

동특성 향상을 위한 영구자석 동기전동기의 MMPC 기반 전류 제어 기법

박준혁, 정성범, 문태양, 조영훈
건국대학교 전력전자연구실

Modulated Model Predicted Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with improved Dynamic Characteristics

Junhyeok Park, Seongbeom Jeong, Taeyang Moon, Younghoon Cho
Konkuk university Power Electronics Lab

ABSTRACT

본 논문은 3상 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)의 전류 제어기 설계에 대한 연구이다. 기존의 비례적분(Proportional Integral, PI) 제어기는 제어 대역폭 한계로 인한 동특성의 제약이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 모델 기반으로 제어 대상을 예측하여 시스템의 출력 형태를 결정하는 모듈레이티드 모델예측제어(Modulated Model Predictive Control, MMPC) 기법을 제안한다. 제안하는 MMPC 기법의 성능 검증을 위해 PSIM을 이용한 모의실험을 진행하였고, PI 제어기와 비교하여 MMPC 기법의 우수한 동특성 성능을 확인하였다.

1. 서 론

모델예측제어(Model Predictive Control, MPC)란 시스템의 모델을 사용하여 미래 동작을 예측하고 최적 기준에 따라 가장 적절한 출력을 선택하는 예측 제어 기법이다. MPC 기법은 기존 PI 제어기와 달리 동특성이 우수하여 빠른 동특성 및 추종 성능을 요구하는 EV용 모터 제어와 관련한 많은 연구가 진행 중이다.^[1]

전력전자 응용 분야에서는 MPC 기법을 적용하여 가능한 스위칭 상태에 대한 시스템 동작을 예측하고 이를 기반으로 상전압을 최적화하는 Finite Control Set(FCS)-MPC 기법이 소개되었다.^[2] 그러나 FCS-MPC 기법은 사용 가능한 스위칭 조합이 제한되는 단점이 있다. 이에 비해 MMPC 기법은 간단한 구현만으로도 더 다양한 스위칭 조합을 사용할 수 있다. 따라서 하나의 벡터로 출력 전압을 결정하는 FCS-MPC 기법과 달리 MMPC 기법은 두 개의 벡터를 조합하여 출력하므로 스위칭 상태 결정에 있어 우수성을 갖는다. MMPC 기법은 수학적 모델링을 기반으로 예측한 미래 전류 값을 이용하여 비용함수를 최적화하고 최적의 듀티를 결정하는 예측 제어 기법으로 MPC 계열 중 캐리어 기반 변조 방식과 가장 유사한 형태로 출력이 된다.^[3] 따라서, 최적 듀티로 출력되는 MMPC 기법은 범용적으로 사용되는 PWM 제어가 가능하고 전력전자 응용 분야에 적용하기 적합하다.

기존 PI 제어기는 제어 대역폭 한계로 인한 동특성의 제약이 존재한다. 이에 비해 MMPC 기법은 빠른 동특성을 가지고 정밀한 제어 성능을 얻을 수 있다. 본 논문은 PI 제어기의 동특성 제약을 개선한 MMPC 기법을 제안한다. PSIM을 이용하여 3상 PMSM 전류 제어기에 MMPC 기법을 적용한 모의실험을 진행하여 제어 타당성을 검증하였고, PI 제어기와 동특성 성능을 비교하였다.

2. MMPC 기법의 원리

2.1 3상 PMSM 모델링

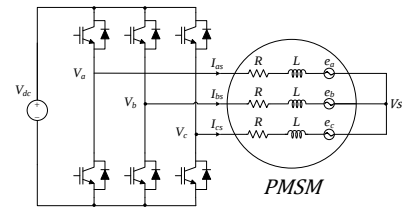


그림 1 3상 PMSM 회로도

Fig. 1 3-phase permanent magnet synchronous motor

그림 1은 3상 PMSM의 회로도를 나타낸다. PMSM의 수학적 모델은 식 (1)과 같다.

$$V_{as} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

여기서 V_{as} , i_a , e_a 는 각각 a상의 상 전압, 상 전류, 역기전력을 의미한다. 제안하는 제어기법은 3상 개별 전류 제어를 진행하였으며, b, c상도 a상과 동일한 제어 전략을 갖는다.

$$V_{as}(s) = Ri_a(s) + \frac{L}{T_s} [i_a(s + T_s) - i_a(s)] + e_a(s) \quad (2)$$

여기서 T_s 는 샘플링 시간을 의미한다. 식 (1)에서 시간에 대한 전류의 미분값은 한 샘플링 시간 동안의 전류의 변화량으로 나타낼 수 있고 식 (1)을 라플라스 변환하면 식 (2)와 같이 정리된다. 식 (2)에 전향 오일러 방식을

적용하여 이산 시간 영역에서 식 (3)과 같은 다음 샘플링의 예측 전류 모델 식을 얻을 수 있다.

$$i_a(t_k + T_s) = \left(1 - \frac{R}{L}T_s\right)i_a(t_k) + \frac{T_s}{L}(V_{as}(t_k) - e_a(t_k)) \quad (3)$$

여기서 t_k 는 샘플링 인덱스 k 에서의 이산 시간이다.

2.2 비용함수 및 제약조건 설계

다음은 최적의 듀티 사이클 도출을 위한 과정을 설명한다. 식 (4)는 a 상의 전류 오차 ε_a 를 나타내며, 제어 성능을 향상시키기 위해 제곱근을 통하여 전류 오차의 비중을 높였다. 그리고 식 (5)의 J_a 는 a 상의 비용함수를 의미하며, 제어 오차를 포함하는 듀티에 관한 2차 방정식으로 나타난다.

$$\varepsilon_a = (i_{a_ref}(t_k + 2T_s) - i_a(t_k + 2T_s))^2 \quad (4)$$

$$J_a = \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon_{a_on} d_{a_on}^2 + \varepsilon_{a_off} d_{a_off}^2} \quad (5)$$

$$d_{a_on} + d_{a_off} = 1 \quad (6)$$

여기서 비용함수는 전류 오차를 포함하고 있기 때문에 해당 비용함수의 최솟값은 전류 오차를 최소화하는 최적의 듀티 출력과 같다. 따라서, 2차 방정식 형태의 비용함수인 식 (5)에 듀티의 출력 조건인 식 (6)을 대입하여 식 (7)과 같이 최적의 듀티 사이클을 도출할 수 있다.

$$d_{a_on} = \frac{\varepsilon_{a_off}}{\varepsilon_{a_on} + \varepsilon_{a_off}} \quad (7)$$

3. 모의실험 및 결과

모의실험은 회로해석 프로그램인 PSIM 툴을 사용하여 검증하였다. 모의실험에 쓰인 모터의 제정수는 상 저항 0.017 Ω , 상 인덕턴스 490 μH , 채교자속은 0.12로 선정하였다. 그림 2는 MMPC에 관한 모의실험 회로도로서 해석의 편의를 위하여 3상 개별 제어로 설계하였으며, PI 회로는 기존 dq 벡터상에서 제어하였다.

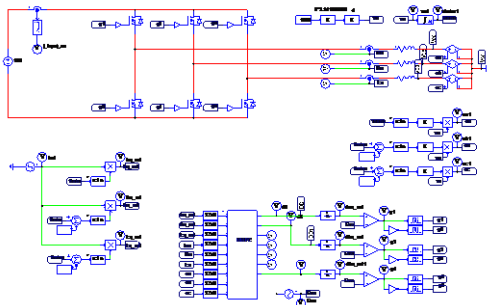


그림 2 MMPC 모의실험 회로도
Fig. 2 Simulation schematic for MMPC

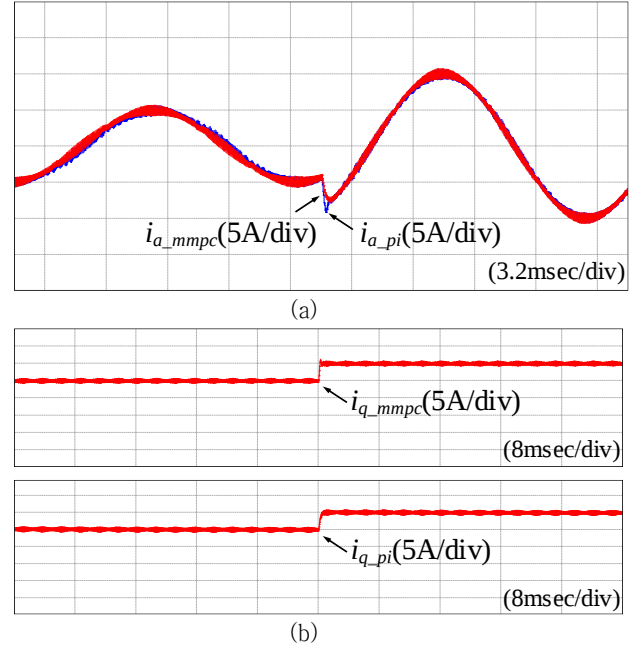


그림 3 PI와 MMPC의 동특성 성능 비교; (a) a 상 전류 (b) q 축 전류
Fig. 3 Comparison of dynamic characteristic performance of PI and MMPC. (a) a -phase current (b) q -axis current

4. 결론

본 논문은 기존 PI 제어기의 동특성 제약을 개선한 MMPC 기법을 제안하였다. 제안한 기법과 기존 PI 제어기의 모의실험을 통하여 제안한 기법의 동특성 성능이 PI 제어기에 비하여 더 우수하다는 것을 검증하였다.

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

참고 문헌

- [1] D. Hrovat, S. Di Cairano, H. E. Tseng and I. V. Kolmanovsky, "The development of Model Predictive Control in automotive industry: A survey," 2012 IEEE International Conference on Control Applications, Dubrovnik, Croatia, 2012, pp. 295–302, doi: 10.1109/CCA.2012.6402735.
- [2] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann and J. Rodriguez, "Model Predictive Control—A Simple and Powerful Method to Control Power Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, pp. 1826–1838, June 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2008349.
- [3] M. B. Shadmand, S. Jain and R. S. Balog, "Autotuning Technique for the Cost Function Weight Factors in Model Predictive Control for Power Electronic Interfaces," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 7, no. 2, pp. 1408–1420, June 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2849738.