

TMS320C31 DSP칩에 의해 제어되는 연료전지용 전력변환장치의 설계

§ 문상필·권순걸·서기영·김영문*
 경남대학교 · 마산대학

Design of fuel cell power conversion system controlled by TMS320C31 DSP Chip

§ S.P.Mun · S.K.Kwon · K.Y.Suh · Y.M.Kim**
 Kyung-nam University · Masan College**

Abstract - Recently, a fuel cell with low voltage and high current output characteristics is remarkable for new generation system. It needs both a DC-DC step-up converter and DC-AC inverter to be used in fuel cell generation system. Therefore, this paper, consists of an isolated DC-DC converter to boost the fuel cell voltage 380[V_{DC}] and a PWM inverter with LC filter to convert the DC voltage to single phase 220[V_{AC}]. Expressly, a tapped inductor filter with freewheeling diode is newly implemented in the output filter of the proposed high frequency isolated ZVZCS PWM DC-DC converter to suppress circulating current under the wide output voltage regulation range, thus to eliminate the switching and transformer turn-on/off over-short voltage or transient phenomena. Besides the efficiency of 93~97[%] is obtained over the wide output voltage regulation ranges and load variations.

1. 서 론

다양한 에너지 자원의 효율적 활용 및 고품질의 전력을 공급하기 위한 방법으로 태양광 발전, 연료전지 발전, 열병합 발전, 풍력 발전 등의 연구가 활발히 전개되고 있다. 연료전지는 다양한 연료를 사용할 수 있고, 저공해 특성을 가지고 있다. 그리고 부하가 밀집된 대도시 혹은 변전소에 분산 설치가 용이하여 송전 손실을 줄일 수 있고, 또 운전중에 발생하는 열을 이용하여 열병합 발전이 가능하여 가장 효율적인 차세대 에너지 전원으로 주목 받고 있다.

연료전지 스택은 일반적으로 27~48[V_{DC}] 정도의 직류를 출력하므로 이를 최대 400[V_{DC}] 정도로 승압하여 60[Hz]의 교류로 변환시키는 전력변환장치가 필요하다. 또한 연료전지 특성상 에너지 저장 능력이 없으므로 시스템 초기 기동시나 부하의 급변에 따른 속응성 능력을 부여하기 위해서 일반적으로 배터리나 슈퍼 캐패시터 등의 에너지저장장치를 병합하여 사용하는 하이브리드 시스템의 구조를 갖는다. 연료전지용 전력변환기의 토폴로지는 연료전지의 출력전압, 용량 및 응용 분야에 따라 다양한 형태가 있다. 연료전지의 낮은 직류 전압을 인버터로 교류변환 후 변압기를 이용하여 승압하는 교류-교류 승압 방식은 비교적 높은 효율을 얻을 수 있지만 저주파 변압기를 사용하므로 무게와 부피가 커지며, 직류 전압을 조정하기 어려우므로 출력전압의 품질이 저하되는 단점을 가지고 있다. 직류-직류 승압 방식에 사용하는 고주파 변압기는 부피 및 무게가 작아 전체 변환기의 소형화가 가능하며, 직류 링크전압이 조정 가능하므로 출력전압의 품질이 향상된다. 연료전지의 출력전압이 낮은 경우 boost 컨버터, buck-boost 컨버터 등의 비절연 컨버터방식으로는 높은 승압비를 구현하기 어려우므로 고주파 변압기를 사용하는 절연형 방식을 주로 사용한다. 하지만 flyback 방식과 forward 방식은 변압기의 이용률이 낮기 때문에 full-bridge, half-bridge, pull -full 형태

의 컨버터를 적용한다. 또한 승압용 컨버터의 2차측 형태에 따라 중간 탭 방식과 브리지 방식으로 선택할 수 있으며, 연료전지 시스템의 용량이 클 경우 복수대의 소용량 컨버터를 사용하는 다중형을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 연료전지 대신에 실제 연료전지의 V-I 출력 특성을 갖는 시뮬레이터를 제작, 사용하였으며, 380[V_{DC}]로 승압하기 위한 풀-브리지 DC-DC 컨버터, 승압되어진 전압을 상용부하에 공급하기 위한 3[kW]급 단상 풀-브리지 DC-AC 인버터를 설계하고 제작하였다. 또한, 전력을 충·방전할 수 있는 양방향 DC-DC 컨버터로 연료전지의 느린 출력 응답특성을 보완할 수 있음을 실험을 통해 타당성을 증명하고자 한다.

2. 제안한 연료전지용 전력변환장치

일반적으로 연료전지용 전력변환장치의 토폴로지는 연료전지의 출력전압, 용량 및 응용분야에 따라 다양한 형태가 있기 때문에 설계자에 따라 최적의 방식을 선택하여야 한다. 표 1은 일반적으로 연료전지 발전시스템에 적용되어지는 전력변환장치들의 장·단점을 나타낸 것이다.

표 1 일반적인 연료전지 발전시스템용 전력변환장치
 Table. 1 Conventional fuel-cell generation system power conversion system

	Primary	Secondary	Efficiency	Character
	Push-Pull Type	Half-Bridge Type	Discharge : 90[%] Charge : 87[%]	· Low Power · A Few Devices
	Full-Bridge Type	Full-Bridge Type	Discharge : 94[%] Charge : 91[%]	· Charge : ZVZCS · ZVZCS · Active Clamper · High Medium Power
	Push-Pull Type	Forward Type	Discharge : 80[%]	· Medium Power

표 1에서 비절연방식의 컨버터는 높은 승압비를 얻기 어려우므로 고주파 변압기를 사용하는 절연 방식을 주로 사용하였으며, 코아 이용률이 낮은 토폴로지에 대해서는 고려하지 않았다. 그리고 절연형 풀-브리지 컨버터는 스위치의 턴-오프시 스위치에 흐르던 전류가 변압기의 누설 인덕터에 의하여 갑자기 전류의 방향을 바꿀 수 없기 때문에 누설 인덕터에 의해 급격한 전압 변화가 생긴다. 이러한 갑작스러운 전압의 증가는 소자의 파손을 가져올 수 있으며, 고주파 동작에서의 스위칭 손실을 발생시켜 심각한 노이즈 발생의 근원으로 작용한다. 이러한 문제

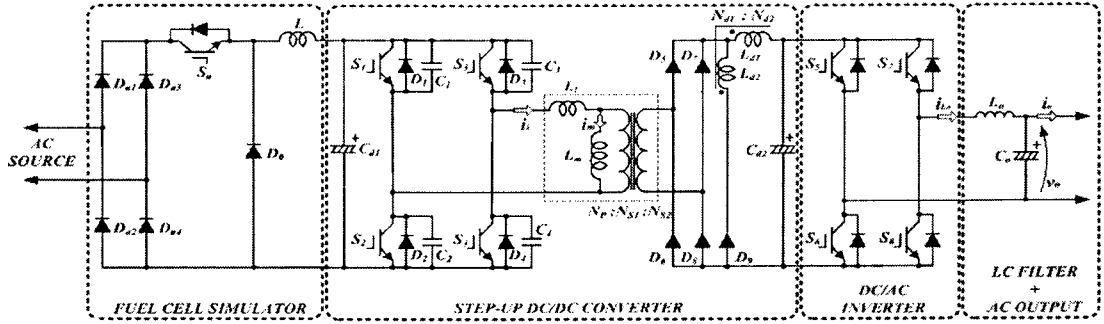


그림 1 제안한 연료전지 발전시스템의 구성도

Fig. 1 Composition of proposed fuel-cell generation system

를 해결하기 위하여 저항과 커패시터로 구성된 RCD 스너버 회로가 사용되어지고 있지만 저항에서의 손실로 대전력 응용에는 적합하지 못한 단점이 있다.

그림 1은 제안한 연료전지 발전시스템의 전체 구성도를 나타낸 것이다. 제안한 연료전지 발전용 전력변환시스템은 Ballard사의 3.0[kW]급 연료전지와 연료전지의 저전압(39~60[VDC])을 승압(380[VDC])시키기 위한 DC-DC 컨버터, 그리고 승압된 DC link 전압을 교류 전압(220[VAC], 60[Hz])으로 변환하기 위한 단상 풀-브리지 인버터로 구성되어 가정용 기기에 적용이 가능하게 된다. 그림1에서 먼저 연료전지용 시뮬레이터는 마이크로프로세서에 의해 제어 블록도에서 출력전압 및 전류를 검출하여 A/D 컨버터를 통해 DSP로 입력되면 연료전지의 V-I 특성 곡선에 해당하는 기준값을 생성하여 D/A 컨버터로 출력하며, D/A 컨버터를 통해 출력된 아날로그 신호는 스위치를 제어하기 위해 PWM 제너레이터 회로의 입력으로 사용되어 강압용 컨버터의 게이트 신호로 인가되도록 제어하였다.

그리고 기존의 DC-DC 컨버터에 순환 전류를 저감시키기 위하여 환류 다이오드와 인덕터 필터를 부가한 PWM DC-DC 컨버터를 구성하였으며, 구성된 컨버터의 기준 스위치 S1, S2는 무손실 스너버 커패시터 C1, C2에 의하여 ZVS로 동작되며, 고주파 변압기 Tr의 자화 인덕턴스 L1는 제어 스위치 S3과 S4의 ZCS 턴-온 동작에 필요한 무손실 스너버 인덕턴스로 이용하였다. 그리고 환류 다이오드 D9는 탭부 인덕터의 Ld2와 직렬로 접속되어 필터 역할을 함으로써 순환 전류를 저감시키는 동시에 스위치 S3과 S4를 ZCS 턴-오프 동작이 가능하게 하였다. 그림 2는 이상적이고 실제적인 연료전지 전압과 전류 특성을 나타낸 것이다.

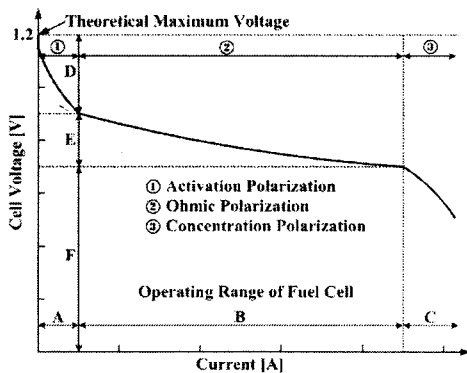


그림 2 이상적이고 실제적인 연료전지 전압/전류 특성
Fig. 2 Ideal and actual fuel cell voltage/current characteristic

표 2는 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수를 나타낸 것이다. 그림 3은 연료전지를 시뮬레이터화하여 나온 전압과 전류의 시뮬레이션 파형을 나타낸 것이다.

표 2 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수
Table 2 Circuit parameter using experiment and Simulation

구분	회로정수	값
연료전지 시뮬레이터	용량	3[kW]
	입력전압	311[Vdc]
	스위칭주파수	15[kHz]
	출력전압	39~60[Vdc]
	출력전류	41.6~76.9[A]
	출력 인덕턴스(L)	2.2[mH]
ZVS ZCS PS-PWM DC-DC 컨버터	용량	3[kW]
	입력전압	39~60[Vdc]
	스위칭주파수	17[kHz]
	변압기 권수비	1:13
	변압기 여자인덕턴스	70[uH]
	자화인덕턴스	300[uH]
	탭부 인덕턴스 Ld1	70[uH]
	Ld2	11[uH]
	무손실 스너버 커패시터	20[nF]
	출력전압	380[Vdc]
출력전류	7.5[A]	
출력 인덕턴스(L)	2.5[mH]	
출력 커패시턴스(C)	1100[uF]	
단상 풀-브리지 인버터	입력전압	380[Vdc]
	출력전압	220[Vac]
	스위칭주파수	4.5[kHz]
	출력 인덕턴스(L)	900[uH]
출력 커패시턴스(C)	20[uF]	

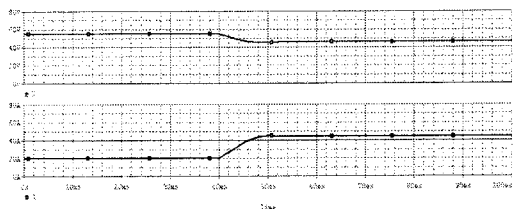


그림 3 연료전지 시뮬레이터 전압과 전류의 시뮬레이션 파형
Fig. 3 Simulation waveform of fuel cell simulator voltage and current

그림 4는 제안한 연료전지용 DC-DC 컨버터의 각부 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이며, 점선은 일반적인 연료전지용 DC-DC 컨버터의 파형을 나타낸 것이다. 제안한 컨버터의 제어기는 마이크로프로세서를 이용하여 출력전압을 검출하여 제어하고자 하는 기준전압과 비교하고, PI제어기를 거쳐 컨버터를 구성하고 있는 스위치의 게이트 신호를 만들게 된다. 또한, 시스템 보호를 위하여 입력전압, 출력전압 및 전류에 대한 과전압, 과전류, 저전압 보호기능을 가지게 하였다.

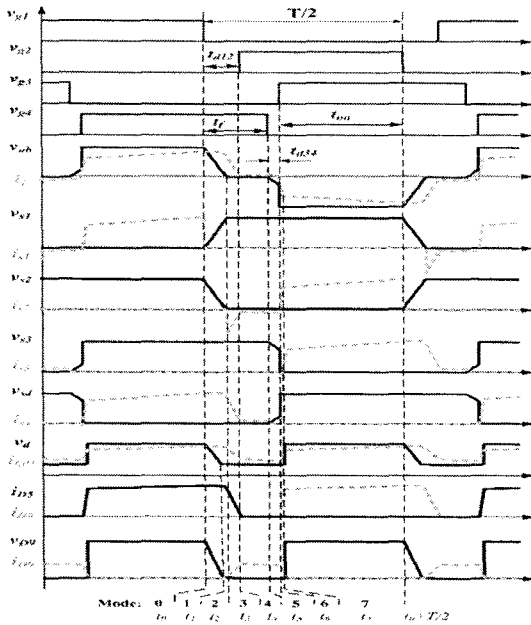


그림 4 DC-DC 컨버터의 각부 전압과 전류 동작 파형
 Fig. 4 The each voltage and current operation waveform of DC-DC converter

그림 5는 실험으로 측정된 연료전지 V-I 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 Ohmic 영역에서의 연료전지 특성을 잘 나타내고 있다.

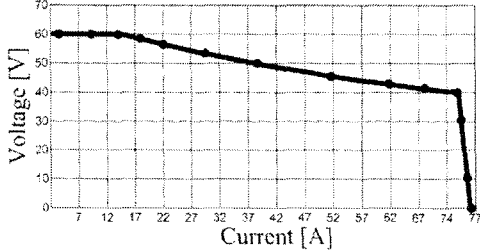


그림 5 연료전지의 V-I 특성 곡선
 Fig. 5 V-I Characteristic of fuel cell

그림 6은 실험에 사용된 연료전지용 전력변환장치의 실제사진을 나타낸 것이다. 그림 7은 중부하시 기존의 DC-DC 컨버터(그림 7(a))와 제안한 DC-DC 컨버터(그림 7(b))의 고주파 변압기 1차측의 전압 v_{ab} 과 전류 i_L 의 파형을 나타낸 것이다. 그림 7에서 기존의 DC-DC 컨버터보다 제안한 DC-DC 컨버터에서 순환 전류가 저감되는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 제안한 DC-DC 컨버터의 각부 실험 파형을 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 스위치 S_2 와 S_4 의 파형이며, 그림 8(b)는 정류 전압 v_d 와 플라휠링 다이오드 D_2 의 전류 i_{D2} 의 파형이다.

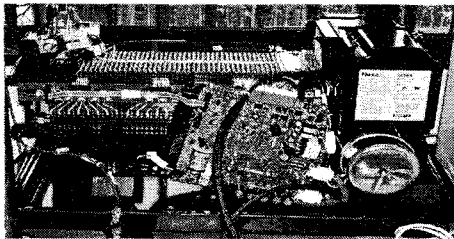
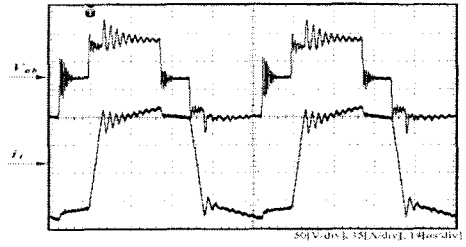
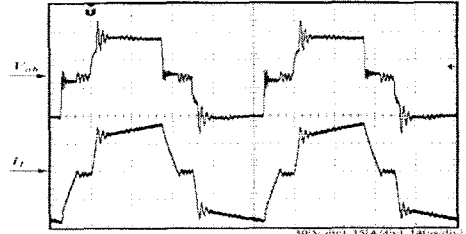


그림 6 연료전지용 전력변환장치의 외형
 Fig. 6 The external fuel cell power conversion system

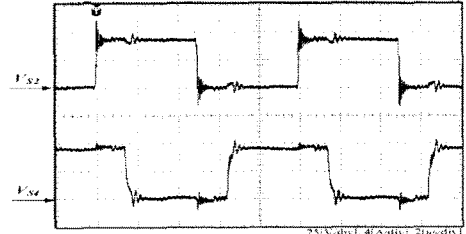


(a) Conventional DC-DC converter

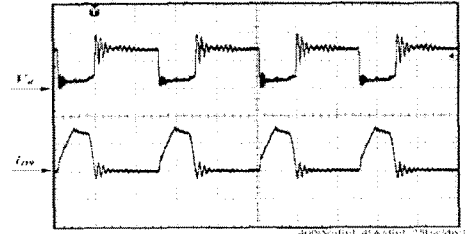


(b) Proposed DC-DC converter

그림 7 중부하시 고주파 변압기의 1차측의 전압 v_{ab} 과 전류 i_L 의 파형
 Fig. 7 High frequency transformer primary side voltage v_{ab} and current i_L waveforms under full load condition



(a) Voltage waveforms across switches S_2 and S_4



(b) Rectified voltage v_d free-wheeling diode current i_{D2} waveforms

그림 8 제안한 DC-DC 컨버터의 각부 실험 파형
 Fig. 8 The each experimental waveforms of the proposed DC-DC converter

그림 8(a)에서 각 스위치에는 큰 전압 서지가 발생하지 않으며, 기준 스위치 S_1, S_2 는 ZVS, 제어 스위치 S_3, S_4 는 ZCS로 동작되어진다 할 수 있다. 그림 8(b)에서 알 수 있듯이 플라휠링 기간중에 정류전압 v_d 가 제로까지 떨어지지 않고, 일정한 값에 의해서 클램프 된다.

그림 9는 인버터의 출력 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 역률이 거의 1에 가까운 것을 확인할 수 있다.

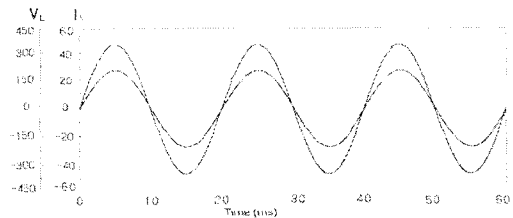
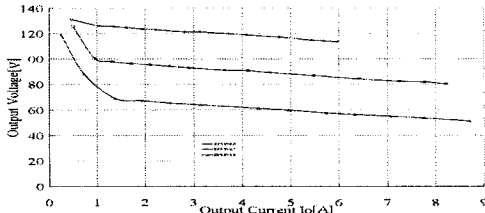
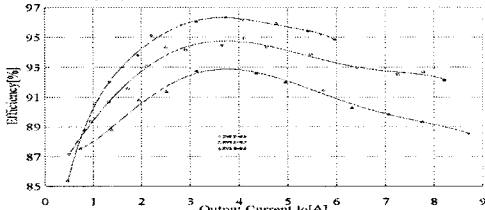


그림 9 인버터의 출력전압과 전류 파형
 Fig. 9 Output voltage and current waveform of inverter

그림 10과 그림 11은 기존의 DC-DC 컨버터와 제안한 DC-DC 컨버터의 출력 전압 특성과 효율 특성을 각각 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 제안한 DC-DC 컨버터는 출력 부하전류의 변화에 대해 거의 일정한 출력 전압 특성을 얻을 수 있으며, 효율의 특성도 기존의 DC-DC 컨버터보다 듀티율 D 조정에 관계없이 비교적 높은 효율을 가지게 것을 확인할 수 있다.



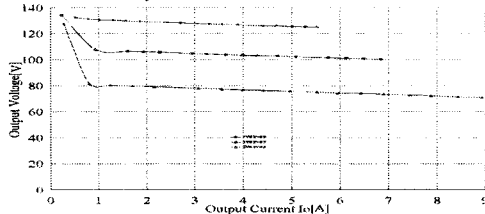
(a) Output voltage as function of the output current and duty cycle D



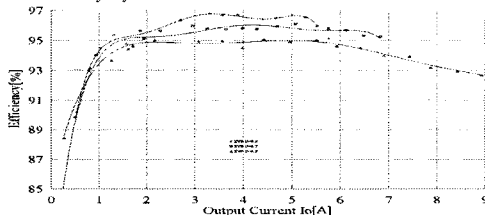
(b) Efficiency as function of the output current and duty cycle D

그림 10 기존 컨버터의 출력 전압과 효율 특성

Fig. 10 Conventional converter output voltage and efficiency characteristics



(a) Output voltage as function of the output current and duty cycle D



(b) Efficiency as function of the output current and duty cycle D

그림 11 제안한 컨버터의 출력 전압과 효율 특성

Fig. 11 Proposed converter output voltage and efficiency characteristics

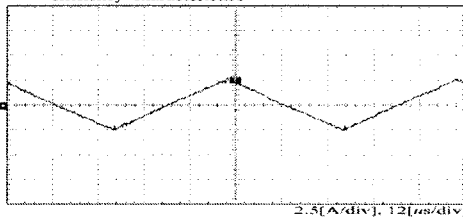


그림 12 출력측 인덕터 전류
Fig. 12 Output Inductor current

그림 12는 출력측 인덕터 전류를 나타내고 있다. 그림 12에서 제안한 컨버터에서 스위칭으로 인해 발생한 전류의 스파크가 거의 여과되어 풀-브리지 2차측에 영향을

주지 않는 것을 알 수 있다.

그림 13은 제안한 3[kW]급 연료전지용 전력변환장치의 입·출력 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 13에서 제안한 3[kW]급 연료전지용 전력변환장치의 출력 전압과 전류는 거의 단위역률에 가까운 것을 확인할 수 있다.

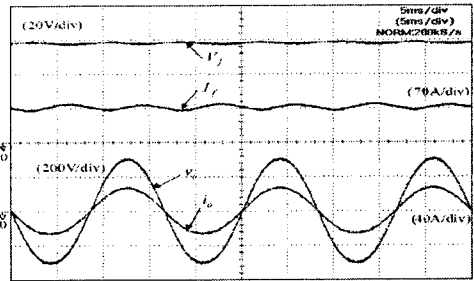


그림 13 연료전지용 전력변환장치의 입·출력 전압과 전류의 파형
Fig. 13 Waveform of input & output voltage and current of power conversion system development for fuel cell

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 연료전지용 전력변환장치의 단점을 보완한 새로운 연료전지용 전력변환장치를 제안하였다. 제안된 연료전지용 전력변환장치는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- 첫째, 환류 다이오드를 포함한 탭부 인덕터 필터를 이용하여 순환 전류를 저감시킬 수 있다.
- 둘째, 스위치 및 변압기의 턴-온, 턴-오프시에 오버슈트의 발생을 줄일 수 있다.
- 셋째, 넓은 출력 전압 조정범위에서 효율을 93~97[%]정도 얻을 수 있다.
- 넷째, 출력 부하전류의 변화에 대해 거의 일정한 출력 전압 특성을 가진다.
- 다섯째, 공진용 인덕턴스에 의하여 고주파 변압기 1차측의 전류가 환류되어 순환 전류가 생긴다.
- 여섯째, 이 순환전류에 의해서 도통 손실이 증대되며, DC-DC 컨버터의 효율이 다소 저하된다.
- 일곱째, 고주파 변압기 여자 전류의 피크값과 고주파 변압기 1차측 전류가 일치하는 부분에서 제어 폭은 여자 유도계수가 큰 만큼 좁아지므로 소프트 스위칭이 곤란하다.

이러한 모든 사항은 시뮬레이션과 실험 결과에 의해서 타당성을 확인하였으며, 다소 개선이 필요한 부분은 계속해서 연구가 진행중이다,

[참 고 문 헌]

- [1] 최세완, "연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술", 전력전자학회지, 제 8권, 제4호, pp. 30~35, 2003.
- [2] A. B. Stambouli and E. Traversa, "Fuel cells, an alternative to stansources of energy," Renewable Sustainable Energy Rev., vol. 6, pp. 297-306, 2002.
- [3] Patterson and D. M. Divan, "Pseudo-resonant full bridge DC/DC converter", IEEE PESC Record, Vol. 2, pp. 424~430, 1987.
- [4] J.A. Sabate, B.H. Cho, "Design considerations for high voltage high-powerfull-bridge zero-voltage switched PWM converter", Proc. IEEE APEC conf., pp. 275~284, 1990.
- [5] E.S.Kim, B.D.Yoon, "An improved soft- switching PWM FB DC/DC converter for reducing conduction losses", IEEE Trans., Vol. 14, No.2, pp. 258~263, 1999.