

PFC를 위한 평균 전류 평균 전압 예측 제어기 설계

이재은
한솔테크닉스

Predictive Average-Current and Average-Voltage Controller Design for PFC

Jae-Eun Lee
Hansol Techniques

ABSTRACT

본 논문에서 PFC 컨버터를 위한 평균 전류 예측 제어기를 설계한다. 기존의 평균 전류 예측 제어기는 모드 판별이 필요치 않으며 PI 전류 제어기에 비해 빠른 동적 특성 덕분에 저전력 구간 역률은 개선되지만 라인 전류의 고주파 왜곡이 발생한다. 이를 해결하기 위해 전류 제어기의 평균 전류와 평균 전압이 보정된 예측 제어기를 제시한다. 이를 통해 다음 제어 주기에 전류 오차와 입력 전압 오차가 정상적으로 반영되며, 실제 라인 전류의 품질이 향상됨을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

역률 개선(Power Factor Correction: PFC) 컨버터, 특히 부스트 컨버터는 간단한 구조로 역률(Power Factor: PF)과 전고조파 왜율(Total Harmonic Distortion: THD)을 개선하기 위해서 사용된다.^[1] 기존의 비례-적분(Proportional-integral: PI) 전류 제어기는 시스템의 출력이 낮아지거나 라인 주파수가 증가할수록 입력 전류가 왜곡되는 등의 문제점이 있다. 입력 전류 왜곡의 원인 중 하나는 전류 연속 모드(Continuous Conduction Mode: CCM)와 전류 불연속 모드(Discontinuous Conduction Mode: DCM)간의 변환이며, 이는 CCM영역에서의 평균 전류에 대한 PI 제어가 영전류 구간이 존재하는 DCM 영역에서는 유효하지 않기 때문이다.^[2]

전류 혼성 모드 (Mixed Conduction Mode: MCM) 영역의 PFC 성능을 개선하기 위한 여러가지 노력 가운데, 디지털 신호 처리(Digital Signal Processing: DSP) 기술의 발전으로 디지털 연산을 활용한 예측 제어기가 주목을 받고 있다. 예측 제어기 중에서 DCM과 CCM 영역에 대한 듀티 사이클을 각각 구하고 그 대소 비교를 통해 바로 다음 주기의 모드를 판별하는 방식이 있다.^[3] 이로 인해 모드 판별을 위한 연산은 간소화 되지만, 각 제어 주기마다 듀티 사이클을 DCM 영역과 CCM 영역 모두에 대해서 구해야 하기 때문에 연산의 복잡성은 증가한다.

따라서 본 논문은 모드 판별 없이 MCM 영역을 단일 식으로 제어하는 평균 전류 예측 제어기에 대해 다루며, 기존의 평균 전류 예측 제어기가 갖는 라인 전류 왜곡을 입력 전류와 입력 전압에 대한 보정을 통해 라인 전류의 품질을 개선하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 평균 전류 평균 전압 예측 제어기

2.1 절 평균 전류 예측 제어기^[4]

부스트 컨버터의 CCM영역에서 샘플링 전류와 평균 전류는 같은 값을 가지므로, 다음 사이클의 샘플링 전류는 아래와 같다.

$$i_{[n+1]} = i_{[n]}^* = i_{[n]} + \frac{v_{in}}{L_f s} - \frac{V_{out}}{L_f s} (1 - d_{[n]} - d_{[n+1]}) \quad (1)$$

또한 DCM영역에 대해 dead time을 고려하여 식 (1)의 전압항을 보정하면, 다음 듀티 사이클은 아래와 같아야 한다.

$$d_{[n+1]} = 2\kappa \left(1 - \frac{v_{in}}{v_{out}}\right) + \frac{2L_f s}{v_{out}} (i_{[n]}^* - \kappa i_{[n]}) - d_{[n]} \quad (2)$$

식(2)에서 보정 상수 κ 는 평균 전류와 샘플링 전류 간 차이를 반영하기 위한 상수이며 표현식은 아래와 같다.

$$\kappa = (1 - d_{dead}) = \frac{i_{avg,[n]}}{i_{[n]}} = d_{[n]} \left(\frac{v_{out}}{v_{out} - v_{in}}\right) \quad (3)$$

보정 상수 κ 는 CCM 영역에서 1의 값을 갖고, 영전류 구간이 존재하는 DCM 영역에선 1보다 작아진다.

2.2 절 평균 전류 보정

DCM영역은 CCM영역과 달리 평균 전류가 샘플링 전류와 같지 않으므로 식(3)에 의해 아래와 같이 전개되어야 한다.

$$i_{[n+1]} = \frac{i_{[n]}^*}{\kappa} = i_{[n]} + \frac{v_{in}}{L_f s} \kappa - \frac{V_{out}}{L_f s} (\kappa - d_{[n]} - d_{[n+1]}) \quad (4)$$

기존 예측 제어기와 마찬가지로 식(4)를 다음 듀티 사이클에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$d_{[n+1]} = 2\kappa \left(1 - \frac{v_{in}}{v_{out}}\right) + \frac{2L_f s}{v_{out}} \left(\frac{i_{[n]}^*}{\kappa} - i_{[n]}\right) - d_{[n]} \quad (5)$$

이를 통해 식(2)는 식(5)의 전류 오차항에 보정 상수 κ 가 곱해진 식과 동일함을 확인할 수 있다. 따라서 기존 예측 제어기와 달리 식(5)는 전류 오차에 대해 충분히 보상한다.

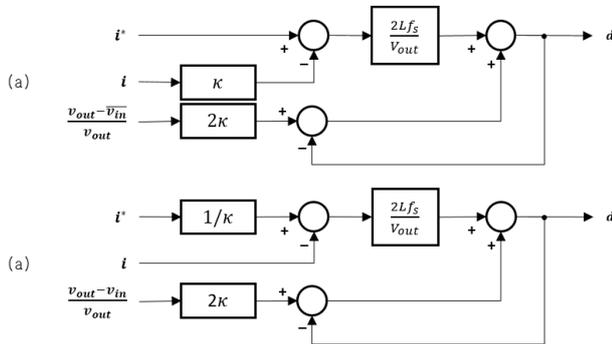


그림1 전류 제어기의 블록 다이어그램: (a) 기존 평균 전류 예측 제어, (b) 평균 전류 및 평균 전압 보정 제어
 Fig.1 Block diagram of the current controllers: (a) the conventional average current predictive control, (b) the adjusted average current and average voltage control.

2.3 절 평균 전압 보정

기존 평균 전류 예측 제어기는 구현의 편의성을 위해 입력 전압이 일정하다고 가정한다. 하지만 실제 정현파 입력 전압은 일정하지 않으며 다음과 같이 표현된다.

$$v_{in}(t) = |V_{in}| \sin(\omega t) \quad (6)$$

따라서 부하의 변동이 없어도 입력 전압에 의해 전류 파형이 왜곡된다. 이를 보정하기 위해 식(3)과 식(5)의 입력 전압을 아래와 같이 평균 입력 전압으로 대체한다.

$$\overline{v_{in}} = f_s \int_t^{t+T_s} v_{in}(\tau) d\tau = \frac{f_s v_{in}}{\omega} \times \left\{ \frac{1 - \cos(\omega T_s)}{\tan(\omega t)} + \sin(\omega T_s) \right\} \quad (7)$$

시스템 스펙과 전압 위상을 알고 있다면 식(7)로부터 약간의 연산만으로 평균 전압을 산출하며, 입력 전압과 오차는 위상 0° 근처에서 커진다. 따라서 기존 예측 제어기는 누적된 전압 오차에 의해 전류 파형의 왜곡이 발생한다. 그림1은 앞서 다룬 평균 전류와 전압 보정 전후의 예측 제어기 블록 다이어그램을 비교한다.

2.4 절 PSIM 시뮬레이션 및 분석

입력AC 전압	310 V, 60 Hz	입력 인덕턴스	480 μ H
DC Link 전압	380 V	출력 캐패시턴스	1500 μ F
출력 부하	1.55 A	스위칭 주파수	40 kHz

표1 시뮬레이션 제정수

실제한 PFC 전류 제어기의 성능을 비교하기 위해 PSIM을 활용해 모의 동작 실험을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 제정수는 표1과 같다. 그림2는 MCM 영역의 일정한 부하 조건에서 입력 전류 파형을 비교한다. 그림2에서 평균 전류 보정이 적용되었을 때 기존 평균 전류 예측 제어기보다 전류 왜곡은 감소하며 역률이 개선된다. 또한 평균 전압 보정도 적용할 때 THD와 역률이 더욱 개선되는 것을 확인할 수 있다.

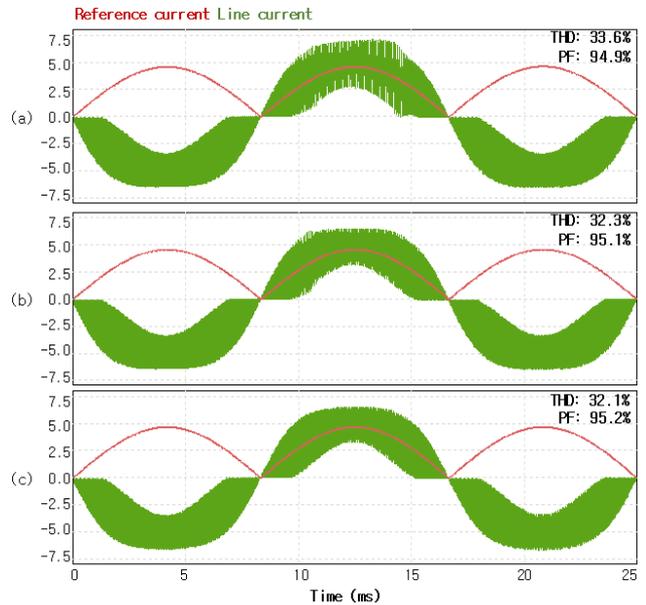


그림2 MCM 영역에서 시뮬레이션 결과: (a) 기존, (b) 평균 전류 보정, (c) 평균 전류 및 평균 입력 보정
 Fig.2 Simulation result at MCM region: (a) the conventional, (b) the adjusted average current, (c) the adjusted average current and adjusted average voltage.

3. 결론

본 논문에서는 부스트 컨버터에 대한 MCM 영역의 동작 개선을 위해 별도의 DCM, CCM 판별 과정이 필요 없는 평균 전류 예측 제어 알고리즘을 다루었다. 기존의 예측 제어기의 성능 개선을 위해 평균 전류 보정과 평균 전압 보정 알고리즘을 적용하고, 이를 PSIM 시뮬레이션을 통해서 실제 역률과 THD가 개선됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Van de Sype, David M., et al. "Duty-ratio feedforward for digitally controlled boost PFC converters." *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no.1, pp. 108-115, Feb. 2005.
- [2] Q. Ji, X. Ruan, L. Xie, and X. Ye, "Conducted EMI spectra of average current controlled boost PFC converters operating in both CCM and DCM", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2184-2194, Apr. 2015.
- [3] J. Park, D. J. Kim and K. Lee, "Predictive control algorithm including conduction-mode detection for PFC converter", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5900-5911, Sep. 2016.
- [4] K. Pretorius and J. Biela. "Predictive average current control for power factor correction (PFC) across both continuous (CCM) and discontinuous (DCM) conduction modes.", *EPE'18 ECCE Europe.*, pp.1-10, Sep. 2018.