

# 매입형 영구자석 동기 전동기의 개선된 토크 제어 방법

박진호, 원충연  
성균관대학교

## Improved Torque Control Method of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Jin Ho Park, Chung Yuen Won  
SungKyunKwan Univ.

### ABSTRACT

영구자석 동기 전동기가 정출력 영역에서 운전 되며 토크 제어가 수행될 경우 과도상태의 응답 특성은 정토크 영역에서 운전되며 토크 제어가 수행될 때보다 매우 중요하다. 본 논문에서는 정출력 영역에서 안정된 토크 제어를 수행하기 위한 전류 제어기의 최적화 방법을 제안하였다.

### 1. 서 론

전동기는 전기 에너지를 기계적 회전력으로 출력하는 전기 기기이다. 즉, 전동기의 출력은 토크이며 기기의 종류와 상관없이 위치나 속도 제어가 요구되는 시스템에서 실제로 제어되어야 할 요소는 전동기의 토크라고 할 수 있다. 따라서 전동기의 제어계에서 전류 제어기는 가장 내부에 위치하게 되며 가장 빨라야 하고 가장 넓은 대역폭을 가져야 한다. 전류 제어기의 구동 성능이 곧 전동기의 구동 성능이 되기 때문이다.

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 전속도 영역에서 최적 제어가 가능한 혼합제어기를 기반으로 전류 제어기를 구성하고 정출력 영역에서 토크 제어를 수행하여 기존의 최적화된 PI 제어기의 응답 특성과 비교하였다.

### 2. IPMSM의 전류 제어기 최적화

#### 2.1 IPMSM의 전류 제어기 이득 선정

3상 교류 전동기의 전류 제어를 위하여 3상 교류 전류를 각각 직접 제어할 수는 있으나 일반적으로 벡터 제어를 통하여 3상 전류를  $d-q$ 축 좌표계로 변환하여 사용한다. 여기서  $d-q$ 축 정지 좌표계는 교류 전류 제어를 위한 제어기이므로 크기와 위상의 오차가 존재한다. 따라서 교류 전동기의 전류와 역기전력이 직류로 변환되는 동기 좌표계 상에서 전류 제어기를 구성하여야 한다. 이러한 동기 좌표계 전류 제어기는 직류 전동기의 전류 제어기를 설계하는 방법과 동일하게 된다.

회전자 각속도  $\omega_r$ 로 회전하는 IPMSM의  $d-q$ 축 전압 방정식은 식 (1 1), (1 2)와 같다.

$$v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_{ds} \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r \quad (1\ 1)$$

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_{qs} \frac{di_{qs}^r}{dt} - \omega_r (L_{ds} i_{ds}^r + \phi_f) \quad (1\ 2)$$

위 식으로부터 동기 좌표계 PI 전류 제어기의 이득 선정에 필요한  $R$ 은  $R_s$ 임을 알 수 있고, IPMSM의 경우에는  $d-q$ 축 인덕턴스 값이 다르므로 각 전류 제어기의 인덕턴스  $L$ 역시  $L_{ds}$ 와  $L_{qs}$ 로 선정하여야 한다. 따라서 전류 제어기의 이득은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$K_{pc} = L_{dqs} \omega_{cc} \quad (2\ 1)$$

$$K_{ic} = (R_s / L_{dqs}) K_p = R_s \omega_{cc} \quad (2\ 2)$$

비례 이득  $K_{pc}$ 는 속응성을 결정하며 적분 이득  $K_{ic}$ 는 정상상태 오차를 줄이는 속도를 결정하는 값이다. 이러한 이득값이 커지면 속응성과 정상상태 오차를 줄이는 구동 성능이 좋아 지지만 시스템 응답이 진동하여 불안정해질 수 있다. 이러한 전류 제어기의 성능을 좌우하는 것이 식 (2 1), (2 2)의 대역폭  $\omega_{cc}$ 이다. 이 대역폭은 전압을 인가하는 전력변환장치의 스위칭 주파수에 제한된다. 본 논문에서는 스위칭 한 주기에 전류 샘플링을 한 번 하여 스위칭 주파수의 1/20로 설정하였다.

#### 2.2 PI-IP 혼합 전류 제어기의 구성

그림 1은 IPMSM의 구동을 위한 전류 제어기의 제어 블록도이다.

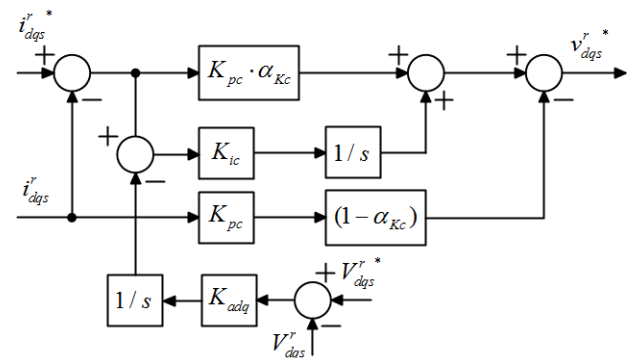


그림 1 PI-IP 혼합 전류 제어기 블록도  
fig. 1 Block diagram of PI-IP hybrid current controller

PI 및 IP 제어기를 선택할 수 있는 설정 변수의 적응적인 설정으로  $d-q$ 축 전류 제어의 최적화가 가능하며 PI 제어기와 비교했을 때 똑같이 적응 제어를 했을 경우 보다 더 안정적인 제어가 가능하다.

### 2.3 최적화된 전류 제어기의 구동 성능

그림 2(a)는 2.1절에서의 이득 선정 과정을 통하여 구성된 PI 전류제어기를 이용하여 정토크 영역에서 토크 제어를 수행한 MATLAB 시뮬레이션 결과이다.

정토크 영역이라 전압 여유분이 충분하여  $d$ 축 전류 응답 특성이 좋지 않아도 시스템에 큰 영향이 없지만 정출력 영역에서의 운전은 대비하여  $d$ 축 전류 제어기의 대역폭을  $q$ 축 전류 응답 특성과 비교하여 최적화 할 필요가 있다.

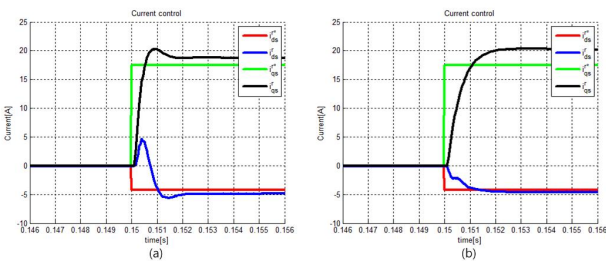


그림 2 PI 전류 제어기 응답 특성(정토크 영역)  
fig. 2 Response Characteristic of PI current controller

그림 2(b)는 그림 2(a)의  $d$ 축 전류 제어기의 대역폭을 조정하여 이득값을 최적화한  $d-q$ 축 전류 응답 특성이다.

$d$ 축 전류의 응답 특성을 확실히 개선시켜야 정출력 영역에서 빠른 전압 여유분을 확보할 수 있어 토크 제어를 할 때에 과도 상태에서 정상 상태까지 안정된 제어가 수행될 수 있다.

그림 3은 최적화된 PI 전류 제어기의 정출력 영역에서의 응답 특성이다. 제어기의 성능을 확인하기 위하여 속도는 전동기 최대 속도인 6000[rpm]의 90%로 설정하였으며 지령토크는 정격의 50%인 20[Nm]로 설정하였다. 최대 속도에서 출력 가능한 최대 토크가 20[Nm]임을 감안하면 충분히 큰 출력을 내고 있음을 알 수 있다.

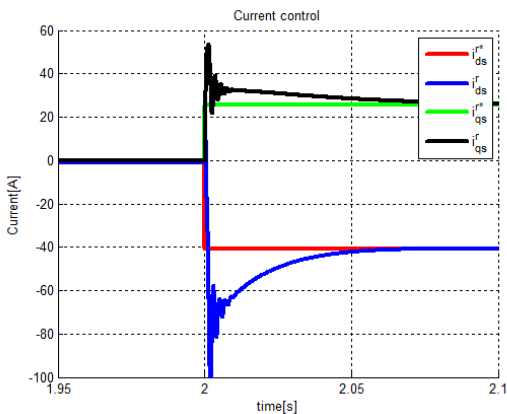


그림 3 PI 전류 제어기 응답 특성(정출력 영역)  
fig. 3 Response Characteristic of PI current controller

과도 상태에서의 전류 응답 특성이 매우 불안정하지만 제어

가 되고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 PI 제어기의 특성상 오버슈트가 발생할 수밖에 없는 구조이며 설정할 수 있는 대역폭의 범위로 제한적이라 제어에 한계가 있다. 이를 위한 해결책으로 안전계수 적용 방법이 있다. 즉, 정출력 영역에서 운전할 때 필요 이상의 과전류를 흘려 미리 충분한 전압 여유분을 확보하는 방법으로 SVPWM으로 구동되는 인버터를 기준으로 출력 가능한 전압의 크기를 약  $V_{DC}/\sqrt{3}$ 라 할 때, 안전 계수  $K_s$ 를 곱한 값만큼을 피드백 받아  $d$ 축 전류  $i_{ds}^*$ 를 흘려주는 전압제한 방식의 약자속 제어 방법이다. 그러나 이러한 계수 적용 방법은 계수의 크기가 클수록 전력 낭비가 커지기 때문에 보다 효율적인 제어 방법은 제어기 성능을 개선시켜 안전 계수를 최대한 작게 설정하는 것이다.

그림 4는 PI 제어기와 IP 제어기를 결합시킨 최적화된 혼합 제어기의 전류 제어 응답 특성이다.

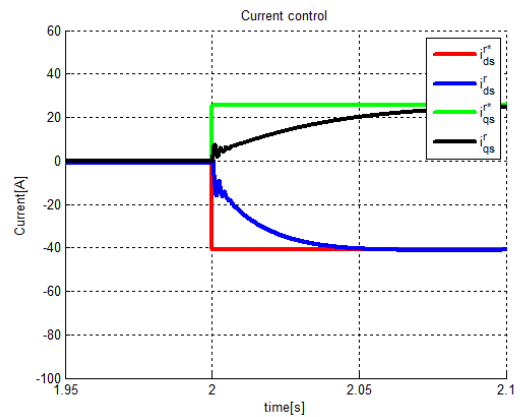


그림 4 PI-IP 혼합 전류 제어기 응답 특성(정출력 영역)  
fig. 4 Response Characteristic of PI-IP current controller

PI 제어기와 IP 제어기의 사용 빈도를 적응적으로 조절하면 그림 4와 같은 과도상태에서의 응답특성을 얻을 수 있다. 전동기의 속도가 증가 될수록 지령전압과 역기전력 전압 역시 증가하게 되므로 전류를 제어할 때 큰 진동이 발생하게 된다. 따라서 정토크 영역과는 달리 정출력 영역에서는 과도 응답의 특성이 좋지 않아 좀 더 강한 제어가 요구된다.

### 3. 결론

본 논문에서는 토크 제어를 위한 전류 제어기를 구성할 때 PI 제어기와 IP 제어기를 결합시킨 혼합 제어기를 구성하여 정출력 영역에서의 전류 제어 응답 특성을 확인하였다. 구성된 제어기는 최적의 설정 변수 값에서 만족할 만한 응답 특성을 보였다. 이 값을 적응적으로 조절한다면 전 속도 구간에서 안정적인 제어가 가능함을 확인하였다.

### 참고 문헌

[1] H. MAHMOUDI, A. LAGRIOUI, "FLUX WEAKENING CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 34, No. 2, pp.110-117, 2011, December.