

Controls Methods Review of Single-Phase Boost PFC Converter : Average Current Mode Control, Predictive Current Mode Control, and Model Based Predictive Current Control

Hyeon-Joon Ko*, Yeong-Jun Choi*

*Student, Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

*Assistant Professor, Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

[Abstract]

For boost PFC (Power Factor Correction) converters, various control methods are being studied to achieve unity power factor and low THD (Total Harmonic Distortion) of AC input current. Among them, average current mode control, which controls the average value of the inductor current to follow the current reference, is the most widely used. However, nowadays, as advanced digital control becomes possible with the development of digital processors, predictive control of boost PFC converters is receiving attention. Predictive control is classified into predictive current mode control, which generates duty in advance using a predictive algorithm, and model predictive current control, which performs switching operations by selecting a cost function based on a model. Therefore, this paper simply explains the average current mode control, predictive current mode control, and model predictive current control of the boost PFC converter. In addition, current control under entire load and disturbance conditions is compared and analyzed through simulation.

▶ **Key words:** Boost PFC converter, Average current mode control, Predictive current mode control, Model predictive current control, THD, Power Factor

[요 약]

부스트 PFC (Power Factor Correction) 컨버터는 AC 입력 전류의 단일 역률과 낮은 THD (Total Harmonic Distortion)를 달성하기 위해 다양한 제어기법들이 연구되고 있다. 그중 인덕터 전류의 평균값을 전류지령에 추종하도록 제어하는 평균전류 모드 제어가 있으며 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 오늘날 디지털 프로세서의 발달로 고도화된 디지털 제어가 가능해지면서 부스트 PFC 컨버터의 예측제어가 관심을 받고 있다. 예측제어에는 예측 알고리즘으로 듀티를 미리 생성하는 예측전류 모드 제어 및 모델을 기반으로 한 비용함수를 선정하여 스위칭 동작을 하는 모델예측제어로 분류된다. 따라서 본 논문에서는 부스트 PFC 컨버터의 평균전류 모드 제어, 예측전류 모드 제어, 모델예측 전류 제어를 간단히 설명한다. 또한, 시뮬레이션을 통해 전체 부하 및 다양한 외란 조건에서의 전류 제어를 비교 분석한다.

▶ **주제어:** 부스트 PFC 컨버터, 평균전류 모드 제어, 예측전류 모드 제어, 모델예측제어, THD, 역률

-
- First Author: Hyeon-Joon Ko, Corresponding Author: Yeong-Jun Choi
 - *Hyeon-Joon Ko (rhguswns050@jejunu.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
 - *Yeong-Jun Choi (yeongjun.choi@jejunu.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
 - Received: 2023. 10. 27, Revised: 2023. 11. 17, Accepted: 2023. 11. 24.

I. Introduction

현재 환경규제 및 탈 탄소화로 인해 전기자동차(EV)가 기존의 화석연료를 사용하는 내연기관 차량의 대안으로 주목받고 있다. 그 중 EV 충전장치는 전기차 시장의 핵심 구성요소로 그 수요가 커지고 있다. 특히 충전을 위해 탑재되는 온보드 차저는 AC/DC 컨버터가 포함되는데 여기에 AC/DC Pre-regulator로 PFC (Power Factor Correction) 컨버터가 사용되고 있다[1-4]. PFC 컨버터는 입력전압과 동상으로 전류를 추종하게끔 제어하여 높은 역률과 낮은 THD (Total Harmonic Distortion) 및 일정한 출력을 제공한다. PFC 컨버터에는 다양한 토폴로지가 있다. 그 중 부스트 PFC 컨버터는 브릿지 정류회로와 부스트 컨버터를 결합한 간단한 구조로 안정적인 출력을 제공한다. 이러한 장점으로 부스트 PFC 컨버터는 산업계에서 널리 사용되고 있다[5-10].

부스트 PFC 컨버터에는 다양한 제어 방법이 존재하며 이 중 가장 널리 알려진 방법은 평균전류 모드 제어이다 [11]. 평균전류 모드 제어는 인덕터 전류의 평균값을 전류 지령에 추종하도록 제어한다. 제어기의 외부루프는 전압제어, 내부루프는 전류 제어인 이중 루프로 구성되어 있다. 전류 제어의 출력변수와 삼각파를 비교하여 PWM (Pulse Width Modulation)을 생성한다. 높은 정확도로 전류지령을 추종하며 상대적으로 작은 인덕터로 낮은 THD를 달성할 수 있다 [12]. 또한 노이즈와 외란에 강하다는 특성이 있다.

예측전류 모드 제어는 예측 알고리즘 통해 듀티를 미리 생성한다[13-14]. 생성된 듀티를 삼각파와 비교하여 PWM을 출력한다. 예측전류 모드 제어는 전압 제어기만을 채택하므로 평균전류 모드 제어 시스템에 비해 제어 시스템 설계가 간단하다. 또한 입력전압의 주파수와 동일한 정현파 지령을 내부적으로 생성하기 때문에 입력전압 왜곡에도 강인하다.

예측전류 모드 제어와 마찬가지로 디지털 제어인 모델 예측 전류 제어가 있다. 모델예측 전류 제어는 시스템의 모델을 기반으로 한 비용함수를 정의하여 컨버터 전류를 제어한다[15-19]. 비용함수가 최소로 되는 최적값을 선택해 스위칭을 직접 출력하기 때문에 별도의 PWM이 필요하지 않다. 또한, 선정된 비용함수에 따라 부스트 PFC 컨버터의 스위치 on/off가 결정되므로 가변스위칭 동작을 하게된다.

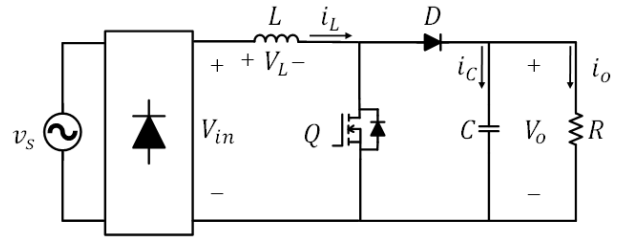


Fig. 1. Circuit diagram of single-phase Boost PFC converter.

본 논문은 부스트 PFC 컨버터의 평균전류 제어, 예측전류 모드 제어 및 모델예측 전류 제어의 제어 성능을 비교 분석한다. 각 제어방식의 왜곡된 입력전압에서의 성능, 전부하에서의 역률, THD 및 장·단점을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I 절에서는 연구배경 및 목적을 설명한다. II 절에서는 부스트 PFC 컨버터의 기본 동작 원리와 및 이론적인 분석을 제시한다. III 절에서는 본 논문에서 설명하는 부스트 PFC 컨버터의 제어전략에 대해 이론적 분석을 제시한다. VI 절에서는 시뮬레이션을 통해 각 제어방식의 성능을 비교 및 분석한다. V 절에서는 VI 절의 결과를 바탕으로 결론을 제시한다.

II. Boost PFC Converter

1. Basic operating principle of boost PFC converter

부스트 PFC 컨버터의 전류 제어를 설계하기 위해서는 회로의 기본 동작 원리를 해석해야 한다. 따라서 본 섹션은 부스트 PFC 컨버터의 모델링을 위한 기본 동작 원리 및 식을 설명한다.

Fig. 1은 단상 부스트 PFC 컨버터 회로의 다이어그램을 나타내고 있다. 그림 1.3은 부스트 PFC 컨버터의 회로도를 보여준다. 여기서 V_L 은 인덕터에 인가되는 전압, i_L 은 인덕터를 통해 흐르는 전류, Q 는 mosfet 스위치, D 는 부스트 다이오드, C 는 출력 커패시터이다. V_s 는 입력 전압, V_{in} 는 정류된 입력 전압, L 은 인덕터, i_C 는 커패시터를 통과하는 전류, R 은 부하, V_o 는 출력 전압, i_o 는 출력 전류이다.

부스트 PFC 컨버터 모델링 과정의 직관적인 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 동작 모드는 연속전도 모드 (CCM)로 동작한다.
- 2) 스위칭 주파수는 라인 주파수보다 월등히 높다.

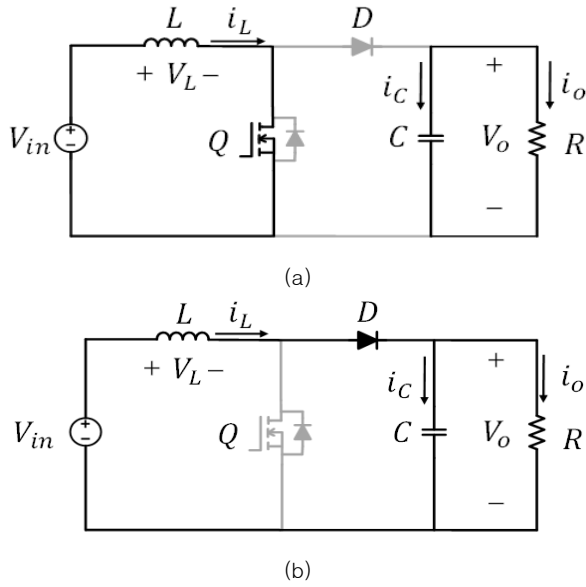


Fig. 2. Boost PFC converter : (a) switch on, (b) off state.

3) 출력전압은 리플 성분이 없는 DC 성분이다.

4) 회로의 기생저항 성분은 고려하지 않았다.

Fig. 2는 스위치 on/off에 따른 부스트 PFC 컨버터의 동작을 보여준다. 스위치 on 시 인덕터에 인가되는 전압 V_L 과 커패시터에 흐르는 전류 i_C 는 다음과 같다.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{in} \quad (1)$$

$$i_C = C \frac{dv_o}{dt} = -\frac{V_o}{R} \quad (2)$$

스위치 off 시는 다음과 같다.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - V_o \quad (3)$$

$$i_C = C \frac{dv_o}{dt} = i_L - \frac{V_o}{R} \quad (4)$$

결과적으로 도출된 식 (1) ~ (4)를 이용하여 부스트 PFC 컨버터의 제어기 설계를 유도할 수 있다.

III. Controller design strategy

1. Average current mode control

부스트 PFC 컨버터의 평균전류 모드 제어를 설계하기 위해서는 부스트 컨버터의 모델링이 필요하다. 모델링 과정은 참고문헌 [20]에 연구되어 있으며 본 절에서는 간략하게 요약한다. 단일 스위칭 주기 동안의 평균 방정식은 식(1)~(4)에 듀티비 D 를 대입한 후 Voltage second

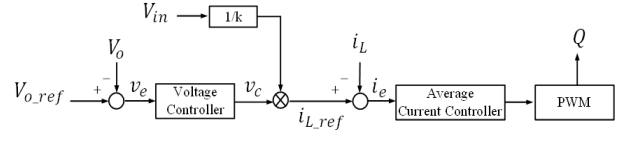


Fig. 3. Block diagram of average current mode control.

balance와 capacitor charge balance로 인해 다음과 같이 나타낸다.

$$\langle L \frac{di_L}{dt} \rangle = 0 = DV_{in} + (1-D)(V_{in} - V_o) = V_{in} - V_o - DV_o \quad (5)$$

$$\langle C \frac{dv_o}{dt} \rangle = 0 = -D \frac{V_o}{R} + (1-D)(i_L - \frac{V_o}{R}) = (1-D)i_L - \frac{V_o}{R} \quad (6)$$

선형화를 위해 식(5), (6)에 교류 소신호 성분을 대입하여 정리하면 식(7), (8)과 같다.

$$sL \hat{i}_L = \hat{v}_i + \hat{v}_o(1-D) - \hat{d}V_o \quad (7)$$

$$sC \hat{v}_o = \hat{i}_L(1-D) + \hat{d}i_L - \frac{\hat{v}_o}{R} \quad (8)$$

여기서 듀티 \hat{d} 로부터 인덕터 전류 \hat{i}_L 를 나타내면 식(9)의 전달함수가 도출되며 \hat{i}_L 로부터 출력전압 \hat{v}_o 를 나타내면 식(10)의 전달함수가 도출된다.

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(CV_o)s + 2(1-D)I_L}{(LC)s^2 + \frac{L}{R}s + (1-D)^2} \quad (9)$$

$$G_{vi}(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{(1-D)V_o - (LL)s}{(CV)s + 2(1-D)I_L} \quad (10)$$

그림 3은 전압제어와 평균전류 모드 제어의 블록 다이어그램을 나타낸다. 외부루프로 전압 제어기, 내부루프로 전류 제어기가 존재하며 식 (9)와 (10)을 이용하여 설계할 수 있다. 출력전압 지령 $V_{o.ref}$ 와 출력전압 V_o 사이의 오차변수 v_e 는 전압 제어기의 입력이 된다. 오차변수는 전압 제어기를 거친 후 전압제어 이득 값 v_c 로 출력되어 입력 전압으로부터 직접 생성한 정현파와 곱해져 인덕터 전류 지령 $i_{L.ref}$ 을 생성한다. $i_{L.ref}$ 과 인덕터 전류 i_L 의 오차 i_e 는 전류 제어기의 입력이 되며 전류 제어기가 이를 보상

하여 듀티를 출력 한다. 출력된 듀티를 삼각파와 비교하여 부스트 PFC 컨버터에 인가할 PWM을 생성한다.

2. Predictive current mode control

그림 4는 부스트 PFC 컨버터의 예측전류 모드 제어 기본 동작 원리를 보여준다. $i_L(k)$, $i_{L.ref}(k)$, $i_L(k+1)$,

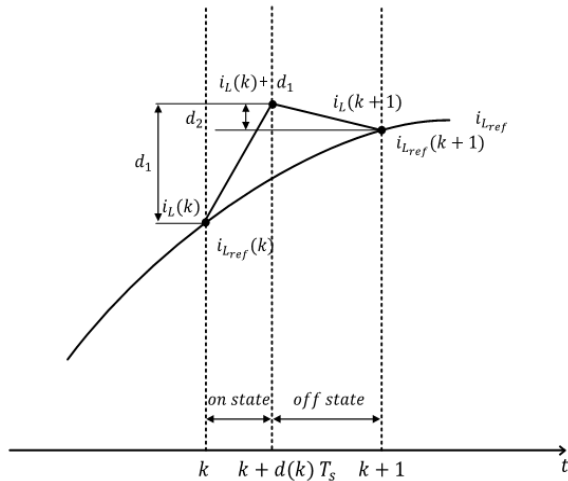


Fig. 4. Operation principle of predictive current mode control.

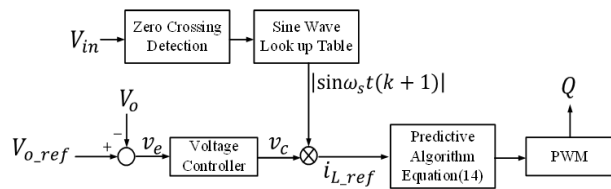


Fig. 5. Block diagram of predictive current mode control.

$i_{L.ref}(k+1)$, $d(k)$ 는 k 및 $k+1$ 시간에 인덕터 전류, 인덕터 전류지령 및 듀티비이다. d_1 은 스위치 on 시 인덕터 전류의 증가량이며 d_2 는 스위치 off 시 인덕터 전류의 감소량이다.

$k+1$ 시간에서 인덕터 전류와 전류지령은 같으므로 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$i_{L.ref}(k+1) = i_L(k+1) = i_L(k) + d_1 + d_2 \quad (11)$$

식 (1)과 (3)의 관계로 k 시간의 인덕터 전류 증가량과 감소량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_1(k) = \frac{V_{in}(k)d(k)T_s}{L} \quad (12)$$

$$d_2(k) = \frac{(V_{in}(k) - V_o(k))(1-d(k))T_s}{L} \quad (13)$$

출력전압 $V_o(k) = V_{o.ref}(k)$ 라 가정하여 식(12)와 (13)을 (11)에 대입하면 (14)와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$d(k) = \frac{V_{o.ref}(k) - V_{in}(k)}{V_{o.ref}(k)} + \frac{L}{T_s V_{o.ref}(k)} (i_{L.ref}(k+1) - i_L(k)) \quad (14)$$

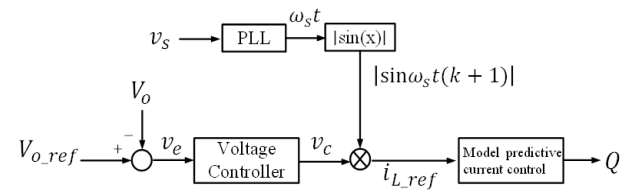


Fig. 6. Block diagram of model predictive current control.

그림 5는 예측전류 모드 제어의 블록 다이어그램을 나타낸다. 부스트 PFC 컨버터의 예측전류 모드 제어는 입력전압 주파수와 전압 제어기의 출력변수를 이용하여 듀티 $d(k)$ 를 생성한다. $d(k)$ 은 V_{in} 파형을 기반으로 생성되므로 왜곡된 입력전압 조건에서 전류 제어 능력이 강인하다.

3. Model predictive current control

부스트 PFC 컨버터의 모델예측 전류 제어 설계는 인덕터 전류와 전압의 관계식으로부터 얻을 수 있다. 인덕터 전류를 모델로 하며 식(1)과 (3)을 포워드 오일러 방정식인 식(15)에 대입하여 스위치 on/off 시 예측모델 식(16)과 (17)을 각각 도출할 수 있다.

$$\frac{di_L(k)}{dt} = \frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} \quad (15)$$

$$i_{L.on}(k+1) = i_L(k) + \frac{V_{in}(k)}{L} T_s \quad (16)$$

$$i_{L.off}(k+1) = i_L(k) + \frac{V_{in}(k) - V_o(k)}{L} T_s \quad (17)$$

모델예측 제어의 스위치 on/off 시 비용함수 g_{on} 과 g_{off} 는 예측모델과 전류지령 $i_{L.ref}(k+1)$ 의 차에 절댓값을 적용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$g_{on} = |i_{L.ref}(k+1) - i_{L.on}(k+1)| \quad (18)$$

$$g_{off} = |i_{L.ref}(k+1) - i_{L.off}(k+1)| \quad (19)$$

여기서, 전류지령은 식 (20)과 같이 전압 제어기의 출력 변수 V_c 와 입력전압의 주파수 w_s 를 검출하여 생성된 예측된 정현파 $|\sin w_s t(k+1)|$ 의 곱으로 나타낸다.

$$i_{L_ref}(k+1) = v_c |\sin \omega_s t(k+1)| \quad (20)$$

결과적으로 g_{on} 과 g_{off} 중 값이 최소가 되는 최적의 비용함수 g_{opt} 를 선정 후, 스위치 Q를 결정한다. 그 과정은 다음과 같다.

$$g_{opt} = \begin{cases} g_{on} \leq g_{off}, & Q = 1 \\ g_{on} > g_{off}, & Q = 0 \end{cases} \quad (21)$$

그림 6은 부스트 PFC 컨버터의 모델예측 전류 제어 블록 다이어그램이다. 부스트 PFC 컨버터의 모델예측 전류 제어는 검출된 입력주파수와 전압 제어기의 출력 변수를 통해 전류지령을 생성한 후 최종적으로 최적의 비용함수 g_{opt} 를 선정해 스위칭 신호를 생성한다. 또한, 입력 주파수를 검출하여 전류지령을 생성했기 때문에 입력전압 왜곡에도 강인하다.

Table 1. System Environment

Symbol	Quantity	Value
v_s	Input Voltage	220 V_s
V_o	Output Voltage	380 V
f_s	Input frequency	60Hz
f_{samp}	Sampling frequency	50kHz
L	Boost Inductor	5mH
C	Output capacitance	1500 μ F
P	Power	3300W

IV. Simulation Result

본 절에서는 PLECS를 이용하여 본 논문에서 조사한 부스트 PFC 컨버터의 제어를 구현하였다. 전부하에 대한 THD 및 역률을 비교하였으며, 입력전압 왜곡, 부하 변동 등 다양한 상황에서의 성능을 조사하였다. 진행된 시뮬레이션의 파라미터는 표 1에 나타나 있다.

그림 7은 부스트 PFC 컨버터의 인덕터 전류 파형을 나타내고 있다. (a)는 평균전류 모드 제어, (b)는 예측전류 모드 제어, (c)는 모델예측전류 제어이다. 세 가지 제어방식 모두 인덕터 전류가 전류지령을 밀접하게 추종하고 있다. (c)는 (a)와 (b)에 비해 리플이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 가변스위칭 방식으로 동작하는 모델예측전류 제어 특성상 스위칭 주파수가 일정하지 않기 때문이다.

그림 8은 왜곡된 입력전압 조건에서의 입력전류 파형을 보여준다. (a)는 평균전류 모드 제어, (b)는 예측전류 모드

제어, (c)는 모델예측 전류 제어이다. (a)는 입력전압으로부터 직접 전류지령을 생성하므로 왜곡된 입력전압 조건에서 취약하다는 단점이 있다. 반면 (b)와 (c)는 입력 주파수를 검출하여 예측된 정현파를 생성하므로 왜곡된 입력전압에서도 강인한 전류 제어 성능을 보여준다.

그림 9는 부스트 PFC 컨버터의 부하 변동시 출력전압을 나타내고 있다. 평균전류 모드 제어는 약 0.3초의 과도 응답시간을 나타내며 최대 40V 출력전압 변동 폭을 보이고 있다. 또한 정상 상태에 도달하기 전, 약간의 오버슈트가 나타난다. 예측전류 모드 제어는 약 0.3초의 과도 응답시간을 나타내며 50V의 출력전압 변동 폭을 보인다. 모델예측전류 제어는 약 0.6초의 과도응답과 최대 55V의 출력전압 변동 폭을 보인다. 비교한 제어기법에서 평균전류 모드 제어와 예측전류 모드 제어의 과도응답 시간은 동일하며 출력 변동 폭은 예측전류 모드 제어가 상대적으로 컸다. 모델예측전류 제어는 세 가지의 방법 중 0.6초로 비교적

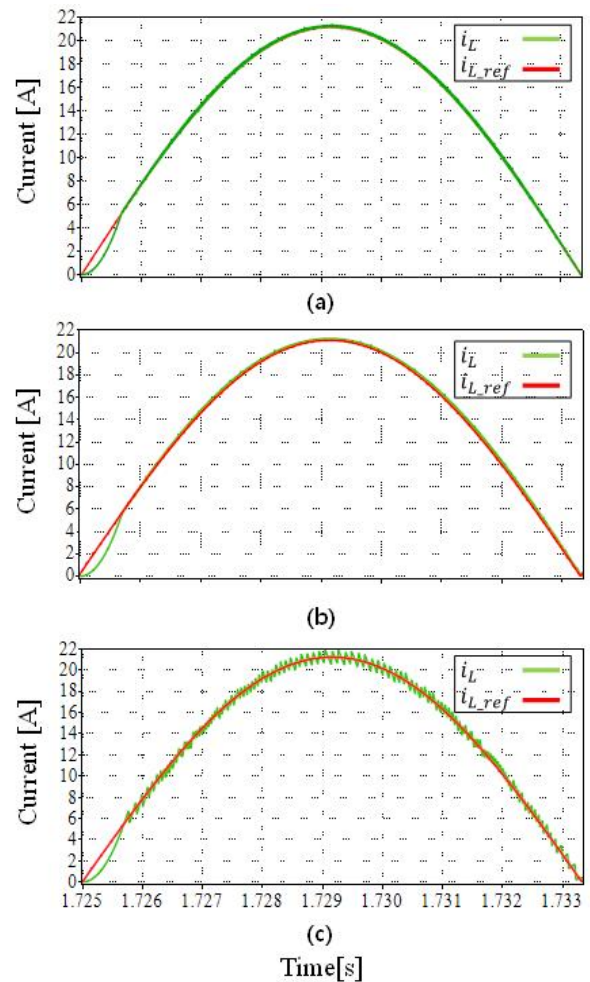


Fig. 7. Inductor current waveforms of boost PFC converter : (a) Average current mode control, (b) Predictive current mode control, (c) Model predictive current control.

가장 느린 과도응답과 55V의 가장 큰 전압 변동의 폭을 나타냈다. 내부 루프에 모델예측전류 제어가 제어기 있는 전압 루프는 평균전류 모드 제어가 있는 전압 루프보다 느리기 때문에 과도응답 및 출력전압 변동이 상대적으로 크게 나타났다.

그림 10은 전부하에서 부스트 PFC 컨버터의 THD를 보여준다. 100% 부하에서 세 가지 제어 모두 3% 미만의 THD를 보여준다. THD는 전반적으로 예측전류 모드 제어가 가장 낮았으며, 모델예측 전류 제어가 가장 높았다.

그림 11은 전부하에서 부스트 PFC 컨버터의 역률을 보여준다.

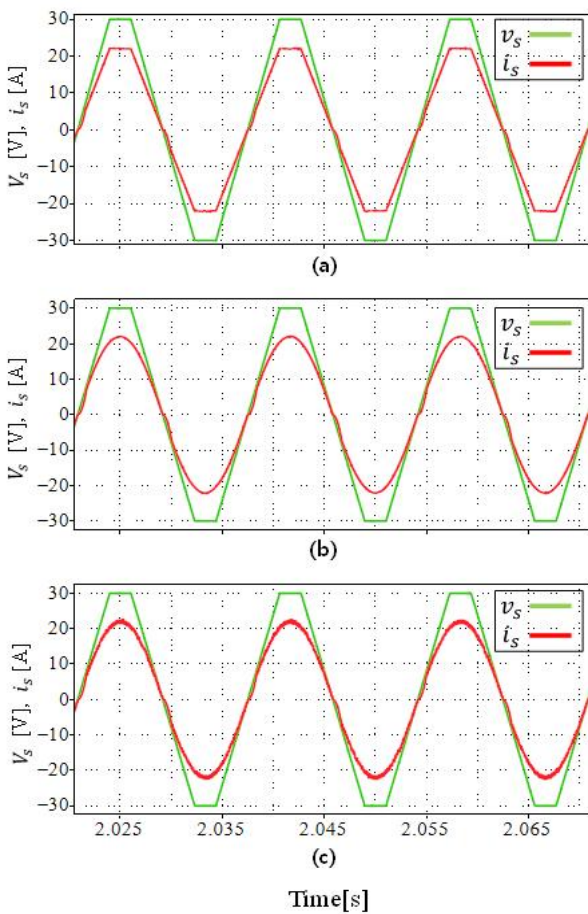


Fig. 8. Input current waveforms under distorted input voltage conditions of boost PFC converter : (a) Average current mode control, (b) Predictive current mode control, (c) Model predictive current control.

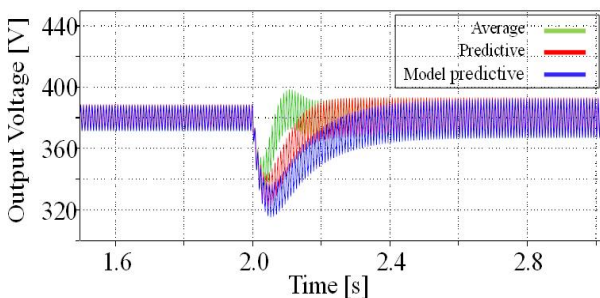


Fig. 9. Output voltage when load changes of boost PFC converter (100% to 75%)

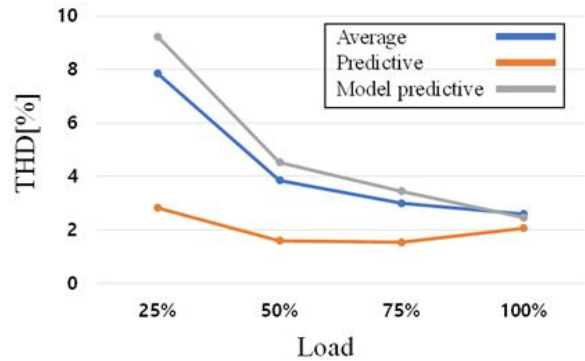


Fig. 10. Power factor of load PFC converter at entire load

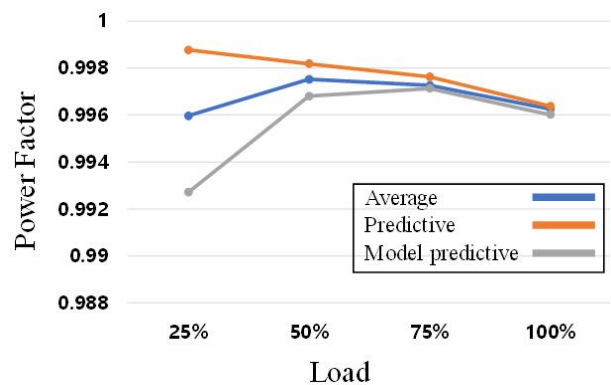


Fig. 11. Input current harmonics of boost PFC converter at entire load

전부하에서 역률은 예측전류 제어 모드가 가장 높았고, 모델예측 전류 제어가 가장 낮게 나타났다. 하지만 전반적으로 모든 제어에서 0.99 이상의 고역률을 달성하였다.

V. Conclusions

본 논문은 단일 역률과 낮은 THD 달성을 위한 부스트 PFC 컨버터의 다양한 전류 제어기법 중 일부를 소개하였다. 평균전류 모드 제어, 예측전류 모드 제어 및 모델예측 전류 제어의 설계 과정을 설명하였으며 시뮬레이션을 통한 다양한 외란 상황에서의 성능을 비교하였다. 또한, 전

부하 시 THD 및 역률도 조사하였다. 입력전압이 왜곡된 상황에서 예측된 전류지령을 생성하는 예측전류 모드 및 모델예측 전류 제어의 강인함을 보였다. 반면에, 입력전압을 직접 검출하여 반영된 전류 지령을 생성하는 평균전류 모드 제어는 입력전압 왜곡에 취약함을 보였다. 모델예측 전류 제어의 경우 경부하에서 THD가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 모델예측전류 제어는 경부하에서 낮은 전류 대비 큰 리플을 나타내며, 가변 스위칭 주파수 방식이므로 스위칭 주파수가 일정하지 않기 때문으로 분석된다. 하지만 정격 부하에서 상대적으로 준수한 제어 성능을 보인다. 결론적으로, 조사된 제어 방식들은 100% 및 75% 부하에서 각 전류 제어는 4% 미만의 낮은 THD를 보였으며, 전 부하에서 0.99 이상의 고 역률을 보였다. 따라서 고효율 애플리케이션인 전기차 충전기, 에어컨, 전력 공급기 등의 다양한 AC-DC pre-regulator로 사용되기 적합하다. 추가적으로, 가변 스위칭 주파수 방식인 모델예측 전류 제어는 스위칭 손실을 개선을 위한 연구에 긍정적인 기여를 할 것으로 예상되며, 스위칭 손실이 큰 애플리케이션에 적용 시 큰 이점이 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 021R1G1A1005334)

REFERENCES

- [1] D. Chakraborty, P. Das and D. Srinivasan, "Coupled inductor based single-phase bridgeless PFC boost rectifier with auxiliary circuit assisted ZVS," 2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Broadbeach, QLD, Australia, pp. 410-416, 2017, DOI: 10.1109/INTLEEC.2017.8214171.
- [2] G. Sivanagaraju, S. Samata, L. M. Kunzler, K. R. Feistel, A. K. Rathore and L. A. Lopes, "PFC interleaved buck-boost converter for telecom power application, "IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China, pp. 2299-2304, 2017, DOI: 10.1109/IECON.2017.8216387.
- [3] Yun-Sung Kim, Byoung-Kuk Lee and J. W. Lee, "Topology characteristics analysis and performance comparison for optimal design of high efficiency PFC circuit for telecom," 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Amsterdam, Netherlands, pp. 1-7, 2011, DOI: 10.1109/INTLEEC.2011.6099764.
- [4] M. M. Jovanovic and Y. Jang, "State-of-the-art, single-phase, active power-factor-correction techniques for high-power applications - an overview," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, pp. 701-708, June 2005, DOI: 10.1109/TIE.2005.843964.
- [5] J. P. M. Figueiredo, F. L. Tofoli and B. L. A. Silva, "A review of single-phase PFC topologies based on the boost converter," 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010, Sao Paulo, Brazil, pp. 1-6, 2010, DOI: 10.1109/INDUSCON.2010.5740015.
- [6] K. Mahmud and L. Tao, "Power factor correction by PFC boost topology using average current control method," 2013 IEEE Global High Tech Congress on Electronics, Shenzhen, China, pp. 16-20, 2013, DOI: 10.1109/GHTCE.2013.6767232.
- [7] S. Wall and R. Jackson, "Fast controller design for single-phase power factor correction systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 5, pp. 654-660, Oct 1997, DOI: 10.1109/41.633465.
- [8] L. Roggia, F. Beltrame, J. E. Baggio, and J. R. Pinheiro, "Digital current controllers applied to the boost power factor correction converter with load variation," IET Power Electronics, vol. 5, no. 5, pp. 532 - 541, 2012, DOI: 10.1049/iet-pel.2011.0086
- [9] H. Zhang, H. Li, J. Mao, C. Pan and Z. Luan, "Model-Free Control of Single-Phase Boost AC/DC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 10, pp. 11828-11838, Oct. 2022.
- [10] E. Roshandel, B. Derakhshanian and A. Mahmoudi, "Optimal Digital Controller for Power Factor Correction of the Switching Power Supplies," 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Brisbane, Australia, 2021.
- [11] A. El Aroudi and M. Orabi, "Stabilizing Technique for AC-DC Boost PFC Converter Based on Time Delay Feedback," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 57, no. 1, pp. 56-60, Jan. 2010, DOI: 10.1109/TCSII.2009.2036546.
- [12] L. Dixon, "Average current mode control of switching power supplies" in Unitrode Power Supply Design Seminar Handbook, NH, Merrimack:Unitrode Corp., 1990.
- [13] Wanfeng Zhang, Guang Feng, Yan-Fei Liu and Bin Wu, "A new predictive control strategy for power factor correction," Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03., Miami Beach, FL, USA, vol.1, pp. 403-409, 2003, DOI: 10.1109/APEC.2003.1179245
- [14] Azazi, H.Z., El-Kholy, E.E.,Mahmoud, S.A., and Shokralla, S.S.,"DSP-based control of boost PFC AC-DC converters using predictive control", Trans. Journal of Engineering and science, vol. 11, pp. 23-33, Apr 2011, DOI:10.53370/001c.23744
- [15] Jingquan Chen, A. Prodic, R. W. Erickson and D. Maksimovic, "Predictive digital current programmed control," in IEEE

Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 1, pp. 411-419, Jan. 2003, DOI: 10.1109/TPEL.2002.807140.

- [16] S. Vazquez et al., "Model Predictive Control: A Review of Its Applications in Power Electronics," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 16-31, March 2014, DOI: 10.1109/MIE.2013.2290138.
- [17] C. Xia, T. Liu, T. Shi and Z. Song, "A Simplified Finite-Control-Set Model-Predictive Control for Power Converters," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 2, pp. 991-1002, May 2014, DOI: 10.1109/TII.2013.2284558.
- [18] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann and J. Rodriguez, "Model Predictive Control—A Simple and Powerful Method to Control Power Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, pp. 1826-1838, June 2009, DOI: 10.1109/TIE.2008.2008349.
- [19] P. Cortés, A. Wilson, S. Kouro, J. Rodriguez and H. Abu-Rub, "Model Predictive Control of Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2691-2699, Aug. 2010, DOI: 10.1109/TIE.2010.2041733.
- [20] K. Mahmud and L. Tao, "Power factor correction by PFC boost topology using average current control method," 2013 IEEE Global High Tech Congress on Electronics, Shenzhen, China, pp. 16-20, 2013, DOI: 10.1109/GHTCE.2013.6767232.

Authors



The B.S Degree in 2021 from Jeju National University, Jeju, Korea. I am Currently working toward M.S. degree at the Department of Electrical Engineering, Jeju National University.

His research interests include modeling and control of power conversion circuits including power factor correction converter.



Yeong-Jun Choi received the B.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2013 and 2019, respectively. From 2018 to 2020, he was a senior researcher with Korea

Electric Power Corporation Research Institute. Since 2020, he has been with Jeju National University, where he is currently an Assistant Professor with Department of Electrical Engineering. His research interests include modeling and control of power conversion circuit including power converter system for renewable energies, battery energy storage systems, resonant converter and power factor correction converter.