3[kW]급 연료전지용 전력변환장치(Ⅰ)의 개발

문상필, 권순걸, 서기영, 김영문* 류재엽**
경남대학교, 마산대학*, 한국폴리텍Ⅶ창원대학**

Development of 3.0[kW]class Fuel Cell Power Conversion System(Ⅰ)

S.P.Mun, S.K.Kwon, K.Y.Suh, Y.M. Kim*, J.Y.Ryu**
Kyungnam University, Masan College* Korea PolytechnicⅦ Chacgwon 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. Therefor, this paper, consists of an isolated DC-DC converter to boost the fuel cell voltage 380[VDC] and a PWM inverter with LC filter to convent the DC voltage to single-phase 220[VAC]. 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.

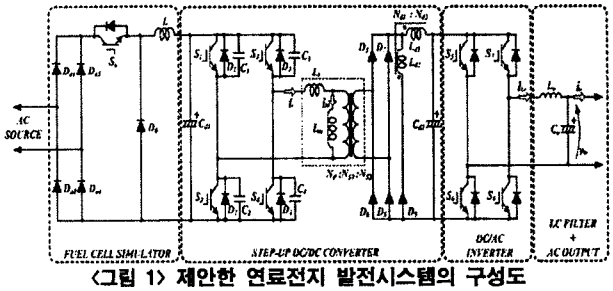
1. 서 론

가장 효율적인 차세대 에너지 전원으로 주목 받고 있는 연료전지 시스템에 사용되는 전지 스택은 일반적으로 27~48[VDC]정도의 직류를 출력하므로 이를 최대 400[VDC]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 커패시터 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 승압방식에 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 형태의 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 출력특성을 갖는 시뮬레이터를 제작, 사용하였으며, 380[VDC]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.

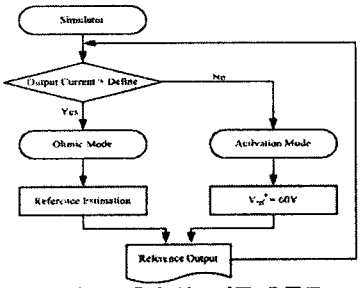
2. 제안한 3[kW]급 연료전지용 전력변환장치

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. 그림 1에서 연료전지용 시뮬레이터는 마이크로프로세서에 의한 제어 블록도에서 출력전압 및 전류를 검출하여 A/D 컨버터를 통해 DSP로 입력되면 연료전지의 V-I 특성 곡선에 해당하는 기준값을 생성하여 D/A 컨버터로 출력한다. D/A 컨버터를 통해 출력되는 아날로그 신호는 스위치를 제어하기 위해 PWM 제너레이터 회로의 입력으로 사용된다. PWM 제너레이터 회로의출력신호는 강압용 컨버터의 게이트 신호로 인가되도록 제어하였다. D/A 컨버터로 출력되는 제어신호와 톱니파의 비교에 의해 만들어진 PWM 신호는 플로딩 게이트 드라이브를 통하여 시뮬레이터의 게이트 신호를 인가하였다.



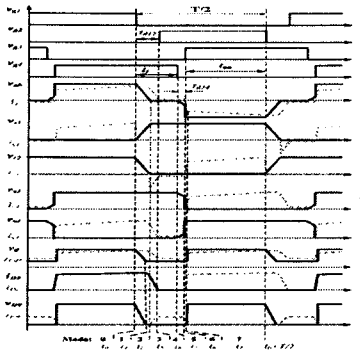
<그림 1> 제안한 연료전지 발전시스템의 구성도

출력전압과 출력전류를 검출하여 출력전류의 변동범위에 따라 Activation 모드와 Ohmic 모드로 동작하도록 연료전지 시뮬레이터를 제어하였다. 검출된 전류가 연료전지의 출력특성 중 Activation 영역에서 Ohmic 영역으로 변환되는 지점의 기준전류 이하일 경우에는 Activation 모드로 동작하여 일정전압이 출력되도록 제어되며, 설정된 기준전류 이상의 경우에는 Ohmic 모드로 동작하도록 제어하게 된다. Ohmic 모드에서는 연료전지의 특성곡선을 1차 함수형태로 간이화한 출력특성을 가지도록 제어한다. 그림 2는 DSP 내부 제어 알고리즘의 흐름도를 나타내었다. 전체 제어루프에서 우선적으로 소자 및 시스템을 보호하기 위하여 출력전압 및 출력전류를 검출함과 동시에 과전압, 과전류, 저전압에 대한 소프트웨어 보호기능을 삽입하여 보다 안정적인 동작을 하도록 구현하였다.



<그림 2> 제어 알고리즘 흐름도

제안한 DC-DC 컨버터는 기존의 DC-DC 컨버터에 순환 전류를 저감시키기 위하여 환류 다이오드와 인덕터 필터를 부가하여 구성하였으며, 기준 스위치S1, S2는 무손실 스너버 커패시터C1, C2에 의하여 ZVS로 동작되며, 고주파 변압기Tr의 자화 인덕턴스Ll는 제어스위치 S3과 S4의 ZCS 턴-온 동작에 필요한 무손실 스너버 인덕턴스로 이용된다. 그리고 환류 다이오드D9는 탭부 인덕터의 Ld2와 직렬로 접속되어 필터 역할을 함으로써 순환 전류를 저감시키는 동시에 스위치S3과 S4를 ZCS 턴-오프 동작이 가능하다. 그리고 컨버터의 제어기는 TMS320C31을 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 가진다. 본 논문에 사용되어지는 단상 풀-브리지 인버터의 저역통과 L-C필터는 PWM 펄스의 고조파를 제거하고, 파형의 형태를 정현파로 만들어 주는 역할을 한다. 그림 3은 제안한 DC-DC 컨버터의 각부 전압과 전류의 동작 파형을 나타낸 것이다.



<그림 3> 제안한 DC-DC 컨버터의 각 부의 동작 파형

3. 실험결과 및 고찰

연료전지 발전시스템을 구현하는데 사용한 툴은 진력전자분야 전용으로 개발된 PSIM6.0으로 회로를 구성하여 Matlab의 subcircuit으로 연동하여 사용하였으며, 실험에 사용된 Ballard사의 3[kW]급 연료전지 스택의 사양은 다음과 같다.

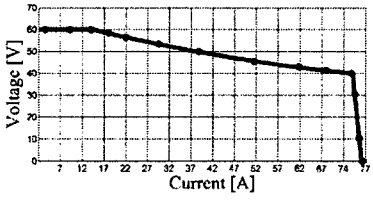
1. 정격출력과 전류 : 3.0[kW], 40~78[A]
2. DC전압범위 : 39~60[Vdc]
3. 동작수명 : 1500시간
4. 순　　도 : 99.99[%] 건조 수소가스
5. 공급압력 : 10~250[PSIG]
6. 외부온도 : 3~30[°C]
7. 상대습도 : 0~95[%]

그리고 공기는 대기에서 공급받고 용량47[*l*], 순도 99.99[%]의 탱크에서 청정하고 건조한 수소를 공급받았다. 그 외의 설계 파라미터는 표 1와 같다.

<표 1> 실험에 사용된 회로정수

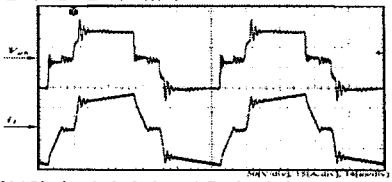
연료전지 시뮬레이터	용량		3[kW]
	입력전압		311[Vac]
	스위칭주파수		15[kHz]
	출력전압		39~60[Vdc]
	출력전류		41.6~76.9[A]
	출력 인덕턴스(L)		2.2[mH]
	출력 커패시턴스(C)		2200[uF]
ZVZCS PS-PWM DC-DC 컨버터	용량		3[kW]
	입력전압		39~60[Vdc]
	스위칭주파수		17[kHz]
	변압기	권수비	1 : 13
		여자인덕턴스	70[uH]
		자화인덕턴스	300[uH]
	램푸 인덕턴스	L_{d1}	70[uH]
		L_{d2}	11[uH]
	무손실 스너버 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 4는 실험으로 측정된 연료전지 V-I 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 Ohmic 영역에서의 연료전지 특성을 잘 나타내고 있다.

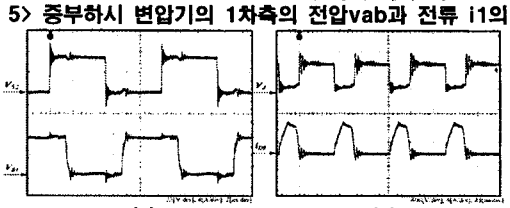


<그림 4> 연료전지의 V-I 특성곡선

그림 5는 중부하시 제안한 DC-DC 컨버터의 고주파 변압기 1차측의 전압vab과 전류 i1의 파형을 나타낸 것이며, 그림 6은 제안한 DC-DC 컨버터의 각부 실험 파형을 나타낸 것이다. 그림 6(a)은 스위치S2와 S4의 파형이며, 그림 6(b)은 정류 전압vd와 플라휠링 다이오드D9의 전류iD9의 파형이다. 그림 6(a)에서 각 스위치에는 큰 전압 서지이 발생하지 않으며, 기준 스위치 S1, S2는 ZVS, 제어 스위치S3, S4는 ZCS로 동작되어진다고 할수 있다. 그림 6(b)에서 알 수 있듯이 플라휠링 기간중에 정류전압 vd가 제로까지 떨어지지 않고 클램프 된다. 그림 7은 제안한 DC-DC 컨버터의 출력 전압 특성과 효율 특성을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 제안한 DC-DC컨버터는 출력 부하전류의 변화에 대해 거의 일정한 출력 전압 특성을 얻을 수 있으며, 효율의 특성도 기존의 DC-DC 컨버터보다 듀티율D 조정에 관계없이 비교적 높다 효율을 가지게 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 출력측 인덕터 전류를 나타내고 있다. 그림 8에서 제안한 컨버터에서 스위칭으로 인해 발생한 전류의 스파크가 거의 여과되어 풀-브리지 2차측에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 그림 9는 3[kW]저항 부하에서의 풀-브리지 인버터 출력전압과 전류 및 연료전지의 전압과 전류의 파형을 나타내고 있으며, 거의 역률1에 가까운 것을 알 수 있다.

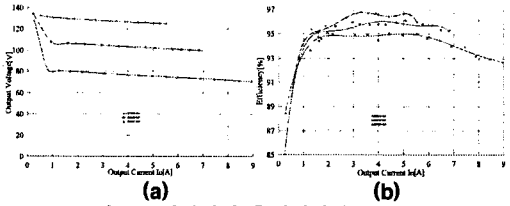


<그림 5> 중부하시 변압기의 1차측의 전압vab과 전류 i1의 파형



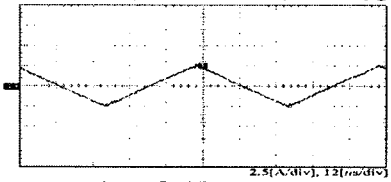
(a)　　(b)

<그림 6> 각부의 동작 파형

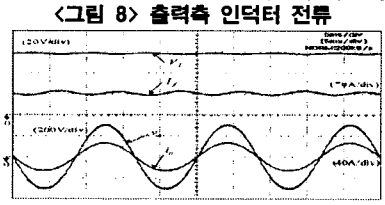


(a)　　(b)

<그림 7> 컨버터의 출력전압과 효율 특성



<그림 8> 출력측 인덕터 전류



<그림 9> 제안한 전력변환장치의 출력전압과 전류파형

3. 결　　론

본 논문에서는 연료전지의 발전특성과 동일한 출력특성을 가지는 연료전지 시뮬레이터, 연료전지의 낮은 출력전압을 승압하는 절연형 DC-DC 컨버터, 가정용에 적합한 교류전원으로 변환하는 인버터를 설계하고 제작하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1)연료전지와 유사한 특성을 얻기 위해 TMS320C31 DSP와 승압형 컨버터를 사용하여 3[kW]급, 직류39~60[VDC]의 출력을 갖는 연료전지 시뮬레이터를 구현하였으며, 연료전지와 동일한 출력 특성을 얻을 수 있었다.

(2)기존의 컨버터보다 부품수가 적고 제어가 쉽으며, 대용량에 적합한 새로운 고주파 절연형 ZVZCS PWM DC-DC 컨버터를 설계하여 순환 전류를 저감시켰으며, 스위치 및 변압기의 턴-온, 턴-오프시에 오버슈트를 방지하였다.

'이 연구물 결과물은 2006학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 이루어졌음'

[참 고 문 헌]

[1]A. B. Stambouli and E. Traversa, "Fuel cells, an alternative to stan -sources of energy," Renewable Sustainable Energy Rev., vol. 6, pp. 297 306, 2002.

[2]Patterson and D. M. Divan, "Pseudo-resonant full bridge DC/DC converter",IEEE PESC Record, Vol. 2, pp. 424~430, 1987.

[3]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.