

듀얼 전동기 구동을 위한 5-레그 인버터의 저연산 모델 예측 제어 기법

이준영, 이은우, 최동호, 이준석
 단국대학교

Low-Complexity Model Predictive Control Method for Driving Dual Induction Motors Fed by Five-leg Inverter

Jun-Young Lee, Eun-Woo Lee, Dongho Choi, June-Seok Lee
 Dankook University

ABSTRACT

본 논문에서는 3상 듀얼 유도전동기(IMs)를 구동하는 5-레그 인버터(FLI)의 저연산 모델 예측 제어(L-MPC) 기법을 제안한다. FLI에서의 기존 MPC 방식은 총 32개의 후보 전압벡터를 모두 고려하여 비용이 최소인 벡터를 선택한다. 이 과정에서 많은 연산량이 요구되며 제어기의 성능에 따라 제어 주기가 제한될 수 있다. 본 논문은 4개의 전압벡터만을 고려하여 연산량을 줄이는 L-MPC 방식을 제안한다. L-MPC 방식에서는 두 IMs의 우선 순위가 제어주기마다 순차적으로 전환된다. 우선 순위가 높은 IM은 제어주기 동안 지령 전압벡터의 인접 유효벡터 3개와 영벡터 1개 중 비용이 최소인 전압벡터가 선택된다. 우선 순위가 낮은 IM은 앞서 선택된 전압벡터에 따라 영벡터가 자동으로 결정된다. 이를 통해 제안하는 L-MPC 방식은 기존 방식보다 적은 수의 전압벡터를 고려해 연산량을 줄일 수 있다. 본 논문의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

5-레그 인버터(FLI)는 3상 듀얼 유도전동기(IMs)를 구동하는 토폴로지 중 하나이다. 그림 1은 2대의 IM₁, IM₂를 구동하는 FLI의 회로도이며, FLI는 2개의 스위치로 이루어진 5개의 레그로 구성된다. 4개의 레그(*leg A*, *leg B*, *leg E*, *leg D*)는 각 IM의 *a*, *b*상과 연결되고 1개의 레그(*leg C*)는 두 IM의 *c*상과 공통으로 연결된다.

FLI의 제어 기법 중 하나인 모델 예측 제어(MPC) 기법^[1]은 모델링을 통해 출력을 예측하고 최적화하여 얻어진 값을 제어 입력으로 사용하는 방식이다. 이는 동특성이 빠른 장점을 가지지만 많은 연산량이 요구되는 단점을 가진다.

따라서, 본 논문에서는 연산량을 줄일 수 있는 저연산 MPC(L-MPC) 기법을 제안한다. 제안하는 L-MPC 기법은 가능한 후보 전압벡터 중 지령 전압벡터와 인접한 3개의 유효벡터, 1개의 영벡터만을 고려하여 연산량을 줄인다. 제안하는 기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 5-레그 인버터의 모델 예측 제어 기법

2.1 Full-set MPC(FMPC) 기법

그림 2는 FMPC의 블록도이다. 여기서 *k*는 이산영역에서 *k*번째 샘플링 값, $\hat{i}_{d,x}^e$ 와 $\hat{i}_{q,x}^e$ 는 각각 동기좌표계 *d-q*축 고정자 전류, $\lambda_{dr,x}^e$ 는 *d*축 회전자 자속을 나타내며, *는 지령, ^는 IM₁과 IM₂를 의미한다. FMPC는 다음과 같은 3단계로 구성된다.

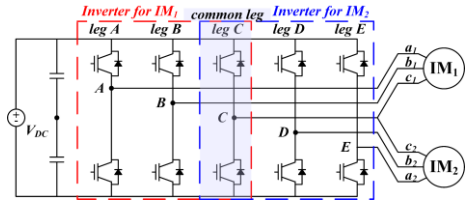


그림1 5-레그 인버터의 회로도.

Fig.1 Circuit of Five-Leg Inverter.

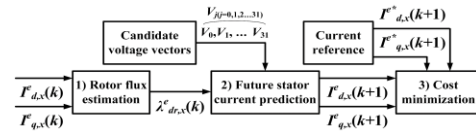


그림2 FMPC 기법 제어 블록도.

Fig.2 Control block diagram of the FMPC.

1) 회전자 자속 추정

$\lambda_{dr,x}^e$ 은 다음 수식을 통해 계산된다.

$$\lambda_{dr,x}^e(k) = \frac{L_{r,x} \lambda_{dr,x}^e(k-1) + L_{m,x} T_s R_{r,x} i_{q,x}^e(k)}{L_{r,x} + T_s R_{r,x}}, \quad (x=1,2) \quad (1)$$

여기서 $R_{s,x}$, $L_{s,x}$, $R_{r,x}$, $L_{r,x}$, $L_{m,x}$, T_s 은 각각 고정자 저항 및 인덕턴스, 회전자 저항 및 인덕턴스, 상호 인덕턴스, 제어주기를 나타낸다.

2) 고정자 전류 추정

FLI는 각 레그에 상보적으로 작동하는 2개의 스위치로 구성되므로 총 32개 후보 전압벡터($V_j, j=0,1,2,\dots,31$)를 가진다. V_j 로부터 *k*+1번째 $\hat{i}_{d,x}^e, \hat{i}_{q,x}^e$ 를 다음 수식으로 계산한다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_{d,x}^e(k+1) &= T_s K \left[\left\{ T_s^{-1} K^{-1} - (R_{s,x} L_{r,x}^2 + R_{r,x} L_{m,x}^2) \right\} i_{d,x}^e(k) \right. \\ &\quad \left. + \omega_{e,x} K^{-1} i_{q,x}^e(k) + L_{m,x} R_{r,x} \lambda_{dr,x}^e(k) + L_{r,x}^2 v_{d,x}^e(k) \right], \\ \hat{i}_{q,x}^e(k+1) &= T_s K \left[\left\{ T_s^{-1} K^{-1} - T_s K (R_{s,x} L_{r,x}^2 + R_{r,x} L_{m,x}^2) \right\} i_{q,x}^e(k) \right. \\ &\quad \left. - \omega_{e,x} K^{-1} i_{d,x}^e(k) - L_{m,x} L_{r,x} \omega_{r,x} \lambda_{dr,x}^e(k) + L_{r,x}^2 v_{q,x}^e(k) \right], \\ &\quad (x=1, 2, K=1/(L_{s,x} L_{r,x} - L_{r,x} L_{m,x})), \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $K, \omega_e, \omega_r, v_{d,x}^e, v_{q,x}^e$ 는 각각 추정계수, 동기각속도, 회전자 각속도, 동기좌표계 *d-q*축 전압벡터를 나타낸다.

3) 비용함수 최소화

최적 전압벡터를 선택하기 위해 다음 과정을 수행한다.

$$G_{c,x} = w_x \left[\left\{ i_{d,x}^e(k+1) - i_{d,x}^e(k+1) \right\}^2 + \left\{ i_{q,x}^e(k+1) - i_{q,x}^e(k+1) \right\}^2 \right], \quad (x=1, 2) \quad (3)$$

$$\Rightarrow \min \{ G_{c,x} \},$$

여기서 $G_{c,x}, w_x$ 는 비용함수, 가중치를 나타낸다. 위 과정을 통해 V_j 중 $G_{c,x}$ 가 최소인 V_j 가 선택된다.

2.2 제안하는 L-MPC 기법

그림 3은 L-MPC의 메커니즘을 보여준다. 제안하는 L-MPC 기법

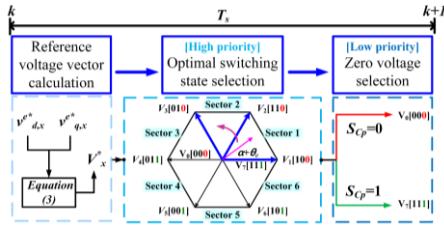


그림3 L-MPC 기법 메커니즘
Fig.3 Mechanism of L-MPC method.

표 1 MPC 기법의 연산량 비교

Table 1 Computation cost comparison of MPC Method

Parameters	FMPC	L-MPC
Cost function minimization	32	4
Stator current prediction	128	16

에서 1), 2) 과정은 FMPC와 동일하지만 그림 3과 같이 3) 과정은 다음과 같은 세가지 방법을 적용하여 수행한다.

i) 지령 전압벡터 계산

동기좌표계 $d-q$ 축 지령 전압($v_{d,x}^*$, $v_{q,x}^*$, $x=1,2$)으로부터 V_x^* 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_x^* = \sqrt{(v_{d,x}^*)^2 + (v_{q,x}^*)^2} \cos(\alpha + \theta_{e,x}),$$

$$(x=1, 2, \alpha = \cos^{-1} \left(\frac{v_{d,x}^*}{\sqrt{(v_{d,x}^*)^2 + (v_{q,x}^*)^2}} \right)), \quad (4)$$

여기서 θ_e, α 는 각각 동기각, 지령에 따른 역률각을 나타낸다.

ii) 스위칭 최적화

IMs의 우선 순위는 T_s 마다 순차적으로 전환된다. 그림 3과 같이 6개의 Sector로 나뉜 전압벡터도에서 우선 순위가 높은 IM은 T_s 동안 V_x^* 의 각에 따라 Sector가 결정된다. Sector에 따라 V_x^* 와 인접한 유효벡터($V_1, V_2 \dots V_6$) 2개, 회전방향에 따른 앞선 유효벡터 1개와 영벡터(V_0, V_7) 1개를 고려하여 그 중 G_{cx} 가 최소인 벡터가 선택된다. 예를 들어 V_x^* 의 각이 30° 이면 Sector 1에 위치하게 된다. 이때 반시계 방향으로 회전하는 경우 V_x^* 와 인접한 유효벡터 (V_1, V_2, V_3)와 영벡터(V_0, V_7)를 고려한다. 만약 영벡터의 G_{cx} 가 최소인 경우 이전 스위칭 상태에 따라 V_0, V_7 중 스위칭이 가장 적은 영벡터가 선택된다.

iii) 영벡터를 이용한 연산량 최소화

FLI의 경우 leg C가 두 IMs에 공통으로 연결되므로 우선 순위가 낮은 IM의 leg C의 스위칭 상태(S_{cp})는 앞선 최적화 과정에서 선택된 전압벡터에 따라 결정된다. 다시 말해, 우선 순위가 낮은 IM의 전압벡터는 S_{cp} 에 따라 자동적으로 V_0, V_7 중 하나가 선택된다. 예를 들어 S_{cp} 가 0이라면 우선순위가 낮은 IM의 V_x^* 는 V_0 이 선택되고 S_{cp} 가 1이라면 V_x^* 는 V_7 이 선택된다.

표 1은 FMPC와 L-MPC의 연산량을 비교한다. 표 1과 같이 FMPC는 32개의 비유함수 식과 128개의 전류 추정식을 가지는 반면 L-MPC는 4개의 비유함수 식과 16개의 전류 추정식을 가진다. 따라서 FMPC 대비 연산량이 8배 감소된다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

제안하는 L-MPC 기법의 성능은 PSIM을 통해 검증하였다. 시뮬레이션의 파라미터는 표 2와 같으며 IM₁과 IM₂는 동일한 전동기를 사용하였다. 또한 두 IMs는 150rpm으로 구동하였다.

그림 4는 FMPC와 L-MPC의 스위칭 상태를 나타낸다. FMPC는 V_j 중 하나가 선택되는 것을 볼 수 있다. 이와 달리 L-MPC는 우선순위가 낮은 IM의 경우 영벡터가 선택되기 때문에 그림 4와 같이 S_{cp} 에 따라 스위칭 상태가 결정되는 것을 볼 수 있다.

표 2 시뮬레이션에서 사용한 IMs 파라미터 및 구동 조건

Table 2 Simulation parameters of induction motor

정격 속도	300[RPM]	$R_{s,1} = R_{s,2}$	1.96[Ω]
정격 전류	4.6[A]	$R_{r,1} = R_{r,2}$	2.74[Ω]
관성 모멘트	0.02[kgm ²]	$L_{s,1} = L_{s,2} = L_{r,1} = L_{r,2}$	221[mH]
극 수	4	$L_{m,1} = L_{m,2}$	210[mH]
제어주기	250[μs]	DC 전압	250[V]

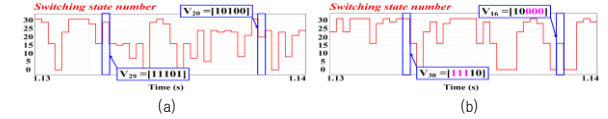


그림4 (a) FMPC 및 (b) L-MPC 기법 스위칭 상태 시뮬레이션 결과 파형.
Fig.4 Simulation results of switching state, (a) FMPC (b) L-MPC.

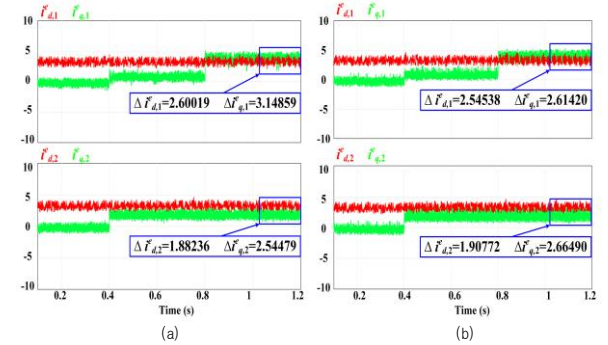


그림5 (a) FMPC 및 (b) L-MPC 기법 전류 시뮬레이션 결과 파형.

Fig.5 Simulation results of currents, (a) FMPC (b) L-MPC.

그림 5는 $i_{d,1}^*, i_{d,2}^*$ 는 정격 3.31[A]로 유지하였고, $i_{q,1}^*$ 는 0[A]에서 1[A], 4[A] 순으로, $i_{q,2}^*$ 는 0[A]에서 2[A]로 변화하였다. 동일한 $i_{d,x}^*, i_{q,x}^*$ 조건에서 FMPC와 L-MPC의 $i_{d,x}^*, i_{q,x}^*$ 시뮬레이션 결과와 정상상태 구간에서의 전류 리플($\Delta i_{d,x}^*, \Delta i_{q,x}^*$)을 나타낸다. 그림 5와 같이 $i_{q,1}^*$ 는 4[A], $i_{q,2}^*$ 는 2[A]인 정상상태에서 두 MPC 기법의 $\Delta i_{d,x}^*, \Delta i_{q,x}^*$ 차이는 $i_{d,x}^*$ 경우 최대 0.05, $i_{q,x}^*$ 경우 최대 0.5 이다. 이는 L-MPC의 정상상태 리플특성이 FMPC 대비 유사한 성능을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 저연산 모델 예측 제어 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 우선 순위에 따라 지령 전압벡터를 기준으로 인접한 유효 전압벡터 3개와 영벡터가 고려된다. 우선순위가 낮은 IM의 전압벡터는 공통 레그의 스위칭 상태에 따라 결정된다. 따라서 32가지 후보 전압벡터를 모두 고려하는 FMPC와 달리 4개의 후보 전압벡터만을 고려하기 때문에 L-MPC는 적은 연산량을 갖는다. 또한 L-MPC는 FMPC와 비교하였을 때 정상상태 리플 성능은 유사하고 연산량은 8배 감소되었다. 제안하는 L-MPC의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 RS-2022-00144203)

참고 문헌

- [1] M. Jones, S. N. Vukosavic, D. Dujic, E. Levi, and P. Wright, "Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power applications", IET Electr. Power Appl., Vol. 2, No. 5, pp.275-287, March, 2008.
- [2] D. Choi, J. -S. Lee, Y. -S. Lim and K. -B. Lee, "Priority-Based Model Predictive Control Method for Driving Dual Induction Motors Fed by Five-Leg Inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 38, no. 1, pp. 887-900, Jan. 2023.