

투 스위치 포워드 컨버터의 더블 루프 피드포워드 제어를 통한 과도 응답 개선

정의락, 지상혁, 장요한, 배성우[†]
한양대학교

Improvement of Transient Response using Double Loop Feedforward Control of Two-Switch Forward Converter

Eurak Jeong, Sanghyuk Ji, Yohan Jang, and Sungwoo Bae[†]
Hanyang University, Seoul, Korea

ABSTRACT

컨버터의 동작 중에는 다양한 요인으로 인하여 입력 전압과 부하가 변동하며, 이는 컨버터의 출력에 변동을 초래한다. 컨버터 출력 변동의 빠른 안정화는 컨버터 제어에 있어 중요한 요소 중 하나이며, 이를 위하여 다양한 제어 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 투 스위치 포워드 컨버터의 입력 전압과 부하의 변동에 의한 출력의 영향을 최소화하는 더블 루프 피드포워드 제어 기법을 제안한다. 제안하는 제어 기법은 투 스위치 포워드 컨버터의 수학적 모델 분석을 기반으로 입력 전압과 출력 전류의 피드포워드 전달함수 도출을 통해 구현되었다. 본 논문이 제안하는 투 스위치 포워드 컨버터의 더블 루프 피드포워드 제어의 유효성은 MATLAB/Simulink 환경의 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 검증 결과, 제안하는 기법은 기존의 더블 루프 피드백 제어 기법에 비해 부하 변동 시 출력 안정화가 38% 빠르게 수행됨이 확인되었다.

1. 서론

현대의 전력 변환 시스템에서는 넓은 입력 전압 범위와 다양한 부하 조건에서 안정적으로 작동하는 것이 매우 중요하다. 그러나 실제 운용 환경에서는 여러 요인으로 인해 입력 전압과 부하가 변동하게 되며, 이는 컨버터 출력 불안정을 유발할 수 있다. 투 스위치 포워드 컨버터는 이러한 전력 변환 시스템 중 하나로, 출력 전류의 안정화를 위해 사용되는 DC/DC 전력 변환 장치이다. 투 스위치 포워드 컨버터는 계통 전압, 혹은 기타 AC 전압을 정류한 DC 전압을 입력으로 사용하며, 전력 변환을 통해 다양한 부하에 DC 전압을 공급한다. 투 스위치 포워드 컨버터는 입력 전압의 변동, 부하의 변동과 같은 요인으로 인해 출력의 불안정이 유발될 수 있으며, 이를 해결하는 것이 컨버터 운용에 있어 핵심 과제이다. 이에 따라, 출력 불안정 문제를 해결하기 위해 다양한 제어 기법이 제안되어왔다.

투 스위치 포워드 컨버터의 제어를 위해 널리 쓰이고 있는 피드백 제어 방식은 출력 전압의 안정화 면에서 우수한 성능을 보이지만, 입력 전압 변동과 같은 외란에 대한 즉각적인 대응력은 부족하다. 이에 따라, 피드포워드 제어 방식을 활용하여 외란을 직접적으로 보상하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 피드포워드 제어는 외란의 영향을 사전에 예측하고 보상함으로써 시스템의 응답 속도를 높이는 데 효과적이다^[1].

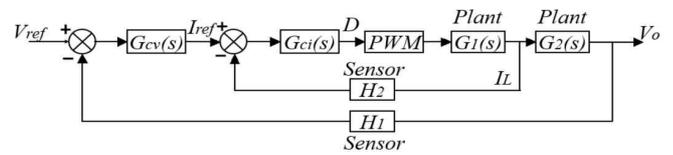


그림 1 더블 루프 피드백 제어 방식

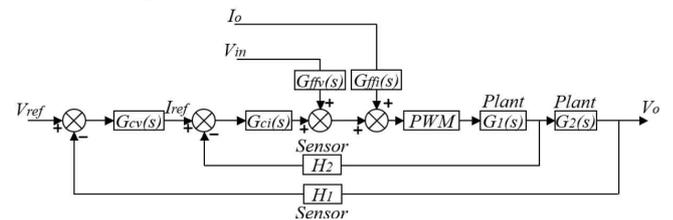


그림 2 더블 루프 피드포워드 제어 방식

본 연구에서는 투 스위치 포워드 컨버터의 입력 전압 및 부하 변동이 출력에 미치는 영향을 줄이기 위한 더블 루프 피드포워드 제어 기법을 제안한다. 이 제어 기법은 투 스위치 포워드 컨버터의 소신호 모델을 분석하여 입력 전압과 출력 전류에 대한 피드포워드 전달함수를 도출하고, 이를 기반으로 더블 루프 피드포워드 제어를 구현한다. 더블 루프 피드포워드 제어를 통해 시스템의 응답 속도를 개선하고, 출력 전압의 안정성을 확보할 수 있다.

2. 제안하는 제어 방식

2.1 더블 루프 피드백 제어

그림 1은 기존의 더블 루프 피드백 제어 방식으로, 인덕터 전류 I_L 와 출력 전압 V_o 이 케환되어 폐루프 제어를 수행한다. 더블 루프 피드백 제어는 외부 전압 루프와 내부 전류 루프 두 개의 제어 루프로 구성된다. 외부 전압 루프는 출력 전압을 측정하여 이를 기준 전압과 비교하고, 그 차이를 보상하기 위해 내부 전류 루프의 레퍼런스 값을 조절한다. 외부 전압 루프는 시스템의 장기적인 안정성을 보장하며, 출력 전압의 정확도를 높인다. 외부 전압 루프의 주요 구성 요소는 전압 센서, 전압 제어기, 그리고 기준 전류 생성기이다. 전압 제어기는 PI 제어를 사용하여 출력 전압의 오차를 최소화하고, 안정적인 전압 제어를 가능하게 한다. 외부 전압 루프는 내부 전류 루프에 비해 비교적 느린 수렴 속도를 가지도록 설정된다. 전압 제어기의 출력은 내부 전류 루프의 레퍼런스 값으로 사용되어 전류

루프를 통해 최종적으로 출력 전압을 제어하게 된다. 전압 제어기의 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$G_{cv} = \frac{k_{pv}s + k_{iv}}{s} \quad (1)$$

내부 전류 루프는 인덕터 전류를 측정하여 외부 전압 루프에서 생성된 전류 레퍼런스 값 I_{ref} 와 비교하고, 그 차이를 보상하기 위해 출력 PWM 신호를 조절한다. 이 루프는 외부 전압 루프에 비해 2배 이상 빠른 응답 속도를 가지며, 인덕터 전류를 이용한 제어를 통하여 부하 변동에 대해 반응할 수 있다. 내부 전류 루프의 구성 요소는 전류 센서 H_2 , 전류 제어기 $G_{ci}(s)$, 그리고 PWM 생성기이다. 전류 센서는 플랜트의 인덕터 전류를 센싱하여 적절한 범위로 스케일링하며, 전류 제어기는 PI 제어를 사용하여 인덕터 전류의 오차를 최소화하고, 안정적인 전류 제어를 가능하게 한다. 전류 제어기의 출력은 듀티 사이클의 형태로 출력되어, PWM 생성기로 전달되어 최종적으로 플랜트의 입력신호인 스위치의 구동 신호를 출력한다. 전류 제어기의 전달함수는 식 (2)와 같다.

$$G_{ci} = \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{s} \quad (2)$$

실제 플랜트에 의한 인덕터 전류와 출력 전압의 전달함수는 각각 식 (3), 식 (4)와 같다. 플랜트는 외부 전압 루프와 내부 전류 루프로부터 생성된 듀티 사이클을 통해 생성된 PWM 신호로 새로운 인덕터 전류와 출력 전압을 생성하여 더블 루프 피드백 제어의 제어 변수로 입력한다.

$$G_1 = \frac{nV_{in}(s + \frac{1}{RC})}{L(s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC})} \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{nV_{in}}{LC(s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC})} \quad (4)$$

2.2 더블 루프 피드포워드 제어

더블 루프 피드백 제어는 출력 전압과 인덕터 전류만을 입력받아 제어를 수행하지만, 입력 전압 피드포워드 제어는 입력 전압 변동과 부하의 변동이 출력 전압에 미치는 영향을 사전에 보상하여 시스템의 동적 응답 속도를 향상시킨다. 해당 제어는 듀티 사이클에 입력 전압과 출력 전류를 각각의 피드포워드 전달함수를 사용하여 추가적으로 보상함으로써 구현된다.

입력 전압 피드포워드 제어를 구현하기 위해서는 먼저 두 스위치 포워드 컨버터의 소신호 모델을 도출해야 한다. 소신호 모델은 컨버터의 동작을 수학적으로 표현한 것으로, 입력 전압 변동이 출력 전압에 미치는 영향을 분석할 수 있게 해준다. 이를 통해 입력 전압 피드포워드 전달함수를 도출할 수 있다.

두 스위치 포워드 컨버터의 소신호 모델을 도출하기 위해, 먼저 컨버터의 평균 스위치 모델을 사용한다. 평균 스위치 모델에서는 스위치를 제어된 전류원으로, 다이오드를 제어된 전압원으로 모델링한다. 이 모델을 바탕으로 두 스위치 포워드 컨버터의 DC 및 소신호 모델을 각각 도출할 수 있다^[2]. 식 (5) ~ (8)은 컨버터 출력 전압에 대한 전달함수이다.

$$\hat{v}(s) = G_{vd}\hat{d}(s) + G_{vg}\hat{v}_g(s) \quad (5)$$

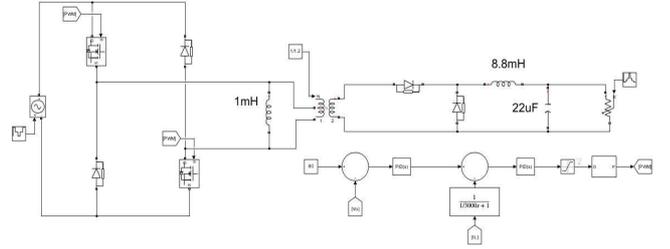


그림 3 두 스위치 포워드 컨버터 및 제어기 모델

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{v}_g(s)=0} = \frac{V}{D} H(s) \quad (6)$$

$$G_{vg}(s) = \frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} \Big|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D}{n} H(s) \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{sL}{R} + s^2LC} \quad (8)$$

$V(s)$, $\hat{v}(s)$ 는 출력 전압과 출력 전압의 소신호, D , $\hat{d}(s)$ 는 듀티 사이클과 듀티 사이클의 소신호, $V_g(s)$, $\hat{v}_g(s)$ 는 입력 전압과 입력 전압의 소신호를 나타내며, n 은 변압기의 턴 수 비 $\frac{N_1}{N_2}$ 를 나타낸다. G_{vd} 는 출력 전압과 듀티 사이클의 전달함수, G_{vg} 는 출력 전압과 입력 전압의 전달함수를 나타낸다. 입력 전압의 피드포워드 전달함수는 소신호 분석을 통한 듀티와 입력 전압의 전달함수로, 식 (9)와 같이 계산될 수 있다^[3].

$$G_{ffv}(s) = -\frac{\hat{d}(s)}{\hat{v}_g(s)} = -\frac{G_{vg}(s)}{G_{vd}(s)} = -\frac{nD^2}{V} \quad (9)$$

마찬가지로, 두 스위치 포워드 컨버터의 소신호 분석을 통해 출력 전류와 듀티 사이클의 전달함수인 출력 전류의 피드포워드 전달함수를 도출하는 과정은 식 (10) ~ (11)를 통하여 나타낼 수 있다.

$$Z_{out}(s) = -\frac{\hat{v}(s)}{\hat{i}_{out}(s)} = \frac{1}{\frac{1}{sL} + sC} + \frac{1}{R} = \frac{s^2RL + R}{s^2LC + sRC + 1} \quad (10)$$

$$G_{ffi}(s) = -\frac{\hat{d}(s)}{\hat{i}_{out}(s)} = -\frac{Z_{out}(s)}{G_{vd}(s)} = -\frac{n}{V} \frac{1 + sRC}{s^2RLC + sL + R} \quad (11)$$

$Z_{out}(s)$ 는 회로의 총 임피던스이다. 더블 루프 피드포워드 제어는 도출된 두 개의 전달함수를 통해, 입력 전압과 출력 전류로 인한 영향을 더블 루프 피드백 제어로 생성된 듀티 사이클에 보상하여 컨버터가 외란에 더욱 빠르게 응답할 수 있도록 한다.

3. 더블 루프 피드포워드 제어 시뮬레이션

제안하는 더블 루프 피드포워드 제어의 검증은 위하여 MATLAB/Simulink 환경에서 두 스위치 포워드 컨버터와 기존 더블 루프 피드백 제어, 더블 루프 피드포워드 제어를 구현하였다. 그림 3은 두 스위치 포워드 컨버터의 모델이다. 입력 전압 변동 조건을 적용하기 위하여 MATLAB/ Simulink의 Controlled Voltage Source와 Repeating Sequence Stair 블록

표 1 두 스위치 포워드 컨버터 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
R	12.8 Ω	C	22 μF
L	8.8 mH	V	80 V
Vg	311 V	n	1/1.2

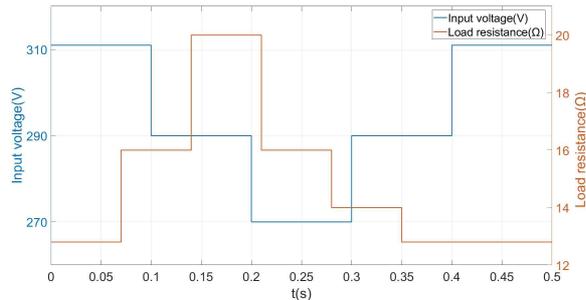


그림 4 시간에 따른 입력 전압 및 부하 변동 조건

을 사용하였으며, 부하 저항의 변동을 모사하기 위하여 Variable Resistor 블록과 Repeating Sequence Stair 블록을 사용하였다. 모델링한 두 스위치 포워드 컨버터의 설계 파라미터는 표 1과 같으며, 입력 전압과 부하 저항의 크기는 그림 2와 같이 시간에 따라서 변동하도록 조건을 설정하였다.

시뮬레이션에서 제어 응답의 안정화 시간은 컨버터의 출력 전압이 1% 오차 이내인 80.8V 이내에 도달하는 시간으로 설정하였다. 안정화 시간을 기준으로 하여 두 가지 제어 방법의 안정성을 비교하였다.

그림 6과 그림 7은 두 제어 방식의 출력 전압과 출력 전류 비교 그래프이다. 더블 루프 피드백 제어의 경우 부하가 변동할 때 출력 전압이 안정화되는데 부하가 변동한 시간으로부터 평균 21ms의 응답 시간이 필요하였다. 더블 루프 피드포워드 제어의 경우 부하가 변동한 후 출력 전압이 안정화되는데 평균 13ms의 응답 시간이 소요되었다. 부하가 변동한 후 피크 전압의 경우 더블 루프 피드포워드 제어의 경우가 더블 루프 피드백 제어의 피크 전압보다 30% 작게 나타났다. 입력 전압이 변동하는 경우는 두 제어 방법 모두 1% 이상의 출력 전압 변동이 발생하지 않았고, 이에 따른 제어 안정화에 필요한 시간이 소요되지 않았다.

출력 전류의 안정화는 안정화된 출력 전류의 1% 미만의 오차 범위 이내로 들어오는 시점을 기준으로 하였다. 더블 루프 피드백 제어의 경우 부하가 변동하는 시점에 출력 전류가 수렴하는데 평균 21ms의 응답 시간이 필요하였다. 더블 루프 피드포워드 제어의 경우 부하가 변동하는 시점에 출력 전류가 수렴하기까지 평균 13ms의 시간이 소요되어 더블 루프 피드백 제어보다 38% 적은 응답 시간이 필요했다. 피크 전류의 크기는 더블 루프 피드백 제어와 더블 루프 피드포워드 제어 모두에서 비슷하게 나타났다. 입력 전압이 변동하는 경우, 출력 전류의 변동은 1% 이내, 혹은 0.01ms 이내의 응답 시간이 소요되어 제어 응답에 큰 영향을 끼치지 않았다.

입력 전압 및 부하 변동에 따른 두 스위치 포워드 컨버터의 시뮬레이션 결과, 출력 전압과 출력 전류의 안정화 시간과 피크 값 모두 더블 루프 피드포워드 제어에서 더블 루프 피드백 제어보다 더 우수한 성능을 보였다.

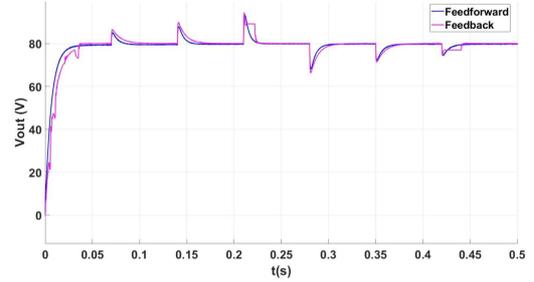


그림 5 피드백 제어와 피드포워드 제어 출력 전압 비교 그래프

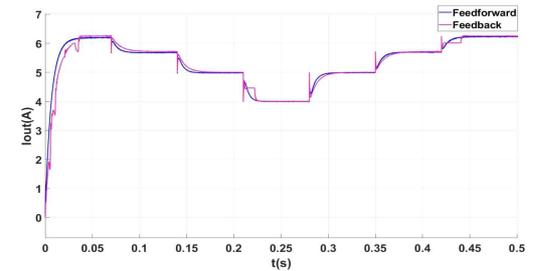


그림 6 피드백 제어와 피드포워드 제어 출력 전류 비교 그래프

5. 결론

본 논문에서는 컨버터의 입력 전압 변동과 부하 변동에 강건한 제어가 가능한 더블 루프 피드포워드 제어 방식을 제안하였다. 제안하는 방식의 유효성은 Simulink 환경에서의 시뮬레이션으로 검증되었다. 더블 루프 피드포워드 제어 방식은 부하 변동 상황에서 평균 13ms의 안정화 시간이 필요하여, 평균 21ms의 안정화 시간이 필요한 더블 루프 피드백 제어보다 38% 더 빠른 응답 시간을 보였으며, 입력 전압 변동 상황에서는 출력 전압이 1% 이상 변동하지 않아 부하 변동과 입력 전압 변동의 두 가지 상황 모두에서의 안정성을 입증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20212020800020)

참고 문헌

- [1] Z. Jiaying, W. Yong and Y. Fanhe, "Dual Feedforward Closed-Loop Control for Phase-Shifted Full-Bridge DC-DC Converter," 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC), Chengdu, China, 2019, pp. 65-68.
- [2] W. Zhang, Y. Lei, X. Zhang and Y. Liu, "Small Signal Analysis of a dual-switch forward Converter with non-ideal transformer in Current-Programmed Control," 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Bangkok, Thailand, 2007, pp. 49-52.
- [3] C. Yao, X. Ruan, W. Cao and P. Chen, "A Two-Mode Control Scheme With Input Voltage Feed-Forward for the Two-Switch Buck-Boost DC-DC Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 2037-2048.