

열차추진시스템에서 Switched Reluctance Motor의 속도제어를 위한 제어기 설계

논문

60P-3-7

A Controller Design for Speed Control of the Switched Reluctance Motor in the Train Propulsion System

김 성 수* · 김 민 석[†] · 이 종 우**
(Sung-Soo Kim · Min-Seok Kim · Jong-Woo Lee)

Abstract - Electric locomotive is adapted to high speed driving and mass transportation due to obtaining high traction force. The electric locomotive is operated by motor blocks and traction motors. Train speed is controlled by supplying power from motor blocks to traction motors according to reference speed. Speed control of the electric locomotive is efficient by spending energy between motor blocks and traction motors. Currently, switched reluctance motors have been studied because the efficiency is higher than induction motors. In this paper, model of the switched reluctance motor is presented and the PID controller is applied to the model for the speed control by using Simulink. Asymmetry converter is used for real-time control and system performance is demonstrated by simulating the speed of switched reluctance motor including PID controller.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Speed Control, PID Controller, Train Propulsion System, Electric Locomotive

1. 서 론

최근 열차추진시스템의 동력 응용이 직접구동방식으로 전환되는 추세에 따라 이에 따른 전동기의 출력성능 향상과 제어기술에 관해 여러 방면으로 연구개발이 진행되고 있다. 또한 영구자석의 실용화, 전력전자 소자의 개발로 인해 고성능, 고효율 전동기의 개발이 이루어지고 있다[1].

열차추진시스템에서는 수송능력을 증가시키기 위해 빠른 가속 특성과 고속 운전 능력을 필요로 한다. 또한 가격 경쟁력 강화와 신뢰성 향상 및 유지보수의 용이함을 위해 부수차에 대한 동력차의 비율을 감소시키기 위해 유도전동기를 사용하고 있다. 최근에는 유도전동기보다 효율이 높은 SRM(Switched Reluctance Motor)을 사용하기 위한 연구가 진행 중에 있다. SRM은 유도전동기보다 높은 출력 토크와 빠른 속도제어가 가능하다[2].

SRM은 구조가 간단하고, 가격이 저렴하며 회전자에 허용 온도가 매우 높고, 개방회로의 전압과 단락시의 전류가 거의 0에 가까운 정도로 매우 작을 뿐만 아니라 기동 토크도 높고 유도전동기에 비해 토크 대 관성비가 크며, 출력밀도가 우수하며 고속운전도 가능한 이유로 유도전동기에 의한 가변시스템을 대체해 나갈 수 있다. 그리고 SRM은 고정자 한

상의 비정렬 위치에서 정렬 위치까지 전원을 인가하여 릴럭턴스가 최소가 되고, 인덕턴스가 최대가 되게 하는 방법으로 구동되며, 다음 상이 순차적으로 on/off를 반복하여 토크를 발생시킨다[3].

열차추진시스템에서는 고속 운전이 필요로 하기 때문에 SRM을 적용하기 위해서는 전류 및 회전자 속도를 고려해야 한다. 즉, 열차는 기동시에 높은 전류를 필요로 하기 때문에 전류에 대한 회전자 속도 해석이 필요하다.

본 논문에서는 SRM에 대한 모델을 제시하고, 과전류와 회전자 속도제어는 PID(Proportional Integral Derivative) 제어기, 실시간 제어를 위해 컨버터는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 이용하였다. PID 제어기의 이득 값 결정에 대한 알고리즘을 제시하고, Simulink를 이용하여 제어시스템을 모델링하였다. 또한 PID 제어기를 사용하여 속도제어가 이루어지는 것을 입증하였다.

2. SRM 모델

일반적으로 전동기는 공극에서 일정한 여자에 의한 Mutual Torque를 활용하였으나, SRM은 이와는 달리 가변 여자에 의한 Reluctance Torque를 활용한 에너지 변환기이다. SRM은 회전자 권선이 없이 구조를 단순한 전동기로 간단한 구조로 되어있으며, 기계적으로 견고하고, 높은 신뢰성을 갖는다. 그 이외에도 고속운전이 용이하며, 생산단가가 저렴하며, 브러쉬 등이 없어 유지비가 저렴하여 다른 전동기가 따를 수 없는 장점이 있다. 또한 단위체적당 토크 및 효율면에서는 유도전동기보다 우수한 것으로 나타나며 또한 신뢰성 등이 우수하여 현재 가장 많이 사용되는 유도기, 직류기를 대체하려는 추세로 나타나고 있다.

표 1에 10마력급 SRM과 유도전동기를 비교하였다. SRM

* 정 회 원 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 박사과정

** 정 회 원 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 교수 · 공박

[†] 교신저자, 정회원 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 박사과정
E-mail : kms0403@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2011년 6월 20일

최종완료 : 2011년 8월 2일

은 Grasby Control(TASC Drive)사의 Oulton 8/6 SRM으로 정격 460[V], 1800[rpm]이고, 유도전동기는 460[V], 1725[rpm]으로 인버터로 구동되며 표준 유도전동기와 고효율 유도전동기 두 종류가 시험되었다[1].

표 1 열차제어정보신호의 파라미터

Table 1 Parameters of information signal for train control

Motor Specification	Oulton	표준 유도기		고효율 유도기
Frame	Cast Iron	Aluminum	Cast Iron	Cast Iron
Output Power(HP)	10	10	10	10
Speed(r/min)	1800	1750	1760	1760
Voltage	460	460	460	460
Output Torque(lb-ft)	29.19	30	29.09	30
Total weight(lb)	169	123	190	172.5
Efficiency(%)	91.8	89.5	91	91.7
Motor input	Pulsed	sine	sine	sine

일반적으로 SRM의 토크와 속도는 식(1) 및 식(2)와 같다[2].

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \tag{1}$$

$$\omega = \int \frac{T_{th} - T_L}{J} dt \tag{2}$$

여기서, i 는 상전류, θ 는 회전자 위치, T_{th} 는 한 상의 토크, T_L 은 부하토크, J 는 관성이다.

식(1)에서 고정자와 회전자의 위치변화에 따라 공극에서의 인덕턴스의 변화가 일어나며, 이러한 인덕턴스의 변화에 의해 토크가 발생된다는 것을 알 수 있다. 그림 1은 1회전 당 인덕턴스의 변화량을 나타낸 것으로 인덕턴스의 변화량은 고정자와 회전자의 극수 및 극호의 함수로 결정되어짐을 보여준다[1].

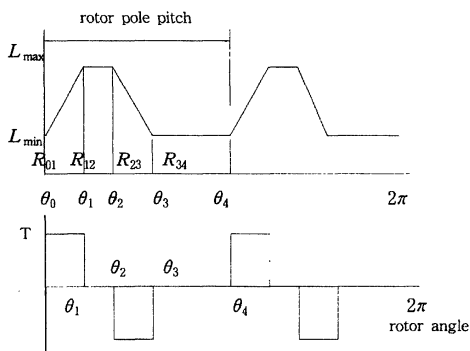


그림 1 인덕턴스 프로파일과 일정전류시 발생 토크

Fig. 1 Inductance profile and torque in constant current

R_{01} 지점에서는 θ_0 에서 회전자 자극의 앞단이 고정자 자극과 만나며, 인덕턴스가 증가하기 시작하여 θ_1 에서 자극이 완전히 중첩되어 인덕턴스가 최대가 된다. R_{12} 의 $\theta_1 - \theta_2$ 사이

서 인덕턴스는 최대값으로 일정하고, 이 구간을 Dead Zone이라 한다. R_{23} 은 $\theta_2 - \theta_3$ 사이로 인덕턴스는 최소값까지 선형적으로 감소하며, R_{34} 는 $\theta_3 - \theta_4$ 사이로 고정자와 회전자가 중첩되지 않으므로 인덕턴스는 계속 초기값을 유지하고 있다.

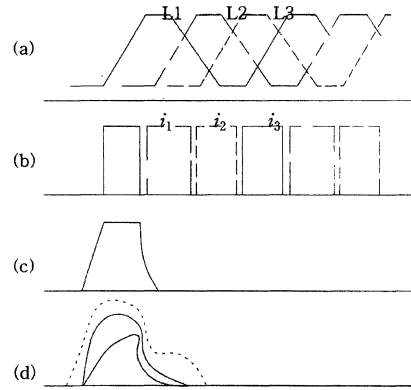


그림 2 인덕턴스 프로파일과 일정전류시 발생 토크

Fig. 2 Inductance profile and torque in constant current

그림 2는 SRM에서 연속적인 토크를 만들기 위해서 각상에 인가되는 연속전류와 이상적인 전류 그리고 저속과 고속에서의 전류의 형상을 나타내고 있다[1].

그림 2의 (a)는 3상에서 인덕턴스의 프로파일, (b)는 저속과 중간속도범위에서의 이상적인 전류 파형, (c)는 초핑이나, PWM(Pulse Width Modulation)에 의해 제어되는 실제의 상전류 파형, (d)는 전동기의 self-e.m.f에 의해서 제한되어진 최고속도시의 실제 전류 파형이다.

3. PID 제어기

PID 제어기 구조는 그림 3과 같다.

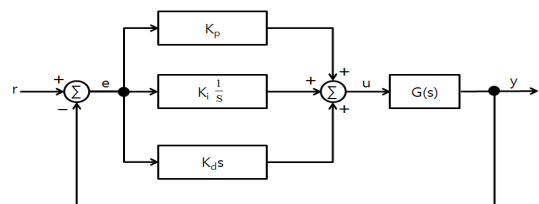


그림 3 PID 제어기

Fig. 3 PID Controller

그림 3으로부터 PID 제어기의 적용식은 식(3) 및 식(4)와 같다[4].

$$e = r - y \tag{3}$$

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{d}{dt} e \tag{4}$$

PID 제어의 장점은 몇 가지 파라미터의 값을 잘 선택할 수 있는 것으로 다양한 공정 응용분야에서 원하는 동작을 얻을 수 있도록 그 제어기를 조절(tuning)하여 사용할 수 있

다. 제어기의 조정에 있어서, Loop 전체에 걸친 이득이 제어기의 이득을 결정한다. 즉, 제어기를 제외한 다른 모든 부분의 동적 특성(Time Constant, Dead Time) 제어기 파라미터를 규정하여 주기 때문에 제어기의 조정 전에 Loop 전체의 동적특성에 대한 정량적인 정보를 얻어야만 한다. Loop 조정절차에서 가장 먼저 고려해야 할 사항은 성능에 대한 판별기준이다.

기존 PID 제어기의 Tuning 절차는 다음과 같다[5][6].

- (1) 제어기를 수동으로 놓은 후 안정해질 때까지 제어기 출력을 조정한다.
- (2) 적분과 미분동작을 모두 없앤다.
- (3) 비레이득을 낮은 값으로 설정한다.
- (4) k제어기를 자동 상태로 놓는다. 설정점이나 프로세스 부하를 변화시켜가며 시험한다.
- (5) 약간의 진동이 발생하여 원하는 감쇄특성을 얻을 때까지 이득을 증가시켜가며 이 동작을 반복한다.
- (6) 측정값이 설정점과 일치할 때까지 적분동작을 증가시킨다. 비례 제어만을 사용할 때 발생하는 진동의 주기를 이용하면 적분이득에 대한 적당한 초기 값을 구할 수 있다. 즉, 다음과 같이 설정한다.

$$K_i = 0.67 \times period \quad (5)$$

또한, 적분동작을 추가할 때의 불안정화 효과를 보상하기 위하여 비레이득을 감소시켜야 한다. 즉, 이득을 이전 값의 3/4로 감소시킨다.[7]

- (7) 미분을 사용한다면, 미분동작(K_d)을 증가시킨다.

잡음의 영향이 나타나면, 미분동작을 감소시킨다. 그렇지 않으면 미분을 최대 적분시간의 약 1/4까지 증가시킬 수 있다.

- (8) 미분을 추가하면, 통상 미분을 사용하지 않을 때보다 이득을 25[%] 정도까지 증가시킬 수 있다. 적분시간을 원래 값의 2/3정도로 감소시킨다.

- (9) 새로운 프로세스에 대하여 그 효과를 시험해보기 전에 조정 파라미터의 값을 이전 값의 50[%]이상 바꾸어서는 안된다. 프로세스 응답이 이미 적당한 상태에 있다면 프로세스 시험마다 25[%]정도 조정하는 것이 적당하다. 조정을 5[%]보다 작게 하면 시험할 가치가 있을 정도로 효과를 보지 못한다.

본 논문에서 PID 제어기의 Tuning 방법은 그림 4와 같다.

그림 4에서 최초의 제어기 이득을 $K_i = \infty$, $K_d = 0$, $K_p = \text{최소}$ 로 설정한다. 설정점이나 부하의 단위계단 입력에 대한 출력이 임계진동이 되도록 K_p 를 점진적으로 증가시킨다. 임계진동 후에 K_p 를 1/2로 감소시키고 Underdamped 출력이 되도록 K_i 를 점진적으로 감소시킨다. Underdamped 출력 후에 K_i 를 2배로 설정하고, 잡음의 증폭이 없도록 K_d 를 점진적으로 증가시킨다. 잡음의 증폭이 없다면 K_p 를 만족하는 출력이 나올 때까지 10[%]씩 증가시켜 비례, 적분, 미분 이득을 구할 수 있다. 실제 제어기를 구현하기 위해서는 저항을 최소로 설정하고, 인덕터는 제외하고, 커패시터를 가장 큰 값으로 설정한다. 그 이후에 그림 4의 튜닝절차에 따라 저항을 높이고, 커패시터 용량을 감소시키고, 인덕터를 추가 하면서 잡음의 증폭이 없도록 이득을 맞춘다.

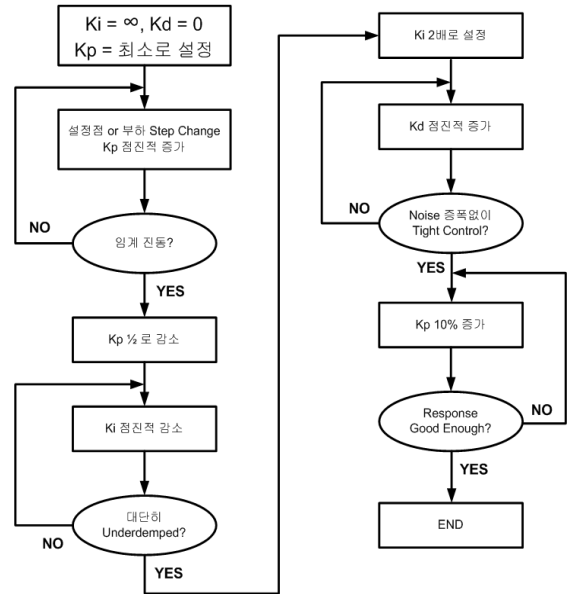


그림 4 PID 제어기의 튜닝 절차
Fig. 4 Tuning flowchart in PID controller

4. 시뮬레이션

3장에서 PID제어기와 IGBT를 이용한 컨버터를 사용하여 SRM의 속도를 제어한다. Simulink를 이용한 컨버터의 모델은 그림 5로 모델링 하였고, SRM 스위치의 on/off 모델은 그림 6으로 모델링 하였다.

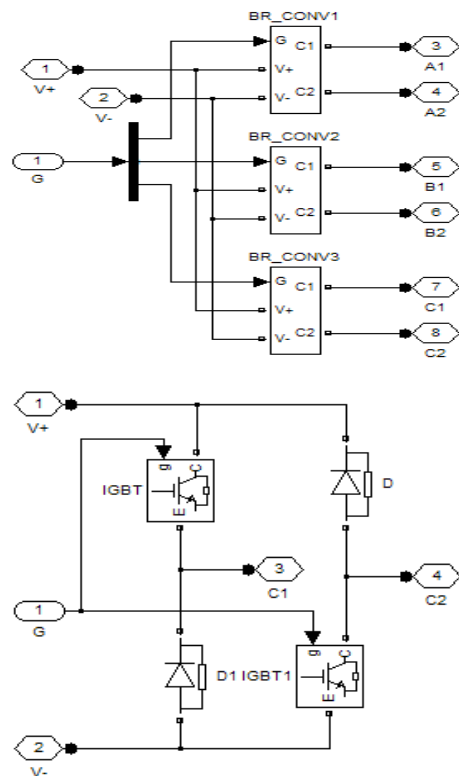


그림 5 컨버터 모델
Fig. 5 Converter model

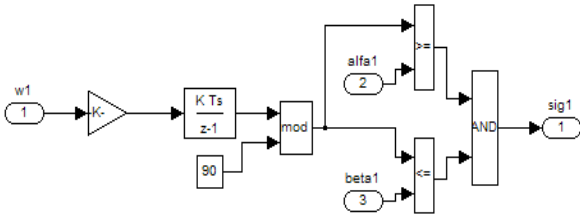


그림 6 스위치 모델
Fig. 6 Switch model

그림 7은 SRM 및 컨버터를 포함한 시뮬레이션 모델을 나타내고, 표 2는 시뮬레이션 조건이다[1][8]. SRM의 모델은 Simulink에 있는 일반적인 SRM을 적용하였다.

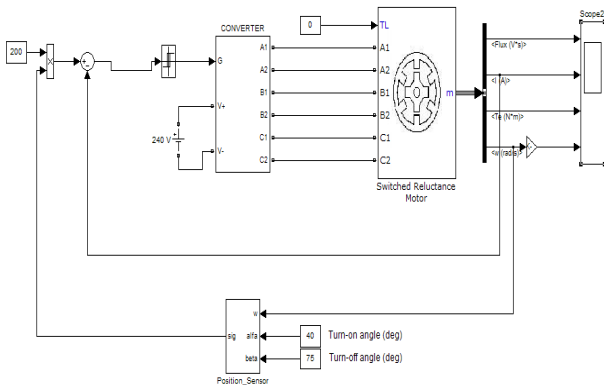


그림 7 시뮬레이션 모델
Fig. 7 Simulation model

표 2 시뮬레이션 조건
Table 2 Simulation conditions

파라미터	값
고정자 저항	0.01[Ω]
고정자 극수	6
회전자 극수	4
관성계수	0.0082[k·m·m]
마찰계수	0.01[N·m·s]
Unaligned 인덕턴스	0.67[mH]
Aligned 인덕턴스	23.6[mH]
포화된 aligned 인덕턴스	0.15[mH]
최대 전류	450[A]
최대 자속 결합	0.486[V·s]

그림 7의 모델로부터 자속, 전류, 토크, 회전자 속도의 결과를 나타내면 그림 8~그림 11과 같다.

시뮬레이션 결과인 그림 8~그림 11을 해석하면 자속 및 전류는 3상이 위상 변화 없이 60[Hz]의 간격으로 발생된다. 또한 열차가 기동할 때, 전류가 약 200[A]까지 상승하였다가 일정하게 유지되며, 토크도 150[N·m]까지 상승하였다가 일정하게 유지되었다. 여기서, 회전자 속도는 발산하는 형태로 해석되었다.

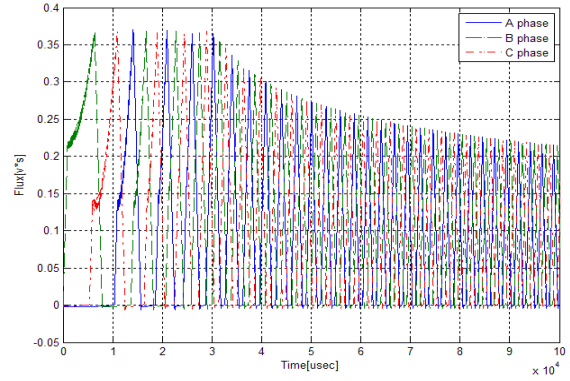


그림 8 자속
Fig. 8 Flux

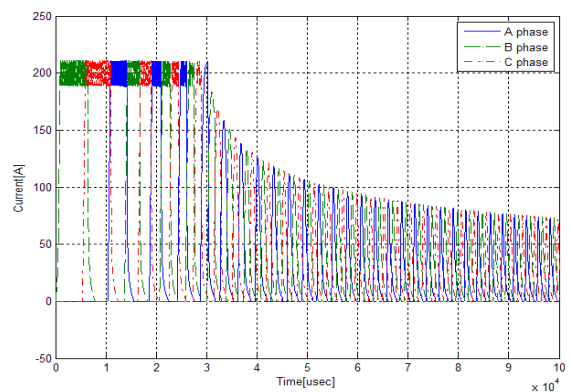


그림 9 전류
Fig. 9 Current

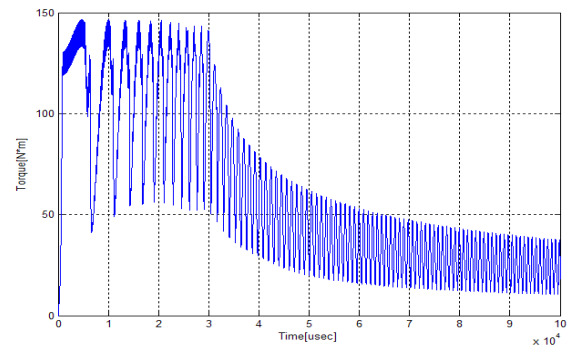


그림 10 토크
Fig. 10 Torque

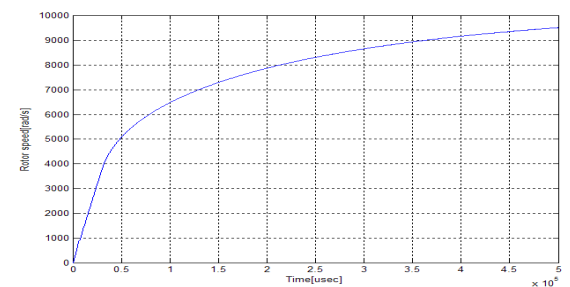


그림 11 회전자 속도
Fig. 11 Rotor speed

열차추진시스템에서 전동기의 최대 정상상태에서의 시간은 약 0.5초이고, 기준 회전자 속도는 9,500[rad/s]이다[9]. 자속, 전류 및 토크는 약 0.1초 이내에서 정상상태로 일정하게 되는데 각속도는 제어되지 않아 발산되고 있는 형태이다. Fig.6에서 PID제어까지 포함한 SRM 시뮬레이션 모델을 나타내면 그림 12와 같다.

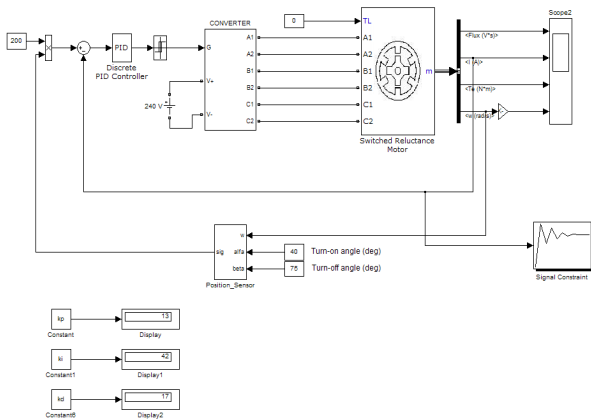


그림 12 PID 제어기가 포함된 시뮬레이션 모델
Fig. 12 Simulation model including PID controller

그림 12에서 PID 제어기의 이득 값은 3장에서 제시한 방법으로 계산하였고, 결과는 표 3과 같다.

표 3 PID제어기의 이득 값
Table 3 Gain in PID controller

K_p	K_i	K_d
13	42	17

그림 13 및 그림 14는 회전자의 속도를 나타낸다. 그림 13은 기존 PID 제어기의 알고리즘에 의한 시뮬레이션 결과이고, 그림 14는 본 논문에서 제안한 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과이다.

기존 PID제어기 알고리즘에서는 기준 회전자 속도를 만족하는 시간이 0.7초이다. 하지만 그림 14에서 보듯이, PID 제어기와 제시한 PID 제어기의 이득 값을 통해 0.4초인 경우에 기준

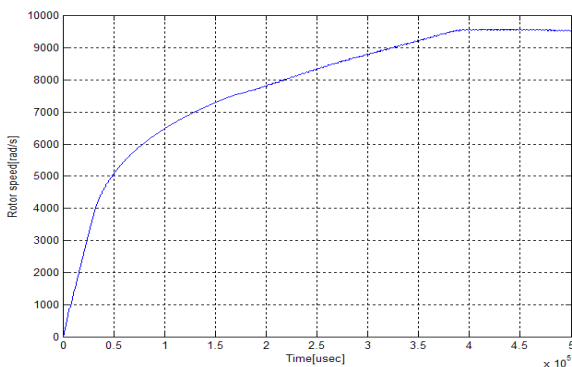


그림 13 기존 PID제어기 알고리즘에 의한 회전자 속도
Fig. 13 Rotor speed including existing algorithm of PID controller

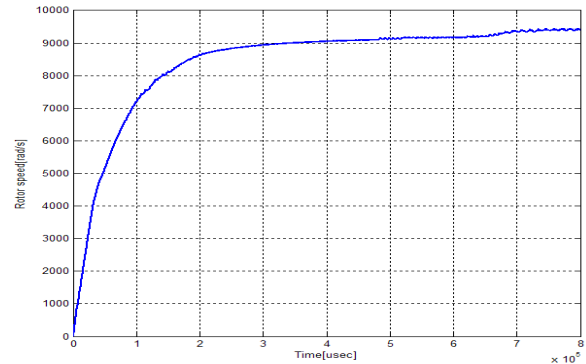


그림 14 제안된 PID제어기 알고리즘에 의한 회전자 속도
Fig. 14 Rotor speed including proposed algorithm of PID controller

회전자 속도를 만족하면서 정상상태를 유지한다. 그러므로 제안된 PID제어기 알고리즘이 목표 추종속도가 빠르다는 것을 입증한다.

5. 결 론

본 논문에서는 열차추진시스템에서 SRM을 적용하기 위해 SRM의 회전자 속도를 제어하였다. PID 제어기를 사용하였고, PID 제어기의 이득 값을 결정하기 위한 알고리즘을 제시하였다. Simulink를 이용하여 SRM의 자속, 전류, 토크 및 회전자 속도를 분석한 결과, PID 제어기를 설치하기 전에 자속, 전류 및 토크의 정상상태 시간에 대해서는 0.1초 이내로 문제가 없는 것으로 해석되었다. 하지만 회전자 속도는 시간에 따라 발산하는 것으로 해석되었다. 본 논문에서 제안한 PID 제어기의 알고리즘을 적용한 이후에는 회전자 속도가 0.4초일 때 기준 값 9500[rad/s]를 만족하면서 일정하게 유지되었다. 즉, 열차의 가감속시에 빠르게 동작하는 것으로 해석되었다. 본 연구는 열차추진시스템에서 SRM을 적용하기 위한 회전자 속도제어의 기초연구이며, 향후 속도 변화에 대한 해석이 필요하다. 또한 실제 적용하기 위해서는 정확한 시뮬레이션 조건이 필요하며, 여러 개의 SRM의 병렬운전제어가 필요하다. 그리고 실제 철도환경에 적합하도록 하는 시험이 필요하며, SRM의 회전자 속도제어를 위한 다른 제어기의 사용에 대해서도 해석할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 강대현, "효율향상을 위한 기전력에 대한 연구", 한국전기연구원, pp.40-48, 1998.
- [2] 안준선, 이주, "단상 SRM의 고속 구동 제어에 관한 연구", 대한전기학회 논문집, Vol.54 No.10, pp.470-476, 2005.
- [3] 김종철, 현동석, "Matlab/M-file을 사용한 Switched Reluctance Motor의 시뮬레이션", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp.423-426, 2002.
- [4] Guoshing Huang, Hueyjian Uang, "Robust Adaptive PID Tracking Control Design for Uncertain Spacecraft Systems", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol.42, No.4, pp. 521-529, 2006.

- [5] 김상훈, "DC & AC Motor Control", 북두출판사, pp. 163-169, 2007.
- [6] Ping Ge, Musa Jouaneh, "Tracking control of a Piezoceramic Actuator", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.4, No.3, pp.209-216, 1996.
- [7] Kiam Heong Ang, "PID control system analysis, design and technology", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.13, No.4, pp.559, 2005.
- [8] 최성기, "철도에서 전동차의 제동시스템 제어", 한국철도학회 학술대회 논문집, pp.425-429, 2009.
- [9] 서석철, "도시철도 열차의 정위치 정차제어에 관한 연구", 철도전문대학원 박사학위 논문, pp.82-86, 2010.

저 자 소 개



김 성 수 (金 成 洙)

1964년 1월 26일생. 1986년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1994년 고려대학교 산업대학원 전기공학과 졸업. 2009년~현재 철도전문대학원 철도전기신호공학과 박사과정. 2006년~현재 경기기계공업고등학교 교사

Tel : 02-970-8919
 Fax : 02-978-4327
 E-mail : kss2572@hanmail.net



김 민 석 (金 旼 奭)

1983년 4월 3일생. 2006년 서울기술대학교 전자정보공학과 졸업. 2008년 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 졸업. 2008년~현재 철도전문대학원 철도전기신호공학과 박사과정

Tel : 02-970-6874
 Fax : 02-978-6874
 E-mail : kms0403@seoultech.ac.kr



이 종 우 (李 鍾 宇)

1959년 3월 20일생. 1983년 한양대학교 기계설계과 졸업. 1986년 Ecole Centrale de Nantes 졸업, 1993년 Paris VI 졸업 (공학). 2005년~현재 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수

Tel : 02-970-6874
 Fax : 02-978-6874
 E-mail : saganlee@seoultech.ac.kr