

연료전지 발전시스템에 적합한 새로운 능동 클램프 Sepic-Flyback 컨버터의 개발

李泰遠^{*}, 張水珍^{*}, 金湫石^{**}, 李秉國^{***}, 元忠淵[†], 金學成^{****}

Design of Suitable a New Active Clamp Sepic-Flyback Converter for a Fuel Cell Generation System

T.W. Lee, S.J. Jang, S.S. Kim, B.K. Lee, C.Y. Won and H.S. Kim

요 약

풍력, 태양광, 연료전지와 같은 신·재생 에너지에 관한 연구가 활발해 지면서 컨버터, 인버터와 같은 PCS (Power Conditioning System)의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 부하에 따라 가변되는 저전압, 대전류, 출력특성을 갖는 연료전지 발전 시스템에서는 PCS의 연구 및 개발이 어려운 실정이다.

본 논문에서는 연료전지를 이용한 발전시스템에 알맞은 능동 클램프 sepic-flyback 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 중간 탭 변압기를 이용하여 sepic, flyback 컨버터를 결합한 구조를 가진다. 변압기를 이용하는 종래의 토폴로지에 비해 변압기 이용률을 높일 수 있고, 변압기의 변환 비 및 파워 스위치 소자의 수를 줄일 수 있으며, 고효율 운전특성을 갖는다.

본 논문에서는 시뮬레이션과 실험을 통하여 컨버터의 동작특성을 비교 분석하였으며, PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)을 이용하여 제안된 컨버터의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, an active clamping sepic-flyback converter has been proposed, which is suitable for a fuel cell based power generation system. The proposed converter is superposition of sepic converter mode and flyback mode. It has outstanding high boosting output voltage, component utilization and high efficiency characteristics under the inherently severe low output voltage of the fuel cell generator.

In this paper, the validity of the proposed converter has been verified by the informative simulation and experimental results that make used of the PEMFC.

Key Words : sepic-flyback converter, Fuel Cell Generation System, Fuel Cell Simulator, PEMFC

1. 서 론

최근 급격한 전력수요 증가에 따른 전원확보,

환경문제에 따른 CO₂ 규제 등을 해결하기 위하여 공해요인이 적으며 에너지 변환 효율이 높은 연료전지 발전 시스템에 대한 관심이 증가되고 있다^[1].

연료전지 발전시스템은 연료로부터 수소를 발생시키는 개질기와 전기화학반응으로 직류를 발생시키는 스택 그리고 직류를 교류로 변환시키는 전력변환기로 구성된다.

연료전지는 저전압, 대전류의 출력 특성을 가지므로, 상용에서 사용하기 위해선 dc-dc 컨버터를 사용하여

[†]교신저자 : 정희원, 성균관대 정보통신공학부 교수

E-mail : won@yurim.skku.ac.kr

^{*}정희원, 성균관대 메카트로닉스공학과 박사과정

^{**}정희원, 서울산업대 전기공학과 조교

^{***}정희원, 성균관대 정보통신공학부 조교수

^{****}정희원, 동양공전 자동화시스템과 부교수

접수일자 : 2006. 1. 12 1차 심사 : 2006. 2. 9

2차 심사 : 2006. 3. 24 심사완료 : 2006. 4. 3

낮은 출력 전압을 승압하고, dc-ac 인버터를 사용하여 교류로 전환하여야 한다. 따라서 연료전지가 효율이 뛰어나다 하더라도 전력변환 부분의 효율이 저하되면 높은 효율의 발전효율을 기대할 수 없다. 이에 본 논문은 전력변환 부분의 효율을 높일 수 있는 sepic-flyback 컨버터를 제안한다.

기존의 연료전지용 승압형 컨버터로서 풀 브리지 컨버터와 하프브리지 컨버터등이 있으나, 이러한 컨버터의 경우는 높은 권수비로 인한 손실을 감수하여야 했다. 제안된 컨버터는 종래의 컨버터 토폴로지에 비해 변압기 이용률을 높일 수 있고, 변압기의 변환 비 및 파워 스위치 소자의 수를 줄일 수 있으며, 고효율 운전특성을 갖는다.

본 논문에서는 제안된 sepic-flyback dc-dc 컨버터와 dc-ac 인버터를 사용하여 연료전지 발전시스템을 위한 전력변환 장치를 구성하였고, 1.2kW급 PEMFC (Ballard, Nexa Power Module)를 이용하여 제안된 시스템의 타당성을 검증하였다.

2. 능동 클램프 sepic-flyback 컨버터를 적용한 연료전지 발전 시스템^[2,3]

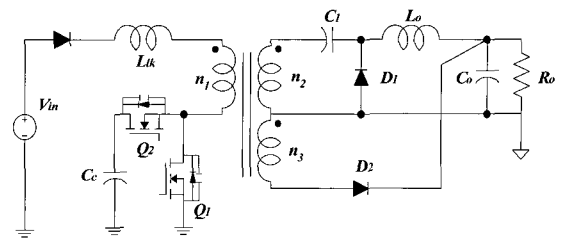
2.1 Sepic-flyback 컨버터

본 논문은 기존의 sepic-flyback 컨버터의 문제점을 보완하여 보다 나은 연료 전지 발전시스템을 제안한다.

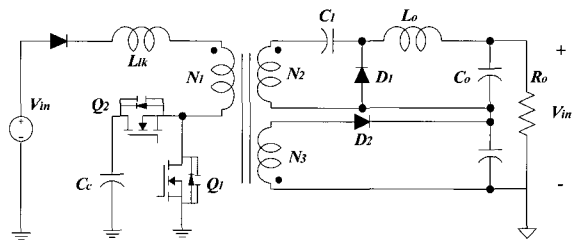
그림 1(a)는 기존의 sepic-flyback 컨버터로서 중간 탭 방식을 이용하여 단일 변압기를 사용하여 sepic 컨버터와 flyback 컨버터를 구현함으로써 변압기의 활용율과 에너지 전달 밀도를 높여 변압기 권수비를 줄이는 이점을 가지고 있다^[2].

기존의 sepic-flyback 컨버터의 경우 flyback 모드 동작시 C1(sepic capacitor)에 축적된 에너지에 의해 변압기를 통한 감자현상이 일어나게 되어 출력을 증가시킬 수 없다는 단점을 갖는다. 반면 그림 1(b)는 기존의 컨버터의 장점을 모두 살리고 중간 탭 방식을 이용함으로써 발생하는 간섭현상을 최소로 줄이기 위하여 중간 탭 부분을 분리시킴으로서 턴-온시와 턴-오프시 발생하는 간섭으로 인한 손실을 줄였다. 아울러 기존의 제안하였던 sepic-flyback 컨버터의 이점을 최대한 살리기 위하여 단일 변압기를 사용하였다.

제안된 sepic-flyback 컨버터는 시비율에 따라 승압 및 강압의 동작을 구현할 수 있는 벅-부스트 컨버터와 비슷한 동작 특성을 갖는다^[2].



(a) 기존의 제안된 sepic-flyback 컨버터



(b) 제안된 sepic-flyback 컨버터

그림 1 Sepic-flyback 컨버터
Fig. 1 Sepic-flyback converter

2.2 제안된 컨버터의 이론적 해석

그림 2는 제안된 컨버터의 동작특성에 따른 이론적인 파형을 보여준다. 주 스위치 및 보조 스위치에 가해지는 게이트 신호 V_{g1} , V_{g2} , 주스위치 드레인-소스 간 전압 V_{Q1} , 주 스위치와 보조 스위치에 흐르는 전류 I_{Q1} , I_{Q2} , 2차측 다이오드 D_1 , D_2 를 통해 흐르는 전류 I_{D1} , I_{D2} 및 출력 인덕터에 흐르는 전류 I_L 이다.

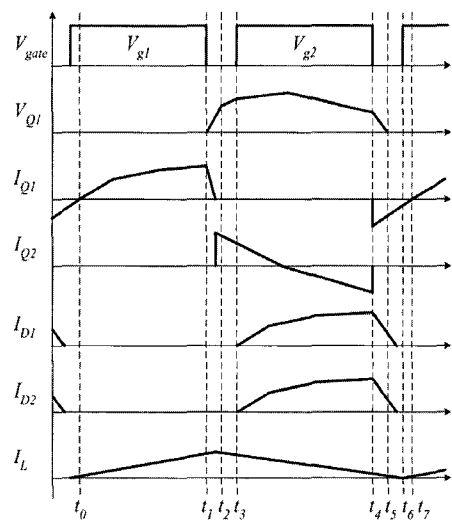


그림 2 이론적 동작 파형
Fig. 2 Theoretical operation waveform

상태 1 : 주 스위치 동작 ($t_0 \sim t_1$)

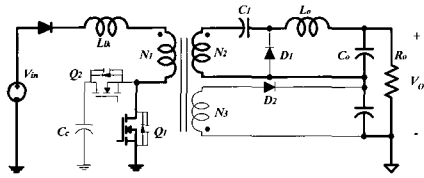
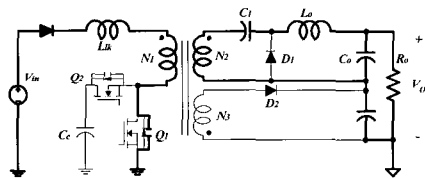


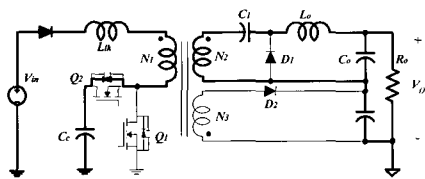
그림 3 상태 1($t_0 \sim t_1$)
Fig. 3 Mode 1($t_0 \sim t_1$)

($t_0 \sim t_1$) : 시간 t_0 에서 컨버터의 주 스위치가 턴-온되며, 클램프회로의 커패시터는 V_{C_c} 만큼 충전된 상태로 주 회로와 연결되지 않은 상태이다. 입력전압 V_{in} 은 변압기 1차측에 공급되며 변압기와 sepic 커패시터 C_1 을 통해 인덕터 L 에 에너지를 축적한다. 이때 다이오드 D_2 는 역 바이어스 상태로 도통하지 않는다.

상태 2 : 주 스위치 턴-오프 ($t_1 \sim t_3$)



(a) $t_1 \sim t_2$



(b) $t_2 \sim t_3$

그림 4 상태 2($t_1 \sim t_3$)
Fig. 4 Mode 2($t_1 \sim t_3$)

($t_1 \sim t_2$) : 주 스위치가 턴-오프 되면 주 스위치의 기생 커패시터 C_{o1} 은 보조 스위치의 내부 다이오드 D_{o2} 를 순 바이어스 시킬 수 있는 전압까지 충전된다.

($t_2 \sim t_3$) : 시간 t_2 에서, 주 스위치에 걸리는 전압 V_{Q1} 은 $V_{in} + V_o/N$ 과 같으며, 보조 스위치 Q_2 의 내부 다이오드 D_{o2} 가 턴-온 된다.

상태 3 : 클램프 동작 ($t_3 \sim t_4$)

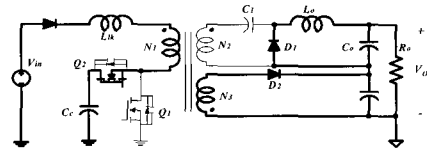


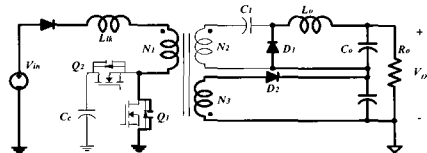
그림 5 상태 3($t_3 \sim t_4$)
Fig. 5 Mode 3($t_3 \sim t_4$)

($t_3 \sim t_4$) : $t_3 \sim t_4$ 구간 동안 클램프 회로(Q_2, D_{o2}, C_c)는 전류 패스를 형성하게 되며, 보조 스위치의 내부 다이오드 D_{o2} 가 도통하는 동안 클램프 커패시터 C_c 는 서서히 충전된다. 이때, 보조 스위치 Q_2 의 영전압 스위칭 조건을 만족하게 된다.

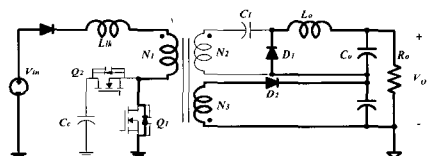
또한, flyback 다이오드 D_2 는 턴-온 되어 I_{D2} 는 서서히 증가하고, sepic 다이오드는 환류를 시작한다.

능동 클램프 회로에 흐르는 전류가 서서히 감소하여 0이 되면, 내부 다이오드 D_{o2} 는 턴-오프되고, 보조 스위치 Q_2 가 턴-온 되어 클램프 커패시터 전압 V_{C_c} 는 서서히 감소하게 된다.

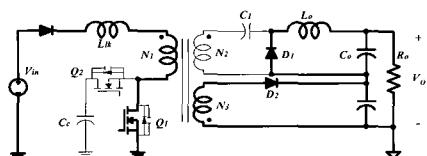
상태 4 : 주 스위치 턴-온 ($t_4 \sim t_7$)



(a) $t_4 \sim t_5$



(b) $t_5 \sim t_6$



(c) $t_6 \sim t_7$

그림 6 상태 4($t_4 \sim t_7$)
Fig. 6 Mode 4($t_4 \sim t_7$)

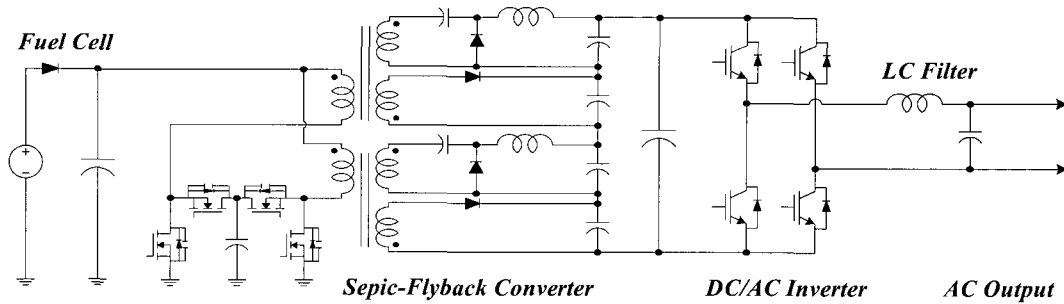


그림 8 연료전지 발전 시스템 구성도
Fig. 8 Configuration of a fuel cell generation system

($t_4 \sim t_7$) : 능동 클램프 스위치 Q_2 가 턴-오프 되면, 누설 인덕터 L_k 에 축적되어 있던 전류는 보조 스위치 내부 커패시터 C_{o2} 를 충전하고 주 스위치의 내부 커패시터 C_{o1} 은 방전을 시작한다. 누설 인덕터의 전류는 주 스위치 내부다이오드 D_{o1} 을 통해 연속적으로 흐르게 되어 ($t_5 \sim t_6$ 구간) 주 스위치의 영전압 턴-온 조건을 만들어 주게 된다.

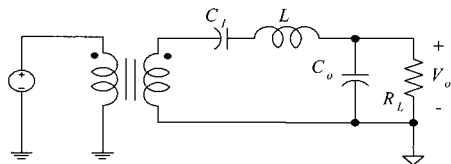
정상상태에서 출력 인덕터의 평균전압 V_L 은 0이며, 제안된 컨버터의 변환비는 수식 (1)과 같다.

$$V_o = \frac{n_2}{n_1} \frac{D}{1-D} V_{in} + \frac{n_3}{n_1} \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (1)$$

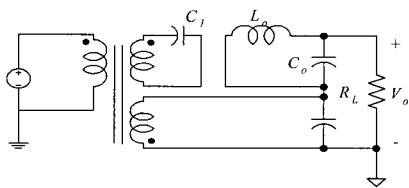
여기서, 변압기 2차측 권수비 n_2, n_3 가 같다면, 입출력 변환비는 수식 (2)와 같다.

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

여기서 $N = n_2/n_1 = n_3/n_1$ 이다.



(a) Sepic 동작 모드



(b) Flyback 동작 모드

그림 7 동작모드에 따른 등가회로
Fig. 7 Equivalent circuit of operational modes

그림 7은 제안된 컨버터의 한주기 스위칭 사이클 동안의 등가회로를 나타낸다. 등가 모델은 스위칭 한 주기 동안 크게 두 가지로 나뉘지며, 주 스위치가 턴-온 하는 구간에서는 sepic 모드로 턴-오프 하는 구간에서는 flyback 모드로 동작한다.

2.3 제안된 연료전지 발전 시스템

그림 8은 능동 클램프 sepic-flyback 컨버터를 적용한 연료전지 발전 시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다. 이 구성도에서는 sepic-flyback 컨버터를 능동 클램프 sepic 컨버터와 능동 클램프 flyback 컨버터를 조합시켜 구성하였으며, 1차측을 병렬구조로 두개의 sepic-flyback 컨버터를 구성하였고, 2차측을 직렬로 연결함으로써 변압기의 권수비를 줄임과 동시에 주 스위치 및 보조스위치의 스트레스를 줄였다^[1].

또한, sepic-flyback 컨버터의 출력을 입력으로 하는 풀 브리지 인버터를 사용하여 DC 전압을 AC 전압 220V/60Hz 로 변환하여 출력하게 된다.

본 논문에서 제안된 연료전지 발전 시스템은 단일 변압기를 이용한 sepic-flyback 컨버터를 적용하여 연료전지의 출력 전압을 승압하고 풀 브리지 인버터를 사용하여 교류 전압을 얻었다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서 제안된 시스템을 PSIM 6.0을 사용하여 시뮬레이션 하였고, 실제 실험에서는 시뮬레이션의 연료전지 부분을 PEMFC (1.2kW Ballard Nexa Power Module)를 사용하여 실험하였다. Sepic-flyback 컨버터의 스위칭 주파수는 100kHz 이며, 풀 브리지 인버터의 스위칭 주파수는 4.5kHz로 하였다. 부하로는 저항 부하를 사용하였다.

그림 9는 실험에서 사용된 실제 PEMFC의 전압전류 특성곡선을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 실제 연료전지 특성을 고려한 입력을 사용하지 않았으며, 컨버터의 동작특성만을 확인하였다.

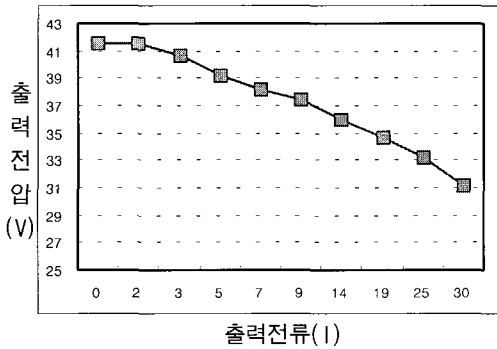


그림 9 연료전지 출력 특성곡선
Fig. 9 Output characteristics of fuel cell

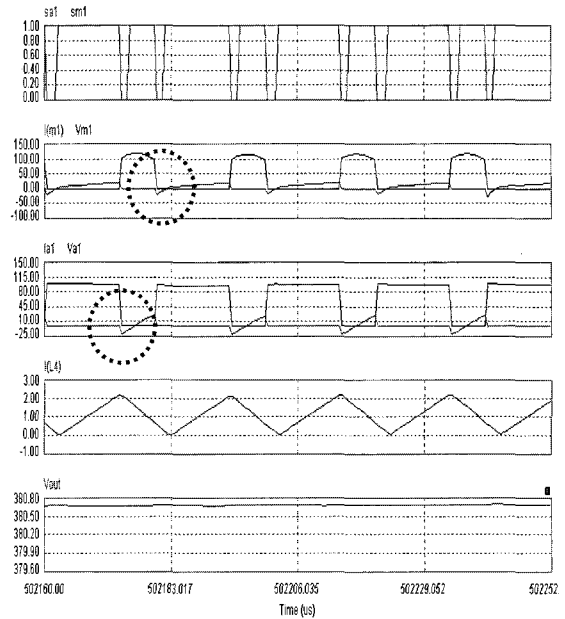
표 1은 본 논문에서 사용된 sepic-flyback 컨버터의 파라미터를 나타낸다.

표 1 sepic-flyback 컨버터 파라미터
Table 1 Parameters of sepic-flyback converter

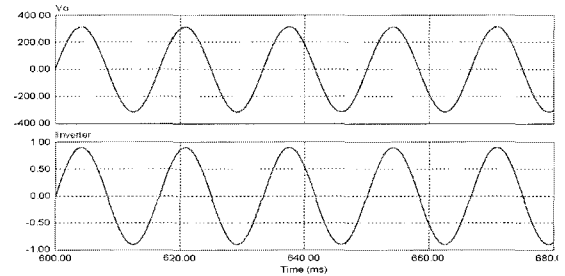
입력전압	V_{in}	24-40Vdc
출력전압	V_o	380Vdc
스위칭 주파수	f_s	100kHz
변압기 권수비	N	1:3.5
출력 인덕터	L_o	2.5mH
출력 커패시터	C_o	830uF

3.1 시뮬레이션

그림 10은 본 논문에서 제안된 전체 시스템의 시뮬레이션 결과로 컨버터의 각부 파형과 인버터 최종 출력파형을 보여준다.



(a) 컨버터 각부 출력파형

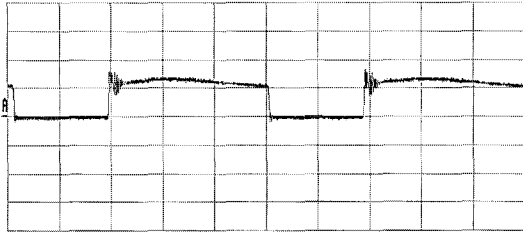


(b) 인버터 출력파형

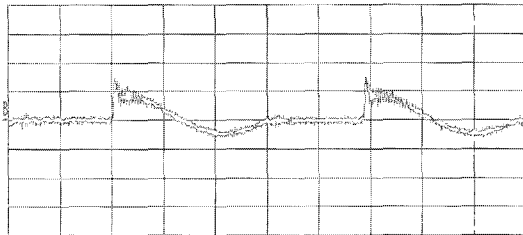
그림 10 시뮬레이션 각부 파형
Fig. 10 Simulation waveform of the system

그림 10 (a)는 제안된 컨버터 각부의 파형을 보이고 있으며, 주 스위치 게이트 신호 (sm1)와 보조 스위치의 게이트 신호 (sa1)를 기준으로 주 스위치 전압 (Vm1) 및 전류 (Im1), 보조 스위치 전압 (Va1) 및 전류 (Ia1), 출력 인덕터 전류 (IL), 출력전압 (Vout)을 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이 컨버터의 주 스위치와 보조 스위치에서 ZVS 동작이 이루어짐을 확인할 수 있으며, 이론적인 파형 (그림 2)과 유사한 출력을 내는 것을 확인할 수 있다. 그림 10 (b)는 단상 인버터의 출력전압 및 전류를 보이고 있으며 단위 역률로 잘 제어 되고 있는 것을 시뮬레이션 결과로 확인할 수 있다.

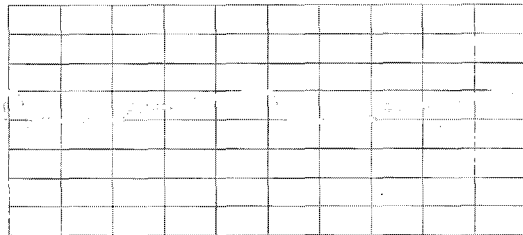
3.2 실험 결과



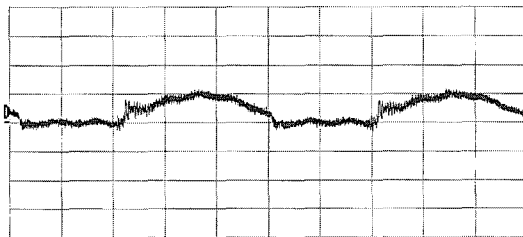
(a) 주 스위치 양단 전압 (50V/div)



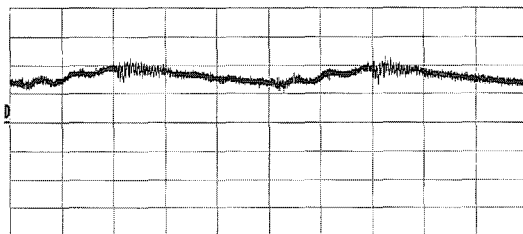
(b) 보조 스위치 전류 (20A/div)



(c) Flyback 다이오드 전류 (2A/div)



(d) Sepic 다이오드 전류 (2A/div)

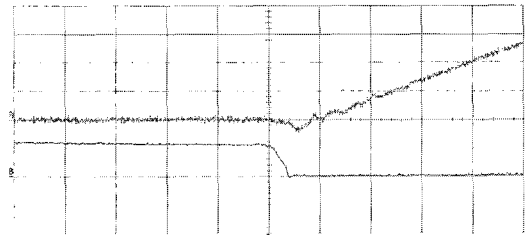


(e) 인덕터 전류 (0.5A/div)

그림 11 제안된 컨버터의 각부파형 (2us/div)
Fig. 11 Voltage and current waveforms of the proposed convert

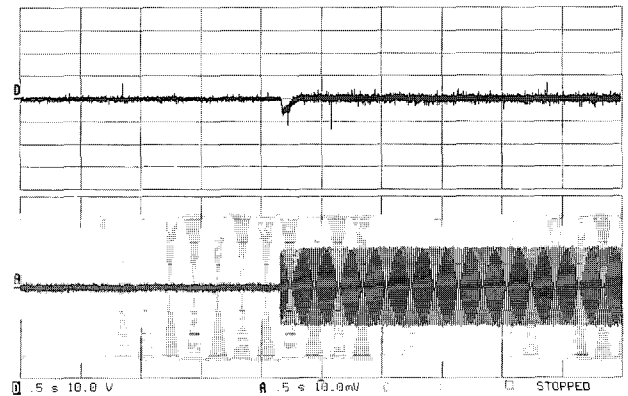
그림 11은 제안된 sepic-flyback 컨버터의 각부 실험파형을 나타낸다. 그림 11 (a)는 주 스위치 양단전압파형으로 턴-오프 구간에서 주 스위치의 드레인-소스간 전압이 안정적으로 클램프 되도록 함으로써 스위치의 전압스트레스로 인한 손실을 줄였다.

그림 12는 턴-온 시 주 스위치의 전압전류파형이며, ZVS 동작이 잘 이루어짐을 알 수 있다.



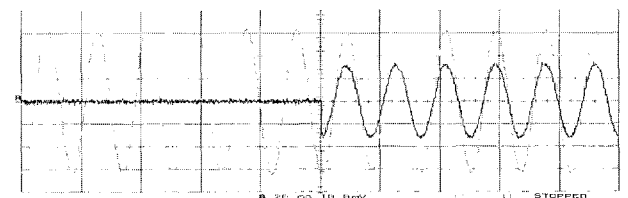
위 : 주 스위치 전류 (5A/div)
아래 : 주 스위치 전압 (50V/div)

그림 12 주 스위치의 ZVS 파형 (0.2us/div)
Fig. 12 ZVS waveform of main switch



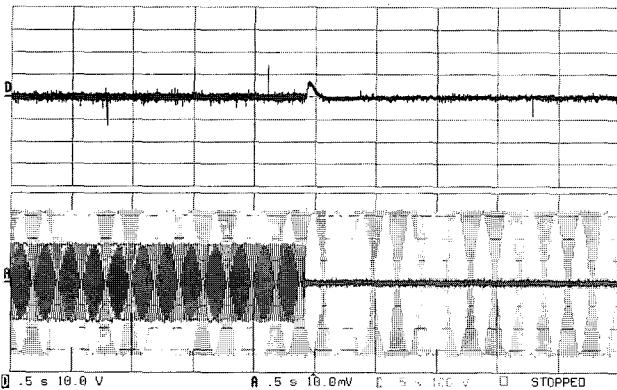
위 : dc-link단의 ac 응답
아래 : 인버터의 출력전압 및 전류

(a) (위 : 10V/div, 아래 : 100V/div, 2A/div, 0.5s/div)



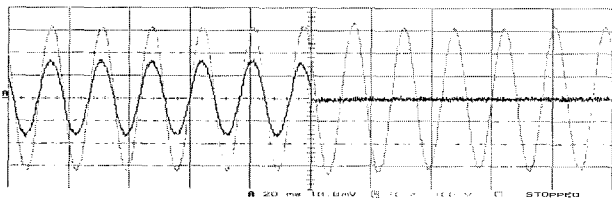
(b) 확대한 인버터 출력파형 (100V/div, 2A/div, 20ms/div)

그림 13 제안된 시스템의 동특성 응답 (무부하 → 500W)
Fig. 13 Dynamic response of proposed system (no load → 500W)



위 : dc-link단의 ac 응답
아래 : 인버터의 출력전압 및 전류

(a) (위 : 10V/div, 아래 : 100V/div, 2A/div, 0.5s/div)



(b) 확대한 인버터 출력파형 (100V/div, 2A/div, 20ms/div)

그림 14 제안된 시스템의 동특성응답 (500W → 무부하)
Fig. 14 Dynamic response of proposed system
(500W → no load)

그림 13과 그림 14는 본 논문에서 제안한 연료전지 발전 시스템의 실험 파형을 나타낸다. 실험은 실제 연료전지인 PEMFC (1.2kW Ballard Nexa Power Module)를 사용하였다.

그림 13 (a)는 제안된 연료전지 발전 시스템에서 출력측 부하를 무부하에서 500W 상태로 급변했을 때의 sepic-flyback 컨버터의 출력전압의 ac 응답파형과 인버터 출력 단에서 전압과 전류파형을 나타낸다. 실험결과에서도 알 수 있듯이 dc-link단 전압의 리플이 약 5V 정도로 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 그림 13 (b)는 그림 13 (a)의 부하변동시의 인버터 출력전압 및 전류를 확대한 파형을 나타낸다.

그림 14는 출력측 부하를 500W에서 무부하로 급변했을 때 컨버터와 인버터 각각의 출력파형을 나타낸다. 그림 14 (b)는 인버터 출력전압 및 전류를 확대한 파형을 나타낸다.

그림 13과 그림 14의 실험 결과를 통해서 알

수 있듯이 부하의 급변 시에도 제안된 컨버터가 안정적으로 dc-link 단 전압을 제어됨을 알 수 있으며, 연료전지 발전 시스템에 적합함을 확인하였다.

4. 결 론

새로운 형태의 sepic-flyback 컨버터를 적용한 연료전지 발전시스템이 연료전지 시스템의 적합함을 보였다. 기존의 제안되었던 sepic-flyback 컨버터의 비해 주 스위치 양단간 전압 스트레스를 줄였으며, 변압기의 권수비도 1:4.4에서 1:3.5로 줄일 수 있었으며 2차측이 분리된 중간탭 변압기를 사용함으로써 2차측의 상호간섭을 줄일 수 있었다. 기존의 제안된 컨버터의 경우 90.4% 정도의 효율을 지나 본 논문에서 제안된 컨버터의 경우 약 4% 정도의 효율 개선을 가져왔다. 또한 부하의 급변에도 잘 제어가 됨을 확인하였다. 이와 같은 실험 결과로부터 본 논문에서 제안한 컨버터가 연료전지 발전 시스템의 적합함을 확인하였다.

이 논문은 한국 전력 연구원에서 지원된 과제 of 일 환으로 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국조명·전기설비학회, “조명·전기설비”, Vol. 19, No. 2, pp. 3-11, 2005, 4.
- [2] 강구삼, 장수진, 이태원, 김수석, 원충연, “단일 변압기를 사용한 SEPIC-Flyback 컨버터의 연료전지 발전 시스템”, 전력전자 하계 학술대회 학술지, pp. 357-359, 2005, 7.
- [3] S.S Kim, D.K. Choi, S.J. Jang, T.W. Lee, C.Y. Won, “The Active Clamp Sepic-Flyback Converter,” IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 1209-1212, 2005.
- [4] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, “Fundamental of Power Electronics,” International Thomson publishing.
- [5] I. D. Jitaru, S. B. Galateanu, “Small Signal Characterization of the Forward-Flyback Converters with Active Clamp,” IEEE-APEC Conf. Rec., vol.2, pp. 626-632, 1998.
- [6] H. Terashi, I. Cohen, T. Ninomiya, “Stability and dynamic response improvement of flyback DC-DC

converter by a novel control scheme," IEEE-APEC Conf. Rec., vol.1, pp. 389-394, 2002.

[7] Dhaval Dalal, "Design Consideration for Active Clamp and Reset Technique," Application handbook, Unitrode.

저 자 소 개



김학성(金學成)

1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~1997년 한국전기연구원(Post Doc). 1997년~현재 동양공업전문대 자동화시스템과 부교수.

템과 부교수.



이태원(李泰遠)

1971년 7월 14일생. 2000년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.



장수진(張水珍)

1976년 7월 13일생. 2002년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2004년 성균관대 에너지시스템공학과 졸업(석사). 2006년 현재 성균관대 메카트로닉스공학과 박사과정.



김수석(金漱石)

1959년 1월 16일생. 1984년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 서울산업대 전기공학과 조교.



이병국(李秉國)

1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학). 2001년~2003년 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년~2005년 한국전기연구원 전력전자 그룹 선임연구원. 2005년~2006년 성균관대 정보통신공학부 연구교수. 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



원충연(元忠淵)

1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~1992년 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문교수. 2003년~2004년 전력전자학회 부회장. 1988년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수.