

FCS-MPC 의 전류 리플 저감을 위한 레퍼런스 입력 변조

이경민, 김서준, 이영우*
한양대학교 ERICA

lkm0828@hanyang.ac.kr, taiockckck@hanyang.ac.kr, *stork@hanyang.ac.kr

Reference Modulation for Reduce Current Ripple on Finite Control Set Model Predictive Control

Lee Kyungmin, Kim Seojun, Lee Youngwoo*
Hanyang University ERICA

요약

전력 시스템에서의 유한 제어 집합 모델 예측 제어(FCS-MPC)는 높은 동적 성능, 제약조건을 통한 시스템의 안정성을 높일 수 있는 장점에도 불구하고 정상 상태 오차 및 높은 전류 리플을 가지는 한계가 있다. 높은 전류 리플은 기계적 소음과 진동을 발생시키며 이는 모터의 수명과 성능을 저하시키는 주요 요인이다. 본 논문에서는 FCS-MPC 의 높은 동적 특성을 유지하며 전류 리플을 감소시키기 위한 레퍼런스 입력 변조 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

I. 서론

최근 고성능 마이크로프로세서의 보편화와 함께 높은 동적 성능 및 플랜트의 비선형성과 제약 조건을 유연하게 관리할 수 있는 장점으로 MPC 는 유도 전동기 및 영구자석 동기 전동기(PMSM)와 같은 전기 기기 제어 전략으로 널리 도입되었다.[1]

그러나 FCS-MPC 의 특성상, 기계적 진동, 소음 및 손실을 유발할 수 있는 큰 진폭의 전류 리플 생성된다. FCS-MPC 에서 전류 리플을 억제하는 것은 산업적 활용을 가능하게 하기 위해 반드시 해결되어야 하는 기술적 과제다.

본 논문에서는 전류 리플을 억제하기 위해 레퍼런스 입력 변조 알고리즘을 결합한 FCS-MPC 기반의 직접 속도 제어기를 제안한다. 이를 큰 진폭의 전류 리플의 발생을 막으며 정상상태 오차를 최소화할 수 있다. 제안된 알고리즘의 효과를 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 결과를 기존 FCS-MPC 기반 직접 속도 제어기의 결과와 비교한다.

II. 본론

1. PMSM 수학적 모델링 및 구동 시스템

dq frame 에서의 이산시간 PMSM 수학적 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$i_d(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L_d}\right) i_d(k) + \frac{T_s L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k) + \frac{T_s}{L_d} v_d(k) \quad (1)$$

$$i_q(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L_q}\right) i_q(k) - \frac{T_s L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k) - \frac{T_s \psi}{L_q} \omega_e(k) + \frac{T_s}{L_q} v_q(k) \quad (2)$$

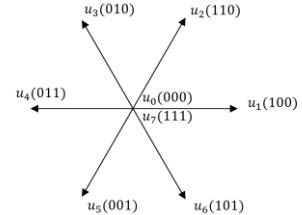


그림 1. 가능한 인버터 전압 벡터

이 때, R 은 상 저항, ψ 은 쇄교 자속 상수이다. L_d 와 L_q 는 d, q 축 인덕턴스, ω_e 는 전기적 각속도이다. i_d, i_q 는 각각 d, q 축 전류, v_d, v_q 는 각각 d, q 축 전압이며 T_s 는 샘플링 시간이다.

전기적 토크 T_e 와 Load torque 가 포함된 PMSM 의 기계적 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$T_e(k+1) = \frac{3}{2} p \left(\psi + (L_d - L_q) i_d(k+1) \right) i_q(k+1) \quad (3)$$

$$\omega_m(k+1) = \frac{J - T_s B}{J} \omega_m(k) + \frac{T_s}{J} (T_e(k) - T_l(k)) \quad (4)$$

여기서 p 는 극 쌍수의 개수를 나타내며 B 는 점성 마찰 계수, J 는 전동기의 관성 모멘트, T_l 은 load torque 이며 기계 각 속도는 $\omega_m = \omega_e/p$ 로 표 현 된다.

이 논문에서는 surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM)을 가정하였으며, 따라서 d, q 축 인덕턴스는 수학적 모델에서 동일하며 다음과 같이 표기된다.

$$L_d = L_q = L \quad (5)$$

또한 6 개의 스위치를 가지는 2 level 3 phase 인버터의 경우 나타낼 수 있는 전압 벡터는 그림 1 과 같다.

| | | |
|-------|------------|-----------------------------------|
| PMSM | L_d, L_q | 47.4 [mH] |
| | R | 26.3 [$m\Omega$] |
| | J | $65 \cdot 10^{-5}$ [$kg\ m^2$] |
| | ψ | 0.24 [Wb] |
| | B | $1 \cdot 10^{-3}$ [$kg\ m^2/s$] |
| | p | 3 |
| 제어기 | N_p | 2 |
| | N_c | 1 |
| | a | 1 |
| | b | 10 |
| | c | 1000 |
| 변조 이득 | ρ_1 | 0.0003 |
| | ρ_2 | 209.44 |
| | ρ_3 | 0.0021 |

표 1. PMSM, 제어기, 변조 파라미터

2. 제안하는 제어 기법

본 논문에서 기반이 되는 주요 제어 기법은 예측 전류 제어에서 확장된 직접 속도 예측 제어이며, 레퍼런스 입력 변조를 통해 정의되는 레퍼런스 속도는 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_*(k) = \omega_d(k) + F_m(q^{-1})e_\omega(k) \quad (6)$$

위에서 적용한 변조 함수는 다음과 같다[3].

$$F_m(z^{-1}) = \rho_1 + \frac{1}{z}\rho_2 + \rho_3 z \quad (7)$$

직접 속도 예측 제어기에서 전압 벡터는 유한 집합 전압 벡터 중 cost function 을 통해 평가하여 최적 제어 출력으로 결정된다. 따라서 cost function 은 제어 성능을 결정하는 중요한 요소이며, 이 논문에서는 속도 오차, 전류 오차, 제어 제약 조건을 평가 지표로 결정하였다[2].

$$g = a \sum_{i=1}^{N_p} g_S(k+i) + b \sum_{i=1}^{N_p} g_C(k+i) + c \sum_{i=1}^{N_p} g_L(k+i) \quad (8)$$

$$g_S(k) = (\omega_*(k) - \omega_m(k))^2 \quad (9)$$

$$g_C(k) = (0.0 - i_d(k))^2 \quad (10)$$

$$g_L(k) = \begin{cases} I_E(k)^2 & (I_E(k) < 0) \\ 0 & (I_E(k) \geq 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$I_E(k) = I_L - \sqrt{i_d(k)^2 + i_q(k)^2} \quad (12)$$

a, b, c 는 가중치, I_L 은 모터의 권선 전류 제한 값이다.

3. 시뮬레이션 결과

MATLAB/Simulink 를 이용하여 전류 리플 감소를 위한 레퍼런스 입력 전류 변조 알고리즘을 검증하였으며, 제어 주기는 100us, 레퍼런스 속도는 2000rpm 으로 설정하였다. 제어 파라미터는 표 1 에 표기하였다. 그림 2 의 시뮬레이션 결과, i_q 전류 리플이 약 50% 감소하였다. 또한 그림 3 에서 각 제어기의 속도 오차를 비교하였을 경우 제안된 제어기에서 정상 상태 오차가 개선된 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 유한 집합 직접 속도 예측 제어기의 레퍼런스 입력에 출력 오차 항을 보상함으로써 변조된 레퍼런스 입력을 통해 큰 계산 복잡성 없이 전류 리플 감소 및 정상상태 오차를 개선하였으며, 제안된 알고리즘의 효과는 시뮬레이션 검증되었다.

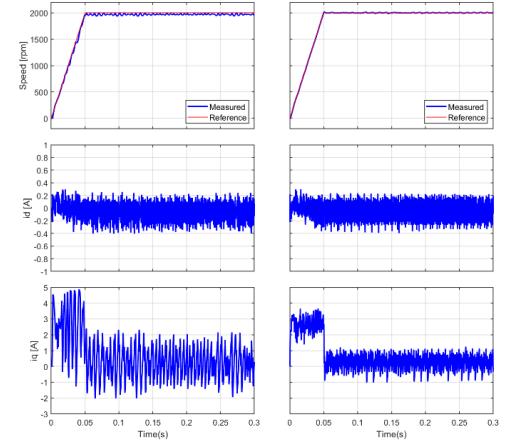


그림 2. 속도 제어기 시뮬레이션 결과 비교 ((a) 기존 FCS-MPC, (b) 제안된 FCS-MPC).

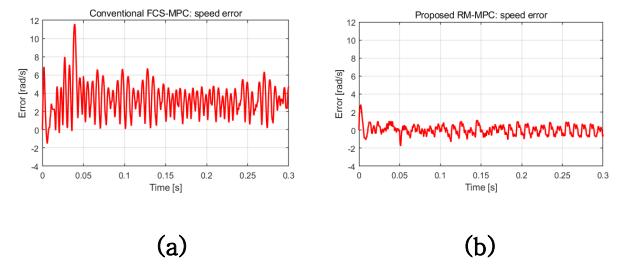


그림 3. 각 제어기의 속도 오차 시뮬레이션 결과 비교

((a) 기존 FCS-MPC, (b) 제안된 FCS-MPC).

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(No.RS-2025-02214408, 산업혁신인재 성장지원사업)과 2025년도 한국정부[산업통상자원부](직류그리드에너지 혁신연구센터)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(20224000000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터)을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] P. Cortes, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo and J. Rodriguez, "Predictive control in power electronics and drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4312–4324, Dec. 2008.
- [2] H. Kawai, Z. Zhang, R. Kennel and S. Doki, "Direct speed control based on finite control set model predictive control with voltage smoother," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 3, pp. 2363–2372, Mar. 2023.
- [3] Y. Lee, L. Sun, J. Moon, and M. Tomizuka, "Reference modulation for performance enhancement in motion control systems," in *Proc. Annu. Amer. Control Conf. (ACC)*, 2018, pp. 6697–6702.