

# 새로운 소프트스위칭 3레벨 Flying Capacitor 컨버터

김재훈, 김익순, 라마단, 최세완  
서울과학기술대학교

## A New Soft-switching Three-level Flying Capacitor Converter

Jaehoon Kim, Iksun Kim, Ramadhan, Sewan Choi  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

본 논문에서는 작은 필터인덕턴스를 갖는 새로운 소프트스위칭 3레벨 Flying Capacitor 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 보조 인덕터  $L_a$ 와 보조 커패시터  $C_a$ 로 인해 모든 스위치의 ZVS 턴 온을 성취하여 높은 효율을 달성할 수 있고, Flying capacitor로 인해 필터 인덕터에 걸리는 전압이 감소하며 스위치간의 위상차로 인해 동작주파수가 2배가 되어 필터 인덕턴스를 줄일 수 있다. 또한 3레벨 구조로써 800V~1000V의 고전압 응용에서 600V의 Si-MOSFET을 사용할 수 있어 도통손실을 줄일 수 있다. 제안하는 컨버터의 동작원리, 비교분석, 인터리빙 효과를 제시하고 시작품을 통해 본 논문의 타당성 및 성능을 검증하였다.

### 1. 서론

최근 PV(Photo-Voltaic) 시스템에서는 AC 측 전선의 비용을 낮추고 연간 발전량을 높이기 위하여 계통전압이 400VAC에서 800VAC까지 높아지고 있다. 이로 인해 DC 링크 전압을 1000VDC에서 1500VDC로 채택하는 추세이다[1]. 또한 EV(Electric Vehicle)나 FCEV(Fuel-Cell Electric Vehicle)에서는 시스템의 부피를 낮추고 효율을 높이기 위해 배터리와 인버터 사이에 DC-DC 컨버터가 요구되며, 최근 DC 링크 전압이 800V까지 높아지고 있다[2][3]. 이에 따라 고전압 응용의 승압형 컨버터 연구에 대한 필요성이 대두되고 있다.

일반적으로 승압형 토폴로지 중 부스트 컨버터는 구조가 간단하고 소자수가 적어 널리 사용되어 왔다. 하지만 스위치의 높은 전압정격과 하드스위칭으로 인해 고주파동작에 제한이 있다. 따라서 입력 필터 인덕턴스가 커져 컨버터의 부피가 커지고 무거워지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 FCBC(Flying Capacitor Boost Converter)가 연구 되어왔다[4]. FCBC는 Flying capacitor에 의해 필터 인덕터에 인가되는 전압이 감소하고, 스위치간의 180° 위상차를 통해 인덕터의 동작주파수가 2배가 된다. 이로 인해 필터 인덕턴스의 크기가 일반적인 부스트 컨버터에 비해 4배 작아지는 장점을 가진다. 또한 3레벨 구조로 인해 스위치의 전압정격이 출력전압의 절반으로 감소한다. 하지만 스위치가 여전히 하드스위칭 동작을 하여 고주파 동작에 제한이 있다.

본 논문에서는 필터 인덕턴스가 작은 새로운 소프트스위칭 3레벨 Flying Capacitor 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 작은 보조 인덕터 및 커패시터를 통해 모든 스위치의 ZVS 턴

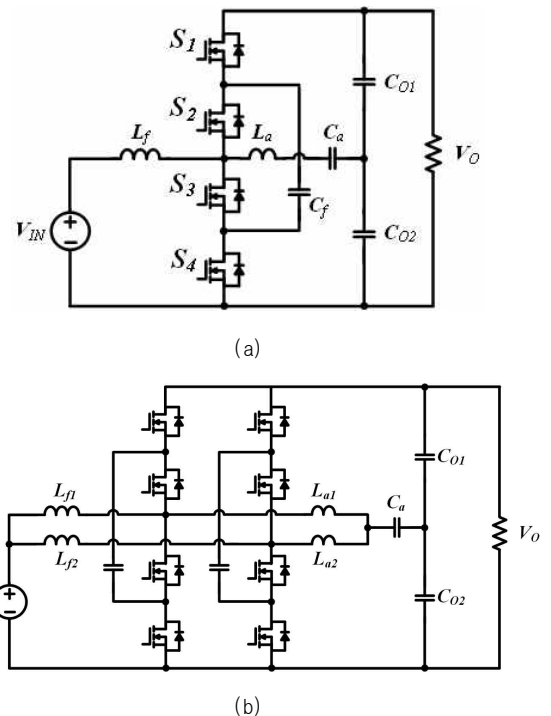


그림 1. 회로도 (a) 제안하는 컨버터의 단상 회로도 (b) 제안하는 컨버터의 2상 인터리빙 회로도

온을 성취할 수 있다. 또한 일반적인 부스트 컨버터에 비해 필터 인덕턴스가 4배 작으며, 3레벨 구조로 인해 스위치의 전압정격이 출력전압의 절반이 되어 고전압 응용에 적합하다. 또한 대전력 응용을 위한 제안하는 컨버터의 2상 인터리빙 구조는 보조소자인  $C_a$ 를 공통으로 사용하여 소자수를 줄일 수 있으며, 인터리빙 효과로 인해  $C_a$ 의 전류정격을 낮출 수 있다. 1kW급 시작품의 실험을 통하여 제안하는 컨버터의 타당성 및 성능을 검증하였다.

### 2. 제안하는 컨버터

제안하는 소프트스위칭 3레벨 Flying Capacitor 컨버터는 그림 1의 (a)와 같이 입력필터 인덕터  $L_f$  플라잉 커패시터  $C_f$  보조 소자  $L_a$ ,  $C_a$  그리고 4개의 스위치로 구성되며 보조 소자를 사용함으로써 ZVS 턴 온을 성취한다. 또한 제안하는 컨버터는 기존의 FCBC와 같이 플라잉 커패시터로 인해 필터 인덕터에

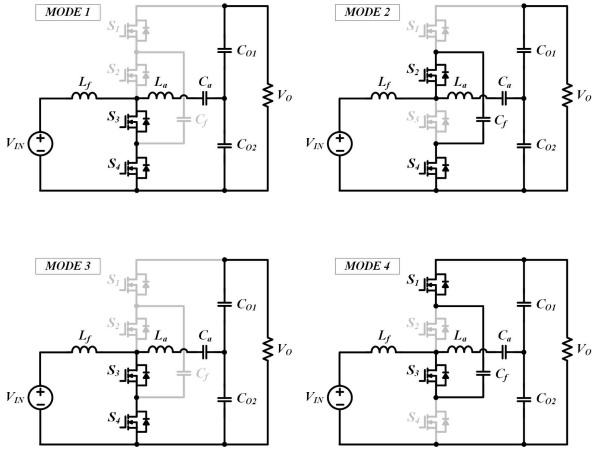


그림 2. 제안하는 컨버터의 동작모드

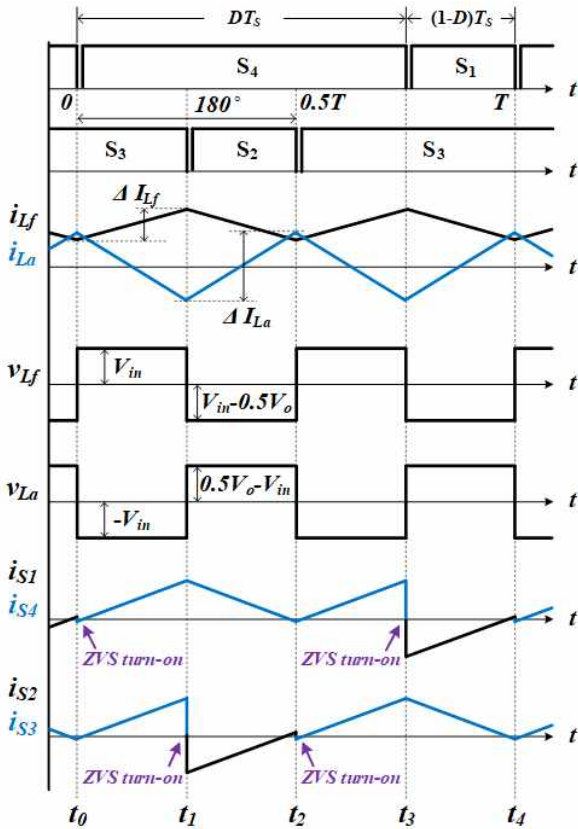


그림 3. 제안하는 컨버터의 동작파형

걸리는 전압이 출력전압의 절반이 되고, 스위치  $S_3$ 와  $S_4$ 의 180도 위상차로 인해 필터 인덕터의 동작주파수가 2배가 된다. 따라서 일반적인 부스트 컨버터에 비해 필터 인덕턴스가 4배 작은 장점을 가진다. 또한 그림 1의 (b)와 같이 제안하는 컨버터에 인터리빙 기법을 적용할 경우 보조 소자인  $C_a$ 를 공통으로 사용할 수 있다. 따라서 인터리빙 효과로 인해  $C_a$ 의 전류정격과 입·출력 리플을 줄일 수 있다. 그림 2와 그림 3은 각각 제안하는 컨버터의 동작모드와 각 모드에 대한 주요 파형을 나타낸다. 스위치  $S_1$ ,  $S_4$  그리고  $S_2$ ,  $S_3$ 는 각각 상보적으로 동작하며  $S_3$ 와  $S_4$ 는 180도의 위상차를 갖는다. 제안하는 컨버터는 필터

표 1 토폴로지 특성 비교

|                        | Boost           | FCBC[4]               | Proposed              |
|------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| 회로도                    |                 |                       |                       |
| 스위치 개수 (전압 정격)         | 2 ( $V_o$ )     | 4 ( $0.5 \cdot V_o$ ) | 4 ( $0.5 \cdot V_o$ ) |
| 보조 회로                  | -               | $C_f$                 | $C_b$ , $C_a$ , $L_a$ |
| $L_f$ 인덕턴스 ( $L_f$ 부피) | 1 p.u. (1 p.u.) | 0.25 p.u. (0.35 p.u.) | 1 p.u. (0.35 p.u.)    |
| 스위치 특성                 | 하드스위칭           | 하드스위칭                 | ZVS 턴온                |

인덕터  $L_f$ 와 보조 인덕터  $L_a$ 의 전류 차를 이용하여 스위치의 ZVS 턴 온을 성취하므로 보조 인덕터  $L_a$ 의 설계가 중요하다.

### 3. 비교분석

표 1은 제안하는 컨버터와 일반적인 부스트 컨버터 그리고 FCBC(Flying Capacitor Boost Converter)의 특성에 대한 비교 결과를 나타낸 것이다. 부스트 컨버터는 스위치 개수가 적고 구조가 간단하지만 스위치가 하드스위칭 동작을 하여 고주파 동작에 제한이 있다. 따라서 필터 인덕턴스가 커져 전체 시스템의 부피가 커지는 단점이 있다. 또한 스위치 전압 정격이 출력전압이므로 고전압 응용에서는 SiC MOSFET을 사용해야 한다. 반면에 FCBC의 스위치 전압정격은 출력 전압의 절반이며, 필터 인덕턴스가 부스트 컨버터에 비해 4배 작은 장점을 가진다. 하지만 모든 스위치가 여전히 하드스위칭을 하여 스위칭 주파수에 제한이 있다. 제안하는 컨버터는 추가된 보조 인덕터와 커패시터로 인해 모든 스위치가 ZVS 턴 온을 성취하여 고효율을 달성할 수 있다. 또한 기존의 FCBC의 장점 또한 그대로 유지된다. 다시 말하면, 3레벨 구조를 통해 고전압 응용에서 낮은 전압 정격의 스위치 선정이 가능하고 소프트 스위칭과 작은 필터인덕턴스를 통해 고전력밀도를 달성할 수 있다.

### 4. 실험 결과

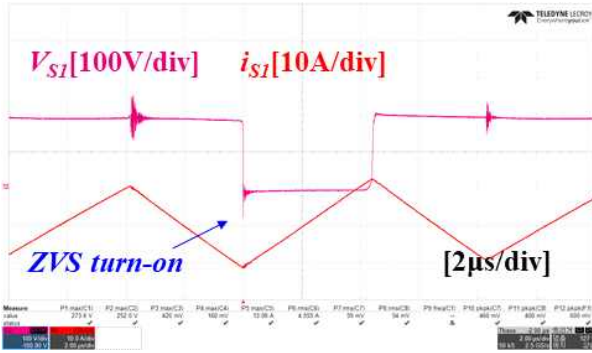
제안하는 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 다음의 설계 사양에 따라 실험을 하였다.

$$\bullet P_o = 1\text{kW} \bullet f_s = 60\text{kHz} \bullet V_i = 100\text{V} \sim 160\text{V} \bullet V_o = 400\text{V}$$

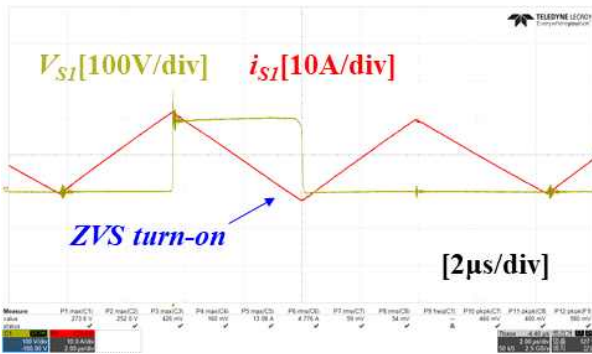
제안한 컨버터의 1kW급 시작품 사진은 그림 6과 같으며, 그림 4는 제안하는 컨버터의 실험파형으로 모든 스위치가 ZVS 턴 온을 성취하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 5는 제안하는 컨버터의 2상 인터리빙 실험파형으로 인터리빙 효과로 입력 전류 리플과  $C_a$ 의 전류정격이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 고전압, 고출력 응용에 적합한 소프트스위칭 3레벨 Flying Capacitor 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 보조 소자를 이용하여 모든 스위치의 ZVS 턴온을 성취하여 고

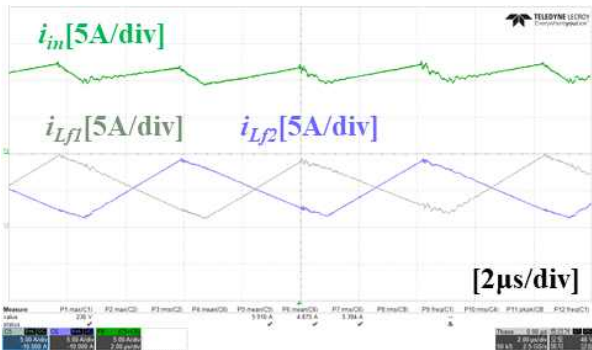


(a)

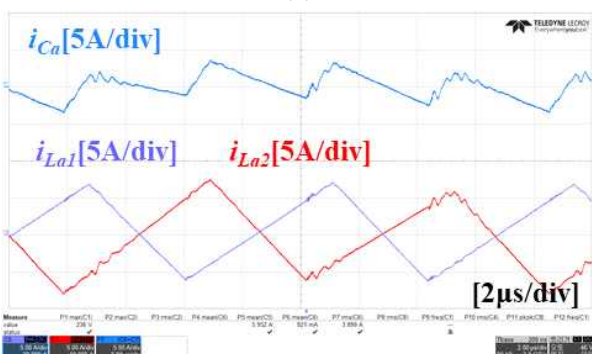


(b)

그림 4. 실험파형 (a) 스위치  $S_1$  전압 및 전류 파형 (b) 스위치  $S_2$  전압 및 전류 파형



(a)



(b)

그림 5. 실험파형 (a) 필터 인덕터  $L_f$ , 입력 전류 파형 (b) 보조 인덕터  $L_a$ , 보조 커패시터  $C_a$  전류 파형

주파 동작을 가능케 하며 필터 인덕턴스의 크기가 작아 고전력 밀도를 달성할 수 있다. 또한 대전력 응용에서는 인터리빙 기

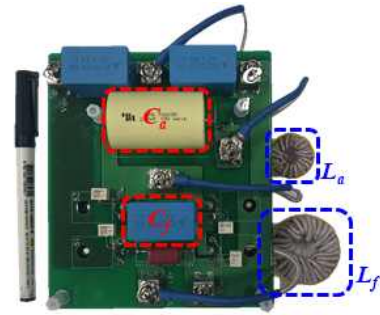


그림 6. 1kW급 시작품

법을 적용하여 보조소자  $C_a$ 를 공통으로 사용할 수 있으며 전류 정격을 줄일 수 있다. 1kW 시작품의 실험 결과를 통해 제안한 컨버터의 타당성 및 성능을 검증하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. Stevanović, D. Serrano, M. Vasić, P. Alou, J. A. Oliver and J. A. Cobos, "Highly Efficient, Full ZVS, Hybrid, Multilevel DC/DC Topology for Two-Stage Grid-Connected 1500-V PV System With Employed 900-V SiC Devices," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 811-832, June 2019.
- [2] Kitamoto, R., Sato, S., Nakamura, H., and Amano, A., "Development of Fuel Cell Boost Converter Using Coupled-Inductor for New FCV," *SAE Technical Paper* 2017-01-1224, 2017
- [3] M. Bruell, P. Brockerhoff, F. Pfeilschifter, H.-P. Feustel and W. Hackmann, "Bidirectional Charge- and Traction-System," in *EVS29 Symposium*, Québec, Canada, June 19-22, 2016.
- [4] J. Itoh, K. Matsuura and K. Orikawa, "Reduction of a boost inductance using a switched capacitor DC-DC converter," *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, Jeju, 2011, pp. 1315-1322