

인터리브드된 전류 주입형 고승압 DC-DC 컨버터

Interleaved Current-fed High Step-up DC-DC Converter

이 준 호^{*}

Junho Lee^{*}

Abstract

An interleaved current-fed high step-up DC-DC converter is proposed. Besides high voltage gain, a low ripple input current is achieved by adopting interleaving operation. Moreover, soft-switching characteristic of the proposed converter reduces switching losses of active power switches and raise the conversion efficiency. The reverse-recovery problem of output rectifiers is also alleviated by controlling the current changing rates of diodes by utilizing the leakage inductances of transformers. Experimental results obtained on a 200W prototype are discussed.

요 약

본 논문에서는 인터리브드된 전류 주입형 고승압 DC-DC 컨버터가 제안된다. 높은 전압 이득 외에도 인터리빙 방식을 채택하여 낮은 리플 입력 전류가 달성된다. 또한 제안된 컨버터의 소프트 스위칭 특성은 전력 스위치의 스위칭 손실을 줄이고 변환 효율을 높인다. 변압기의 누설 인덕턴스를 활용하여 다이오드의 전류 변화율을 제어함으로써 출력 정류기의 역 회복 문제도 완화된다. 200W 프로토타입에서 얻은 실험 결과에 대해 설명한다.

Key words : Interleaving operation, High step-up, DC-DC converter, soft-switching, reverse-recovery problem

1. 서론

최근 에너지 부족과 심각한 대기 오염 문제로 인해 solar arrays와 fuel cell과 같은 재생 가능한 녹색 에너지원에 대한 더 많은 연구가 필요하다[1-5]. 이러한 에너지소스의 출력 전압이 상대적으로 낮기 때문에 이러한 시스템에서는 높은 전압으로의 승압이 가능한 고승압 DC-DC 컨버터가 필요하다[6, 7]. 고승압 DC-DC 컨버터에는 높은 승압률 외에도 낮은 입력 전류 리플, 높은 전력 밀도 및 고효율과

같은 다른 특성이 필요하다. 그 중에서도 낮은 입력 전류 리플은 가장 중요한 특성 중 하나이다. 입력 전류 리플이 크면 소스를 비롯한 입력단 커패시터의 수명이 단축 될 수 있기 때문이다. 특히 연료 전지 시스템에서, 큰 전류 리플은 연료 전지 수명을 단축시키고 성능을 크게 저하시킨다[8-10]. 전류 리플을 줄이기 위해 인터리빙 방식을 선택할 수 있다. 병렬로 연결되고 동일한 위상 변이로 작동하는 동일한 컨버터가 여러 개있는 경우 전류 리플 문제를 쉽게 해결할 수 있다[11-13]. 또한 전력밀도

* Dept. of Electronics and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology

★ Corresponding author

E-mail : ljh@seoultech.ac.kr, Tel : +82-2-970-6418

※ Acknowledgment

This study was supported by the Research Program funded by the SeoulTech(Seoul National University of Science and Technology).

Manuscript received Jun. 5, 2020; revised Jun. 11, 2020; accepted Jun. 12, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

를 높이고 전반적인 시스템 효율을 높이기 위해서는 스위칭 손실을 저감할 수 있는 기술이 요구된다. 이런 요구 조건을 만족시키기 위해 인터리브된 전류 주입식 고승압 DC-DC 컨버터가 제안된다. 2개의 컨버터 모듈의 입력단을 병렬로 연결하고 인터리빙 제어 방식을 채택함으로써 입력 전류 리플을 크게 줄일 수 있다. 또한 두 변환기 모듈의 출력단을 직렬로 연결하여 높은 승압률을 제공한다. 전력용 반도체 스위치의 영전압스위칭(zero-voltage-switching, ZVS) 동작은 스위칭 전환 중 스위칭 손실을 줄이고 전체 효율을 향상시킬 수 있다. 또한 변압기의 누설 인덕턴스를 활용하여 출력 다이오드의 턴오프 전류 변화율을 조절하여 다이오드의 역회복 손실을 줄이고 노이즈를 저감한다. 이론적 분석은 24V에서 480V로 변환되는 200W 실험 프로토타입으로 검증된다.

II. 본론

1. 제안된 컨버터의 동작 설명

가. 회로구조

제안된 컨버터의 회로도를 그림 1에 나타내었다. 2개의 전류 주입형 컨버터의 입력단이 병렬로 연결되고 인터리빙 제어 방식이 적용되어 입력 전류 리플을 감소시킨다. 2개의 컨버터의 출력단은 직렬로 연결되어 전압 이득을 높인다. 두 개의 전류 공급 컨버터는 동일한 주파수에서 동작하지만 위상은 180° 차이가 나도록 동작한다. 제안된 컨버터의 이론적인 파형은 그림 2에 나타내었다.

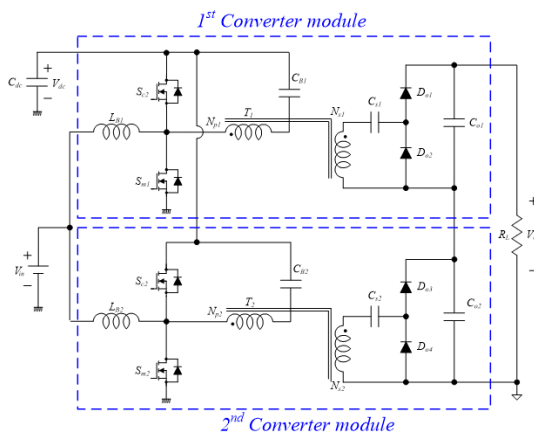


Fig. 1. Proposed current-fed high step-up DC-DC converter. 그림 1. 제안된 인터리브 전류 주입형 고승압 DC-DC 컨버터

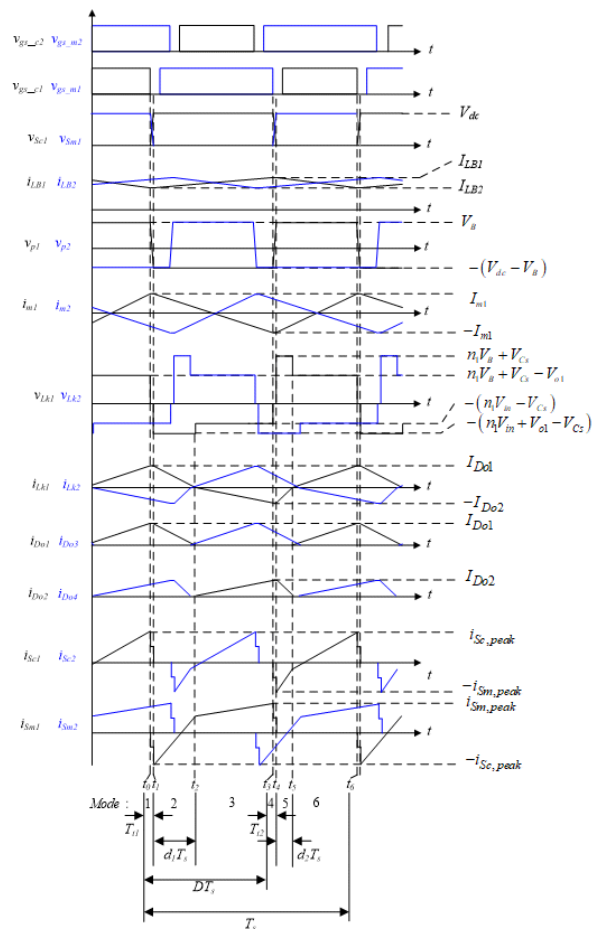


Fig. 2. Theoretical waveforms of the proposed converter. 그림 2. 제안된 컨버터의 이론적 파형

나. 동작원리

각 전류 공급 변환기에는 6개의 동작 모드가 있다. 이어지는 모드별 해석은 첫 번째 변환기 모듈을 기반으로 한다.

모드 1 $[t_0, t_1]$: t_0 에서 스위치 S_{c1} 이 꺼진다. 그 후, 자기 소자에 저장된 에너지는 스위치의 기생 커패시턴스를 충전 및 방전하기 시작한다. 따라서 S_{c1} 의 전압 v_{Sc1} 은 V_{dc} 에서 떨어지기 시작하고 S_{m1} 의 전압 v_{Sm1} 은 0에서 상승하기 시작한다. 이러한 기생 커패시턴스는 매우 작기 때문에 이 시간 간격은 매우 짧다. 따라서 이 모드에서는 모든 인덕터 전류가 일정하다고 간주될 수 있다.

모드 2 $[t_1, t_2]$: t_1 에서, 메인 스위치 S_{m1} 전압 v_{Sm1} 은 0이 되고 스위치의 바디 다이오드가 켜지게 된다. 그 다음 게이트 신호가 스위치 S_{m1} 에 인가된다. 게이트 신호가 인가되기 전에 전압 v_{Sm1} 이 0이 되기 때문에, S_{m1} 의 ZVS on이 달성된다. 이 모드에서는 L_{B1} 양단의 전압이 V_{in} 이므로 인덕터 전류

i_{LB1} 은 I_{LB2} 에서 선형으로 증가한다. 1차 전압 v_{p1} 은 $-(V_{dc}-V_B)$ 이고 2차측의 누설 인덕턴스 L_{k1} 양단의 전압 v_{Lk1} 은 $-(V_{o1}+n_1V_{in}-V_{Cs})$ 이므로, 자화 전류 i_{m1} 및 2차 전류 i_{Lk1} 은 선형으로 감소한다.

모드 3 [t_2, t_3] : t_2 에서 2차 전류 i_{Lk1} 이 방향을 바꾼다. 다이오드 전류 i_{Do1} 이 0으로 감소하고 출력 다이오드 D_{o1} 이 꺼진다. 그리고 다이오드 D_{o2} 가 켜지고 전류가 선형 적으로 증가한다. 변압기 T_1 의 누설 인덕턴스 L_{k1} 에 의해 D_{o1} 의 전류 변화율이 제어되므로, 역 회복 문제가 상당히 완화된다. 전압 v_{Lk1} 은 $-(n_1V_{in}-V_{Cs})$ 이므로, 2차 전류 i_{Lk1} 은 선형으로 감소한다.

모드 4 [t_3, t_4] : t_3 에서 메인 스위치 S_{m1} 이 꺼진다. 모드 1과 유사하게, 자기 소자에 저장된 에너지는 스위치의 기생 커패시턴스를 충전 및 방전하기 시작한다.

모드 5 [t_4, t_5] : t_4 에서, 클램프 스위치 S_{c1} 의 전압 V_{Sc1} 은 0이 되고 스위치의 바디 다이오드가 켜진다. 그다음 게이트 신호가 S_{c1} 에 인가된다. 게이트 신호가 인가되기 전에 전압 v_{Sc1} 이 0이 되기 때문에, S_{c1} 의 ZVS on이 달성된다. 이 모드에서 L_{B1} 양단의 전압은 $-(V_{dc}-V_{in})$ 이므로 인덕터 전류 i_{LB1} 은 I_{LB1} 에서 선형으로 감소한다. v_{p1} 은 V_B 이고 v_{Lk1} 은 $V_{Cs}+n_1V_B$ 이므로 전류 i_{m1} 및 i_{Lk1} 은 선형으로 증가한다.

모드 6 [t_5, t_6] : t_5 에서 2차 전류 i_{Lk1} 이 방향을 변경한다. 다이오드 전류 i_{Do2} 가 0으로 감소하고 다이오드 D_{o2} 가 꺼진다. 누설 인덕턴스로 인해 D_{o2} 의 역 회복 문제도 완화된다. 그 후, 출력 다이오드 D_{o1} 이 켜지고 전류가 선형 적으로 증가한다. v_{Lk1} 은 $(V_{Cs}+n_1V_B-V_{o1})$ 이므로 2차 전류 i_{Lk1} 은 선형으로 증가한다.

2. 특성 분석 및 디자인 파라미터

가. V_{dc} , V_B , and V_{Cs}

정상상태에서 L_{B1} 의 전압 v_{LB1} 의 평균전압은 0이어야 하므로 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$V_{in}DT_s - (V_{dc} - V_{in})(1-D)T_s = 0 \quad (1)$$

(1)에서 전압 V_{dc} 는 다음과 같이 유도 된다.

$$V_{dc} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (2)$$

마찬가지로, T_1 의 1차 측에 걸린 평균 전압은 0이어야하므로 C_{B1} 에 걸린 전압 V_B 는 다음과 같이 유도 된다.

$$V_B = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (3)$$

C_{s1} 의 평균 전압이 D_{o2} 의 평균 전압과 같기 때문에 전압 V_{Cs} 는 다음과 같다.

$$V_{Cs} = (1-D+d_1-d_2) V_{o1} \quad (4)$$

나. I_{LB1} , I_{LB2} , and I_{m1}

모드 2와 3에서 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$I_{LB1} - I_{LB2} = \frac{DV_{in}T_s}{L_{B1}} \quad (5)$$

i_{LB1} 의 평균값은 평균 입력 전류의 절반이므로 $I_{LB1} + I_{LB2}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_{LB1} + I_{LB2} = \frac{P_o}{\eta V_{in}} \quad (6)$$

여기서 P_o 는 평균 출력 전력이고 η 는 효율이다. (5)와 (6)에서 I_{LB1} 과 I_{LB2} 는 다음과 같이 유도된다.

$$I_{LB1} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_o}{\eta V_{in}} + \frac{DV_{in}T_s}{L_{B1}} \right) \quad (7)$$

$$I_{LB2} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_o}{\eta V_{in}} - \frac{DV_{in}T_s}{L_{B1}} \right) \quad (8)$$

전류 i_{m1} 의 평균값이 0이므로 피크 값 I_{m1} 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$I_{m1} = \frac{DV_{in}T_s}{2L_{m1}} \quad (9)$$

다. I_{Do1} and I_{Do2}

모드 2와 6에서 전류 I_{Do1} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{Do1} &= \frac{n_1V_{in} + V_{o1} - V_{Cs}}{L_{k1}} d_1 T_s \\ &= \frac{n_1V_B - V_{o1} + V_{Cs}}{L_{k1}} (1-D-d_2) T_s \end{aligned} \quad (10)$$

마찬가지로 모드 3과 5에서 전류 I_{Do2} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_{Do2} &= \frac{n_1 V_{in} - V_{Cs}}{L_{k1}} (D - d_1) T_s \\
 &= \frac{n_1 V_B + V_{Cs}}{L_{k1}} d_2 T_s
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

전류 i_{Lk1} 의 평균값은 0이어야하므로 평균 출력 전류 I_o 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_o &= (1 - D + d_1 - d_2) \frac{I_{Do1}}{2} \\
 &= (D - d_1 + d_2) \frac{I_{Do2}}{2}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

라. V_o/V_{in}

(2), (3), (4), (10), (11), (12)에서 제안된 컨버터의 전압이득은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2n_1 D(1-2k)}{(D-k(2D-1))(1-D+k(2D-1))}
 \tag{13}$$

여기서 k 는 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8L_{k1}I_o}{n_1 V_{in} D T_s}} \right)
 \tag{14}$$

마. ZVS 조건

S_{c1} 에 대한 ZVS 조건은 아래와 같이 주어진다.

$$I_{m1} + n_1 I_{Do2} + I_{LB1} > 0
 \tag{15}$$

(15)의 좌변의 모든 항은 양의 값을 가지므로 S_{c1} 의 ZVS는 쉽게 달성된다. S_{m1} 의 ZVS는 다음 조건을 만족해야 한다.

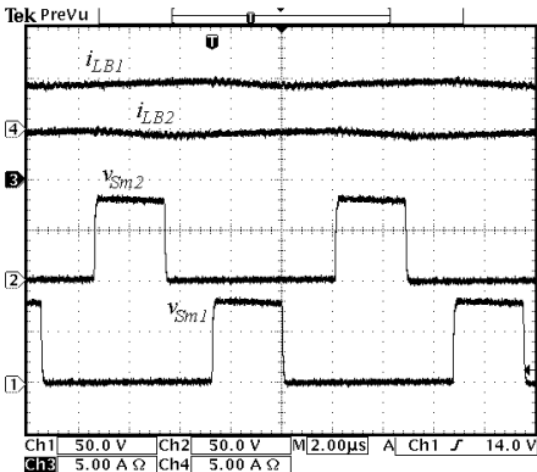


Fig. 3. Experimental waveforms of i_{LB1} , i_{LB2} , V_{Sm1} , and V_{Sm2} . 그림 3. i_{LB1} , i_{LB2} , V_{Sm1} , V_{Sm2} 의 실험파형

$$I_{m1} + n_1 I_{Do1} > I_{LB2}
 \tag{16}$$

바. 스위치와 출력다이오드의 전압 스트레스

그림 1에 도시된 바와 같이, 스위치 양단의 전압은 dc 링크 전압 V_{dc} 로 제한된다. 또한, 출력 다이오드 양단의 전압은 출력 전압 V_o 의 절반인 전압 V_{o1} 에 한정된다.

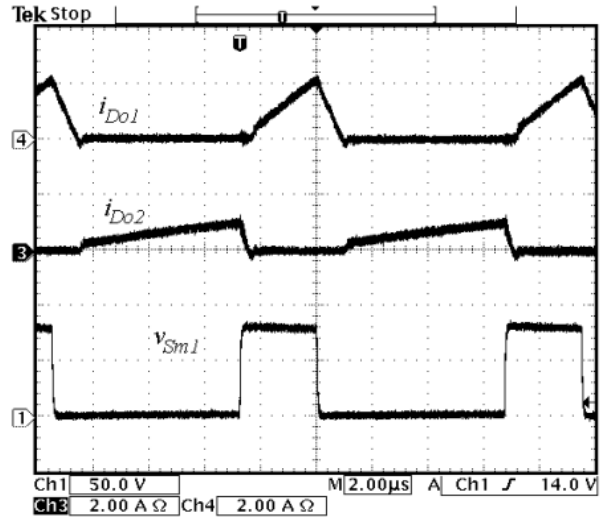


Fig. 4. Experimental waveforms of i_{Do1} , i_{Do2} , and V_{Sm1} . 그림 4. i_{Do1} , i_{Do2} , V_{Sm1} 의 실험파형

3. 실험 결과

인터리빙 동작을 갖춘 제안된 전류 주입식 고승압 DC-DC 컨버터의 프로토타입은 $n_1 = n_2 = 3$, $V_{in} = 24V$, $V_o = 480V$, $L_{B1} = L_{B2} = 320\mu H$, $L_{k1} = L_{k2} = 79\mu H$, $L_m = 170\mu H$, $f_s = 100kHz$, $P_o = 200W$ 사양으로 구현되었다. 그림 3은 i_{LB1} , i_{LB2} , V_{Sm1} 및 V_{Sm2} 의 측정 파형을 보여준다. 그림 4는 출력 다이오드 전류를 보여준다. 변압기의 누설 인덕턴스에 의해 출력 다이오드의 역회복 전류가 크게 감소하고 역회복 문제가 대폭 완화됨을 알 수 있다. 그림 5는 S_{c1} 의 ZVS 동작을 보여준다. 게이트 펄스가 인가되기 전에 스위치 S_{c1} 에 걸리는 전압 v_{Sc1} 은 0이 된다. 따라서, S_{c1} 의 ZVS가 달성된다. 그림 6은 S_{m1} 의 ZVS를 보여준다. 역시 ZVS가 달성됨을 알 수 있다. 전반적으로 이론적인 파형과 유사한 파형이 관측되었다. 그림 3, 4, 5, 6에 나타낸 실험파형을 통해 이론적 해석이 적절히 수행되었음을 알 수 있다. 제안된 컨버터의 측정된 최대 효율은 120W에서 94.8%이다. 전부하 조건에서 94.2%의 효율을 나타낸다. 파워 반도체 소자들의 소프트 스위칭 특성과 출력다

이오드의 역 회복 문제 완화로 인해 전체 효율이 향상됨을 알 수 있다.

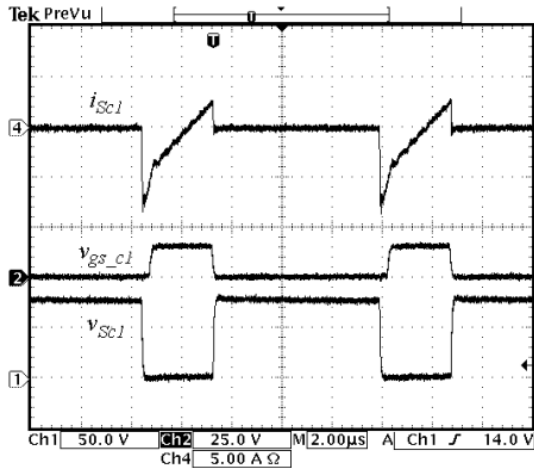


Fig. 5. Measured ZVS waveforms of S_{c1} .
그림 5. 측정된 S_{c1} 의 ZVS 파형

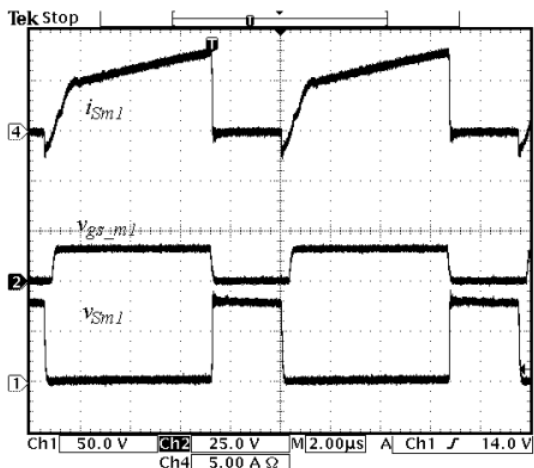


Fig. 6. Measured ZVS waveforms of S_{m1} .
그림 6. 측정된 S_{m1} 의 ZVS 파형

III. 결론

인터리브드된 전류 주입형 고승압 DC-DC 컨버터가 제안되었다. 제안된 DC-DC 컨버터에는 두 개의 컨버터 모듈이 사용된다. 입력단이 병렬로 연결되고 출력단이 직렬로 연결된 구조이다. 2개의 컨버터 모듈의 인터리빙 동작으로 입력 전류 리플이 줄어들고, 비교적 작은 변압기 권선비로 높은 전압 이득을 얻을 수 있다. 스위치와 출력 다이오드의 소프트 스위칭 동작으로 인해 고효율이 달성된다.

References

- [1] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no.5 pp.1184-1194, 2004.
DOI: 10.1109/TPEL.2004.833453
- [2] R. J. Wai, W. H. Wang, and C. Y. Lin, "High-performance stand-alone photovoltaic generation system," *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol.55, no.1, pp. 240-250, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2007.896049
- [3] C. Wang and M. H. Nehrir, "Power management of a standalone wind/photovoltaic/fuel cell energy system," *IEEE Trans. Energy Convers.* vol.23, no.3, pp.957-967, 2008.
DOI: 10.1109/TEC.2007.914200
- [4] R. J. Wai and W. H. Wang, "Grid-connected photovoltaic generation system," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol.55, no.3, pp. 953-964, 2008. DOI: 10.1109/DRPT.2008.4523838
- [5] R. J. Wai, C. Y. Lin, R. Y., Duan, and Y. R. Chang, "High-efficiency power conversion system for kilowatt-level distributed generation unit with low input voltage," *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol.55, no.10, pp.3702-3714, 2008.
DOI: 10.1109/TIE.2008.921251
- [6] K. Kobayashi, H. Matsuo, and Y. Sekine, "Novel solar-cell power supply system using a multiple-input DC-DC converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol.53, no.1, pp.281-286, 2006.
DOI: 10.1109/INTLEC.1998.793656
- [7] S. K. Mazumder, R. K. Burra, and K. Acharya, "A ripple-mitigating and energy-efficient fuel cell power-conditioning system," *IEEE Trans. Power Electron.* vol.22, no.4, pp.1437-1452, 2007.
DOI: 10.1109/TPEL.2007.900598
- [8] X. Kong and A. M. Khambadkone, "Analysis and Implementation of a High Efficiency, Interleaved Current-Fed Full Bridge Converter for Fuel Cell System," *IEEE Trans. Power Electron.* vol.22, no.2, pp. 543-550, 2007.
DOI: 10.1109/TPEL.2006.889985
- [9] S. Pradhan, S. K. Mazumder, J. Hartvigsen,

and M. Hollist, "Effects of electrical feedbacks on planar solid-oxide fuel cell," *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, vol.4, no.2, pp.154-166, 2007.

DOI: 10.1115/1.2713773

[10] W. Choi, P. N. Enjeti, and J. W. Howze, "Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current," *J. Power Source*, vol.158, no.2, pp.355-361, 2006. DOI: 10.1109/APEC.2004.1295834

[11] T. Bhattacharya, V. S. Giri, K. Mathew, and L. Umanand, "Multiphase bidirectional flyback converter topology for hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 56, no.1, pp. 78-84, 2009. DOI: 10.1109/TIE.2008.2004661

[12] W. Yu, H. Qian, and J. H. Lai, "Design of high-efficiency bidirectional DC-DC converter and high-precision efficiency measurement," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.25, no.3 pp.650-658, 2010.

DOI: 10.1109/IECON.2008.4758036

[13] J. Zhang, J. Lai, R. Kim, and W. Yu, "High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol.22, no.4, pp.1145-1153, 2007.

DOI: 10.1109/TPEL.2007.900462

BIOGRAPHY

Junho Lee (Member)



1988 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
 1991 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
 2005 : PhD degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1998~ : Associate Professor, Seoul National University of Science and Technology.