

유도 전동기의 동특성 개선과 토크 리플 저감을 위한 토크 예측 제어

인효철, 조용수, 이교범
아주대학교 전자공학과

Torque Predictive Control of Induction Motor Drives with Improved Performance and Reduced Torque Ripple

Hyo-chul In, Yongsoo Cho, Kyo-Beum Lee
Ajou Univ., Dept. of Electrical and Computer Engineering

ABSTRACT

본 논문에서는 토크 리플 저감과 동특성을 개선하는 유도 전동기(IM)의 토크 예측 제어 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 고정된 전압 벡터의 크기를 사용하지 않고, 토크 변동분 넓이의 합이 최소값이 되도록 하는 전압 벡터 인가 시간을 결정하여 유도 전동기에 인가한다. 이 방법은 토크 제어에 필요한 전압만 인가하므로 잉여 전압이 발생하지 않는다. 따라서 정확한 제어 성능을 가지면서도 과도 상태에서는 동특성이 개선되고, 정상 상태에서는 토크 리플의 크기를 최소화할 수 있다. 제안하는 알고리즘의 유효성과 우수성을 시뮬레이션으로 검증한다.

1. 서론

토크 예측 제어 기법(Torque predictive control; TPC)은 룩업 테이블을 이용하는 직접 토크 제어 기법과는 달리 지령 전압 벡터를 직접 구하여 제어를 하는 기법이다.

일반적인 TPC의 경우 토크 제어에 필요한 유효 전압 벡터를 계산하여 사용하므로 공간벡터변조 기법 기반의 직접 토크 제어에서의 문제점인 PI 제어기의 부적절한 게인 설정으로 인한 오버슈트가 발생하지 않아 정확한 제어가 가능하며, 벡터제어의 단점인 좌표 변환과 같은 복잡한 계산 과정이 없어 제어 구조가 단순하여 빠른 제어가 가능하다.^[1] 또한 공간벡터변조 기법을 사용하므로 스위칭 주파수가 고정되어 있으며, 다양한 전압 벡터를 구현 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고정되어 있는 유효 전압 벡터의 인가 시간으로 인해 불필요한 잉여 전압이 인가되면 토크의 리플이 커지는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 유효 전압 벡터의 인가 시간을 가변하는 TPC를 구현하여 정상 상태에서는 토크의 리플을 저감하고, 과도 상태에서는 동특성을 개선하는 유도 전동기의 제어 기법에 대하여 제안한다.

2. 유도 전동기의 토크 예측 제어

2.1 토크 예측 제어

유도 전동기의 TPC는 PI 제어기를 사용하지 않고 고정자 전압 벡터와 전동기 토크, 회전자 자속 간의 관계식을 통하여 구현한다.^[2]

먼저, 유도 전동기의 토크 T_e 의 변화량은 식 (1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} T_e = \frac{3}{2} P_n \left(\frac{d}{dt} \lambda_s \times i_s + \lambda_s \times \frac{d}{dt} i_s \right) \quad (1)$$

여기서 P_n 은 전동기 극의 쌍 수, λ_s 는 고정자 자속, i_s 는 고정자 전류이다.

고정자 자속과 고정자 전류의 시간에 대한 미분은 식 (2)와 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \lambda_s = v_s - R_s i_s \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_s = \left(\frac{L_r}{L_m} \frac{1}{L_\sigma} \right) \frac{d}{dt} \lambda_s - \frac{1}{L_\sigma} \frac{d}{dt} \lambda_r \quad (3)$$

여기서 $L_\sigma = (L_s L_r - L_m^2) / L_m$, L_m 은 자화 인덕턴스, L_s 는 고정자 인덕턴스, v_s 는 고정자 전압, R_s 는 고정자 저항이다.

식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입하고 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_e = \frac{3P_n}{2L_\sigma} \lambda_r \times v_s T_k - \left(\frac{R_s T_e}{\sigma L_s} + \frac{3P_n}{2L_\sigma} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) T_s \quad (4)$$

여기서 T_k 는 유효 전압 벡터의 인가 시간이며, T_s 는 제어 주기이다.

식 (4)로부터 토크의 오차를 최소로 만드는 전압 벡터의 위상각 θ 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\Delta T_e + \left(\frac{R_s T_e}{\sigma L_s} + \frac{3P_n}{2L_\sigma} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) T_s}{\frac{3P_n}{2L_\sigma} |\lambda_r| |v_s T_k|} \right) \quad (5)$$

2.2 유효 전압 인가 시간 조절

일반적인 TPC는 고정된 T_k 를 사용한다. 이 경우 T_k 가 크면 정상 상태에서의 토크 리플이 커지고, T_k 가 작으면 과도 상태에서의 동특성이 느려지는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안하는 TPC는 토크 리플의 RMS값이 최소가 되도록 T_k 를 가변한다.

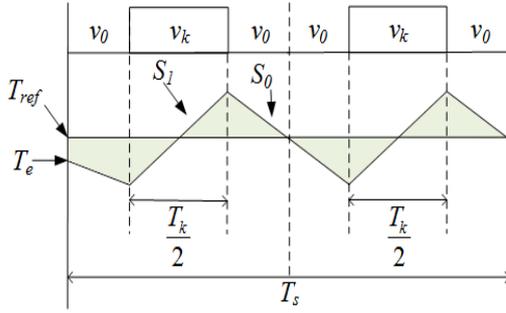


그림 1 토크 리플의 변화량 곡선
Fig. 1 Variation curve of torque ripple

그림 1은 공간벡터변조 기법에서 한 주기 동안 토크 리플의 변화량을 나타낸다. 빗금 친 부분은 토크 변동분의 넓이를 의미하며, T_{ref} 는 지령 토크, v_k 는 유효 전압 벡터, v_0 는 영전압 벡터를 의미한다. 이 때 토크의 상승 기울기 S_1 과 하강 기울기 S_0 는 식 (4)를 통해 식 (6)과 식 (7)로 각각 나타낼 수 있다.

$$S_1 = \left(\frac{3P_n}{2L_\sigma} \lambda_r \times v_s T_k - \left(\frac{R_s T_e}{\sigma L_s} + \frac{3P_n}{2L_\sigma} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) \right) \quad (6)$$

$$S_0 = \left(\frac{R_s T_e}{\sigma L_s} + \frac{3P_n}{2L_\sigma} \lambda_s \times \frac{d}{dt} \lambda_r \right) \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)로부터 토크 리플의 RMS값이 최소가 되도록 하는 T_k 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.^[3]

$$T_k = \frac{2(\Delta T_e) - S_0 T_s}{2S_1 - S_0} \quad (8)$$

식 (8)을 통해 얻어진 T_k 는 고정자 권선에 인가되는 유효 전압 벡터의 인가 시간을 결정하여 최적화된 유효 전압 벡터를 만든다. 따라서 정상 상태에서는 고정자 권선에 인가되는 불필요한 잉여 전압 성분이 감소되므로 토크의 리플이 감소한다. 또한 과도 상태에서는 지령 토크를 빠르게 추종하기 위해 최대 유효 전압 벡터를 인가하므로 일반적인 TPC에 비해 동특성이 개선된다.

2.3 시뮬레이션

PSIM을 이용하여 500 r/min 조건에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 일반적인 TPC의 한 주기 동안 T_k 는 0.7로 고정하였다. 또한 토크 지령은 3 Nm에서 7 Nm으로 가변하였다.

그림 2는 일반적인 TPC와 제안하는 TPC의 토크 및 고정자 전류를 나타낸다. 일반적인 TPC의 토크 리플은 약 1 Nm이고, 제안하는 TPC의 토크 리플은 약 0.66 Nm으로 토크 리플이 약 34 % 감소하였다.

그림 3은 한 주기 동안 T_k 에 따른 토크 동특성을 나타낸다. 과도 상태에서 유효 전압 벡터를 모두 사용하는 제안한 TPC에 비해 일반적인 TPC는 유효 전압 벡터의 0.7배만을 사용하므로 정상상태에 도달하는데 더 긴 시간이 요구된다. 일반적인 TPC를 적용하는 경우 정상 상태에 도달하는 시간이 약 1.8 ms이며, 제안하는 TPC의 경우 약 1.2 ms로 약 0.6 ms정도의 더 빠른 응답 특성을 보인다.

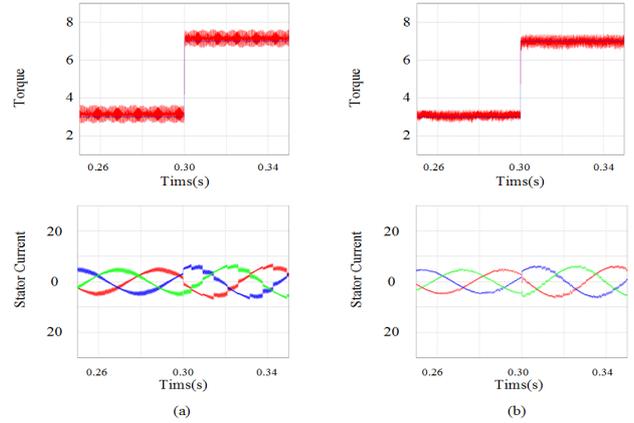


그림 2 일반적인 TPC와 제안하는 TPC의 토크 및 고정자 전류
(a) 일반적인 TPC, (b) 제안하는 TPC

Fig. 2 Simulation results when the conventional and proposed TPC was applied
(a) conventional TPC, (b) proposed TPC

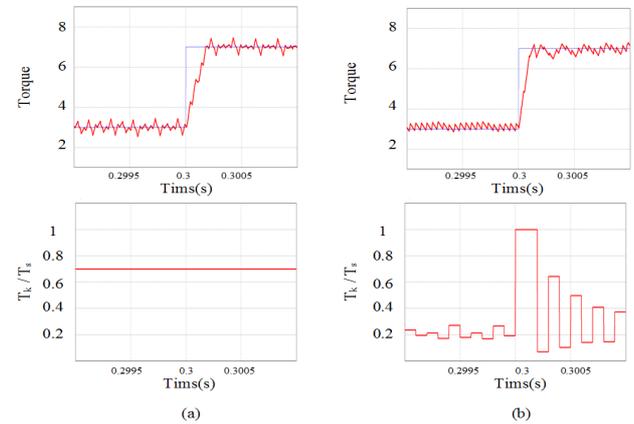


그림 3 한 주기 동안 T_k 에 따른 토크 동특성
(a) 일반적인 TPC, (b) 제안하는 TPC

Fig. 3 Torque dynamics
(a) conventional TPC, (b) proposed TPC

3. 결론

본 논문에서는 유효 전압 벡터의 인가 시간을 토크 리플의 RMS값이 최소가 되도록 가변 하는 토크 예측 제어 기법을 제안하였다. 계산된 유효 전압 벡터의 인가 시간을 통해 최종 지령 전압 벡터를 선정하여 인가하면 정상 상태 토크 리플이 감소하고 과도 상태 동특성이 개선된다. 제안하는 알고리즘은 PSIM 시뮬레이션을 통해 유효성과 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 이교범, “전동기 제어,” 한티미디어, 2016
- [2] Y. Li, C. Wang, and H. Hu, “Predictive Control of Torque and Flux of Induction Motor Drives,” *IEEE PEDS*, vol. 1, pp. 67–71, Nov. 2005.
- [3] K.K Shyu, J.K Lin, V.T Pham, M.J Yang, and T.E Wang, “Global Minimum Torque Ripple Design for Direct Torque Control of Induction Motor Drives,” *IEEE Trans. IE*, vol. 57, issue. 9. pp. 3148–3156, Aug. 2010.