

# 벽 차동전력조절 회로가 적용 된 다출력 스위치드-커패시터 부스트 컨버터의 소신호 모델 분석

이춘구, 박정현, 박종후  
송실대학교

## Small signal Model Analysis of multi-output switched-capacitor boost converter with buck differential power processor circuit

Chun-Gu Lee, Jung-Hyun Park, Joung-Hu Park  
Soongsil University

### ABSTRACT

본 논문은 벽 차동전력조절 회로가 적용 된 다출력 스위치드-커패시터 부스트 컨버터의 소신호 모델 분석에 대한 논문이다. 제안하는 회로는 각 태양광 모듈의 최대전력점을 추정하기 위해서 제어된다. 제안하는 회로는 상태 공간 평균화 기법과 시그널 플로우 그래프를 통해서 해석하였으며 PSIM과 MATLAB을 통해서 증명하였다.

### 1. 서론

차동전력조절 회로란 특정 태양광 모듈에 부분 음영 현상이 발생할 때 만 동작하는 회로로 각 태양광 모듈이 최대 전력 점에서 동작 할 수 있게 해준다. 이를 위해서는 스트링 컨버터와 차동전력조절 회로의 입력전압 제어를 설계할 필요가 있다. 하지만 PV의 개수를 n개 이상으로 확장 했을 때 전달 함수를 구하는 것은 매우 어려워 많은 시간을 필요로 한다. 본 논문에서는 벽 차동전력조절 회로가 적용 된 다출력 스위치드-커패시터 부스트 컨버터의 소신호 모델 분석에 대해서 다룬다. 상태 공간 평균화 기법과 시그널 플로우 그래프를 통해서 기존의 구하기 어렵고 복잡하였던 전달함수를 보다 쉽게 구할 수 있게 하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 제안하는 컨버터

아래의 그림 1은 본 논문에서 제안 하는 컨버터이다. 스트링 컨버터인 다출력 스위치드-커패시터 부스트 컨버터와 벽 차동전력조절 회로로 이루어져 있다.<sup>[1]</sup>

#### 2.2 태양광 패널의 수가 2개일 때 전달함수

그림 1의 태양광 모듈 PV<sub>1</sub>에 부분 음영현상이 발생 하였을 때의 제안하는 컨버터의 동작회로는 그림 2와 같다. 스트링 컨버터 스위치의 온, 오프 동작에 의해 그림 2에서 식 (1)~식 (5)을 나타낼 수 있다.<sup>[2]</sup> ( $N = \frac{N_{bu1}}{N_p}$ )

$$V_{C1} = (R_1 \parallel \frac{1}{\omega C_1})(I_{smg} + I_{L1}) = (R_1 \parallel \frac{1}{\omega C_1})(-I_{Lm} - D_2 N I_{L1} + I_{L1}) \quad (1)$$

$$V_{Cn} = (R_n \parallel \frac{1}{\omega C_n}) I_{smg} = (R_n \parallel \frac{1}{\omega C_n})(-I_{Lm} - D_2 N I_{L1}) \quad (2)$$

$$I_{Lm} = \frac{1}{\omega L_m} [D_1 V_{PV} + D_1' (V_{PV} - V_{DC})] = \frac{1}{\omega L_m} [V_{PV} + V_{DC} + D_1 V_{DC}] \quad (3)$$

$$I_{L1} = \frac{1}{\omega L_1} [D_2 (N V_{PV} - V_{C1}) + D_2' (-V_{C1})] = \frac{1}{\omega L_1} (D_2 N V_{PV} - V_{C1}) \quad (4)$$

$$V_{PV} = V_{C1} + V_{Cn} \quad (5)$$

위의 식 (1)~식 (5)의 D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>을 미소하게 흔들면 아래의 식들과 같다. ( $Z_{b2} = \frac{R_1}{sR_1 C_1 + 1}$ ,  $Z_{bn} = \frac{R_n}{sR_n C_n + 1}$ )

$$\hat{v}_{C1} = Z_{b1}(-\hat{i}_{Lm} + (1 - ND_2)\hat{i}_{L1} + N I_{L1} \hat{d}_2) \quad (6)$$

$$\hat{v}_{Cn} = Z_{bn}(-\hat{i}_{Lm} - N I_{L1} \hat{d}_2 - ND_2 \hat{i}_{L1}) \quad (7)$$

$$\hat{i}_{Lm} = \frac{1}{sL_m} (\hat{v}_{PV} + V_{DC} \hat{d}_1) \quad (8)$$

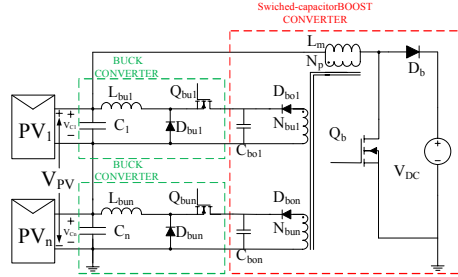


그림 1 제안하는 컨버터

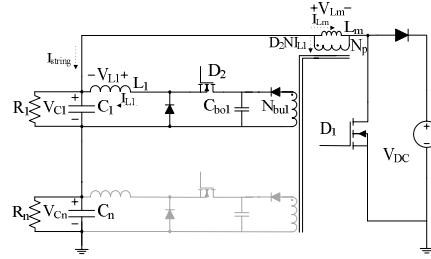


그림 2 제안하는 컨버터의 동작회로

$$\hat{i}_{L1} = \frac{1}{sL_1} (D_2 N \hat{v}_{PV} + N V_{PV} \hat{d}_2 - \hat{v}_{C1}) \quad (9)$$

$$\hat{v}_{PV} = \hat{v}_{C1} + \hat{v}_{Cn} \quad (10)$$

위의 식을 시그널 플로우 그래프로 표시하면 다음과 같다

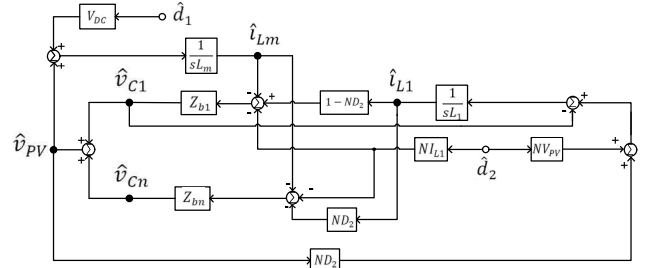


그림 3 시그널 플로우 그래프

#### 2.2.1 스트링 컨버터의 전달함수

시그널 플로우 그래프를 통해서 스트링 컨버터의 전달함수  $\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1}$ 는  $\frac{\hat{v}_{C1}}{\hat{d}_1}$ 와  $\frac{\hat{v}_{Cn}}{\hat{d}_1}$ 의 합과 같다는 것을 알 수 있다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1} = \frac{BZ_{b1}FZ_{bn} + CZ_{b1}}{1 - EZ_{bn}} + \frac{CZ_{b1}DZ_{bn} + FZ_{bn}}{1 - AZ_{b1}} \quad (11)$$

$$A = \frac{-(1 - ND_2)^2}{sL_1^2} - \frac{1}{sL_m}, B = \frac{(1 - ND_2)ND_2}{sL_1} - \frac{1}{sL_m}, C = -\frac{V_{DC}}{sL_m}$$

$$D = -\frac{(ND_2)^2}{sL_1} + \frac{ND_2}{sL_1} - \frac{1}{sL_m}, E = -\frac{(ND_2)^2}{sL_1} - \frac{1}{sL_m}, F = -\frac{V_{DC}}{sL_m}$$

### 2.3 시그널 플로우 그래프를 이용한 태양광 패널의 수가 n개일 때 제안하는 컨버터의 전달함수

차동전력조절기 회로가 제어되고 있다고 가정하면  $i_{Lm} \gg NI_{L1}d_2 + ND_2i_{L1}$  라고 할 수 있다. 이때 그림 3에서  $NI_{L1}d_2 + ND_2i_{L1}$  의 선을 삭제하면  $\hat{v}_{Cn}$  은  $i_{Lm}$  의 영향만 받는다. 즉 차동전력조절 회로가 동작하지 않는 태양광 모듈의 전압은  $i_{Lm}$  의 영향만 받아 태양광 모듈의 개수가 증가함에 따라 그림 3의 루프들 중 특정 루프만 같이 증가된다. 이해를 돕기 위해 그림 3을 아래의 그림4와 같이 변형하였다 점선 안은 태양광모듈이 2개일 때 이고 실선 안은 태양광 모듈이 3개일 때 이다.

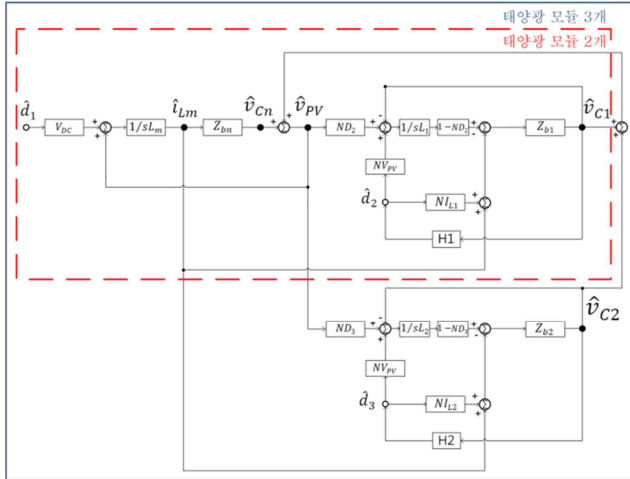


그림 4 제안하는 컨버터의 블록 다이어그램

가정을 적용하여 그린 시그널 플로우 그래프인 그림 4에서 태양광 모듈이 2개일 때  $\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1} = \frac{d - \frac{b}{1-c}}{1 - e - \frac{a}{1-c}} \quad (12)$$

$$a = Z_{b1}(ND_2(1 - ND_2)(1/sL_1) - (1/sL_m)) \quad b = Z_{b1}V_{DC}(1/sL_m)$$

$$c = H1NV_{PV}(1 - ND_2)(1/sL_1)Z_{b1} + H1(1 - ND_2)(1/sL_1)NI_{L1}$$

$$+ (1 - ND_2)(1/sL_1)Z_{b1}, d = Z_{b1}(1/sL_m)V_{DC}, e = Z_{b1}(1/sL_m)$$

태양광 모듈이 3개일 때  $\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1}$ 는 다음과 같다

$$\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1} = \frac{d - \frac{b}{1-c} - \frac{b}{1-c'}}{1 - e - \frac{a}{1-c} - \frac{a'}{1-c'}} \quad (13)$$

$$a' = Z_{b2}(ND_3(1 - ND_3)(1/sL_2) - (1/sL_m))$$

$$c' = H2NV_{PV}(1 - ND_3)(1/sL_2)Z_{b2} + H2(1 - ND_3)(1/sL_2)NI_{L2}$$

$$+ (1 - ND_3)(1/sL_2)Z_{b2}$$

식 (12)와 식 (13)을 비교했을 때 태양광 모듈의 수가 증가 할 때  $\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1}$ 에서 분자에는  $-\frac{b}{1-c}$ 항이 분모에는  $-\frac{a'}{1-c'}$ 항이 추가 된 것을 알 수 있다 이를 이용하여 태양광 모듈 n개에 대해서 정의하면 아래의 식과 같다.

$$\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1} = \frac{d - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{b}{1-c_k}}{1 - e - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{a_k}{1-c_k}} \quad (14)$$

$$a_k = Z_{bk}(ND_{k+1}(1 - ND_{k+1})(1/sL_k) - (1/sL_m))$$

$$c_k = HkNV_{PV}(1 - ND_{k+1})(1/sL_k)Z_{bk} + Hk(1 - ND_{k+1})(1/sL_k)NI_{Lk}$$

$$+ (1 - ND_{k+1})(1/sL_k)Z_{bk}$$

위의 이론을 증명하고 가정성립의 확인을 위해서 PSIM과 MATLAB에서 각각 모듈이 3개일 때를 기준으로  $\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1}$ 에 대한 Bode plot을 구하여 비교했다. 그림 5가  $\frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{d}_1}$ 에 대한 MATLAB과 PSIM의 Bode

plot이다 두 Bode plot의 차이가 거의 없는 것으로 보아 가정이 맞는 것을 확인 할 수 있다 표 1은 시뮬레이션에서 사용한 주요 변수들이다.

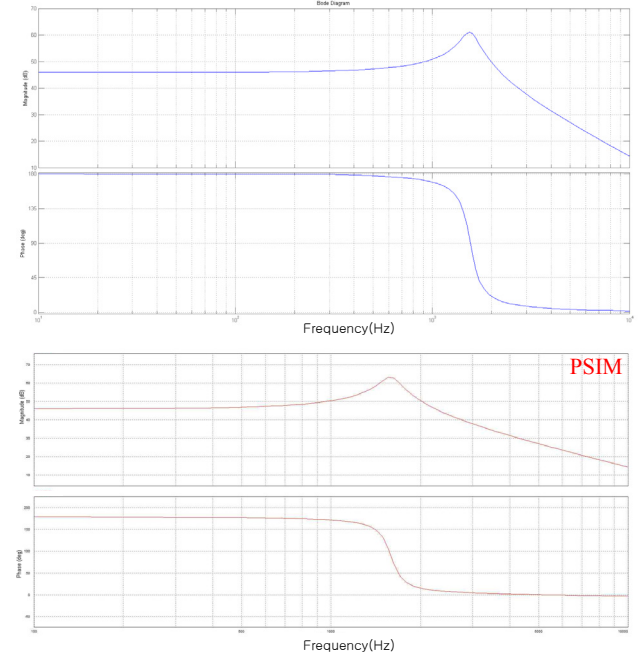


그림 5 태양광 모듈이 3개일 때 Bode plot

### 3. 결론

본 논문에서는 벽 차동전력조절 회로가 적용 된 다출력 스위치-커패시터 부스트 컨버터를 상태 공간 평균화 기법과 시그널 플로우 그래프를 통해서 분석하였다 상태 공간 평균화 기법과 시그널 플로우 그래프를 사용하여 회로를 분석했기 때문에 기존의 구하기 어렵고 복잡했던 회로의 전달함수를 비교적 쉽게 구할 수 있었으며 시그널 플로우 그래프를 통해 회로를 직관적으로 파악 할 수 있었다. 회로의 전달함수를 구하는 과정에서 특정한 가정이 들어갔지만 그림 5를 확인하였을 때 큰 차이가 나지 않는 것으로 보아 소신호 모델 분석에 영향이 거의 없다는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 n개의 태양광 모듈을 갖는 시스템의 소신호 모델 분석을 보다 쉽고 빠르게 할 수 있다.

표 1 주요 변수

Parameter	Value	Parameter	Value
$R_1$	$5\Omega$	$C_1, C_2, C_3$	100uF
$R_2$	$6\Omega$	$C_{bu1}, C_{bu2}, C_{bu3}$	200uF
$R_3$	$7\Omega$	$V_{DC}$	120 V
$L_1, L_2, L_3$	1mH	$V_{PV}$	200 V
$L_m$	300uH	$N_p:N_{bu1}:N_{bu2}:N_{bu3}$	2:1:1:1

### 참고 문헌

- [1] 이춘구, 박종후. "절연형 벽 컨버터가 적용된 승압형 태양광 피드백 차동전력조절기." 전력전자학회논문집, (2016 7): 347-348.
- [2] 김현우 "고효율 차동전력 조절기를 위한 부스트-포워드 통합 컨버터 분석 및 설계", 숭실대학교 2015.6.