

모델예측제어를 적용한 PFC 컨버터 특성 연구

이민섭, 이은수

한양대학교 ERICA 전자공학부

Characteristics of PFC Converter Using Model Predictive Control

Minseob Lee, Eunsoo Lee

Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

ABSTRACT

본 논문에서는 기존 Boost PFC 컨버터와 Bridgeless PFC 컨버터에 적용할 수 있는 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC) 방법을 제안하였다. 기존 PI 제어는 고조파 왜곡 감소와 응답 속도 향상에 한계가 있으며, 복잡한 시스템 변화에 적용하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 반면, 제안하는 MPC 제어는 예측 알고리즘을 통해 보다 정밀한 제어가 가능하며, 시스템의 동적 변화에 유연하게 대응할 수 있는 장점을 지닌다. 따라서, 본 논문에서는 기존 PI 제어와 제안한 MPC 제어를 적용한 PFC 컨버터의 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다.

1. 서론

전기 자동차(EV)의 세계적인 보급이 가속화됨에 따라, 전기 자동차에 대한 수요가 전례 없이 증가하고 있으며, 이러한 환경 변화는 EV 충전 시스템에서의 고효율 고전력밀도 전력변환장치를 요구하고 있다. EV의 핵심 전장품인 OBC(On Board Charger)는 220V 상용 교류 전원을 입력받아 400 ~ 800V DC 배터리 셀을 충전하는 역할을 수행하며, 이 과정에서 고효율 전력 변환이 필수적이다. AC/DC 컨버터는 Boost 또는 Bridgeless 토폴로지를 사용하는 Power Factor Correction (PFC) 컨버터 및 양방향 SPWM 컨버터를 사용한다. PFC 컨버터는 입력 역률(Power Factor)을 보상하고, 입력 전류의 전고조파 왜율(Total Harmonic Distortion, THD)을 저감하기 위한 목적으로 사용되며, 대부분의 PFC 컨버터는 전류 제어기로 PI 제어를 채택하고 있다. 그러나 PI 제어기는 느린 동적 특성이라는 한계로 인해 영 전류 영역에서 전류 왜곡을 유발하여 역률 및 고조파에 부정적인 영향을 미치는 단점이 존재한다. 이러한 한계를 보완하고자 듀티 전향 보상 방법이 제안되어 적용되었으나, PI 제어기의 성능을 완전히 보상할 수 없어 영 전류 영역에서의 전류 왜곡을 완전히 개선할 수 없다^[1]. 본 논문에서는 전류 왜곡을 개선하기 위해 PFC 컨버터의 모델 예측 제어 (Model Predictive Control, MPC) 제어를 제안하였다. 제안하는 제어기는 시스템 모델을 기반으로 다음 상태의 전류를 예측하여 듀티 사이클을 미리 계산함으로써 PI 제어기에 비해 빠른 동적 특성과 개선된 THD를 달성할 수 있다. 본 논문에서는 PLECS 시뮬레이션 툴을 이용하여 컨버터의 인덕터 전류의 고조파 개선 성능을 기존 PI 제어기와 비교 및 분석하였다.

2. PFC 컨버터의 토폴로지

그림 1은 Boost PFC 컨버터의 등가 회로를 나타낸다. 스위칭 소자 Q_1 의 상태와 인덕터 L을 통해 승압 동작이 수행된다. Q_1 이 온(ON) 상태일 때 인덕터에 에너지가 축적되며, 오프(OFF) 상

태로 전환될 경우 인덕터에 저장된 에너지가 출력 커패시터 C와 부하 R으로 전달된다. 이러한 동작을 통해 출력 전압이 승압된다. 그림 2는 Bridgeless PFC 컨버터의 등가 회로를 나타낸다. 스위칭 소자 S_1 과 S_2 의 상태, 입력 전압의 극성 및 인덕터 L에 따라 승압 동작이 수행된다. S_1 과 S_2 는 상보적으로 동작하며, 입력 전압은 정현파 형태로 대칭성을 유지한다. 입력 전압이 양의 반주기일 때 S_1 이 온 상태가 되면 인덕터가 충전되고, S_1 이 오프 상태로 전환되면 인덕터에 저장된 에너지가 출력 커패시터 C와 부하 R으로 전달되어 출력 전압이 승압된다.

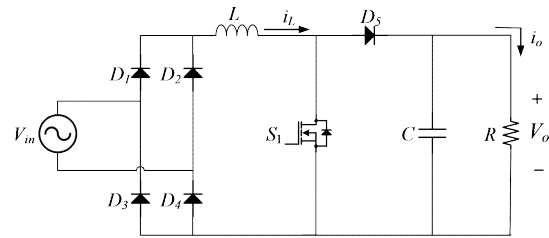


그림 1. Boost PFC 컨버터 회로도

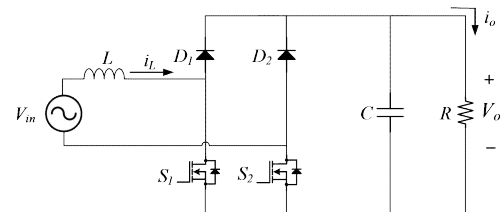


그림 2. Bridgeless PFC 회로도

3. 제안하는 MPC 제어기

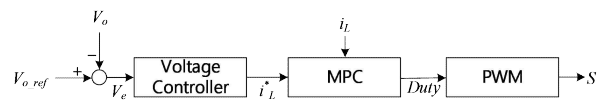


그림 3 제안하는 제어기 다이어그램

그림 3은 제안하는 제어기 다이어그램이다. 그림 4는 PFC 컨버터 동작 시의 전류 파형을 나타낸다. 그림 4를 통해 스위치가 켜진 상태일 때의 전류의 기울기와 꺼진 상태일 때의 전류의 기울기를 각각 식 (1)과 식 (2)으로 표현할 수 있으며, 현재 상태의 전류 $i_L[n]$ 로부터 다음 상태의 전류 $i_L[n+1]$ 은 식 (3)으로 나타낼 수 있다. 이때, T_{samp} 는 제어기의 샘플링 시간이며, 스위치가 켜져 있는 시간 T_{on} 과 꺼져있는 시간 T_{off} 의 합과 동일하다.

$$Sl_{on} = |V_{AC}|/L. \tag{1}$$

$$Sl_{off} = (|V_{AC}| - V_{out}) / L. \quad (2)$$

$$i_L[n+1] = i_L[n] + Sl_{on}[n] \cdot T_{on}[n+1] + Sl_{off}[n] \cdot (T_{samp} - T_{on}[n+1]). \quad (3)$$

전류 지령인 i_L^* 과 $i_L[n+1]$ 의 차이가 0이라고 가정하면, 식 (3)으로부터 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$T_{on}[n+1] = \frac{i_L^* - i_L[n] - Sl_{off}[n] \cdot T_{samp}}{Sl_{on}[n] - Sl_{off}[n]}. \quad (4)$$

식 (4)를 통해 최적의 듀티 사이클을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Duty[n+1] = \frac{T_{on}[n+1]}{T_{samp}}. \quad (5)$$

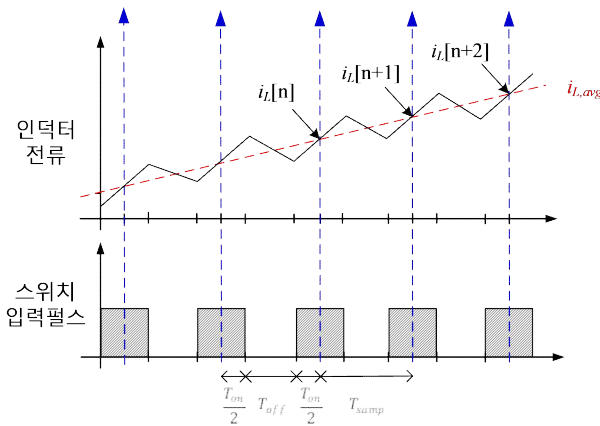


그림 4. 스위치 입력펄스에 따른 인덕터 전류 센싱 특성

디지털 신호 처리기(DSP)는 전류 및 전압의 샘플링, 제어 알고리즘 실행, 통신 등의 연산을 순차적으로 수행하며, 연산이 완료된 후 제어를 위한 듀티 사이클을 출력한다. 전류 및 전압의 샘플링 시점과 듀티 사이클 출력 시점이 상이하기 때문에, 디지털 제어 시 지연 문제가 발생한다. 현재 상태에서 센싱한 값을 기준으로 연산을 수행할 경우, 다음 상태에 적용되는 시점이 지연된다. 이러한 지연 문제로 인해 전류는 지령 전류 부분에서 큰 리플을 나타내며 진동하여 전류의 품질에 부정적인 영향을 미치게 되므로, 2주기 예측 제어를 적용해야 한다^[2]. 2주기 예측을 적용한 식은 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_{on}[n+2] = \frac{i_L^* - i_L[n+1] - Sl_{off}[n+1] \cdot T_{samp}}{Sl_{on}[n+1] - Sl_{off}[n+1]}. \quad (6)$$

4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 기존 PI 제어기와 MPC 제어기를 적용한 PFC 컨버터의 인덕터 전류 THD를 비교하기 위하여 PLECS 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 적용한 PFC의 소자 값이다. 시뮬레이션 코드에 실제 DSP에 활용할 때 나타나는 딜레이를 구현하기 위해 1주기부터 3주기를 지연하는 코드를 추가하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 5와 그림 6은 PFC 컨버터에 1주기를 지연하는 PI제어기와 MPC제어기를 적용했을 때 인덕터 전류를 비교한 그림이다. MPC 제어기를 적용했을 때, 영 전류 영역에서 전류 왜곡이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 표 2는 인덕터 전류 파형의 THD 값을 측정한 표이며, 제안하는 MPC 제어를 통해 THD가 개선되었다는 것을 확인할 수 있다.

표 1. PFC 컨버터의 소자 파라미터 값

파라미터	값	파라미터	값
V_{in} [V _{rms}]	220	f_{in} [Hz]	60
V_o [V]	400	f_{sw} [kHz]	75
L [μ H]	430	C [mF]	3.6
P_{ref} [kW]	7.2		

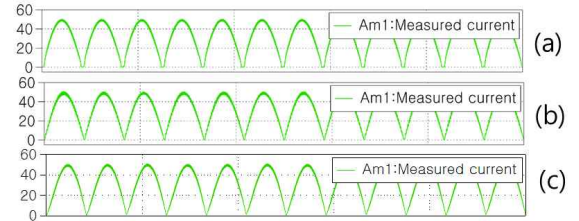


그림 5 Boost PFC의 시뮬레이션 결과 (1지연) : (a) PI제어기, (b) MPC제어기 (1주기 예측), (c) MPC제어기 (2주기 예측)

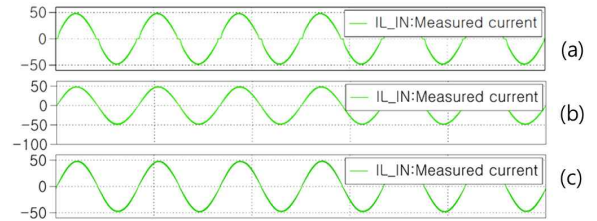


그림 6 Bridgeless PFC의 시뮬레이션 결과 (1지연) : (a) PI제어기, (b) MPC제어기 (1주기 예측), (c) MPC제어기 (2주기 예측)

표 2. PFC 컨버터의 THD 요약

구분 / 지연주기	Boost PFC			Bridgeless PFC		
	1주기	2주기	3주기	1주기	2주기	3주기
PI제어	4.35	5.49	7.27	4.39	5.61	7.16
MPC제어 (1주기 예측)	3.87	51.22	71.63	3.14	51.87	72.52
MPC제어 (2주기 예측)	18.20	3.95	9.15	9.97	2.46	10.56

5. 결론

본 논문에서는 Boost PFC 컨버터와 Bridgeless PFC 컨버터를 제어에 사용하는 MPC제어기를 제안하였다. 제안하는 기법은 느린 동특성을 가져 전류 왜곡이 발생하는 PI 제어 기법과 달리 하여 시스템 모델을 기반으로 다음 상태의 전류를 예측하여 듀티 사이클을 계산함으로써 전류 왜곡을 개선한다. 제안된 기법은 PLECS 시뮬레이션을 통해서 유효성을 검증하였으며, 인덕터 전류의 THD를 개선됨을 확인하였다. 향후 PFC 컨버터 실험 세트를 제작을 통해 본 MPC 제어기에 대한 주요 성능을 검증할 예정이다.

참고 문헌

- [1] F. D. M. Van de Sype, K. De Gussemme, A. P. Van den Bossche, and J. A. Melkebeek, "Duty Ratio Feedforward for Digitally Controlled Boost PFC Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 1, pp. 108-115, Feb. 2005.
- [2] 박진혁, "전기차 충전기를 위한 정류 회로 제어기술", 아주대학교 박사학위 논문, pp. 19-22, Aug. 2018.