동적 특성 개선과 토크 리플 저감을 위한 영구자석 동기전동기의 토크 예측 제어 기법

신예슬, 조용수, 이교범
아주대학교 전자공학과

Permanent-magnet Synchronous Motor Control Strategy for Improved Torque Dynamics and Torque Ripple Reduction

Yesl Shin, Yongsoo Cho, Kyo Beum Lee
Ajou Univ., Dept. of Electrical and Computer Engineering

ABSTRACT

본 논문은 영구자석 동기전동기의 동적 특성 개선과 토크 리플 저감 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 영구자석 동기전동기의 인가전압과 토크의 관계를 수학적인 분석을 통해 유효벡터 인가 시간을 결정하는 기법이다. 결정된 유효벡터 인가시간과 동기전동기의 토크 오차와의 관계를 이용하여 최종적인 지령전압벡터를 계산한다. 계산된 지령전압벡터는 영구자석 동기전동기의 빠른 응답성과 우수한 정상상태 특성을 보인다. 시뮬레이션을 이용하여 제안하는 영구자석 동기기 토크 제어 알고리즘의 타당성을 확인한다.

1. 서 론

영구자석 동기전동기(PMSM)은 최근 고성능 전동기 분야에서 사용이 크게 늘어나고 있다. DC 전동기 및 유도 전동기와 비교했을 때 영구자석 동기기의 장점은 고효율과 높은 역률, 속응성이 뛰어나고 무게에 대한 토크 출력비가 높은 것이다. 사마리움 코발트, Neodymium boron iron (NdFeB)등과 같은 고성능 자석의 개발 또한 영구자석 동기기의 성능 향상을 가능하게 하였다[1] [3].

영구자석 동기기는 그 목적에 맞는 제어기를 설계하여 산업, 상업 및 다양한 모터 드라이브 적용 등에 쓰인다. 직접 토크 제어(Direct torque control; DTC)는 히스테리시스 제어기를 기반으로 토크와 자속을 제어하여 원하는 토크를 얻는 방법이다. 직접 토크 제어는 속응성은 우수하지만 한 제어주기 내에서 인가되는 전압벡터는 한 가지이므로 이로 인한 토크 리플이 크다는 단점을 갖는다. 토크 리플을 줄이기 위해서는 빠른 제어주기를 구현할 수 있는 고성능의 프로세서가 필요하며 이 경우 스위칭 주파수가 가변적이라는 단점을 갖는다[1],[2].

토크 예측 제어는 기존 직접 토크 제어처럼 룩업 테이블을 사용하여 전압벡터를 선택하는 것이 아닌 전동기 토크와 자속 및 모터 전압 사이의 관계를 분석하여 수학 방정식에 근거하여 원하는 전압벡터를 계산하여 제어를 하므로, 오버슈트가 발생하지 않고 정확하고 빠르게 제어할 수 있다. 전압 지령값을 계산할 때, 토크 리플을 줄이기 위한 다양한 방법이 반영될 수 있으며 이는 리플을 줄이는 방식에 따라 달라진다. 또한 스위칭 테이블을 이용한 스위칭을 하는 직접 토크 제어와 달리 토크 예측 제어는 Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)를 이용하여 스위칭한다. SVPWM을 이용하는 방식은 스위칭 테이블의 인가전압보다 다양한 전압벡터를 구현할 수 있다[3]. 본 논문에서는 전압 인가 시간을 가변하는 토크 예측 제어를 구현하여 동적 특성을 개선하고 토크 리플을 저감하는 영구자석 동기전동기의 제어기법에 대하여 연구하였다.

2. 토크 예측 제어 기법

2.1 토크 예측 제어

토크 예측 제어는 PI제어기를 사용하지 않고 토크와 자속, 전압벡터의 관계식을 이용하여 전압 지령값을 계산하는 방식이다. 직접 토크 제어와 달리 한 제어 주기 내에 한 번 이상 인가하는 전압벡터가 달라지기 때문에 토크 리플을 줄일 수 있다.

전압벡터와 자속은 각 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 토크를 나타내면 식(3)과 같다.

$$\vec{u}_s = R_s\vec{i}_s + \frac{d}{dt}\vec{\lambda}_s \tag{1}$$

$$\vec{\lambda}_s = L\vec{i}_s + \vec{\lambda}_r \tag{2}$$

$$T_e = \frac{3}{2}p_n\vec{\lambda}_s \times \vec{i}_s \tag{3}$$

전압벡터의 관계식으로 토크 변동분은 다음과 같다.

$$\Delta T_e = \frac{3}{2}\frac{p_n}{L}\vec{\lambda}_r \times \vec{u}_s T_k + (-\frac{R_s}{L}T_e - \frac{3}{2}\frac{p_n}{L}\vec{\lambda}_s \times \frac{d}{dt}\vec{\lambda}_r)T_s \tag{4}$$

T_s는 제어 주기 시간이며, T_k는 유효전압벡터가 인가되는 시간이다. 식(4)에서와 같이 토크 변동분은 전압벡터가 포함된 항과 포함되지 않은 항으로 나눌 수 있다. 이 식으로부터 지령 전압벡터의 각을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_v = \arcsin\left(\frac{\Delta T_e + (\frac{R_s}{L}T_e + \frac{3}{2}\frac{p_n}{L}\vec{\lambda}_s \times \frac{d}{dt}\vec{\lambda}_r)T_s}{\frac{3}{2}\frac{p_n}{L}|\lambda_r||T_k u_s|}\right) \tag{5}$$

기존 토크 예측 제어의 경우에는 T_k가 특정 값으로 고정되어 있어, 다양한 전압벡터를 인가할 수 있는 SVPWM을 사용하여도 만들 수 있는Novel Torque Predictive Control for a Permanent 지령 전압벡터 선택에 한계가 있다. 이 때문에 전동기의 토크 제어에 필요한 전압이 지령 전압보다 불가피하게 부족하거나 큰 경우가 발생하여 정확한 제어가 불가능하다. 특히 저속 영역에서 이러한 현상에 의한 리플이 비교적 크게 나타난다.

2.2 가변 듀티 토크 예측 제어

기존 토크 예측 제어에서 발생하는 단점을 해결하기 위하여 가변 듀티 토크 예측 제어에서는 T_k값을 상황에 맞게 계산하여 적용한다.

전압벡터와 토크의 관계식은 기존 토크 예측 제어와 다름없지만 제안하는 토크 예측 제어에서 다른 점은 T_k가 토크 변동분에 따라 결정된다. 본 논문에서 제안하는 토크 예측 제어는 토크 변동분의 합이 최솟값이 되도록 하는 듀티를 결정하는 방법을 사용한다. 그림 1에서와 같이 한 주기 내에 토크 변동분은 빗금 친 부분과 같으며 이 부분은 곧 토크 리플을 의미한다.

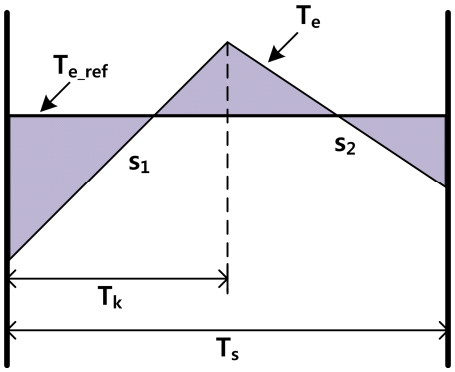

그림 1 전압 인가에 따른 토크 응답

Fig. 1 Torque response upon the applied voltage

이를 수식으로 정리하여 $\frac{1}{t_{sp}}\int_{t_{sp}}^{(k+1)t_{sp}}\left(T_e - T_{e_ref}\right)^2 dt$가 최솟값이 되도록 듀티를 결정하는 식을 세우면 다음과 같다.

$$dt_{sp} = \frac{2\left(T_{e_ref} - T_e\right) - s_2 t_{sp}}{2s_1 - s_2} \tag{6}$$

식 (4)에서 전압벡터가 포함된 항의 계수를 A, 포함되지 않은 항의 계수를 B라 할 때, 유효 전압벡터 인가 시 단위 시간당 토크 변화량은 (A+B)이며 이 값이 식(6)의 s_1이며 s_2는 영전압벡터 인가 시 변화량으로 B와 같다.

3. 시뮬레이션

PSIM을 이용하여 저속영역에서 영구자석 동기기의 가변 듀티 토크 예측 제어를 수행하였다. 그림 2는 기존의 토크 예측 제어를 했을 때 0.3초부터 가변 듀티 토크 예측 제어를 적용한 파형이다. 그림 2의 첫 번째 파형에서와 같이 토크 리플의 진동폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 기존 토크 예측 제어에서 T_k는 T_s의 70%로 고정되었다.

그림 3은 각 제어 방법을 적용했을 때 속응성을 나타낸다. 그림 3의 (a)는 기존 토크 예측 제어, (b)는 제안한 토크 예측 제어를 적용한 파형이다. 기존 토크 예측 제어를 적용한 경우 실제 인가전압벡터의 70% 만이 토크 변동에 사용되기 때문에 인가전압벡터가 모두 전달되는 제안한 토크 예측 제어를 사용할 경우보다 정상상태에 도달하는데 더 긴 시간이 필요하다. 각 경우 정상상태에 도달하는 시간은 약 0.4ms, 0.29ms으로 가변 듀티 토크 예측 제어를 사용한 경우 더 빠른 응답성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

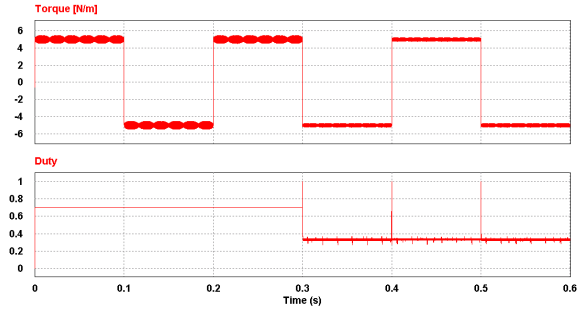

그림 2 기존 토크 예측 제어와 제안한 토크 예측 제어를 적용한 출력 파형

Fig. 2 Simulation results when the conventional and proposed TPC was applied

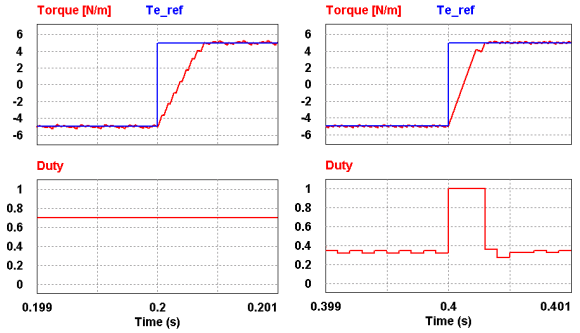

그림 3 토크 응답성

(a)기존 토크 예측 제어, (b)제안한 토크 예측 제어

Fig. 3 Torque dynamics

(a)conventional TPC, (b)proposed TPC

3. 결 론

본 논문에서는 토크 예측 제어에서 듀티를 가변하여 토크 리플 감소와 속응성을 개선하는 기법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 토크 변동분의 합이 최솟값이 되도록 하는 듀티를 계산하였다. 계산된 듀티를 통해 결정된 유효벡터 인가 시간과 동기전동기의 토크 오차의 관계를 이용하여 최종적인 지령전압벡터를 계산한다. 계산된 지령전압벡터는 영구자석 동기전동기의 빠른 응답성과 우수한 정상상태 특성을 보인다. 제안된 방법의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. S2012A040300097).

참 고 문 헌

[1] Y. Cho, K. Lee, M. Li, J. Song and Y. Lee, "Novel Torque Predictive Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Minimum Torque Ripple and Fast Dynamics", Appl. Power Electron. Conf., pp. 2253 2258, 2013, March.

[2] 이교범, "전동기 제어", 한티미디어, 2013.

[3] H. Zhu, X. Xiao, and Y. Li, "Torque Ripple Reduction of the Torque Predictive Control Scheme for Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 59, No. 2, pp. 871 877, 2012, Feb.