

고승압비를 갖는 부스트-플라이백 컨버터의 개선된 모델링 방법 및 제어

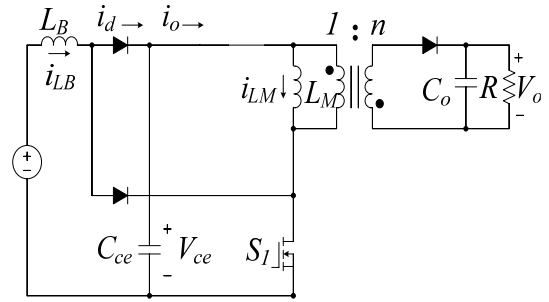
서상욱, 이귀준, 김래영, 현동석  
한양대학교

Improved modeling and control of integrated boost-flyback converter for high step-up applications

Sang-Uk Seo, Kui-Jun Lee, Rae-Young Kim, Dong-Seok Hyun  
Hanyang University

**Abstract** - 본 논문에서는 부스트-플라이백(Integrated Boost-Flyback Converter, IBFC) 직렬 연결 구조 컨버터의 동작 특성 해석 및 정확한 제어를 위한 개선된 모델링 방법을 제시한다. 주 스위치에 의해 IBFC의 부스트, 플라이백 컨버터가 서로 다른 도통 모드로 동시에 동작하기 때문에 2대 컨버터의 모델링과 회로 해석을 위한 이론적인 모델링 접근방법과 수학적 계산과정이 복잡하다. 따라서 IBFC를 등가 전류 소스를 포함한 부스트, 플라이백 컨버터로 각각 나누어 상태 공간 평균화 방법을 이용하여 회로 방정식을 독립적으로 유도한 후, 이 회로 방정식을 종합하여 IBFC의 완전한 상태 공간 방정식을 얻을 수 있다. 제안된 방법은 IBFC의 복잡한 모델링을 간단하게 해 주며, 수학적 계산 과정도 간소화 시킬 수 있는 장점이 있다. 이를 바탕으로 정상 상태 해석 및 높은 출력 전압 추종 제어를 설계하였다. 시뮬레이션과 실험 결과를 제시하여 제안된 방법의 유효함을 검증하였다.

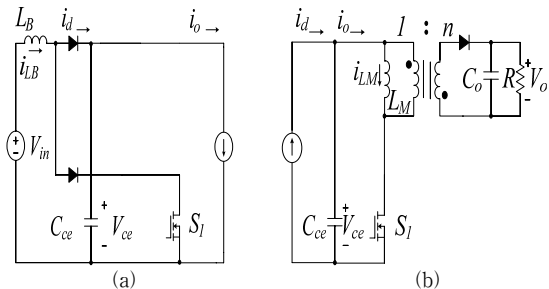
하기 때문에 세부 구간별 통유율을 쉽게 유도 할 수 있다.



〈그림 1〉 일반적인 부스트-플라이백 컨버터

1. 서 론

태양광 모듈, 연료 전지와 같은 대부분의 신재생 에너지는 낮은 출력 전압과 높은 전류가 발생하게 되는데, 이를 계통과 연계하여 사용하기 위해서는 높은 전압이 요구되기 때문에 다양한 승압형 컨버터 토폴로지가 연구되고 개발되었다. 이 중, 부스트-플라이백 직렬연결 결합 구조 컨버터(Integrated Boost-Flyback Converter, IBFC)는 간단한 회로 소자 및 높은 전압 증폭의 특징을 가진 부스트 컨버터와 트랜스포머 턴수비에 비례하는 증폭 및 회로 절연이 가능한 플라이백 컨버터 특징을 모두 가진 승압형 컨버터 토폴로지 중의 하나이다. 그림 1은 부스트-플라이백 직렬연결 결합 구조 컨버터를 나타낸 것이다. 부스트 컨버터는 불연속 도통 모드(discontinuous conduction mode), 플라이백 컨버터는 연속 도통 모드(continuous conduction mode)에서 동작하도록 설계하였다. 컨버터의 동작 특성을 파악하고 정확한 제어를 설계하기 위해서는 컨버터를 모델링 하여 해석하기 때문에, 단일 컨버터 모델링 방법으로 스위치 에너지 전달 방법(switch energy conservation), 상태 공간 평균화 방법(state-space average) 같은 다양한 접근법이 제시되었다. 하지만, 부스트-플라이백 직렬연결 결합 구조 컨버터의 경우 하나의 컨버터를 해석하는 것이 아니라, 서로 다른 모드로 동시에 동작하는 2대의 컨버터를 모델링 하여야 하기 때문에 동작 특성을 해석하여 정확한 제어를 설계하는 것이 쉽지 않으며 모델링을 위한 수학적 계산 과정 역시 매우 복잡하다.



〈그림 2〉 제안된 방법에 의해 표현된 등가 전류 소스를 포함한 컨버터 (a) 부스트 컨버터, (b) 플라이백 컨버터

따라서 본 논문에서는 고승압비를 갖는 IBFC의 동작 특성 해석 및 제어를 설계하기 위해 개선된 모델링 방법을 제안한다. 기본적인 개념은 IBFC를 등가 전류 소스를 포함한 부스트, 플라이백 컨버터로 각각 분리해 주는 것이다.[1] 나누어진 컨버터는 하나의 인덕터와 하나의 캐패시터로 이루어진 기본적인 부스트, 플라이백 컨버터 토폴로지와 같아진다. 상태 공간 평균화 방법을 이용하여 상태 방정식을 독립적으로 유도한 후 이를 결합하여 최종적으로 IBFC의 대 신호 상태 공간 평균 방정식을 얻어 내어 IBFC의 동작 특성 해석 할 수 있다[2,3]. 즉, 4개의 상태 변수가 존재하는 IBFC를 한 번에 해석하는 것이 아니라 2개의 상태 변수가 존재하는 부스트, 플라이백 컨버터를 해석하기 때문에 수학적 계산 과정이 이전에 방법에 비해 간소화 된다. 또한, 대 신호 방정식을 선형화하여 소 신호 등가 모델을 유도하고 이를 바탕으로 제어를 설계 할 수 있다. 시뮬레이션 결과 및 실험 결과가 이론적인 예측과 일치함을 나타내었으며, 이것은 제안된 모델링 방법과 제어기 설계가 유효함을 증명한다.

부스트 컨버터는 불연속 모드로 동작하기 때문에 부스트 인덕터 전류가 상승하는 구간 1, 인덕터 전류가 감소하며 저장된 에너지가 DC-link C<sub>cc</sub> 에 전달되는 구간 2, 인덕터 전류가 제로가 되는 구간 3이 존재한다. 따라서, 각 세부 구간별 통유율을 정확히 알 수 없기 때문에 부스트 최대전류와 평균전류의 관계식을 이용하여 세부 구간 2, 3을 주 스위치 S<sub>1</sub>의 통유율과 상태 공간 방정식의 상태변수(인덕터 전류, 캐패시터 전압)로 표현 해 주어야 한다. 그 후, 상태 공간 평균화 기법을 이용하여 그림 2(a) 부스트 컨버터와 그림 2(b) 플라이백 컨버터의 상태 방정식을 각각 유도한다. 즉, IBFC의 상태 변수가 4개이므로 4차식의 방정식이 유도되지만 4차식을 동시에 유도 하는 것이 아니라 부스트 컨버터의 2차 방정식과 플라이백 컨버터의 2차 방정식으로 유도하고 각 컨버터에 상응하는 등가 전류 소스를 상태 변수로 치환하여 주고 이를 종합하여 전체적인 IBFC의 4차 상태 공간 방정식을 식(1)과 같이 유도한다.

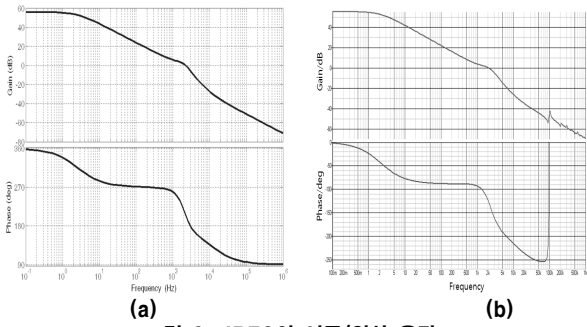
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{LB} \\ v_{cc} \\ i_{LM} \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(q-d)}{L_B} & 0 & 0 \\ \frac{(q-d)}{q \cdot C_{cc}} & 0 & \frac{-d}{C_{cc}} & 0 \\ 0 & \frac{d}{L_M} & 0 & \frac{-(1-d)}{n \cdot L_M} \\ 0 & 0 & \frac{(1-d)}{n \cdot C_o} & \frac{1}{R \cdot C_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{LB} \\ v_{cc} \\ i_{LM} \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{q}{L_B} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [v_{in}] \quad (1)$$

대 신호 상태 공간 평균 방정식을 선형화하여 제어기 설계를 위한 통유율과 출력전압의 전달함수를 구하면 식(2)와 같다.

$$G_{vd} = \frac{\hat{v}}{\hat{d}} = \frac{a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}{p_4 \cdot s^4 + p_3 \cdot s^3 + p_2 \cdot s^2 + p_1 \cdot s + p_0} \quad (2)$$

2. 시스템 모델링과 해석

그림 1은 일반적인 부스트-플라이백 직렬연결 구조 컨버터의 나타낸다. 제안된 방법의 개념을 적용하여 그림 2의 모습처럼 등가 전류 소스를 포함한 컨버터로 나눈다. 플라이백 컨버터는 연속 도통 모드로 동작



〈그림 3〉 IBFC의 이득/위상 응답

- (a) 제안된 방법으로 매틀랩에 의해 구현된 이론적인 이득/위상 응답
- (b) SIMPLIS simulator 에 의해 구현된 이득/위상 응답

### 3. 제어기 설계

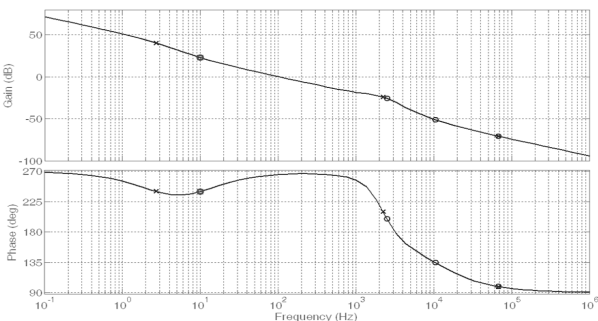
그림 3(a)는 제안된 방법으로 모델링한 IBFC의 통유율과 출력전압의 전달함수 식(2)의 이득/위상 주파수 응답을 매틀랩으로 표현한 것이며, 이를 바탕으로 하여 높은 출력 전압 특성을 추종하기 위한 정확한 제어기를 설계하였다. 설계과정은 다음과 같다. 정상상태의 오차를 줄이기 위해 적분기에 해당하는 극점을 배치하였으며, 분할 주파수(crossover frequency)에서 위상 여유를 확보하여 시스템의 안정성을 확보하기 위해 10Hz에 위해서 영점을 추가한 PI 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기를 IBFC에 적용하면 상승시간은 2.8ms, 정착시간 23ms, 위상여유 85°의 특성을 가진 빠른 응답과 높은 안정성을 가진 IBFC를 설계할 수 있으며 이것의 이득/위상 보드 선도를 그림 4에 나타내었다.

### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

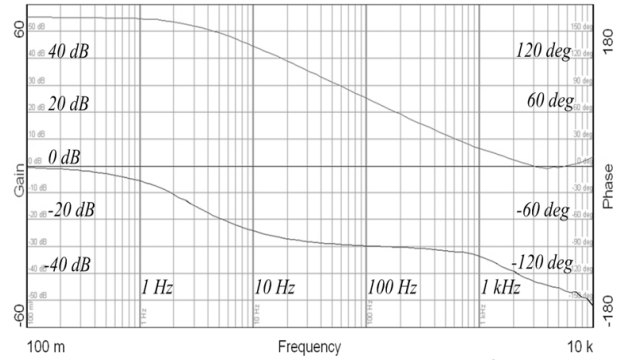
그림 3(b)는 SIMPLIS로 구현된 이득/위상 시뮬레이션 결과로서 그림 3(a)와 일치한다. 제안된 모델링 방법을 기본으로 하여 표 1의 설계 사양으로 제작된 단일 IBFC는 저 주파수 영역에서의 특성만 가지므로, 시스템 대역폭(100Hz)의 10배 되는 지점(1kHz)까지 이득/위상 응답특성을 Frequency Response Analyzer(venabel model 3120)로 측정하였다. 측정된 실험결과 그림 5는 저 주파수 영역에서 제안된 방법의 의한 이론적인 결과와 시뮬레이션 결과 그림 3과 일치한다. 그림 6은 제안된 방법을 바탕으로 설계된 제어기를 적용한 시스템의 PSIM 시뮬레이션 결과로서 부하 가변 시에도 높은 출력 전압을 일정하게 추종하는 것을 확인할 수 있다. 또한 100W IBFC 2대를 병렬 연결하여 출력 전압 400V, 출력 전력 200W 시작품을 제작하여 부하 가변 실험을 시행하여 그림 7에 나타내었다. 부하 가변 시에도 설계된 제어기에 따라 400V의 고출력 출력을 일정하게 추종하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 실험결과를 통해 제안된 모델링 방법과 제어기의 유효함이 증명되었다.

〈표 1〉 설계사양

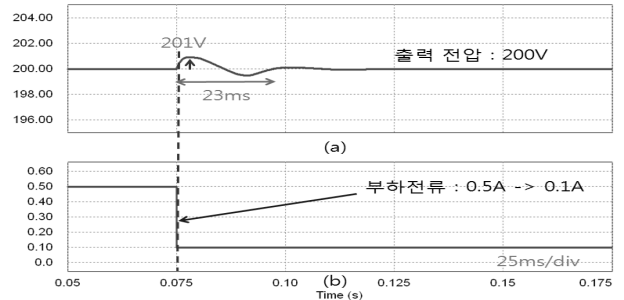
출력 전력	100W
입력 전압	30V
출력 전압	200V
부스트 인덕터	15μH
DC-link capacitor(Cce)	4.4μF
플라이백 자화 인덕턴스	200μH
출력 capacitor(Co)	440μF
출력 저항	400Ω
스위칭 주파수	100kHz
변압기 권수비(일차측:이차측)	1:5



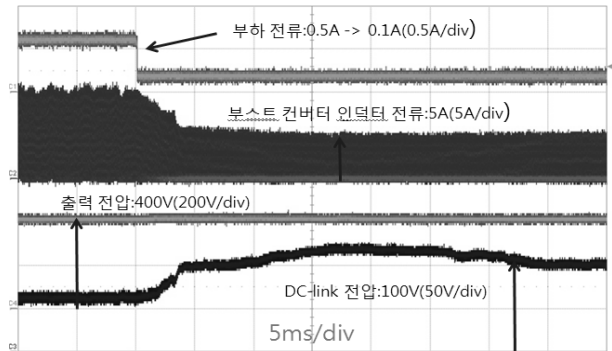
〈그림 4〉 설계된 제어기가 적용된 IBFC 이득/위상 응답



〈그림 5〉 Test setup의 저 주파수 영역에서의 이득/위상 응답



〈그림 6〉 제어기를 적용한 IBFC의 PSIM 시뮬레이션 파형 (a) 출력 전압, (b) 부하 전류



〈그림 7〉 200W Test setup의 부하 가변 시 실험 파형

### 5. 결 론

본 논문에서는 고출력비를 갖는 IBFC의 개선된 모델링 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 시스템 모델링에 대한 직관적인 해석과 수학적 계산 과정이 간소화시키면서도 기존 모델링과 일치하는 결과를 유도 해 낼 수 있는 장점이 있으며 이론적으로 얻어진 결과와 시뮬레이션, 실험 결과가 일치함을 제시함으로써 유효함을 증명하였다.

제안된 모델링 및 제어기 설계방법은 부하 가변이 발생하더라도 계통에 높은 전압을 일정하게 전달하기 위한 분야에서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Rae-Young Kim and Jih-sheng Lai, "Aggregated modeling and control of a boost-buck cascade converter for maximum power point tracking of a thermoelectric generator," in *IEEE2008 Applied Power Electronics Conference*, 2008, pp. 1754-1760.
- [2] S. Cuk and R. D. Middelbrook, "A general unified approach to modeling switching dc-to-dc converters in discontinuous conduction mode," in *Proc .IEEE Power Electronics Specialists Conf. PESC '77*, 1977, pp.36 - 57
- [3] W.Erickson and D.Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics," second edition, Springer Science,