어날 수 있는 모터의 소손에 따라 달라지는 파라미터 값을 보상하여 지령 토크값을 변화시켜 제어할 수 있도록 하는 알고리즘을 구현하였다.

이런 알고리즘을 구현하기 위해서는 파라미터 값들을 실시간으로 추정하고 받아와야 한다. 강인한 제어 알고리즘을 구현하기 위해서는 고려해야 할 파라미터 값들이 많기 때문에 상당히 복잡하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 토크보상 강인제어 알고리즘을 이용하여 이러한 설계의 복잡성을 줄여준다.

또한 기존 철도차량의 경우에는 1대의 제어기에 유도전동기 4대를 결선하여 제어하는 방식이었으나, 본 논문에서 연구한 방식은 4대의 제어기에 각각 4대의 IPMSM을 연결하는 1C1M의 방식을 채택하고 있다. 이를 통하여 전동기를 독립적으로 제어하여 운행상황 별 운전 방법의 자유도를 넓혀 저속영역에서도 정밀한 제어가 가능하다. 여기서 IPMSM과 PWM 3상 인버터 전류제어기 및 속도제어기 시뮬레이션 모델들은 MATLAB/Simulink 프로그램을 통하여 구성하고 결과를 도출하였다

2. 본 론

2.1 IPMSM 속도제어 시스템 모델링

2.1.1 IPMSM modeling

Fig.1은 매입형 영구자석 전동기의 속도제어 시스템을 나타낸다. 이에 따라 먼저 IPMSM의 고정자 방정식을 표현하면 동기좌표계 상에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_d = R_s i_d + pL_d i_d - P\omega_{rm} L_q i_q \quad (1)$$

$$v_q = R_s i_q + pL_q i_q + P\omega_{rm} L_d i_d + P\omega_{rm} \phi_f \quad (2)$$

여기서

v_d, v_q : d축 및 q축 전압

i_d, i_q : d축 및 q축 전류

R_s : 고정자 저항

L_d, L_q : d축과 q축 고정자 인덕턴스

ω_{rm} : 회전자 기계 각속도

ϕ_f : 쇠교 자속

p : 미분 연산자

P : 극 쌍수

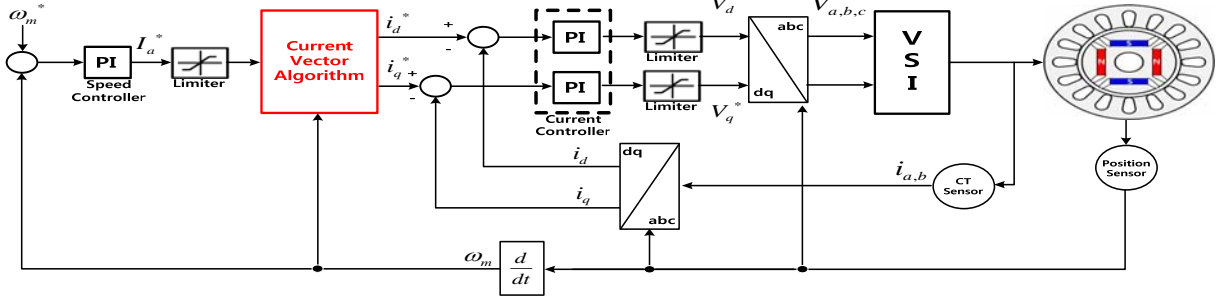


Fig. 1 Speed Control topology of IPMSM

2.1.2 토크 출력식

영구자석 동기전동기의 토크는 d-q축 전압 방정식을 이용한 전동기의 입력 전력으로부터 구할 수 있다. d-q축 좌표계에서 입력 전력은 다음과 같다.

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

앞서 구한 d-q축 전압을 대입하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} \left(\left(R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{rm} \lambda_q \right) i_d + \left(R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{rm} \lambda_d \right) i_q \right) \\ &= \frac{3}{2} \left(R_s (i_d^2 + i_q^2) + i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{rm} \Phi_f i_q + \omega_{rm} (L_d - L_q) i_d i_q \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $R_s (i_d^2 + i_q^2)$: 고정자 동손

$i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt}$: 자계 에너지 변동분

$\omega_r \Phi_f i_q + \omega_r (L_d - L_q) i_d i_q$: 기계적 출력

영구자석 동기전동기의 토크는 기계적 출력을 ω_{m} 으로 나누면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \left[\Phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \quad (5)$$

2.1.3 Current controller modeling

전류제어기 설계 시 있어서 앞에서 구한 (1),(2)를 통하여 (6),(7)를 구성하면 아래와 같다.

$$v_d^* = v_d' - P \omega_{m} L_q i_q \quad (6)$$

$$v_q^* = v'_q + P\omega_m (L_d i_d + \phi_f) \quad (7)$$

d-q축을 서로 비간섭 제어를 하도록 하여, d축 전류와 q축 전류가 서로 독립적으로 작용 하도록 하면 (8), (9)에서 d축 q축 각각의 전류를 비례적으로 적분제어기에 의해 증폭된 값을 v'_d 와 v'_q 각각 전압 목표 값으로 구한다.

$$v'_d = \frac{K_{pd}s + K_{id}}{s} (i_d^* - i_d) \quad (8)$$

$$v'_q = \frac{K_{pq}s + K_{iq}}{s} (i_q^* - i_q) \quad (9)$$

여기서 v_d^* , v_q^* 가 의미하는 것은 v_d , v_q 값의 지령 값이다. (1)에서 (6)까지 폐루프 제어를 통해 i_d^* , i_q^* 를 얻어 낼 수 있다. 전류제어기의 게인 값들은 아래의 식으로 결정된다

$$K_{pd} = \omega_c L_d, K_{id} = \omega_c R, K_{pq} = \omega_c L_q, K_{iq} = \omega_c R \quad (10)$$

여기서 ω_c 는 전류제어에 대한 차단 주파수를 의미한다. 따라서, 전류 제어 시스템의 안정성을 보장 할 수 있고 각 전류는 독립적으로 제어 될 수 있다.

2.1.4 Inductance estimator modeling

위에서 유도한 IPMSM의 전압방정식을 통하여 인덕턴스 추정기를 모델링을 한다. 식(1),(2)은 정상상태에서 미분성분이 포함된 항이 0이 되므로 식을 간소화 할 수 있다. d축 및 q축 인덕턴스에 대한 추정을 위해 미분항을 소거하여 각각 식(11), (12)을 얻을 수 있다.

$$v_q - R_s i_q - \omega_m \phi_f = \omega_m L_d i_d \quad (11)$$

$$R_s i_d - v_d = \omega_m L_q i_q \quad (12)$$

$$\hat{L}_d = \frac{v_q - R_s i_q - \omega_m \phi_f}{\omega_m i_d} \quad (13)$$

$$\hat{L}_q = \frac{v_d - R_s i_d}{\omega_m i_q} \quad (14)$$

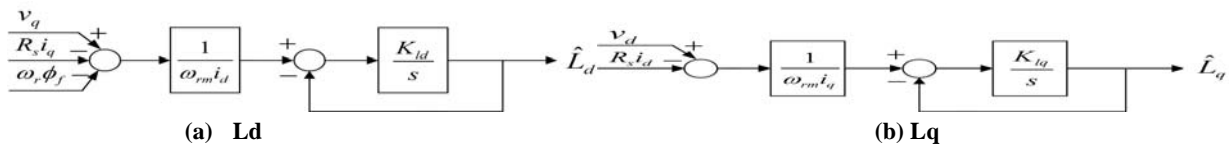


Fig. 2 Inductance estimator block diagram

2.2 Modeling Simulation

2.2.1 Simulation parameter table

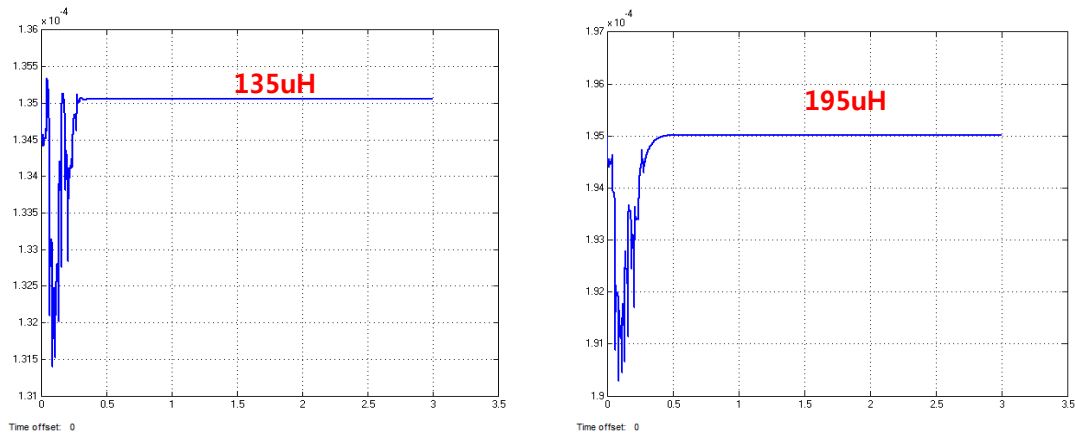
앞 선 절에서 모델링한 수식들을 통하여 MATLAB/SIMULINK로 구현하기에 앞서 시뮬레이션에 사용된 지표를 아래의 Table 1로 표현하였다.

Table 1 IPMSM parameter

<i>Parameter</i>	<i>value</i>
Power rating[kW]	268.46
Phase Current rating[A _{pk}]	50
Phase Voltage rating[V _{pk}]	179
R _s [mΩ]	400
L _d [uH]	135, 150
L _q [uH]	195, 180
Flux linkage [Wb]	0.085
Pole	8

2.2.2 Simulation Result

앞 선 절에서 구한 파라미터값을 모델링한 MATLAB/SIMULINK에 적용하여 나온 결과는 아래와 같이 나오게 되는데 Fig. 2와 같은 경우에는 L_d값이 2%가량 오차가 발생하였고 L_q값 같은 경우에는 추정이 잘되었다. Fig. 3 또한 L_d값만 2%정도 오차가 발생하였다.



(a) L_d

(b) L_q

Fig. 2 L_d, L_q waveform (L_d=135uH, L_q=195uH, L_q/L_d =1.44)

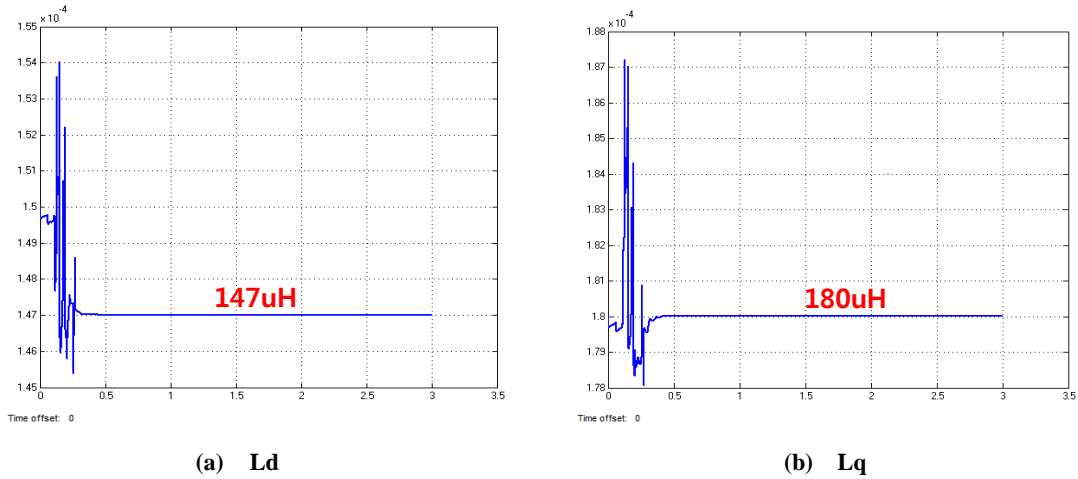


Fig. 3 Ld, Lq waveform (Ld=150uH, Lq=180uH, Lq/Ld =1.2)

3. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기에서의 온라인 파라미터 추정에 대하여 인덕턴스 값을 고려하였다. IPMSM의 전압방정식과 토크 방정식으로 통하여 온라인 파라미터 추정기를 구성하였으며 영구자석 동기전동기의 구동 시뮬레이션 데이터를 이용하여 추정기의 성능을 검증하였다.

제안한 온라인 파라미터 추정기와 추정된 파라미터 정보를 기반으로 인덕턴스 값을 추정하면 벡터 전류제어에 있어 영구자석 동기전동기의 제어신뢰성 확보에 도움이 된다. 모터가 구동 도중 소손되어 파라미터가 바뀌어도 추정값을 따라 제어를 하게 되므로 차세대 철도차량의 안정성을 높여줄 수 있다. 전동기 운전상태에 따라 자속 추정값이나 저항값 등 더 다양한 파라미터 상태를 고려하여 제어를 하면 신뢰성 확보 및 고효율 운전이 가능하리라 기대된다.

참고문헌

- [1] Z. Wang (2014) A Review of Permanent Magnet Synchronous Motor Fault Diagnosis, *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo.*
- [2] M.Lin (2011) Design and Implementation of a Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Based on a Novel Flux Model, *IEEE PEDS 2011*, pp.394-398
- [3] A. Wang, (2011) Dynamic Performance Improvement based on a New Parameter Estimation Method for IPMSM used for HEVs, *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp.1825-1829