

예측전류제어가 적용된 IPMSM 구동 시스템의 제어기 성능 분석

황준하¹, 원일권, 김도윤, 김영렬, 원충연
안양대학교, 성균관대학교

The Performance Analysis of IPMSM Drive System applied Predictive Current Control

Jun Ha Hwang, Il Kuen Won, Do Yun Kim, Young Real Kim, Chung Yuen Won
Anyang University, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

The control of IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) for electric vehicle is important to track torque reference depended on accelerator. This paper executes IPMSM control applied the predictive current control which has good dynamic characteristic and, compare PI control with predictive current control to verify dynamic characteristic through simulation.

1. 서 론

IPMSM은 구조적인 특성상 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 모두 사용할 수 있다. 이러한 이유로 단위체적당 토크 출력이 높고, 넓은 속도영역 특성을 가지고 있다. 따라서 최대토크출력과 단위체적당 토크효율이 중요시되는 전기 자동차 주행용 모터로서 IPMSM이 사용되고 있다. 설명한 특징들을 최대한으로 이용하기 위해, IPMSM에 적용되는 제어기는 동특성이 좋아야 한다. 최근 제어기의 동특성을 높이기 위해 지령전류를 미리 예측하는 예측전류제어에 대한 연구가 활발하다. 전기자동차용 IPMSM을 보다 효율적으로 제어하기 위해서는 기존 PI 제어와 예측전류제어에 대한 비교분석이 필요하다.

본 논문에서는 IPMSM의 전류제어기에 PI 제어와 예측전류제어를 각각 사용하여 MTPA(Maximum Torque Per Ampere)를 적용 할 때 나타나는 IPMSM의 출력특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

2. 본 론

2.1 기존의 PI 제어

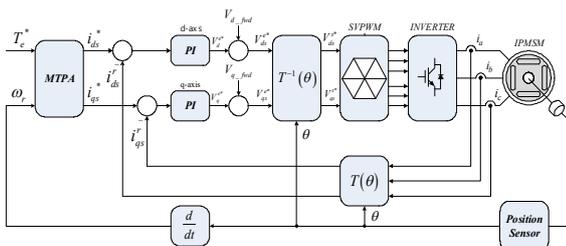


그림 1 PI 제어가 적용된 IPMSM 구동 시스템
Fig. 1 The IPMSM drive system applied PI control

그림 1은 PI 제어로 전류제어기를 구성하고 역기전력 전향 보상이 포함된 IPMSM 구동 시스템을 나타낸다. PI 제어는 MTPA에서 출력된 전류지령과 측정 전류와의 차이를 입력으로 받아 설정된 비례이득과 적분이득에 따라 d축과 q축의 출력 전압 지령 V_d^{e*} , V_q^{e*} 을 출력한다. PI 제어의 출력은 이득 값에 의해 결정되기 때문에 대역폭에 맞는 이득 값이 아닌 경우 제어성능이 불안정해진다. 또한 과도구간에서 동특성을 빠르게 이득 값을 설정하면 오버슈트가 발생하여 시스템에 무리를 준다. 하지만 PI 제어는 구조가 간단하고 제어성능도 크게 떨어지지 않아 전기자동차용 IPMSM 제어시스템에서 주로 사용된다.

2.2 예측전류제어

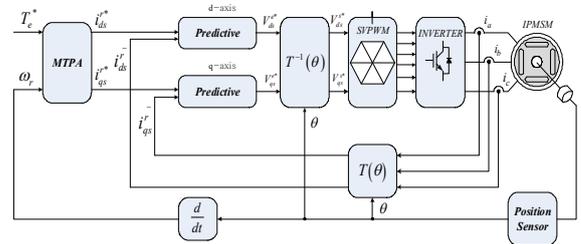


그림 2 예측전류제어가 적용된 IPMSM 구동 시스템
Fig. 2 The IPMSM system applied predictive current control

그림 2는 예측전류제어로 전류제어기를 구성한 IPMSM 구동 시스템을 나타낸다. 예측전류제어는 PI 제어와는 달리 이득 값을 설정 할 필요가 없지만 IPMSM에 대한 수학적 모델링이 필요하다. IPMSM의 역기전력과 상호간섭 성분까지 고려한 동기좌표 d q축 전압 방정식은 식 (1), (2)와 같다.[1]

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + L_d \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_r L_q i_{qs}^e \quad (1)$$

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + L_q \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_r L_d i_{ds}^e + \omega_r \phi_f \quad (2)$$

V_{ds}^e 는 d축 고정자 전압, V_{qs}^e 는 q축 고정자 전압, R_s 는 고정자 저항, i_{ds}^e 는 고정자 d축 전류, i_{qs}^e 는 고정자 q축 전류, L_d 는 d축 인덕턴스, L_q 는 q축 인덕턴스, ϕ_f 는 계자자속을 나타낸다. 이를 이용하여 식 (3), (4)와 같이 전압과 전류를 (k+1)항과

k항의 관계로 전개하여 전압 지령을 직접 계산 할 수 있다. 예측전류제어는 PI 제어와는 달리 이득 값을 따로 정하지 않아도 제어가 되는 장점을 갖는다.[2]

$$V_{ds}^{e*}(k) = R_s i_{ds}^e(k) + L_d \frac{i_{ds}^e(k+1) - i_{ds}^e(k)}{T_s} - \omega_r L_q i_{qs}^e(k) \quad (3)$$

$$V_{qs}^{e*}(k) = R_s i_{qs}^e(k) + L_q \frac{i_{qs}^e(k+1) - i_{qs}^e(k)}{T_s} + \omega_r L_d i_{ds}^e(k) + \omega_r \phi_f \quad (4)$$

3. 시뮬레이션

IPMSM의 전류제어기를 PI 제어와 예측제어를 사용할 때의 출력 토크 성능을 비교하기 위해 표 1과 같은 IPMSM 파라미터를 바탕으로 시뮬레이션 하였다.

표 1 IPMSM의 파라미터
Table 1 Parameters of IPMSM

Parameter	Value	Unit
정격 용량	16	kW
정격 전류	46	A
정격 주파수	60	Hz
고정자 저항	1	Ω
계자자속	0.0455	Wb
d축 인덕턴스	303	μH
q축 인덕턴스	907	μH
pole	8	pole
관성 모멘트	0.0297	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
최대토크	14	Nm

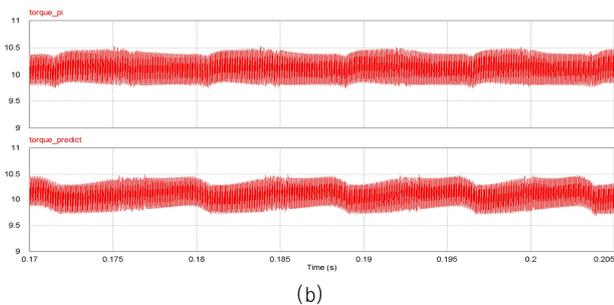
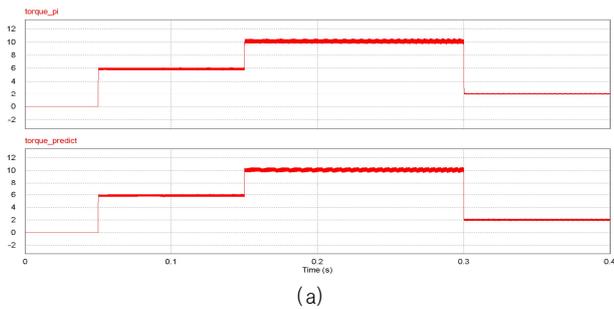


그림 3 PI 제어와 예측전류제어를 사용한 IPMSM의 토크출력
Fig. 3 Torque output of IPMSM using PI control and predictive current control

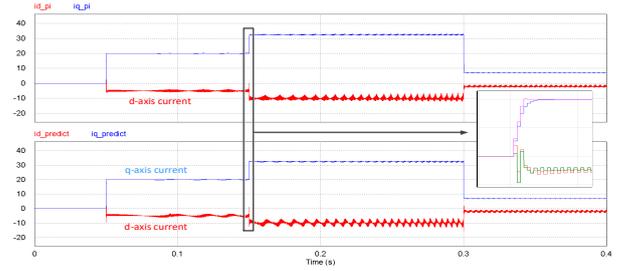


그림 4 PI 제어와 예측전류제어를 사용한 IPMSM의 전류출력
Fig. 4 Current output of IPMSM using PI control and predictive current control

그림 3 (a)는 PI 제어와 예측전류제어의 토크 출력 파형이다. 토크 레퍼런스를 0.05 초에서 6 Nm, 0.15 초에서 10 Nm 0.3 초에서 2 Nm을 주었다. 두 제어기 모두 인가된 토크 지령을 추종하는 것을 확인하였다.

그림 3 (b)는 두 제어기의 토크 출력을 확대한 파형으로 PI 제어가 적용되었을 때 토크 리플이 적게 나타난다. 이를 통하여 정상상태구간에서는 PI 제어의 특성이 우수함을 확인하였다.

그림 4는 주어진 토크 지령에 대한 동기 d q축 전류를 나타낸다. 오른쪽 파형은 PI 제어와 예측전류제어의 과도구간에서 전류파형을 확대하여 비교한 파형이다. 이 파형을 통해 과도구간에서 예측전류제어가 PI 제어보다 동특성이 우수함을 확인하였다. 정상상태구간에서는 동기 q축 전류는 PI 제어와 예측전류제어 간의 차이가 적지만, 동기 d축 전류는 PI 제어가 전류 리플이 더 적은 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 정상상태에서는 PI 제어의 제어성능이 우수하고, 과도구간에서는 예측전류제어의 동특성이 우수함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 PI 제어와 예측전류제어를 IPMSM 구동 시스템에 적용하여 제어기의 성능을 비교 분석하였다. 두 제어기에서는 각각 전류리플과 동특성 측면에서 차이를 갖는다. 두 제어기의 동특성을 비교하였을 경우에는 지령 전압을 직접 계산하는 예측전류제어가 우수하고, 전류 리플과 토크 리플을 비교하였을 경우에는 오차의 적분을 이용하는 PI 제어가 우수함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
(No 2014R1A2A2A05006744)

참고 문헌

- [1] Patricio Cortés, Marian P. Kazmierkowski, Ralph M. Kennel, Daniel E. Quevedo, José Rodríguez "Predictive Control in Power Electronics and Drives" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 55, No. 12, pp 4312 4324, 2008, Dec.
- [2] 서정현, 한승훈, 선정원, 이권순, "PMSM에 대한 예측 전류 제어 분석과 제안하는 예측 전류 제어", 한국자동차제어학술회의 논문집, pp 243 249, 2005, Oct.