

새로운 토크 제어를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기 토크제어

박정우 송지훈
현대로템

A New Torque Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation

Jeong-Woo Park, Ji-Hun Song
Hyundai Rotem

ABSTRACT

IPMSM의 속도제어를 다룬 [1]에서 토크제어에 대해 별다른 언급이 없어서 수많은 연구자들이 IPMSM의 토크제어를 전류맵 기반으로 하고 있다. 이에 본 논문은 [1]에 사용할 수 있는 새로운 토크제어를 제안한다.

1. 서 론

IPMSM의 수식을 기반으로 한 토크제어기가 없어서 전류맵 기반 토크제어를 대부분 사용한다. 특히 자동차 업계는 국토교통부에서 5% 이내 토크 정밀도를 요구하여, 정밀한 토크제어를 위해 전류맵 보정을 한다. 본 논문은 수식 기반으로 정밀한 토크제어를 수행하는 새로운 토크 제어기를 제안한다.

2. 새로운 토크 제어기

2.1 새로운 토크 제어기

IPMSM의 토크 수식은 다음과 같다.^[2]

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left[\lambda_f I_s^* \sin\beta + \left(\frac{L_d - L_q}{2} \right) (I_s^*)^2 \sin 2\beta \right] \quad (1)$$

여기서 T_e 는 전동기의 순시 전기적 토크[N.m], P 는 전동기의 극수, λ_f 는 IPMSM의 영구자석 세기[Wb], I_s^* 는 전동기 고정자 전류 크기[A], β 는 d' 축 전류와 고정자 전류 I_s^* 가 이루는 각도[rad]^[2], L_d, L_q 는 d', q' 축 인덕턴스[H]이다.

식(1)을 I_s^* 에 대한 2차 방정식으로 보고, 2차 방정식을 풀면

$$I_s^* = \frac{\text{sign}(T_e^*) \left[-\lambda_f + \sqrt{(\lambda_f)^2 + 4(L_d - L_q) \left(|T_{e,MTPA}^*| \right) \frac{4\cos\beta}{3P\sin\beta}} \right]}{2(L_d - L_q)\cos\beta} \quad (2)$$

으로 T_e 대신 $|T_{e,MTPA}^*|$ 를 사용한다. I_s^* 는 [1]의 속도제어 모드와 대응되며 I_s^* 를 모드에 따라 전환하여 사용할 수 있다. 식(2)를 [1]의 MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 수식에 넣으면 되며 MTPA 수식은 다음과 같다.^[1]

$$i_{dx,MTPA}^{r*} = \frac{\lambda_f - \sqrt{(\lambda_f)^2 + 8(L_d - L_q)(I_s^*)^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (3)$$

$$i_{qx,MTPA}^{r*} = \text{sign}(I_s^*) \sqrt{(I_s^*)^2 - (i_{dx,MTPA}^{r*})^2} \quad (4)$$

$$\beta = \text{atan2}(|i_{qx,MTPA}^{r*}|, i_{dx,MTPA}^{r*}) \quad [\pi^*0.501, \pi^*0.999] \quad (5)$$

β 는 약자속 전류가 포함되지 않은 MTPA 전류지령들만으로 부터 얻는다.

새로운 토크제어기의 구조는 그림 1과 같다.

그림 1의 식(6), 식(7)의 경우 약자속 구간에서 약자속 전류 Δi_{df}^{r*} 가 들어가면 토크 실제 측정값 T_e 가 사용자의 토크 지령 T_e^* 보다 크게 나오는 현상이 있으므로 MTPA 토크 지령 $T_{e,MTPA}^*$ 을 사용자의 토크 지령 입력 T_e^* 보다 작아지게 하는 원리이다. 식(6) 대신 토크 실제 값을 넣으면 가장 좋다.

$$T_{e,FB} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_{qs}^{r*} + (L_d - L_q) i_{ds}^{r*} i_{qs}^{r*}] \quad (6)$$

$$T_{e,FFcomp} = LPF \left[\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) (i_{dx,MTPA}^{r*} - i_{ds}^{r*}) i_{qs}^{r*} \right] \quad (7)$$

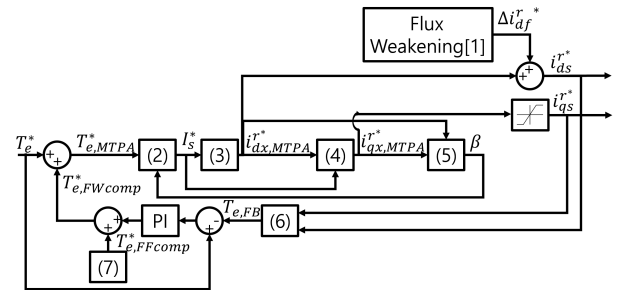


그림 1 새로운 토크 제어기의 구조

Fig. 1 A New Torque Controller

2.2 구현 상의 문제점들과 해결들

식 (2)에 토크 지령의 크기인 $|T_{e,MTPA}^*|$ 로 하여, 음의 토크 지령 시 음수의 제곱근이 되지 않도록 한다. 음의 토크 지령은

$sign(T_e^*)$ 텀으로 반전하여 사용하며, 이는 [1]에서 식(4)의 $sign(I_s^*)$ 를 사용하여 $i_{qs,MTPA}^*$ 를 반전하는 것으로 이어진다. 또 식(5)의 β 에 $|i_{qs,MTPA}^*|$ 로 된 것은 음의 토크 지령 시 식(2)에 토크 지령의 크기인 $|T_{e,MTPA}^*|$ 를 사용하기 때문이다.

식(2), 식(3), 식(4)는 음수의 제공근이 되지 않도록 제공근 안의 값이 음수일 경우에는 제공근 안을 반전하여 $\sqrt{-x}$ 으로 입력한다. 이는 0으로 처리하는 것보다 토크가 작기 때문이다.

식(2)에서 $\sin\beta, \cos\beta$ 가 분모로 들어가기 때문에 식(5) $\beta = [\pi*0.501 \sim \pi*0.999]$ 으로 제한하여, 0으로 나눗셈 되지 않게 한다. β 의 초기값과 idle 시(if $i_{dr,MTPA}^* = 0$) 값은 $\beta = \pi*0.501$ 로 하여 초기 토크가 작게 나오게 한다.

β 는 약자속 전류가 포함되지 않은 MTPA 전류지령들만으로 부터 얻는데, 약자속 전류까지 포함해서 β 각을 계산한 것보다 MTPA 지령 전류만으로 β 각을 계산한 것이 약자속 구간에서 실제 토크를 지령에 더 가깝게 하기 때문이다.

식(6)을 사용한다면 PI제어기 없이 식(7)만 이용해도 된다. 식(7)의 LPF는 전류지령이 급격히 변경되는 경우에 적용한다.

식(6) 대신 다른 토크 수식을 사용한다면 PI제어기가 필요한데, 사용자 토크 지령 T_e^* 가 스텝으로 부호가 반전되는 경우와 약자속 전류가 있는 상황에서 토크 제어 후 사용자 토크 지령을 0으로 변경하는 경우에 PI제어기 오동작이 있다. 이 문제들은 MTPA 토크 지령 크기 $|T_{e,MTPA}^*|$ 가 사용자의 토크 지령 크기 $|T_e^*|$ 보다 큰 경우 PI제어기 모든 요소를 0으로 초기화하는 것으로 해결된다. MTPA 토크 지령 크기 $|T_{e,MTPA}^*|$ 는 사용자 토크 지령 크기 $|T_e^*|$ 보다 항상 작기 때문이다.

λ_f, L_d, L_q 파라미터 실제 값이 전류 및 온도에 따라 변동되기 때문에 고토크 구간에서 실제 토크와 오차가 있을 수 있다. λ_f, L_d, L_q 파라미터를 전자계 해석 값을 토대로 작성된 참조표로 선형보간 하여 식(6)과 실제토크가 일치해야 한다.

$$\hat{L}_d = \frac{v_{qs}^{r*} - R_s i_{qs}^{r*} - \lambda_f \omega_{re} - d(L_q i_{qs}^{r*})/dt}{\omega_{re} i_{ds}^{r*}} \quad (8)$$

$$\hat{L}_q = -\frac{v_{ds}^{r*} - R_s i_{ds}^{r*} - d(L_d i_{ds}^{r*})/dt}{\omega_{re} i_{qs}^{r*}} \quad (9)$$

$$\hat{\lambda}_f = \frac{v_{qs}^{r*} - R_s i_{qs}^{r*} - d(L_q i_{qs}^{r*})/dt}{\omega_{re}} - L_d i_{ds}^{r*} \quad (10)$$

또는 파라미터 추정을 통해 참조표를 얻을 수 있는데, d^r 축, q^r 축 전류, 속도를 변경 시험하여 식(8), 식(9), 식(10) 결과로 파라미터 참조표를 작성할 수 있다. 통상 속도와 d^r 축 전류 항은 무시하고, q^r 축 전류항의 1차원 참조표로 선형보간 한다. 전압지령은 인버터 비선형성 보상하여 실제전압과 일치해야 한다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_{qs}^{r*} + (L_d - L_q) i_{ds}^{r*} i_{qs}^{r*} - L_{eq} (i_{ds}^{r*})^2 + L_{ed} (i_{qs}^{r*})^2] \quad (11)$$

또는 온라인 파라미터 추정을 이용할 수도 있는데 [3]의 토크 수식인 식(11)에 LPF를 거치고 사용할 수 있다. 하지만 식(11)은 L_{ed}, L_{eq} 를 안정화하기 위해 실제 값 대신 지령을 이용하고 LPF를 통과한 값을 이용하더라도, 사용자 토크 지령이

변경되는 과도상태에서 추정된 L_{ed}, L_{eq} 의 진동이 있으므로, 토크 지령을 변경하는 경우 안정화 시간을 카운트한 후에 그림 1의 식(6) 대신 식(11)을 입력할 수 있다. 또한 전동기 속도 향으로 인하여 기저 속도의 10% 이상에서 사용하는 것이 좋다.

[3]은 전류의 실제 값을 사용하는 토크 피드백 제어기인데, 본 논문은 전류의 지령 값을 이용할 수 있는 토크 제어기이므로, 전류 지령 값에는 센서 노이즈가 없으므로 강건하고 응답성이 매우 빠르다. 또한 본 논문은 필요 시 그림 1의 식(6) 부분을 다른 토크 수식 및 토크 측정치 등 다양하게 이용하여 피드백할 수도 있다.

3. 시험 결과

AVL사의 200kW급 부하 다이내모미터를 이용한 IPMSM의 토크제어 시험 결과는 그림 2이다. 그림 2는 AVL 다이내모미터의 토크센서로 측정된 실제 토크 값이다.

AVL 부하 다이내모미터는 전동기 속도를 2700[RPM]으로 속도제어를 하고 있고, 본 논문의 토크 제어기가 구동 중인 인버터를 이용하여 IPMSM의 토크를 10, 20, 30, 40, 50[N.m]로 제어하였다. 약자속 구간에서 본 논문의 토크 제어기를 이용하여 즉각적으로 원하는 토크가 나오게 된다.

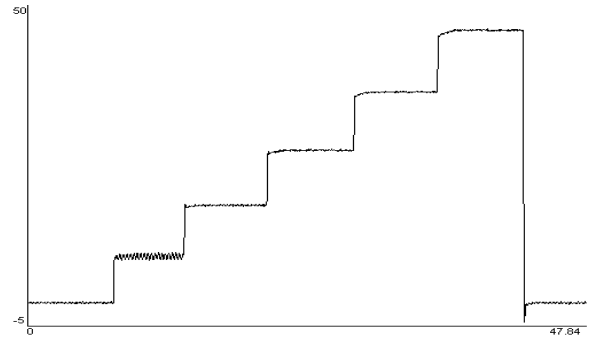


그림 2 약자속 구간에서의 토크 제어 시험
Fig. 2 In Flux Weakening Region, Torque Control Test

4. 결론

본 논문은 [1]의 토크제어 버전이다. 새로운 토크 제어기를 제안하였고, 다이내모 시험을 통해 결과가 검증되었다. 제어기 구조 상 실제 값이 아닌 지령 값을 이용하여 강건하고 응답이 빠르다. 본 논문은 그림 1의 토크 피드백 식(6) 대신 다른 피드백을 사용해서 결과가 더욱 좋아질 수도 있다.

참고 문헌

[1] Jang-Mok Kim and S. -K. Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 1, pp. 43-48, Jan.-Feb. 1997
[2] 김상훈, "모터제어 4판," 북두출판사, 320p, 2022.
[3] 양두영, "매입형 영구자석 동기 전동기의 상호인덕턴스 추정을 이용한 토크제어," 국내석사학위논문 건국대학교 대학원, 2014. 서울