

Modulated Model Predictive Control (MMPC)을 적용한 영구 자석 동기 전동기 (PMSM)의 토크 리플 개선

김영훈, 이소은, 홍은진, 조영훈*

건국대학교 전력전자연구실

The application of Modulated Model Predictive Control (MMPC) for reducing torque ripple of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

Young-Hoon Kim, So-Eun Lee, Eun-Jin Hong, and Younghoon Cho*

Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

동기 전동기의 토크를 제어하기 위한 기법은 여러 가지가 있다. 예전부터 사용되어온 FCS-MPC(Finite Control Set-Model Predictive Control) 기법이 그 예시 중 하나이다. 하지만 FCS-MPC를 사용하면 토크 리플이 비교적 크게 발생할 뿐만 아니라 스위칭 주파수도 변하게 된다. 그래서 본 논문을 통해 FCS-MPC의 문제점을 개선하기 위한 방법 중 하나로 Modulated Predictive Model Control(MMPC)를 제안하고자 한다.

1. 서 론

예전부터 용도에 맞게 PMSM을 구동할 수 있도록 다양한 제어 기법들이 제안되어왔고 그 중 대표적으로 DTC(Direct Torque Control)와 FOC(Field Oriented Control)와 같은 기법들이 개발되었다.

그러나, DTC는 높은 토크 리플과 스위칭 주파수가 변한다는 단점을 가지고, FOC는 공간 벡터 펄스폭 변조 방식(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)이 필요한 제어 기법으로 이로 인한 계산 과정이 증가한다는 단점을 가진다. 그래서, 이 문제를 개선한 FCS-MPC(Finite Control Set-Model Predictive Control) 제어 기법이 제안되었다. FCS-MPC 기법을 이용하면 기존에 제안된 제어 기법을 적용했을 때보다 PMSM의 토크 리플을 감소시킬 수 있었다. 그러나, 모듈레이터가 존재하지 않아 스위칭 주파수가 변하는 문제가 발생했다 [1].

본 논문에서는 표면부착형 영구 자석 동기 전동기(Surface-mounted PMSM, SPMSM)에 스위칭 주파수를 고정시킬 수 있는 Modulated Model Predictive Control(MMPC) 기법을 적용하여 토크 리플을 저감할 수 있는 방법을 제안한다.

2. FCS-MPC와 MMPC를 적용한 제어 방법

2.1 FCS-MPC를 적용한 PMSM 제어

FCS-MPC는 현재 상태와 모델을 이용해 미래의 상태를 예측하여 제어하는 기법을 말한다. 미래의 상태를 예측해 비용 함수를 만들고, 이 함수의 값을 최소화할 수 있는 입력값을 찾

아 제어하는 기법이다.

PMSM의 d, q축 전압 방정식을 연속 시간 모델 식으로 나타내고, 오일러 전향 차분 ($s \approx \frac{z-1}{T_s}$)을 이용하면 차분 방정식으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. q축 전류에 대해서도 똑 같은 과정을 적용하여 식 (3)을 얻을 수 있다

$$i_d(k+1) = (1 - \frac{R_s T_s}{L_d})i_d(k) + \frac{T_s L_q}{L_d} \omega_r i_q(k) + \frac{T_s}{L_d} v_d(k) \quad (2)$$

$$i_q(k+1) = (1 - \frac{R_s T_s}{L_q})i_q(k) - \frac{T_s L_d}{L_q} \omega_r i_d(k) - \phi_f \omega_r T_s + \frac{T_s}{L_q} v_q(k) \quad (3)$$

식 (2)에서 $i_d(k+1)$ 와 $i_q(k+1)$ 은 d-q 축에서 다음 샘플링 주기의 d-q 축 전류의 예측값을 의미한다. $i_d(k)$ 와 $i_q(k)$ 는 현재 샘플링 주기의 d, q 축 전류 값을 의미한다. 각 샘플링 주기마다 비용 함수를 최소화 할 수 있는 전압 벡터가 인버터에 인가되는 방식을 통해 PMSM을 제어함으로써 FCS-MPC 제어 기법을 적용한다.

$$g = (i_d^* - i_d(k+1))^2 + (i_q^* - i_q(k+1))^2 \quad (4)$$

2.2 MMPC를 적용한 PMSM 제어

MMPC는 앞서 살펴본 FCS-MPC와 마찬가지로 예측에 기반해 제어를 수행하는 기법이다. MMPC는 FCS-MPC와 달리 적절한 변조를 포함한다는 차이점이 있다.

영벡터 V_0 와 인접하는 전압 벡터 V_j 와 V_k 의 듀티는 식 (4)을 이용해 구한 각 전압 벡터 별 비용 함수를 이용해서 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} d_0 &= g_j g_k / (g_0 g_j + g_j g_k + g_0 g_k) \\ d_j &= g_0 g_k / (g_0 g_j + g_j g_k + g_0 g_k) \\ d_k &= g_0 g_j / (g_0 g_j + g_j g_k + g_0 g_k) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 d_0, d_j, d_k 는 각각 영전압 벡터와 두 인접 전압 벡터 V_j, V_k 의 듀티를 나타낸다. 최종 MMPC 비용 함수 G 는 식 (7)으로 기술할 수 있다.

$$G = d_j g_j + d_k g_k \quad (7)$$

최종 비용 함수 G 를 최소화 하는 영벡터 V_0 와 인접한 두 벡터 V_j, V_k , 그리고 각 벡터의 듀티 d_0, d_j, d_k 를 이용해 전 동기에 전압을 인가함으로써 MMPC를 적용할 수 있다 [2].

표 1 모의실험 시스템 제정수
Table 1 Parameters of simulation

Parameter	Mark	Value	Unit
Pole	P	4	
Rated Voltage	V	24	V
Rated Speed	N	3000	rpm
Stator Inductance	L_s	201.6	μH
Stator Resistance	R_s	0.0825	Ω
Inverter DC voltage	V_{dc}	20	V
Sampling time	T_s	0.000025	sec
Field flux linkage	λ_f	0.01847	$V \cdot s$

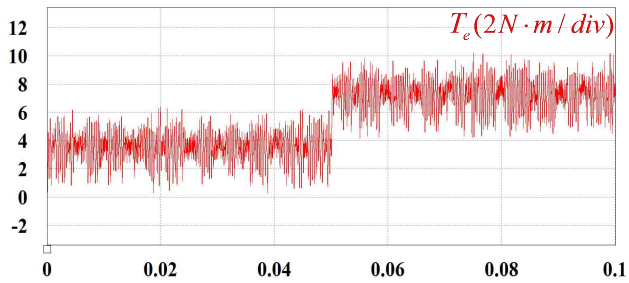


그림 1 FCS-MPC를 적용한 토크 파형
Fig. 1 Torque waveform using FCS-MPC

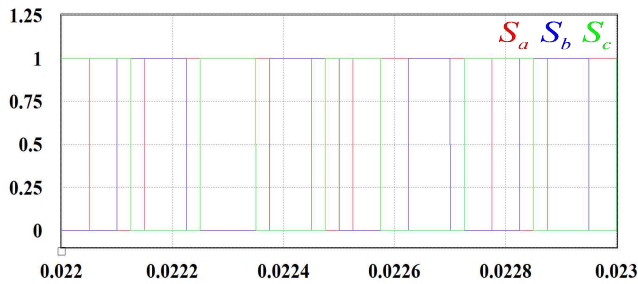


그림 2 FCS-MPC를 적용한 a,b,c 상 스위칭 함수
Fig. 2 Switching functions for phases a,b,c using FCS-MPC

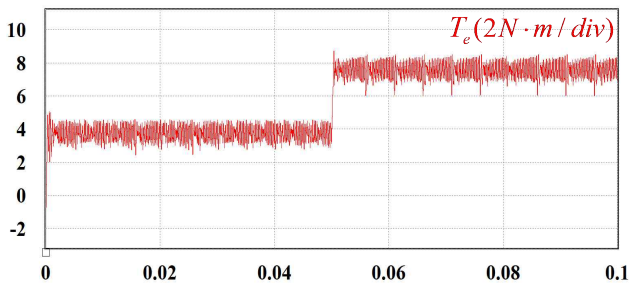


그림 3 MMPC를 적용한 토크 파형
Fig. 3 Torque waveform using MMPC

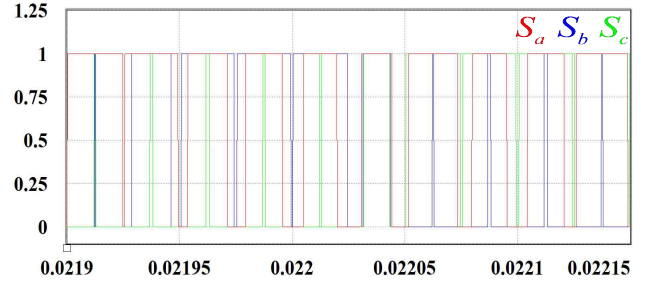


그림 4 MMPC를 적용한 a,b,c 상 스위칭 함수
Fig. 4 Switching functions for phases a,b,c using MMPC

2.3 모의실험 결과

그림 1에서 토크 리플의 최대값은 $6.04N \cdot m$ 이고 그림 3에서 토크 리플의 최대값은 $2.46N \cdot m$ 이므로 MMPC를 적용했을 때 토크 리플이 59.24% 개선된 것을 알 수 있다. 또한 그림 2에서 이전 샘플링 주기에서 구한 최소 비용 함수를 내는 전압 벡터와 현재 샘플링 주기에서 구한 최소 비용 함수를 내는 전압 벡터가 동일할 때 이전 샘플링 주기의 스위칭 함수를 유지하여 스위칭 주파수가 절반으로 감소한다. 하지만 그림 4에서는 고정된 스위칭 주파수를 출력하고 있으므로 MMPC를 적용하면 스위칭 주파수를 고정시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문은 MMPC 기법을 적용하여 영구 자석 동기 전동기의 토크 리플을 저감하고 스위칭 주파수를 고정시키는 것에 대해 제안하였다. 제안한 MMPC 제어기법과 기존의 FCS-MPC 제어기법을 비교하여, 제안한 MMPC 제어기법이 제어를 잘 수행하고 있음을 확인하였다. 향후 계획으로는 실제 영구 자석 동기 전동기에 MMPC 토크 제어를 적용하여 실험을 통해 제안한 MMPC 제어기법을 검증할 것이다.

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 대학혁신지원사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] 윤한중, 이성민, 원상필, 조영훈, “MMPC를 적용한 3상 부스트 PFC 컨버터의 계통 전류 제어,” 전력전자학술대회 논문집, pp. 336-338, 2022.
- [2] Q. Wang, M. Rivera, J. A. Riveros and P. Wheeler, “Operating With Three-level NPC Inverter,” 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Santos, Brazil, 2019, pp. 1-5