

모터 제어를 위한 FCS-MPC 및 MMPC 기법의 THD 비교 분석

김정규, 박수현, 송영재, 장현준, 조영훈
건국대학교 전력전자연구실

Comparison Analysis of THD between FCS-MPC and MMPC Techniques for Motor Control

Jeonggyu Kim, Soohyun Park, Young Jae Song, Hyeon Jun Jang, Younghoon Cho
Konkuk University Power Electronics Lab

ABSTRACT

본 논문은 모터 제어를 위한 모델기반 예측 제어 기법(Model Predictive Control, MPC)을 소개하며, MPC의 종류별로 THD를 비교 분석한다. MPC 기법은 기존의 비례 적분(Proportional Integral, PI) 제어 기법과 달리 제어가 간단하고 우수한 동특성을 지니어 널리 사용되고 있으며, 그 종류에는 FCS-MPC(Finite Control Set-Model Predictive Control), MMPC(Modulated Model Predictive Control) 기법이 있다. 특히 THD는 상전류에 원치 않는 고조파를 생성시키는데, 이는 모터에 진동, 소음 및 성능 저하와 같은 문제를 발생시킨다. 따라서, 본 논문에서는 MPC의 종류에 따른 THD에 대한 비교 분석을 진행하여 최적의 MPC 기법을 제안한다.

1. 서 론

현대 산업에서 환경 문제와 에너지 절약 문제는 점점 더 중요시되고 있는데, 따라서 최근 몇 년 동안 산업용 모터에는 전력 밀도와 효율성 향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 특히 EV용 추진 시스템은 모터의 성능을 높이기 위한 컴팩트한 설계가 중요하므로, 현 EV 업계에서는 전력 밀도가 높은 PMSM 모터를 채택하고 있다. 이러한 PMSM 모터를 제어하기 위한 다양한 기법이 존재하는데, 그 중 하나가 바로 MPC 기법이다. MPC 기법은 현재 상태와 모델을 통해 미래 상태를 예측하고, 이를 기반으로 최소의 비용함수를 만드는 출력전압벡터를 사용하는 제어 기법이다. MPC 기법은 제어 이득의 설계가 필요없어 기존의 모터 제어 기법에 비해 구현이 단순하고, 더욱 정확하고 효율적인 제어를 통해 우수한 동특성을 얻을 수 있다. 따라서 MPC 기법은 우수한 모터 제어 기술로 각광받고 있다.

또한, 모터의 안정성을 높여 성능을 향상시키는 것도 중요한 이슈이다. THD(Total Harmonic Distortion)는 모터에서 인버터를 통해 공급되는 전압 및 전류 신호의 왜곡 정도를 나타내는 지표이다. 인버터를 사용하여 변환된 전압 및 전류 신호는 대개 사각파에 가까운 형태를 가지고 있으며, 이러한 신호는 THD가 높은 고조파를 포함할 가능성이 높다. 고조파 전압이 모터에 인가될 경우, 모터 내부에서 고조파 전류가 발생하게 되는데, 이는 모터 내부에서 진동, 소음, 효율 저하, 성능 저하 등의 문제를 초래할 수 있다. 또한 고조파 전압이 지속적으로 인가될 경우, 모터 내부에서 고조파 전류가 축적되어 모터 내부의 온도가 증가하게 된다. 이러한 과열은 모터 내부의 절연

체를 손상시키고, 최악의 경우 모터의 전기적 고장을 초래할 수 있다. MPC 기법은 모터 내부에서 발생할 수 있는 고조파와 같은 문제를 해결할 수 있어 모터의 안정성과 성능을 높일 수 있다. 하지만 MPC 기법은 한 샘플링동안 한 번의 스위칭 동작만 가능하여 스위칭 주파수가 고정되지 않는다는 한계가 있어 이러한 단점을 해소할 수 있는 FCS-MPC, MMPC 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 인버터 토폴로지를 사용하는 모터의 예측 제어 기법인 FCS-MPC, MMPC 기법을 THD의 관점에서 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 토대로, THD의 효과적인 감소를 통해 모터의 안정성을 높일 수 있는 MPC 기법을 소개하여 본 논문의 유효성을 입증한다.

2. MPC 제어 기법 비교 분석

2.1 모터 제어를 위한 FCS-MPC 기법

FCS-MPC 기법은 비용함수 계산을 통해 그림 1과 같이 6개의 전압 벡터 중 가장 적절한 출력 전압 벡터를 결정하여 직접 인가해 주는 기법이다. 이로 인해 PI 제어기와 비교했을 때 더 빠른 응답 속도를 가져 스위칭 효율이 높다. PI 제어기의 경우 속도 변화나 로드 변화 시마다 이득 값을 조정해주어야 하는 번거로움이 있지만 FCS-MPC 기법은 속도 성분까지 함께 고려하기 때문에 EV 제어에는 PI 제어 기법보다 FCS-MPC 기법이 더 적합하다. 또한 출력 전압 벡터를 합성하여 스위칭 신호를 생성하는 SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) 기법과 비교했을 때에도, FCS-MPC 기법은 6개의 전압 벡터 중 한 벡터만 선택하여 인가하기 때문에 스위칭 효율이 더 우수하다. 하지만 FCS-MPC 기법은 사용 가능한 스위칭 조합이 제한된다는 점에서 제어 성능의 한계가 존재한다.

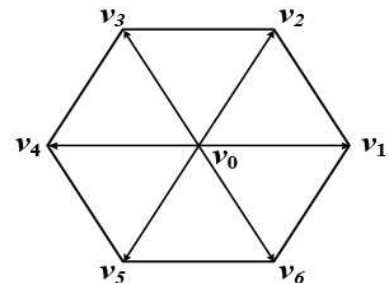


그림 1. 출력 가능한 전압 벡터 영역
Fig. 1 output feasible voltage vector space

2.2 모터 제어를 위한 MMPC 기법

MMPC는 MPC 기법과 Pulse Width Modulation(PWM)의 장점을 결합한 제어 기법인데, 모터 드라이브 및 재생 에너지 응용 분야에서 사용되는 전력 전자 시스템에서 일반적으로 사용된다. 기존의 MPC 기법에서는 시스템의 수학적 모델을 사용하여 미래 동작을 예측하고 비용 함수를 기반으로 제어 동작을 최적화하는데, 전력 전자 시스템의 경우 출력 신호는 주로 전압 레벨이나 스위칭 상태와 같이 이산적인 형태를 가지기 때문에 MMPC 기법이 필요하다. MMPC는 PWM을 결합하여 연속적인 파형을 생성하는 기술로, 이산 출력 신호를 가진 전력 전자 시스템을 제어할 수 있게 한다. 그림 2와 같이 제어 알고리즘은 시스템의 최소 오차 동작을 출력하기 위해 모듈레이터의 최적 듀티 사이클을 결정한다. 더하여 MMPC의 목표는 다양한 시스템 제약 조건, 성능 기준 및 THD 감소와 같은 상황을 고려하는 비용 함수를 최소화하는 것이다. 이러한 MPC 기법과 PWM을 결합한 MMPC는 두 벡터의 합성을 통해 다양한 스위칭 조합을 가능하게 하여 제어 정확도 향상, 고조파 감소 및 시스템 변수 제약 조건 처리 기능 등의 이점을 제공하고 전력 전자 시스템의 정밀 제어를 가능하다. 본 MMPC기반 전류 제어기는 참고문헌 [3]을 토대로 설계하였다.

THD의 관점에서 보았을 때, FCS-MPC 기법에서는 선택된 전압 벡터가 더 높은 고조파를 가지는 경우 THD가 증가할 수 있는데, MMPC는 제어 과정에서 주기적인 펄스 폭 변조를 통해 연속적인 파형을 생성하여 고조파를 다양한 전압 레벨에 효과적으로 분산시키고 이에 따라 더 부드럽고 사인파에 가까운 출력 파형을 생성한다. 따라서 MMPC 기법은 일반적으로 고조파의 집중화를 줄일 수 있어 FCS-MPC 기법에 비해 낮은 THD를 달성할 수 있다.

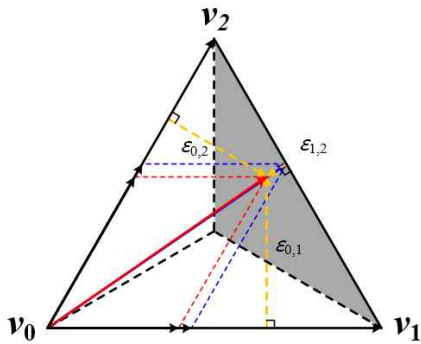


그림 2 MMPC 동작 원리

Fig. 2 The operating principle of MMPC

2.3 PMSM 모델링

MPC 계열의 제어기는 시스템의 모델을 기반으로 작동되기 때문에 본 PMSM의 모델 도출 과정이 필수적이다. 식 (1)은 PMSM의 전압 방정식을 나타내며, x 는 a, b, c상을 의미한다.

$$V_{xs} = Ri_x + L \frac{di_x}{dt} + e_x \quad (1)$$

PMSM의 전류 제어를 위하여 제어 대상인 전류에 대한 식으로 이항 정리 과정이 필요하다. 또한, 디지털 제어를 위하여 Z-변환 과정이 추가된다.

$$i_x(t_k + T_s) = \left(1 - \frac{R}{L} T_s\right) i_x(t_k) + \frac{T_s}{L} (V_{xs}(t_k) - e_x(t_k)) \quad (2)$$

식 (2)에서는 모듈레이터에 의한 시지연 보상을 위해 1샘플 예측을 진행하였다. 그러나 $i_{xs}(t_k)$, $V_{xs}(t_k)$, $e_x(t_k)$ 과 같이 센싱 변수에 대한 시지연 보상이 적용되지 않았기에 추가적인 1샘플 예측이 필요하며, 따라서 총 2샘플 예측을 통한 전류 제어 모델을 도출한다.

2.4 시뮬레이션 결과

FCS-MPC 및 MMPC의 알고리즘 동작은 PSIM 프로그램을 이용하여 검증하였으며, 표 1은 모터의 제정수를 나타내고 그림 2는 두 MPC의 THD 결과를 나타낸다.

모터 구동 조건은 1000rpm에서 20N·m을 인가하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험 결과 FCS-MPC와 MMPC의 THD[%]는 각각 대략 2.2와 0.3이다. 따라서 MMPC의 전류 왜곡률이 더 낮음을 확인할 수 있다.

표 1 PMSM 시스템 제정수

Table 1 Parameters of PMSM system

R	0.017 Ω	λ	0.12
L	490 μH	V_{in}	120 V

3. 결 론

모터의 예측 제어 기법인 FCS-MPC, MMPC 기법을 시뮬레이션을 통해 THD의 관점에서 분석한 결과, MMPC 기법이 THD를 가장 줄이는 모터 제어 기법으로 판단되었다. 따라서, MMPC 기법이 모터의 성능과 안정성을 높이는 최적의 모터 제어 기법이 될 수 있다.

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

참 고 문 헌

- [1] Seong Hwan Park and Young Il Lee, "The Finite Control Set Model Predictive Torque Control Method for Surface Mounted Permanent Magnetic Synchronous Motor of Electric Vehicle", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 22, NO. 6, 2016.
- [2] Hanjong Yoon, Sungmin Lee, Sangpil Won and Younghoon Cho, "Grid current control of three-phase boost PFC converter by using MMPC", *Journal of Institute of the Power Electronics Conference*, pp. 336-338, July 2022.
- [3] Fan Zhang, Tao Peng, Hanbing Dan, Jianheng Lin, and Mei Su, "Modulated Model Predictive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor", *2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy System (IESES)*, pp. 130-133, 2018.