

FCS-MPC의 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-MPC의 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 MPC는 유도 전동기 및 영구자석 동기 전동기(PMSM)와 같은 전기 기기 제어 전략으로 널리 도입되었다.[1]

그러나 FCS-MPC의 특성상, 기계적 진동, 소음 및 손실을 유발할 수 있는 큰 진폭의 전류 리플 생성된다. FCS-MPC에서 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 frame에서의 이산시간 PMSM 수학적 모델은 다음과 같이 표현된다.

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

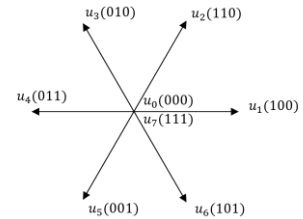


그림 1. 가능한 인버터 전압 벡터

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 torque가 포함된 PMSM의 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 torque이며 기계 각속도는 $\omega_m = \omega_e/p$ 로 표현된다.

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

PMSM	L_d, L_q	47.4 [mH]
	R	26.3 [$m\Omega$]
	J	$65 \cdot 10^{-5} [kg \cdot m^2]$
	ψ	0.24 [Wb]
	B	$1 \cdot 10^{-3} [kg \cdot m^2/s]$
	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].

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

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

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

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

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

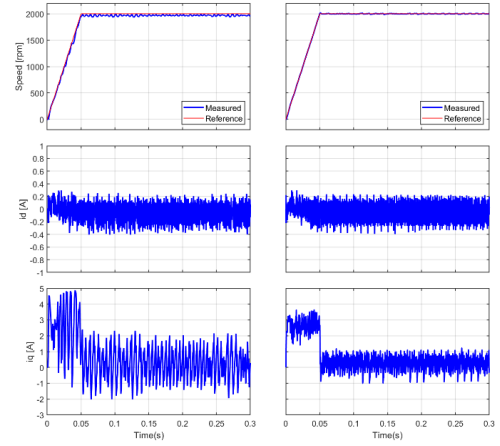
a, b, c 는 가중치, I_L 은 모터의 권선 전류 제한 값이다.

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 2의 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

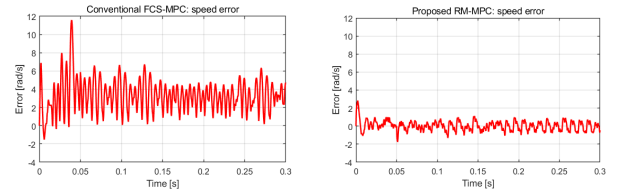
본 논문에서는 유한 집합 직접 속도 예측 제어기의 레퍼런스 입력에 출력 오차 항을 보상함으로써 변조된 레퍼런스 입력을 통해 큰 계산 복잡성 없이 전류 리플 감소 및 정상상태 오차를 개선하였으며, 제안된 알고리즘의 효과는 시뮬레이션 검증되었다.



(a)

(b)

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



(a)

(b)

그림 3. 각 제어기의 속도 오차 시뮬레이션 결과 비교

((a) 기존 FCS-MPC, (b) 제안된 FCS-MPC).

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [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.