

고효율 및 고신뢰성 인버터 동작을 위한 FCS-MPC 기반의 IPMSM 구동용 인버터 제어 기법

김종석, 박기범
KAIST 조천식모빌리티대학원

FCS-MPC based Inverter Control Method for IPMSM for High Efficiency and High Reliability Inverter Operation

Jongseok Kim, Ki-Bum Park
CCS Graduate School of Mobility, KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 유한제어요소 모델예측제어(Finite Control Set-Model Predictive Control) 기법을 이용하여 고효율 및 고신뢰성 인버터 동작을 할 수 있는 제어 기법을 제안한다. 인버터의 예측 수명은 부하 변동에 의한 IGBT의 평균 온도 및 온도 변화량에 의해 결정되며, 평균 온도가 높고 온도 변화가 심할수록 예측 수명은 줄어들게 된다. FCS-MPC의 비용 함수에 인버터 손실 항을 포함시킴으로써 IGBT의 발열량을 줄인다. Foster 모델을 이용하여 예측한 IGBT의 온도를 기반으로 인버터 손실 항의 가중치를 실시간으로 변화시킴으로써 부하 변동에 의한 온도 변화량을 감소시킨다. 시뮬레이션을 통해 기존의 FCS-MPC와 제안 제어 기법의 성능을 비교하고 타당성을 검증한다.

사용하지 않는 유한제어요소 모델예측제어(Finite Control Set-Model Predictive Control)가 있다. 변조기를 사용하는 PI-SVPWM의 경우 시스템 역률이 낮을 경우 FCS-MPC보다 인버터 효율 및 전류 THD 측면에서 성능이 좋지 않으며^[3], 다중 목표 제어를 위해서는 제어기 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 이에 반해 MPC는 비선형 시스템 및 다중 목표 제어가 가능한 제어 기법이며^[4], 그 중에서 FCS-MPC의 경우 변조기로 인한 구조적 한계가 없다는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 FCS-MPC를 선정하였다.

위 3가지 제어 목표 달성을 위해 제안된 FCS-MPC 기반의 제어 기법이 있으나^[5], 4개의 제어 항을 사용함으로써 제어 복잡도가 증가하였다. 또한, 이를 처리하기 위해 필요한 가중치 선정 방법에 대한 명확한 설명이 누락되어 있다.

본 논문에서는 위에서 언급한 내용들에 대한 해결 방안으로써 고효율 및 고신뢰성 인버터 동작을 위한 FCS-MPC 기반의 영구자석 동기전동기(IPMSM, interior permanent magnet synchronous motor) 구동용 인버터 제어 기법을 제안한다.

1. 서론

전세계적으로 기온 상승을 막기 위해 온실가스 감축에 대한 요구가 높아짐^[1]에 따라 다양한 분야에서의 시스템의 전기화(Electrification)가 진행되고 있다. 인버터는 전기 시스템을 구성 및 동작하는 데에 필요한 핵심 요소이지만, 이 과정에서 발생하는 손실로 인해 시스템의 효율을 낮추는 요소이며, 신뢰성 측면에서 가장 취약한 요소 중 하나이기도 하다^[2]. 따라서 인버터는 1) 시스템 동작을 보장하는 높은 성능, 2) 에너지 소비량을 줄일 수 있는 높은 효율, 3) 장기간 사용할 수 있는 높은 신뢰성을 보장해야 한다.

위의 3가지 목표를 만족하기 위한 대표적인 인버터 제어 기법으로서 선형제어 및 변조기 기반의 PI-SVPWM (Proportional Integral-Space Vector PWM), 모델 기반 최적화 및 변조기 기반의 연속제어요소 모델예측제어(Continuous Control Set-Model Predictive Control), 그리고 변조기를

2. IPMSM을 위한 FCS-MPC 및 시스템 사양

FCS-MPC를 이용하기 위한 IPMSM의 이산화된 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_d(k+1) &= i_d(k) + \frac{T_s}{L_d} [-R_s i_d(k) + \omega_e L_q i_q(k) + v_d(k)] \\ i_q(k+1) &= i_q(k) + \frac{T_s}{L_q} [-R_s i_q(k) - \omega_e L_d i_d(k) \\ &\quad - \omega_e \varphi_{mg} + v_q(k)] \end{aligned} \quad (1)$$

i_d, i_q, v_d, v_q 는 d, q -축 고정자 전류와 전압을 나타낸다. L_d, L_q 는 d, q -축 인덕턴스, φ_{mg} 는 영구자석 쇠교자속, R_s 는 고정자 저항, ω_e 는 회전자의 전기 각속도, 그리고 T_s 는 샘플링 주기를 의미한다. 디지털 제어로 인해 발생하는 1-step 지연을 보상하기 위해 모델 기반의 보상을 진행한다. 그림 1은 이에 대한 시스템 구성도를 제시한다. FCS-MPC는 비용함수를 구성

표 1 IPMSM 사양
Table 1 IPMSM specification

최대 출력	60 [kW]	최대 토크	192 [Nm]
R_s	18.95 [mΩ]	φ_{mg}	0.11 [Wb]
L_d	0.53 [mH]	Pole pairs	4
L_q	0.83 [mH]	V_{DC}	350 [V]

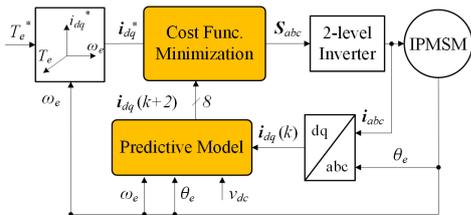


그림 1 FCS-MPC 기반 IPMSM 제어 구성도
Fig. 1 IPMSM control system diagram using FCS-MPC

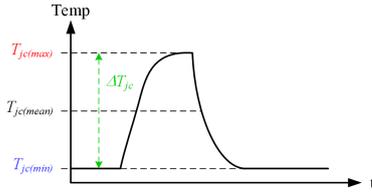


그림 2 IGBT 접합 온도 사이클 정의
Fig. 2 Definition of an IGBT junction temperature cycle

하는 방식에 따라 성능 차이가 나타난다. 4장에서 본 논문에 사용된 비용함수를 제시한다. 표1은 본 논문에서 사용된 IPMSM에 대한 사양을 제시한다.

3. 인버터 신뢰성 결정 요소

인버터에서 가장 신뢰성이 취약한 요소는 IGBT 본딩 와이어(Bonding wire)이기 때문에^[2] 본 논문에서는 인버터의 신뢰성을 본딩 와이어의 신뢰성으로 정의한다. 본딩 와이어의 파손은 외부 온도 및 IGBT의 손실로 인해 발생하는 온도 변화로 인한 피로파괴(Fatigue)가 원인이다. IGBT 본딩 와이어 파손에 대한 예측은 일련의 과정^[2] 및 아래의 식^[6]을 통해 이루어진다.

$$N_f = A \cdot (\Delta T_{jc})^\alpha \cdot (ar)^{\beta_1 \Delta T_{jc} + \beta_0} \cdot \left(\frac{C + (t_{on})^\gamma}{C + 1} \right) \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_b \cdot T_{jc(mean)}} \right) \cdot f_d \quad (2)$$

N_f 는 파손에 이르는 사이클의 수이다. 이외의 파라미터는 참고문헌^[6]에서 확인이 가능하다. 중요한 요소는 그림 2에 표현되어 있는 ΔT_{jc} 및 $T_{jc(mean)}$ 이다. IGBT의 접합 온도 T_{jc} 는 부하 변동에 대응하기 위해 인버터가 동작하면서 발생하는 손실로 인해 변동한다. 따라서 부하 변동에 따른 ΔT_{jc} 및 $T_{jc(mean)}$ 를 줄이는 것이 인버터의 신뢰성을 높일 수 있는 방법이다.

4. 고효율 및 고신뢰성 인버터 제어 기법

본 논문에서 제안하는 제어 기법의 원리는 다음과 같다. 인버터 손실을 기반으로 구성된 FCS-MPC의 비용함수를 통해 인버터의 효율을 높이고 $T_{jc(mean)}$ 을 전반적으로 낮춘다. Foster 모델을 통해 예측하는 T_{jc} 를 기반으로 인버터 손실 항의 가중치를 실시간으로 조절함으로써 부하 변동에 따른 ΔT_{jc} 를 줄인다.

4.1 인버터 손실 모델

인버터 손실 에너지는 다음과 같이 모델링할 수 있다^[3].

$$E_{sw} = \begin{cases} E_{on}(i_{abc}, T_{jc}) \cdot V_{CE}/V_{CE,rated}, & \text{if } \Delta s_{abc} = 1 \\ E_{off}(i_{abc}, T_{jc}) \cdot V_{CE}/V_{CE,rated}, & \text{if } \Delta s_{abc} = -1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \Delta s_{abc} = s_{abc}[k+2] - s_{abc}[k+1] \quad (3)$$

$$E_{cond} = \begin{cases} T_s \cdot V_{CE,on}(i_{abc}, T_{jc}) \cdot i_{abc}, & \text{if } s_{abc}[k+2] = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

E_{on} , E_{off} 는 턴온, 턴오프 스위칭 에너지, i_{abc} 는 상전류, V_{CE} 는

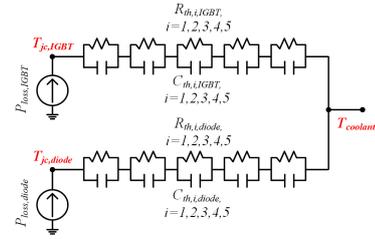


그림 3 IGBT 모듈의 5-layer Foster 모델 (Starpower GD400FFX65P3H)
Fig. 3 5-layer Foster model of the IGBT module

blocking 전압, T_{jc} 는 IGBT 또는 diode의 접합온도, 그리고 s_{abc} 는 각 상의 스위칭 상태를 의미한다.

4.2 Foster 모델

IGBT 접합 온도 추정을 위한 IGBT 모듈의 5-layer Foster 모델을 그림 3에 제시한다.

4.3 FCS-MPC 비용함수

본 논문에서 사용한 FCS-MPC 비용함수를 아래와 같이 정의한다.

$$g_1 = \|i_{dq}^* - i_{dq}(k+2)\|_2^2 \quad (5)$$

$$g_2 = \left| 0 - \sum_{a,b,c} [E_{sw}(k+2) + E_{cond}(k+2)] \right|^2 \quad (6)$$

$$g = g_1 + \lambda \cdot g_2 \quad (7)$$

g_1 은 전류 지령 추종 항, g_2 는 인버터 손실 항, λ 는 g_2 에 대한 가중치이며, g 는 전체 비용함수를 의미한다.

4.4 IGBT 예측온도 기반 인버터 손실 항 가중치 결정

그림 2에 나타난 ΔT_{jc} 및 $T_{jc(mean)}$ 를 줄이기 위해서는 부하 변동에 따른 가중치 λ 를 실시간으로 조절해야 한다. λ 가 크면 인버터 손실이 줄어들어서 T_{jc} 가 감소하고, λ 가 작으면 인버터 손실이 증가해서 T_{jc} 가 증가하는 경향성을 보인다. 식 (2)를 통해 ΔT_{jc} 을 줄이는 것이 N_f 을 증가시키는 데에 효과적임을 알 수 있다. 따라서 T_{jc} 의 변화에 따라 λ 를 조절하여 결과적으로 ΔT_{jc} 을 줄이는 동작이 필요하다.

본 논문에서는 Foster 모델을 통해 예측한 IGBT 접합 온도 $T_{jc,pred}$ 를 기반으로 아래와 같이 λ 를 결정한다.

$$T_{jc,LPF} = \alpha \cdot T_{jc,pred} + (1 - \alpha) \cdot T_{jc,LPF} \quad (8)$$

where, $\alpha = \frac{T_s f_c}{1 + T_s f_c}$

$T_{jc,LPF}$ 는 $T_{jc,pred}$ 에 저주파 통과필터를 적용한 값이다. 차단주파수 f_c 는 25Hz를 사용한다. 해당 값을 이용하여 $T_{jc,LPF}$ 가 냉각수 온도인 $T_{coolant}$ 에 가까워질 때에는 λ 가 0이 되도록 아래 식을 구성한다.

$$\lambda = (T_{jc,LPF} - T_{coolant}) \times 5 \cdot 10^{-5} \quad (9)$$

$5 \cdot 10^{-5}$ 는 최대 부하에서 시스템이 안정적인 동작을 할 때를 기준으로 정한 값이다.

5. 시뮬레이션 결과

PLECS 4.7.1 Blockset 및 MATLAB/Simulink R2021a를

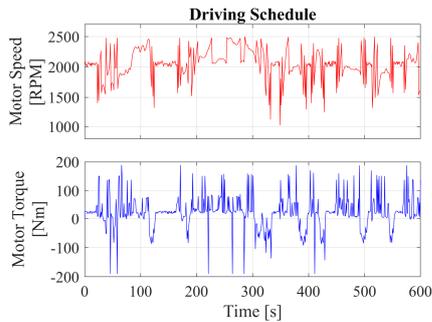


그림 4 10분 동안의 모터 속도 및 토크 운전 조건
Fig. 4 Motor torque and speed operation condition for 10 minutes

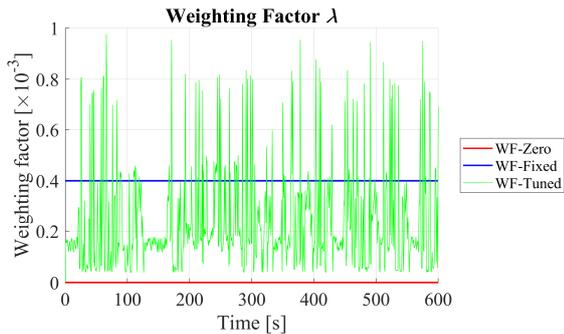


그림 5 실시간 가중치 λ
Fig. 5 Weighting factor λ in real-time

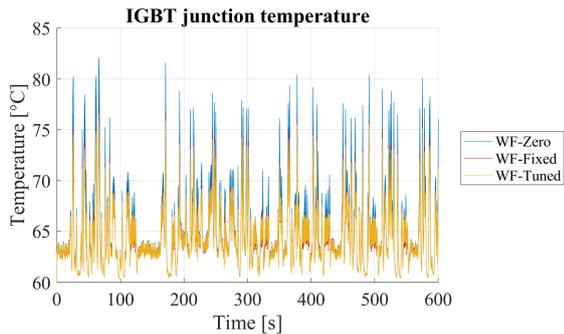


그림 6 PLECS 열모델을 통해 측정된 IGBT 접합 온도 T_{jc}
Fig. 6 T_{jc} measured from the PLECS thermal model

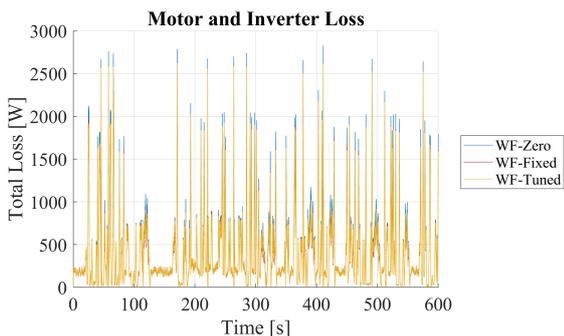


그림 7 모터 및 인버터 전체 손실
Fig. 7 Total loss of the motor and the inverter

이용하여 시뮬레이션 검증을 진행했다. IGBT의 실시간 손실 및 온도를 측정하기 위하여 PLECS의 열모델 및 손실 계산 기능을 사용했다. 성능 비교를 위해 λ 를 실시간으로 조절하는 제안 제어 기법 외에도 $\lambda = 0$ 인 경우와 $\lambda = 0.4 \times 10^{-3}$ 인 경우에 대한 결과를 같이 제시한다.

그림 4에 나타나 있는 10분 간의 모터 운전 상황에 대한 가중치 변화를 그림 5에 제시한다. 해당 가중치는 제어기 내부에서 실시간 계산 및 예측한 IGBT 접합 온도를 식 (8, 9)에 적용하여 실시간으로 사용된 가중치를 의미한다. 이에 대한 PLECS 열모델로부터 측정된 T_{jc} 변화를 그림 6에 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있듯이 제안 제어 기법은 고출력 영역에서는 다른 경우보다 온도가 낮지만, 저출력 영역에서는 비교적 온도를 높게 유지해서 ΔT_{jc} 를 줄이는 동작을 한다. 그림 7에는 이 과정동안 발생한 모터 및 인버터의 시간에 따른 전체 발생 손실량을 제시한다. 모터 손실의 경우 고정자 저항에 의한 동손(Copper loss)만 포함되었고, 인버터 손실은 PLECS에서 제공하는 손실 계산 기능을 통해 얻은 값이다.

10분 간의 구동을 통한 전체 에너지 소비량 및 예상 수명 비율을 표2에 정리한다. 표2를 통해 알 수 있듯이 제안하는 제어 기법은 231.37 [MJ]로 에너지 소비량을 가장 적게 유지하면서 4.83 [p.u.]로 예상 수명을 가장 길게 유지할 수 있는 제어 기법임을 확인할 수 있다.

표 2 가중치에 따른 총 에너지 소비량 및 예상 수명 비율

Table 2 Total consumed energy and expected lifetime ratio

	총 에너지 소비량	예상 수명 (p.u.)
WF-Zero	251.23 [MJ]	1
WF-Fixed	231.62 [MJ]	3.59
WF-Tuned	231.37 [MJ]	4.83

3. 결론

본 논문에서는 고효율 및 고신뢰성 인버터 동작을 위한 FCS-MPC 기반의 IPMSM 구동용 인버터 제어 기법을 제안하였다. 제안 기법은 FCS-MPC의 비용함수에 인버터 손실 항을 추가하였고, Foster 모델을 통해 예측한 IGBT 접합 온도를 기반으로 인버터 손실 항의 가중치를 조절하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법이 전류 제어만 하는 FCS-MPC와 인버터 손실 항 가중치가 고정된 FCS-MPC보다 더 낮은 에너지 소비량과 더 높은 예상 수명을 기록함을 제시함으로써 제안하는 기법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 농림축산식품부의 “상용화를 위한 20kW 전기구동 플랫폼 및 통합 차량 제어 모듈 기술 개발”의 지원을 받아 연구되었음 (322046-03).

참고 문헌

- [1] European Commission – Paris Agreement.
- [2] P. D. Reigosa, H. Wang, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Prediction of Bond Wire Fatigue of IGBTs in a PV Inverter Under a Long-Term Operation," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 10, pp. 7171–7182, Oct. 2016.
- [3] J. Kim, J. Song, K. Choi and K. -B. Park, "A Comparison of DPWM and Inverter Loss Energy Based FCS-MPC for IPMSM," *2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Brasov, Romania, 2022.
- [4] G. Tobias, "Model predictive control of high power converters and industrial drives," John Wiley & Sons, 2016.
- [5] J. Falck, G. Buticchi and M. Liserre, "Thermal Stress Based Model Predictive Control of Electric Drives," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 2, pp. 1513–1522, March–April 2018.
- [6] U. Scheuermann, R. Schmidt and P. Newman, "Power cycling testing with different load pulse durations," *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, Manchester, UK, pp. 1–6, 2014.