

철도차량구동용 영구자석전동기의 주행성능 개선을 위한 제어 기법에 관한 연구

Study on control strategies for the improvement of driving performances of PMSM

오승철*, 신원진***, 오예준**, 원준희**, 김현진**, 배성우****, 이 주**†

Seung-Chul Oh*, Won-Jin Shin***, Ye-Jun Oh**

Jun-Hui Won**, Hyun-Jin Kim**, Sung-Woo Bae****, Ju Lee**†

Abstract Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM) has recently been studied widely for traction motors of Electric vehicles and Railway systems. This paper proposes a new control strategy to stabilize driving performances particularly on accelerations based on classical control theory utilizing Proportional-Integral(PI) controllers and compare the system responses with a conventional approach. Simulated results are analyzed in terms of performance of control systems.

Keywords : PMSM, PI Controller, Acceleration performance, Traction motors

초 록 영구자석동기전동기(PMSM)는 최근 전기자동차 및 철도차량 시스템의 구동용 모터로써 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 이러한 PMSM의 제어 기법을 제안하는데 특히 가속 시 주행성능의 안정화를 목표로 하는 새로운 제어 기법을 소개하고 다른 제어 방식과 시뮬레이션을 통해 비교함으로써 시스템 상에서의 출력 특성을 비교한다. MATLAB/Simulink를 통하여 제안하는 제어 기법을 모델링하고 각 제어 기법에 따른 시스템의 특성을 분석하였다.

주요어 : 영구자석전동기(PMSM), PI 제어기, 가속성능, 구동 모터

1. 서 론

영구자석동기전동기(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)는 단위 체적 당 높은 토크와 효율을 얻을 수 있어 다양한 산업 분야에 사용되어 왔으며, 최근에는 전 세계적으로 확대되고 있는 탄소배출 제한 및 신재생에너지 정책에 따라 자동차 산업에도 화석연료를 사용하는 기존의 엔진 시스템을 대신하는 친환경 시스템으로의 전환에 적용되고 있다. 전기 자동차 및 철도차량의 구동용으로 사용되는 영구자석동기전동기를 제어하기 위해서는 전력을 공급하는 배터리와 이 전력을 교류전력으로 변환해주는 인버터 시스템이 구성되어야 한다.

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

* 공항철도(주) 기술사업처

** 한양대학교 공과대학 전기공학과,

*** 한양대학교 공학대학원 철도시스템공학과

**** 영남대학교 공과대학 전기공학과

또한, 자동차 또는 철도차량을 운전하는 운전자가 원하는 속도로 운전하기 위해서는 인버터로부터 모터로 공급되는 전력을 제어할 수 있는 제어 시스템도 필수적인 요소라고 할 수 있다. 반복적인 일을 하는데 사용되는 모터를 제어하는 시스템에 비하여 구동용 모터의 제어 시스템은 운전 시 다양한 환경변화에 맞춰 순시적으로 제어할 수 있는 복잡한 제어 알고리즘 및 시스템이 구성되어야 주행성능과 안전을 보장할 수 있다. 구동용 모터 제어 시스템에서는 속도와 토크가 주요 제어변수로서 알고리즘을 설계하는데 사용되는데 최근에는 순시적으로 이러한 변수를 제어할 수 있는 벡터제어(Vector Control) 알고리즘이 사용되고 있다.

본 논문에서는 철도차량 시스템에 사용되는 영구자석동기전동기를 제어하는데 있어 철도차량이 가속하는 구간에서의 주행성능을 안정화 할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 철도차량의 가속이 짧은 시간에 발생하지 않는 점을 고려하여 가속구간에서의 주행성능이 운전자의 조작에 의존하지 않는 방법을 소개하는 것이 특징이다. MATLAB 시뮬레이션을 통해 제어 시스템을 모델화하여 제안하는 알고리즘의 성능을 분석하고 일반적으로 유추할 수 있는 제어 방식과 비교하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 철도차량 구동용 영구자석동기전동기의 제어 시스템 모델

철도차량 구동용 영구자석동기전동기는 배터리로부터 직류전력을 받아 인버터를 통해 교류전력으로 변환되며 이 교류전력이 전동기로 공급되는데 제어를 한다는 것은 전동기로 공급되는 교류전력을 제어한다는 것과 같다고 할 수 있다. Fig. 1은 영구자석동기전동기의 속도 제어 시스템 구조를 나타낸다. 그림에서 Current Vector Algorithm은 전동기의 속도를 피드백 받아 속도에 따라 운전요구사항에 맞게 전류벡터를 생성하는 알고리즘 부분을 나타내는데 정격속도 이상에서 약자속 제어(Field-weakening Control) 등의 다른 제어 기법으로 전환하고자 할 때 전환된 제어 기법에 따라 d축 전류벡터와 q축 전류벡터 지령이 출력되도록 한다.

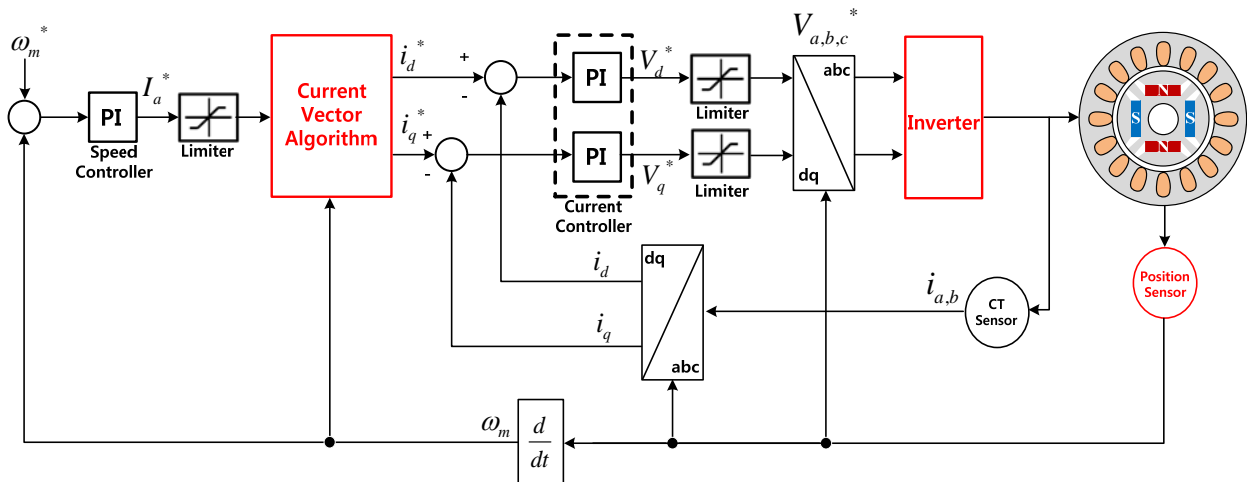


Fig. 1 Block diagram of the control system for IPMSM

Fig. 1에서 CT Sensor는 전동기에 공급되는 전류를 측정하여 전류제어기로 피드백 하고, Position Sensor는 회전자의 위치 즉, 기준 위치로부터의 변위 각을 피드백 하여 속도제어기의 오차를 생성하고 Current Vector Algorithm에서 적절한 전류벡터 지령을 출력할 수 있도록 한다.

2.2 영구자석전동기의 속도제어기 설계

영구자석동기전동기의 속도제어는 일반적으로 비례적분(PI: Proportional-Integral) 제어기로 설계한다. Fig. 2는 전동기의 속도제어기 구조를 MATLAB/Simulink 상에서 나타낸 것이다.

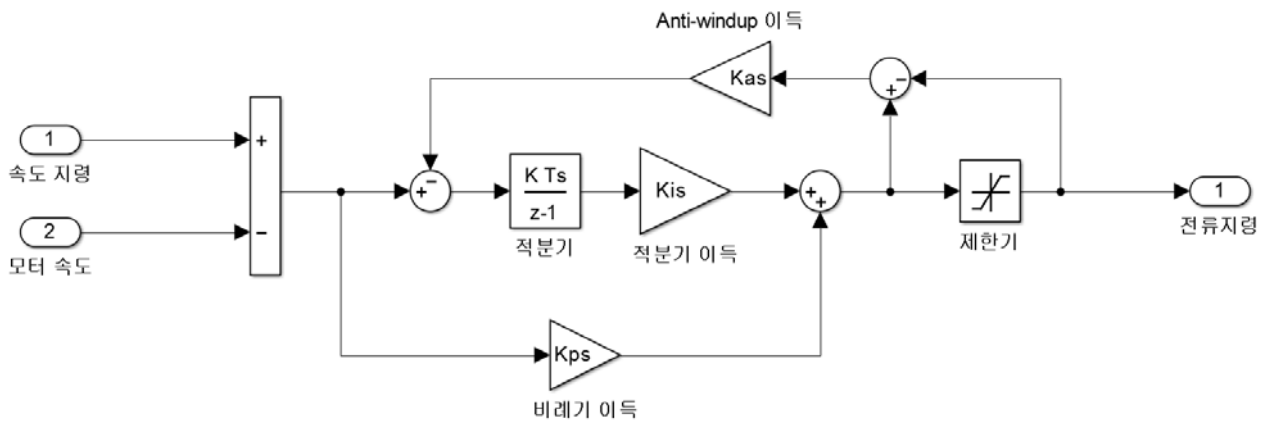


Fig. 2 전동기의 속도제어기 구조 (MATLAB/Simulink)

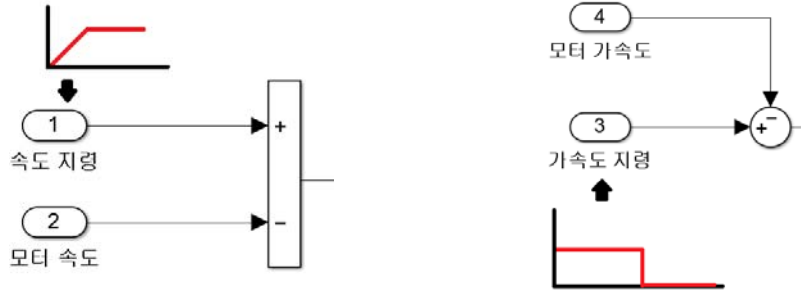
전동기의 속도제어기는 폐루프제어기(Closed-loop Controller)의 형태를 가지는데 속도 지령 값과 실제 전동기의 속도의 차를 제어기의 입력으로 하고 비례이득과 적분이득을 제어 시스템의 요구사항을 만족하도록 적절히 선정한다. 또한, 적분 누적 방지(Anti-Windup) 제어기를 추가하여 출력 값이 지령 값을 잘 따라가도록 설계한다. 출력 값은 상위 제어기인 전류 제어기의 지령 값이 된다.

2.3 제안된 가속구간에서의 제어 알고리즘(가속도 기반)

서론에서 언급하였듯이 본 논문에서는 철도차량의 가속이 짧은 시간에 발생하지 않는다는 가정을 하고 이 가속구간에서 발생할 수 있는 속도변화 즉, 가속도의 변동을 저감할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 가속구간에서의 제어 지령을 주는 방법은 크게 두 가지로 예측 할 수 있는데 제어기의 입력 즉, 속도지령 값을 시간에 따라 일정하게 증가시키는 방법과 특정 가속도 값을 지령 값으로 하는 제어기를 설계하는 방법이다. 두 가지 방법에 대하여 MATLAB/Simulink 상에서 같은 가속성능을 발휘하는 지령 값을 주었을 때 시스템의 특성을 비교, 분석한다.

2.3.1 속도지령 제어 기법

먼저 속도지령을 시간에 따라 일정하게 증가시키는 방법은 Fig. 1에 나타낸 일반적인 속도 제어기를 사용하되, 지령 값을 일정하게 증가시킨다. Fig. 3(a)는 증가하는 속도지령의 속도 제어기의 입력 부를 나타내고 빨간색 선이 지령 값의 변화를 나타낸다.



(a) Increasing reference for PI controller

(b) Constant acceleration reference for PI controller

Fig.3 Reference characteristics of PI controller

제어이득을 충분히 잘 선정하여 모터속도가 속도지령을 잘 따라가도록 설계한다면 일정하게 증가하는 속도지령에 대하여 출력(모터 속도)도 일정하게 증가하는 일정한 가속도를 가진다.

2.3.2 제안된 가속도 제어 기법

본 논문에서 제안하는 가속도 제어 기법은 일정한 가속도 값을 입력 값으로 가지는 비례적분 제어기이다. Fig. 3(b)는 제안된 가속도 제어기의 입력 부를 나타낸다. 제안된 가속도 제어기의 지령은 일정한 값을 가지며 모터 가속도 값을 피드백 한다. 증가하는 속도지령의 속도 제어기에서는 지령 값이 시간에 따라 변하기 때문에 제어기의 대역폭이 충분히 크지 않은 경우에는 출력이 불안정해질 수 있다는 것과 제안된 가속도 제어기는 Fig. 1의 일반적인 속도 제어기와 같은 제어 성능을 발휘할 것이라는 것을 유추할 수 있다. 다만, 피드백 값으로 들어오는 모터의 가속도 값을 모터 속도 측정과 동등한 정확도로 측정할 수 있다는 전제 하에 두 제어기의 성능을 비교한다.

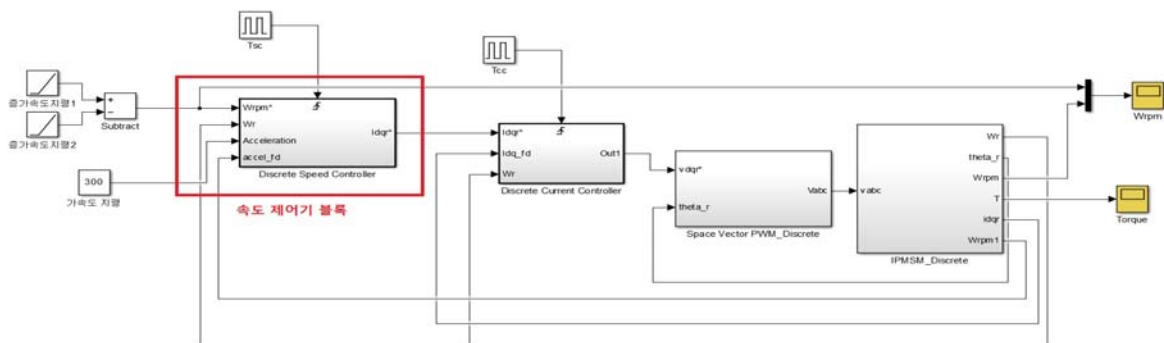


Fig.4 Speed Control System block diagrams for IPMSM

2.4 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 방법 및 결과

Fig. 4는 제안된 제어 기법을 적용하기 위한 영구자석동기전동기의 제어 시스템을 나타낸다. 매입형 영구자석동기전동기(IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)를 모델링 하였고, 벡터제어방식은 SVPWM(Space Vector Pulse Wave Modulation)방식을 채택하였다. 하위 제어기인 속도제어기에 앞 절에서 설명한 증가하는 속도지령의 속도제어기와 제안된 가속도 제어기를 적용하여 제어기 출력이 지령 값에 수렴하는지 비교하였다. Fig. 5 및 Fig. 6는 각각 속도지령이 1초당 300rpm씩 증가하는 속도제어기와 가속도 지령 값이 300rpm/s^2 인 가속도제어기를 이산 시스템으로 시뮬레이션 했을 때의 모터 속도 변화 및 입력전류 값을 시간에 따라 나타낸 결과 그래프이다. 모터 속도는 동일 가속도로 증가 후 900rpm에서 정속운전 하도록 했다.

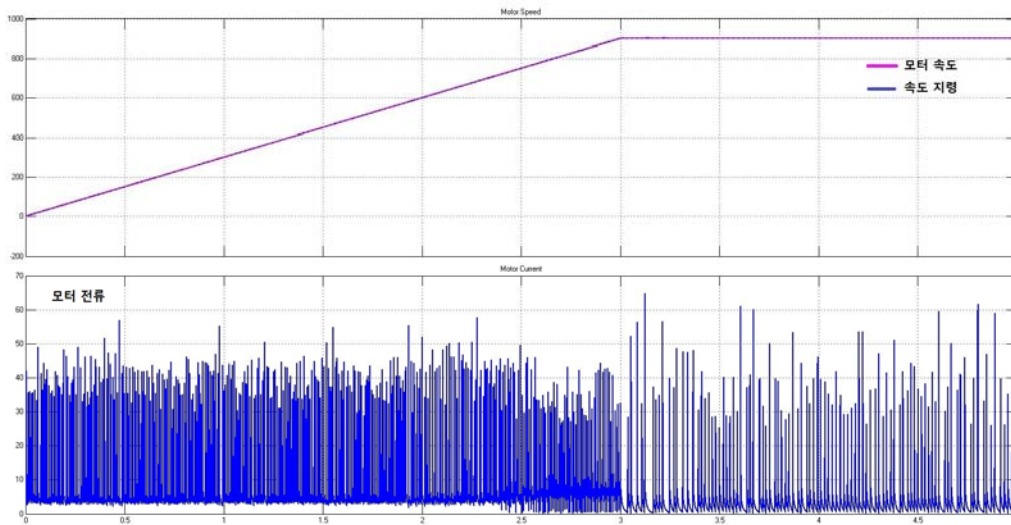


Fig.5 Motor Speed & Current characteristics of speed controller with increasing speed reference

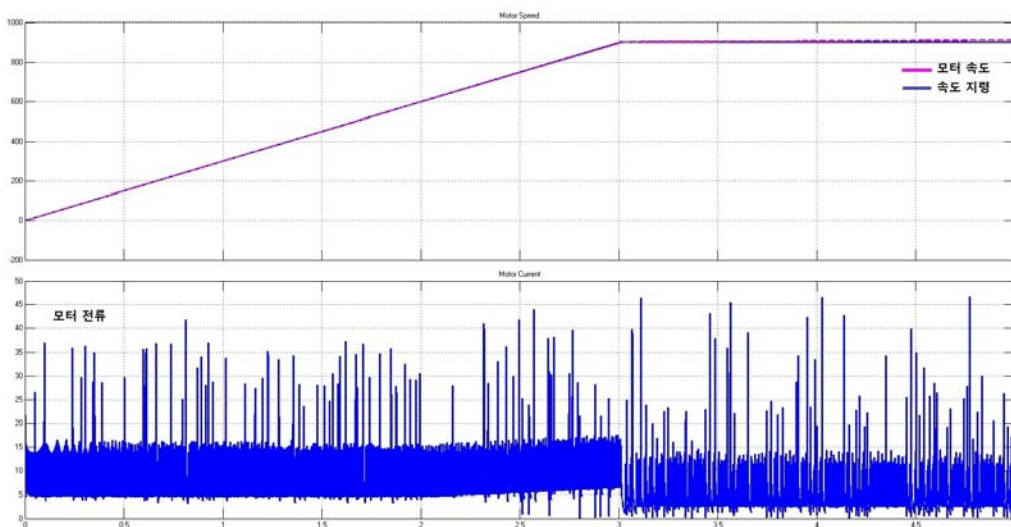


Fig.6 Motor Speed & Current characteristics of acceleration controller with constant acceleration reference

Fig. 5 및 Fig. 6의 모터 속도 그래프에 나타난 바와 같이 각각 증가하는 속도 지령 및 가속도 지령 값에 맞게 모터 속도가 제어 가능 하였다. 하지만, 증가하는 속도지령의 속도제어기의 경우 모터로 공급되는 전류의 크기가 가속도제어기의 경우보다 큰 양상을 보였다. 이는 동일한 비례적분제어기를 사용하여 동일한 가속도 성능을 발휘하도록 지령 값을 주더라도 제어 기법에 따라 최대 전류가 다른 양상을 나타낼 수 있다는 것이고 가속도제어기를 사용할 경우에 더 작은 크기의 전류만으로 속도제어가 가능함을 보인 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 철도차량의 구동용 모터로써 사용되는 영구자석동기전동기의 제어에 있어 가속구간에서의 주행성능을 개선하기 위한 제어 기법을 제안하고 MATLAB/Simulink 상에서 시뮬레이션을 통해 제안한 제어 기법의 특성을 기존의 제어 방식과 비교하였다. 본 논문에서 제안된 제어 기법은 철도차량의 가속이 짧은 시간에 발생하지 않는 점에 착안하여 가속구간에서의 제어 기법에 따라 제어 성능 및 시스템의 출력 특성을 개선할 수 있을 것이란 예측으로부터 시작되었다. 제안된 가속도제어기를 통해 가속 시 기존에 일반적으로 사용되는 제어기보다 더 적은 전류가 모터에 공급됨으로써 발열 특성 개선과 하드웨어 시스템의 크기를 줄일 수 있을 것으로 기대되며 철도차량 외에도 전기 자동차 및 하이브리드 자동차의 구동모터 제어 시스템 개발 시에도 가속구간에서의 제어 기법 선정에 참고자료로 활용될 수 있기를 바란다.

참고문헌

- [1]한양대학교 에너지변환연구실 저 (2012) 전기기기, 홍릉과학출판사, 서울시 강북구
- [2]김상훈 저 (2016) 모터제어 -DC, AC, BLDC, 복두출판사, 서울특별시 영등포구