

# 3-Level 부스트 컨버터의 소신호 모델링과 제어기 설계

이강문<sup>1</sup>, 고재학<sup>1</sup>, 백승우<sup>1</sup>, 김학원<sup>1</sup>, 조관열<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 한국교통대학교

## 3-Level Boost Converter Small Signal Modeling and Controller Design

Kang Mun Lee<sup>1</sup>, Jae Hak Ko<sup>1</sup>, Seung Woo Baek<sup>1</sup>, Hag Wone Kim<sup>1</sup>, Kwan Yual Cho<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Korea National University of Transportation

### ABSTRACT

3-Level 부스터 컨버터는 기존의 부스터 컨버터에 비해 인덕터의 크기를 줄이고, 더 낮은 전류리플을 취할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 스위치의 동작은 Duty가 0.5 이상과 이하일때에 따라 달라진다. 이에 본 토폴로지의 제어를 설계하기 위해서는 Duty가 0.5 이상일때와 이하일때의 두가지 경우의 상태로 토폴로지를 분석한 뒤 소신호 모델링을 할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 경우에 따라 두가지의 상태 평균화 방정식을 세우고, 이를 비교한뒤 소신호 모델링을 통해 제어기를 설계한다. 또한 상단과 하단 커패시터에서 생기는 전압 불균형을 개선하기 위해 Duty를 보상하여 전압 불평형을 개선하는 제어 방법을 제안한다. 제안된 컨트롤러는 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증된다.

### 1. 서론

3-Level 부스터 컨버터는 기존의 부스터 컨버터와 더 작은 인덕터를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 같은 조건에서 더 작은 전류 리플을 갖는 장점이 있다. 그러나 3-Level 부스터 컨버터는 기존의 부스터 컨버터에 비해 컨트롤러 설계에서 몇 가지 고려사항이 있다. 첫째, 3-Level 부스터 컨버터는 스위치 2개를 가지고 동작하며 3가지의 동작특성을 가진다. 동작 특성 중 하나의 동작에서 Duty가 0.5보다 크거나 작을때에 따라 달라진다. 따라서 컨트롤러 설계에 앞서 동작 특성에 따른 상태방정식을 해주고 이것을 상태평균화 모델링을 통하여 평균화된 모델링 값을 비교한 뒤 소신호 해석을 할 필요가 있다. 동작 특성이 다르기 때문에 두 경우의 상태평균화된 모델이 다를 수 있고 따라서 Duty에 따라 제어기의 모드전환에 대하여 고려해볼 필요가 있기 때문이다. 둘째, 중성점을 기준으로 High side와 Low side의 각 커패시터의 합은 전체 출력전압이고 전압제어기 출력전압은 제어하기 때문에 두 커패시터의 Voltage Balancing이 어긋나게되면 결국 하나의 커패시터로 보이게 되어 전압 불평형이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 두 전압의 전압 불평형 개선하기 위하여 두전압 차만큼의 Duty를 보상하는 제어 알고리즘을 제안한다. 두 전압의 오류 값은 각각 High side와

Low side의 Duty를 보상한다. 각 Side의 전압 차를 가지고 두 전압 사이의 불평형을 해결하기 위해 각 Duty신호에 보상해준다.

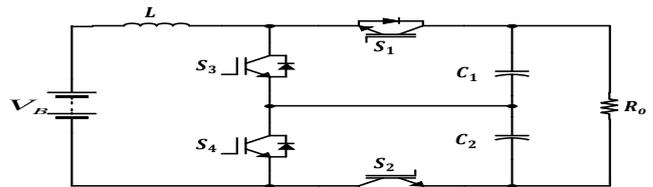


Fig 1.3-Level Bi-directional DC-DC Converter

### 2. 상태평균화 모델링과 소신호 해석

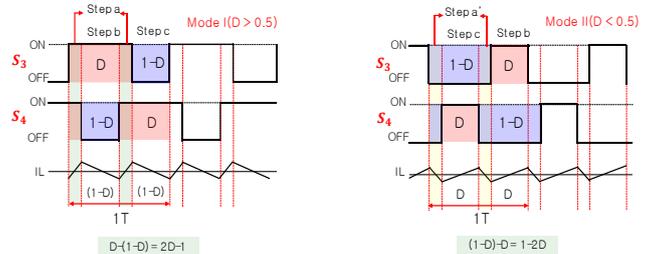


Fig 2. Switching pattern in two cases

#### 2.2 Mode에 따른 스위칭 패턴

Fig 2.는 두 가지 경우에 따른 스위칭 패턴이다. 이것은 Duty가 0.5보다 크고 0.5보다 작은 Duty를 가질 때에 따라 달라지며 각각 Mode 1과 Mode 2로 구분하였다. 각 스위치가 켜지는 구간을 (D)라고 하고, 꺼지는 구간을 (1-D)라고 한다. 여기서 스위치 1번과 스위치 2번은 스위치 소자 내부 다이오드의 용도로만 사용된다. 따라서 실제로 제어하는 스위치는 3번과 4번이다. Mode1 에서는 3번, 4번 스위치가 둘중에 하나가 상보적으로 켜지며 이에 따라 High side 혹은 Low side의 커패시터가 충전된 하게되는 구간과 3, 4번 스위치를 모두 켜기 위한 구간이 있다. 스위치 3과 4가 모두 켜진 구간은 스위치 3이 켜진 구간(D)에서 스위치 4가 꺼진 구간(1-D)을 뺀구간으로 (2D-1) 만큼이 되고, 이것을 Step(a)로 정하였다. 스위치 3만 켜진 구간은 Step (b) , 스위치 4만 켜진 구간은 Step (c)라고 정하였다. Step (b)와 (c)

사이의 간격은 (1-D)이다. Mode2에서는 Step(b)와 Step(c)가 동일한 흐름을 가지지만 주기가 (D)만큼이 된다. 스위치 3과 4가 모두 꺼진 구간은 스위치 3이 꺼진 구간 (1-D)에서 스위치 4가 켜지는 구간 (D)을 빼면 (1-2D)이고, 이는 Step(a')이다.<sup>[1]</sup>

## 2.2 상태평균화 모델링과 소신호 해석

식(1)는 각 Mode1 과 Mode2 에 대한 평균 행렬이다. 각 단계에서 얻은 상태 방정식의 평균은 최종적으로 Mode1 와 Mode2 둘다 동일한 행렬방정식의 결과를 초래한다. 따라서 컨트롤러 설계 시 Duty 에 따라 컨트롤러 모드를 전환하는 것을 고려할 필요는 없다.

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-D) & -(1-D) \\ (1-D) & \frac{L}{R_0} & \frac{L}{R_0} \\ C_1 & -RC_1 & -RC_1 \\ (1-D) & 1 & 1 \\ C_2 & -RC_2 & -RC_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \quad (1)$$

따라서 식(1)의 평균 모델링 행렬은 소신호를 분석하고 Laplace 변환을 통하여 식(6)과 같은 표현식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_L(s) &= \frac{C_1 C_2 V_0 s + (C_1 + C_2) \frac{V_0}{R_0} + I_L (1-D)}{(s^2 L C_1 C_2 + \frac{L(C_1 + C_2)}{R_0} s + (1-D)^2 (C_1 + C_2))} \\ \hat{V}_{C1}(s) &= \frac{-(I_L L C_2) s + V_0 C_2 (1-D)}{(s^2 L C_1 C_2 + \frac{L(C_1 + C_2)}{R_0} s + (1-D)^2 (C_1 + C_2))} \\ \hat{V}_{C2}(s) &= \frac{-(I_L L C_1) s + V_0 C_1 (1-D)}{(s^2 L C_1 C_2 + \frac{L(C_1 + C_2)}{R_0} s + (1-D)^2 (C_1 + C_2))} \end{aligned} \quad (2)$$

## 3. 컨트롤러 설계

### 3.1 제어기 설계

그림 4 는 컨트롤러의 블록 다이어그램을 나타낸다. 전압 컨트롤러와 전류 컨트롤러로 구성된 Dual-Loop 의 제어기이다.

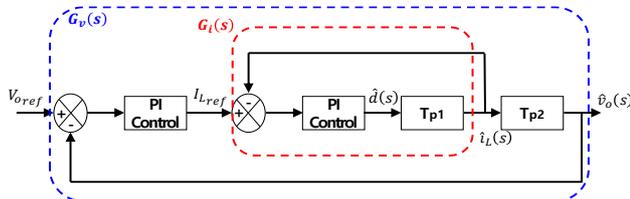


Fig 4. Controller Board Diagram

### 3.2 불평형 보상기

또한 토폴로지에서 Vc1과 Vc2의 불평형은 Vc1과 Vc2의 차이에 대해 High side의 Duty와 Low side의 Duty를 보상해야 한다. 각 Side의 불평형을 개선해주는 불평형을 개선하는 Duty 보상기의 구조는 Fig 5.에 나타나 있다.<sup>[2]</sup>

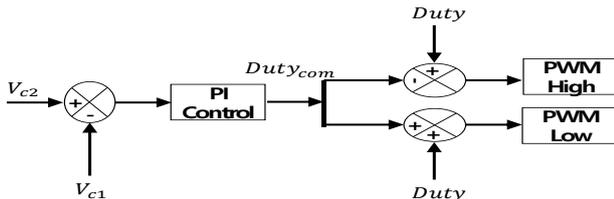


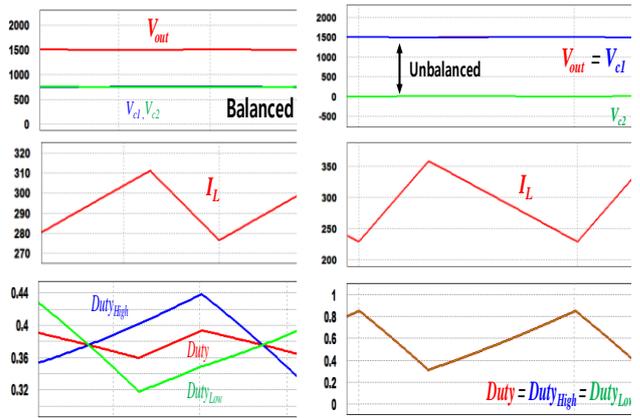
Fig 5. Duty Compensator

## 4. 모의해석

Fig7.은 보상기 사용의 효과를 보여주는 시뮬레이션이다. Duty 보상기를 사용하지 않을 때 Vc1 과 Vc2 에서 불평형을 갖는 것을 볼 수 있다. 보상기를 사용할 때, High side 와 Low side 의 Duty 가 보상되고 전압의 불평형문제가 해결되는것을 확인할 수 있다.

	$V_{in}$	$L$	$C_1, C_2$	$f_s$	$D$	$V_{out}$
value	1020[v]	0.5m[H]	900u[F]	5k[Hz]	0.32	1500[v]

Table1.The parameter when simulated



Used Duty Compensator      Unused Duty Compensator  
Fig 7. Comparison of simulation with or without Compensator

## 5. 결론

결론적으로 각 모드에 대해 상태 방정식을 세우고 이를 평균화하였다. 그런 다음 평균화된 상태 방정식을 비교하고 소신호 해석 후 컨트롤러를 설계했다. 설계한 컨트롤러는 High side와 Low side의 평형이 맞지 않음을 확인하고, 불평형 개선에 대한 Duty를 보상하기 위해 불평형 Duty 제어 보상기를 제안했다. 시뮬레이션은 제안된 보상기가 불평형을 개선한다는 것을 보여주었다.

본 연구는 2016 년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성 사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030201100)  
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2017121020084)

## 참고 문헌

[1] MoonHyun Lee, jong-Woo Kim, jin-Sheng Lai , "small-signal Modeling of Three-Level Boost Rectifier and System Design for Medium-Voltage Solid-State Transformer," 2019 10<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and ECCE Asia(ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, 2019

[2] Jae-Uk Lim, Seung-Tae Lee, Seung-Woo Baek, Hag-Wone Kim, Kwan-Yuhl Cho, "A Study of Design Single Phase Boost Converter Controller for compensated Load Current and Duty", 2017 Power Electronics Conference, The Korean INSTITUTE OF Power Electronics, 160-161p