

새로운 소프트스위칭 3레벨 Flying Capacitor 컨버터

김재훈¹, 김선주¹, 최세완[†]

A New Soft-Switching Three-Level Flying Capacitor Converter

Jae-Hoon Kim¹, Sun-Ju Kim¹, and Se-Wan Choi[†]

Abstract

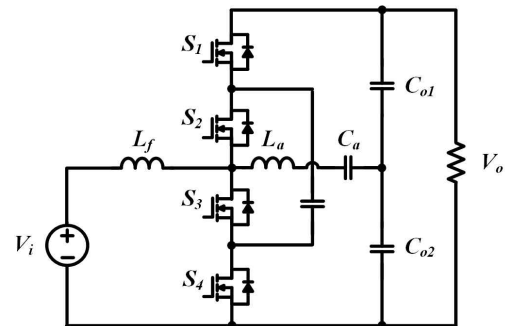
This study proposes a new soft-switching three-level flying capacitor converter with low filter inductance. The proposed converter can achieve zero voltage switching (ZVS) turn-on of all switches by using auxiliary components L_a and C_a . It can also reduce filter inductance because the applied voltage of the filter inductor is decreased by using the flying capacitor. Furthermore, filter inductance can be reduced because the operating frequency of the filter inductor is doubled by the phase shifting between switches S_3 and S_4 . The operation principle, design of passive components for ZVS turn-on, interleaving effects, and comparison of different topologies are presented. The experimental waveforms of a 1 kW two-phase interleaved converter prototype are provided to verify the validity of the proposed converter.

Key words: Soft switching, Step-up, Switched-capacitor converter, Three-level DC-DC converter

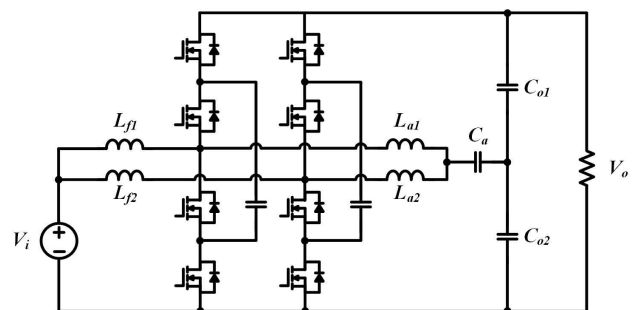
1. 서 론

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^{[4]-[7]}.

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



(a) Proposed converter



(b) Proposed converter with interleaved

Fig. 1. Circuit diagram.

커져 컨버터의 부피가 커지고 무거워지는 단점을 갖는다^{[8]-[11]}. SCC(Switched Capacitor Converter)는 스위치와 커패시터만으로 승압이 가능하므로 자성체가 없어 부피가 작은 장점이 있다. 하지만 플라잉 커패시터의 큰

Paper number: TKPE-2020-25-6-8

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul National University of Science and Technology

Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

¹ Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul National University of Science and Technology

Manuscript received Oct. 24, 2019; revised Dec. 11, 2019; accepted Aug. 6, 2020

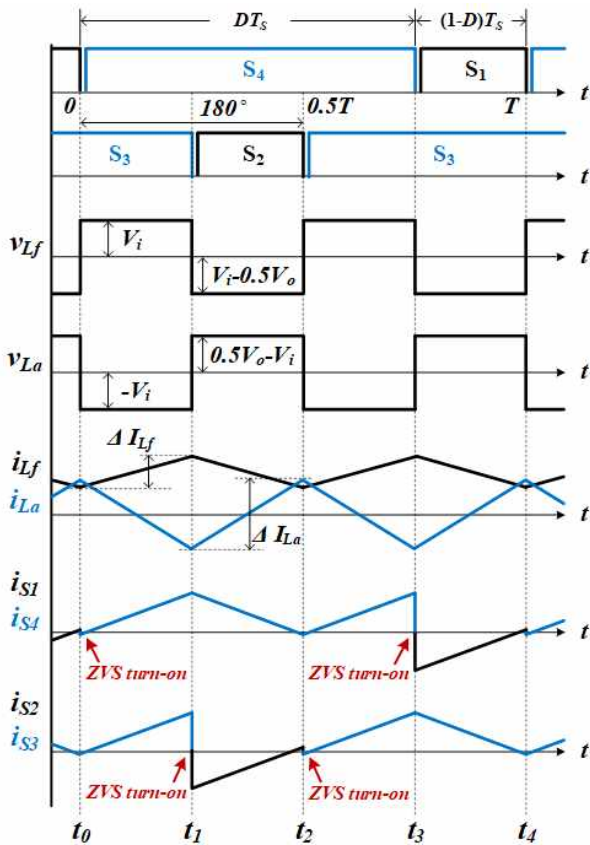


Fig. 2. Key waveforms of the proposed converter.

돌입전류로 인해 플라잉 커패시터의 수명이 짧고 효율이 낮은 문제가 있다. 또한 출력전압이 레벨 수에 의해 결정되므로 제어가 불가능한 단점이 있다^{[12]-[14]}. 이러한 단점을 보완하기 위해 FCBC(Flying Capacitor Boost Converter)가 연구되어 왔다^{[15],[16]}. FCBC는 Flying capacitor에 의해 필터 인덕터에 인가되는 전압이 감소하고, 스위치 간의 180° 위상차를 통해 인덕터의 동작주파수가 2배가 된다. 이로 인해 필터 인덕터의 크기가 일반적인 부스트 컨버터에 비해 4배 작아지는 장점을 갖는다. 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 온을 성취할 수 있다. 또한 일반적인 부스트 컨버터에 비해 필터 인덕턴스가 4배 작으며, 3레벨 구조로 인해 스위치의 전압 정격이 출력전압의 절반이 되어 고전압 응용에 적합하다. 그리고 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.

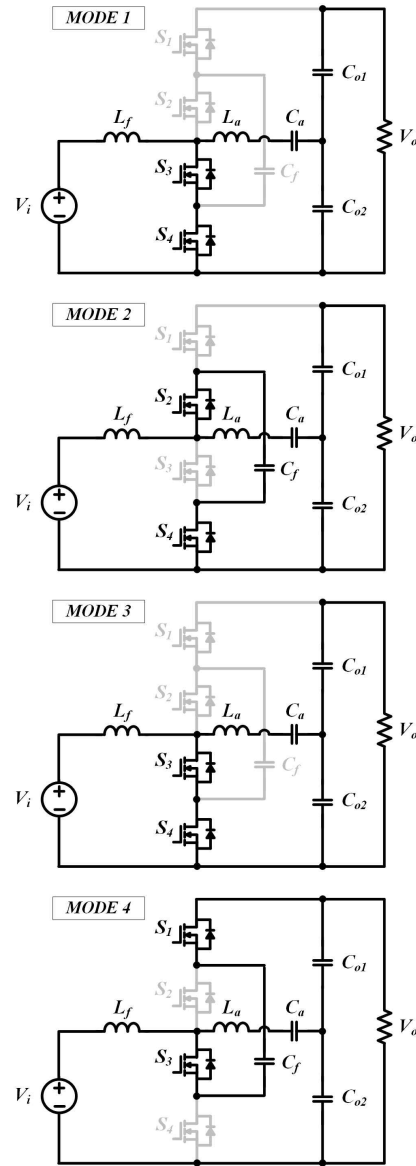


Fig. 3. Operation mode of the proposed converter.

2. 제안하는 컨버터

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

다. 스위치 S_1, S_7 그리고 S_3, S_5 는 각각 상보적으로 동작하며 S_3 와 S_5 는 180° 의 위상차를 갖는다. 제안하는 컨버터는 필터 인덕터 L_f 와 보조 인덕터 L_a 의 전류 차를 이용하여 스위치의 ZVS 턴 온을 성취하므로 보조 인덕터 L_a 의 설계가 중요하다.

2.1 제안하는 컨버터의 동작원리

제안하는 컨버터는 듀티가 0.5일 때를 기준으로 동작 모드가 달라지지만 원리는 동일하므로 본 논문에서는 $D > 0.5$ 때의 동작원리를 설명한다. 그림 2는 제안하는 컨버터의 주요 동작파형을 나타낸다. 제안하는 컨버터는 스위칭 한주기 동안 4가지 동작모드를 가지며, 그림 3은 각 동작모드에 대한 동작원리를 나타낸다.

Mode 1 (t_0-t_1): 스위치 S_1 이 턴 오프하면 i_{L_f} 과 i_{L_a} 의 차이가 S_2 의 바디 다이오드로 흐르며, 이 때 S_2 를 턴 온하면 ZVS 턴 온을 성취한다. i_{L_f} 와 i_{L_a} 는 아래 수식에 의해 결정되는 기울기로 각각 증가 및 감소한다.

$$\frac{di_{L_f}}{dt} = \frac{V_i}{L_f} \quad (1)$$

$$\frac{di_{L_a}}{dt} = \frac{-V_i}{L_a} \quad (2)$$

Mode 2 (t_1-t_2): t_1 에서 스위치 S_3 가 턴 오프하면 i_{L_f} 과 i_{L_a} 의 차이가 S_2 의 바디 다이오드로 흐르고, 이 때 S_2 를 턴 온하면 ZVS 턴 온을 성취한다. i_{L_f} 와 i_{L_a} 는 아래 수식에 의해 결정되는 기울기로 각각 증가 및 감소한다.

$$\frac{di_{L_f}}{dt} = \frac{0.5V_i - V_o}{L_f} \quad (3)$$

$$\frac{di_{L_a}}{dt} = \frac{V_o - 0.5V_i}{L_a} \quad (4)$$

Mode 3 (t_2-t_3): t_2 에서 스위치 S_5 가 턴 오프하면 i_{L_f} 과 i_{L_a} 의 차이가 S_3 의 바디 다이오드로 흐르고, 이 때 S_3 를 턴 온하면 ZVS 턴 온을 성취한다.

Mode 4 (t_3-t_4): t_3 에서 스위치 S_7 가 턴 오프하면 i_{L_f} 과 i_{L_a} 의 차이가 S_7 의 바디 다이오드로 흐르고, 이 때 S_7 를 턴 온하면 ZVS 턴 온을 성취한다. 이후 스위치 S_7 를 턴 오프하면 모드 1을 반복한다.

2.2 수동소자 설계

i_{L_f} 와 i_{L_a} 의 전류 차로 스위치의 ZVS 턴 온을 성취하기 때문에 필터 인덕터 L_f 와 보조 인덕터 L_a 는 중요한 설계 파라미터이다. L_f 와 L_a 는 각각 모든 Duty 범위에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

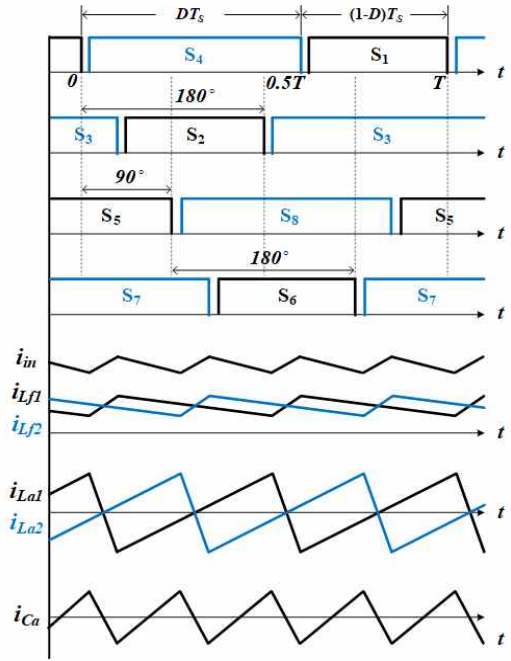


Fig. 4. Key waveforms of the 2-phase interleaved converter.

$$L_f = \frac{V_o(1-D)(2D-1)}{2\Delta I_f} \quad (5)$$

$$L_a = \frac{V_o(1-D)(2D-1)}{2\Delta I_{La}f} \quad (6)$$

ZVS 턴 온을 성취하기 위해서 필터 인덕터 전류 i_{L_f} 의 최소값이 보조 인덕터 전류 i_{L_a} 의 최대값보다 작아야 하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_i - \frac{\Delta I_i}{2} < \frac{\Delta I_{La}}{2} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)로부터 ZVS를 성취하기 위한 보조 인덕터 L_a 는 다음과 같다.

$$L_a < \frac{(1-D)(2D-1)V_o}{2(2I_i - \Delta I_i)f} \quad (8)$$

2.3 인터리빙 효과

ZVS 턴 온을 성취하기 위해 L_a 의 전류리플은 크게 설계되어야 한다. 이로 인해 DC blocking 역할을 하는 보조 커패시터 C_a 의 전류정격이 높아지게 된다. C_a 의 전류정격을 낮추기 위해 그림 1(b)와 같이 C_a 를 공통으로 사용하면서 인터리빙 기법을 적용할 수 있다. N상 인터리빙 컨버터의 각 상은 π/N 의 위상차로 동작하며, 그림 4는 2상 인터리빙 컨버터의 주요 동작파형을 나타낸다. 파형으로부터 입력 전류와 보조 커패시터의 동작 주파수가 스위칭주파수의 두 배가 되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 C_a 의 전류 정격 및 수동소자의 부피를 감소시킬 수 있다.

TABLE I
COMPARISON OF DIFFERENT TOPOLOGIES

		Bidirectional boost converter	FCBC ^{[15],[16]}	Proposed converter
Circuit diagram				
Number of switches (Voltage rating)		2 (Vo)	4 (0.5Vo)	4 (0.5Vo)
Auxiliary circuit		None	Cf	Cs, Ca, La
Boost inductance Lf (Boost inductor volume)		1 p.u. (1 p.u.)	0.25 p.u. (0.35 p.u.)	0.25 p.u. (0.35 p.u.)
Switching characteristic	Turn-on	Hard switching	Hard switching	ZVS
	Turn-off	Hard switching	Hard switching	Hard switching

TABLE II
EXPERIMENTAL SPECIFICATIONS (Po=1kW)

Symbol	Meaning	Value
V_{in}	Input voltage	100V
V_o	Output voltage	400V
f_s	Switching frequency	60kHz
L_f	Boost inductance	60 μ H
L_a	Auxiliary inductance	25 μ H
C_a	Auxiliary capacitance	2.2 μ F
C_f	Flying capacitance	4.7 μ F
$S_1 \sim S_4$	Si MOSFET	IXFH80N65X2 (650V/55A@100 $^{\circ}$ C)

3. 비교 분석

이 장에서는 기존의 부스트 컨버터, 플라잉 커패시터 부스트 컨버터와 제안하는 컨버터를 비교한다. 비교 결과는 표 1에 요약되어 있다. 기존의 부스트 컨버터는 적은 소자수를 갖지만 필터 인덕턴스가 큰 단점을 가진다. 스위칭 주파수를 높임으로써 인덕턴스를 줄일 수 있지만 모든 스위치가 하드스위칭 턴 온 및 턴 오프하므로 스위칭주파수를 높이는 데 한계를 갖는다. 또한 스위치의 전압정격이 출력전압이므로 고전압 응용에서는 1200V 정격의 SiC MOSFET가 필수적이다. 반면에 FCBC는 스위치 전압정격이 출력전압의 절반이며, 필터 인덕턴스가 기존의 부스트 컨버터에 비해 4배 작은 장점을 갖는다. 그러므로 스위칭 주파수를 높이지 않아도 인덕턴스

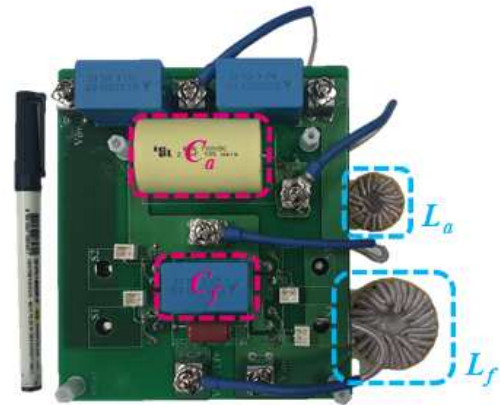
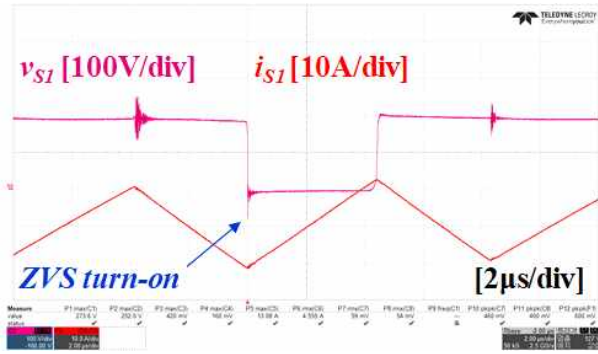


Fig. 5. 1 kW prototype of the proposed converter.

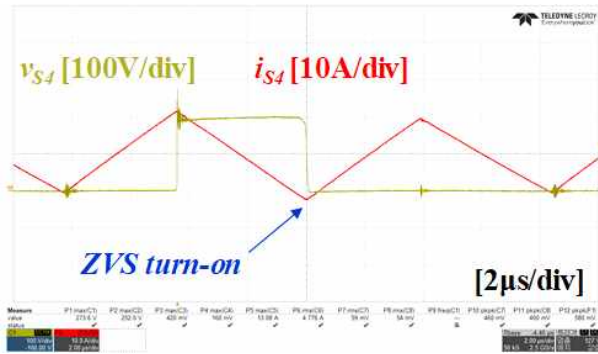
값을 줄일 수 있으며 이로 인해 기존의 부스트 컨버터에 비해 고효율을 달성할 수 있다. 하지만 모든 스위치가 여전히 하드스위칭 턴 온 및 턴 오프하는 단점을 갖는다. 제안하는 컨버터는 보조 인덕터와 보조 커패시터를 추가함으로써 기존의 FCBC의 장점을 유지하면서 모든 스위치의 ZVS 턴 온을 성취할 수 있다. 다시 말해 제안하는 컨버터는 소프트스위칭 및 작은 필터 인덕턴스를 통해 높은 전력밀도를 얻을 수 있으며, 고전압 응용에서 낮은 전압정격의 Si MOSFET의 적용이 가능하다.

4. 실험 결과

제안하는 컨버터의 성능 검증을 위해 그림 5과 같이 1kW 시제품을 제작하였으며, 플라잉 커패시터 C_f 보조

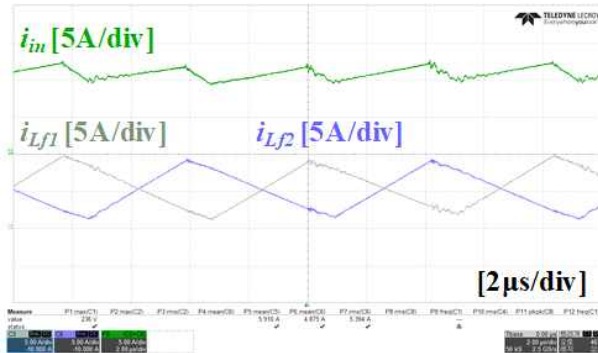


(a)

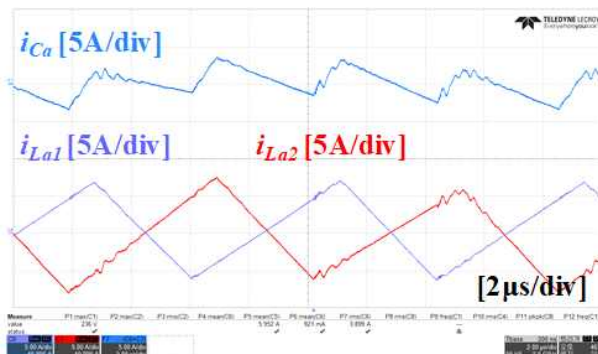


(b)

Fig. 6. Experimental waveforms of proposed converter at $V_i = 100\text{ V}$ and $P_o = 1\text{ kW}$. (a) Switch S_1 , (b) Switch S_2 .



(a)



(b)

Fig. 7. Experimental waveforms of the 2-phase interleaved converter at $V_i = 100\text{ V}$ and $P_o = 1\text{ kW}$. (a) Current i_{in} and $i_{L\phi}$ (b) Current i_c and $i_{L\phi}$.

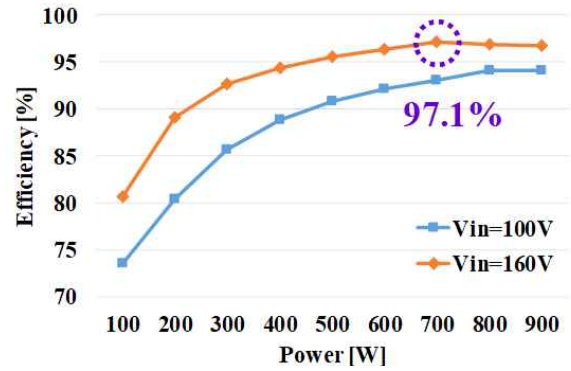


Fig. 8. Measured efficiency of the proposed converter.

커패시터 C_{ϕ} , 필터 인덕터 L_{ϕ} , 보조 인덕터 L_a 그리고 4 개의 스위치로 구성되었다. 제어기는 TI사의 TM S320F28377D를 사용하였으며 실험사양 및 사용된 파라미터는 표 2와 같다. 그림 6은 스위치 S_1 , S_2 의 전압 및 전류 파형을 나타내며 모든 스위치가 ZVS 턴 온 하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 7은 제안하는 컨버터의 2상 인터리빙 실험파형으로 인터리빙 효과에 의해 입력전류 리플과 C_{ϕ} 의 전류 리플이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 제어기를 제외한 제안하는 단상 컨버터 회로의 출력 전력에 따른 효율을 나타낸다. 측정 효율은 YOKOGAWA WT3000을 이용하여 측정되었으며 700W에서 최고효율 97.1%를 달성하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 고저압, 대전력 응용을 위한 낮은 필터 인덕턴스를 갖는 소프트 스위칭 3레벨 플라잉 커패시터 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 C_{ϕ} 와 스위칭 방식을 통해 필터 인덕턴스를 줄일 수 있고, 보조소자 L_a 와 C_{ϕ} 를 통해 모든 스위치가 ZVS 턴 온을 성취하므로 고주파 동작을 가능케 하여 고효율을 기대할 수 있다. 또한 대전력 응용에서는 인터리빙 기법을 적용하여 보조소자 C_{ϕ} 를 공통으로 사용할 수 있으며 전류정격을 줄일 수 있다. 1kW급 시작품을 통해 제안하는 컨버터의 타당성 및 성능을 검증하였고 최고효율 97.1%를 달성하였다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업”으로 수행된 연구결과입니다. (과제번호: P0000270)

References

[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," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 811-832, Jun. 2019.
- [2] R. Kitamoto, S. Sato, H. Nakamura, and A. Amano, "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*, Jun. 2016.
- [4] Y. Du, X. Zhou, S. Bai, S. Lukic, and A. Huang, "Review of non-isolated bi-directional DC-DC converters for plug-in hybrid electric vehicle charge station application at municipal parking decks," in *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA*, pp. 1145-1151, 2010.
- [5] R. M. Schupbach and J. C. Balda, "Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Madison, WI, USA*, Vol. 3, pp. 1369-1374, 2003.
- [6] M. Kwon, S. Oh, and S. Choi, "High gain soft-switching bidirectional DC-DC converter for eco-friendly vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1659-1666, Apr. 2014.
- [7] F. Zhang, L. Du, F. Z. Peng, and Z. Qian, "A new design method for high-power high-efficiency switched-capacitor DC-DC converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 2, pp. 832-840, Mar. 2008.
- [8] F. H. Aghdam and M. Abapour, "Reliability and cost analysis of multistage boost converters connected to PV panels," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 6, No. 4, pp. 981-989, Jul. 2016.
- [9] W. Li and X. He, "Review of nonisolated high-step-up DC/DC converters in photovoltaic grid-connected applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, pp. 1239-1250, Apr. 2011.
- [10] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, "Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost-converter-supplied PV system using fuzzy controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 4, pp. 749-758, Aug. 2003.
- [11] A. Urtaun, P. Sanchis, and L. Marroyo, "Adaptive voltage control of the DC/DC boost stage in PV converters with small input capacitor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 11, pp. 5038-5048, Nov. 2013.
- [12] F. Zhang, L. Du, F. Z. Peng, and Z. Qian, "A new design method for high-power high-efficiency switched-capacitor DC-DC converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 2, pp. 832-840, Mar. 2008.
- [13] F. H. Khan and L. M. Tolbert, "A multilevel modular capacitor-clamped DC-DC converter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 43, No. 6, pp. 1628-1638, Nov./Dec. 2007.
- [14] B. Wu, S. Li, K. M. Smedley, and S. Singer, "A family of two-switch boosting switched-capacitor converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 10, pp. 5413-5424, Oct. 2015.
- [15] J. Itoh, K. Matsuura, and K. Orikawa, "Reduction of a boost inductance using a switched capacitor DC-DC converter," in *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Jeju*, pp. 1315-1322, 2011.
- [16] A. B. Ponniran, K. Orikawa, and J. Itoh, "Minimum flying capacitor for N-level capacitor DC/DC boost converter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 52, No. 4, pp. 3255-3266, Jul./Aug. 2016.



김재훈(金載勳)

1994년 2월 1일생. 2016년 한국산업기술대 에너지전기공학과 졸업. 2018년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업(석사). 2018년~현재 동 대학원 전기정보공학과 박사과정.



김선주(金善宙)

1994년 3월 9일생. 2017년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2019년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2019년~현재 동 대학원 전기정보공학과 박사과정.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 수석부회장.