

고체산화물형 연료전지를 위한 10KW급 독립전력변환장치의 개발

Development of a 10KW Stand-alone Power Processing Unit for Solid Oxide Fuel Cell

최세완

서울산업대학교

1. 서 론

본 논문은 5KW급의 SOFC와 저전압 배터리를 복합전원으로 하는 10KW급 독립형 연료전지발전시스템의 전력변환장치의 개발에 관한 것이다. 이를 위한 전력변환장치는 연료전지로부터의 저전압을 상승시키기 위한 고주파 DC-DC 컨버터 및 이를 안정된 교류전원으로 변환하기 위한 DC-AC 인버터 그리고 저전압 배터리를 충·방전하기 위한 양방향 DC-DC 컨버터로 구성된다. 미국 에너지부 및 IEEE가 주최한 "2003 International Future Energy Challenge Competition"[1]에서 제시한 90%이상의 효율과 \$40/KW 이하의 양산가 등의 사양을 목표로 개발된 본 전력변환장치에 대한 토폴로지, 주요 부품의 설계 및 제어방식에 관하여 기술하고 실험결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 전체 시스템

그림 1은 SOFC-저전압 배터리의 복합발전을 위해 제안하는 전력변환장치의 구성도를 나타내고 있다. 이는 연료전지의 낮은 전압을 증압시키기 위한 Front-end DC-DC 컨버터, 교류전압으로 변환시키기 위한 인버터, 배터리 충·방전을 통해 연료전지의 느린응답을 보완하기 위한 양방향 DC-DC 컨버터로 세 부분으로 나눌 수 있다.

첫째, Front-end DC-DC 컨버터는 연료전지로부터의 저전압을 증압 시켜주는 것과 동시에 입력전류 제어와 출력 DC-link 전압제어를 통해 과도상태동안의 시스템의 안정성을 향상 시켜준다. 이때 고주파 변압기는 전기적인 Isolation과 연료전지의 저전압을 증압 시켜주는 역할을 한다.

둘째, 앞단의 Front-end DC-DC 컨버터에 의해서 얻어진 DC-link 전압으로부터 부하에 요구되는 교류전압을 만들어 주는 인버터는 출력전압을 필터를 사용하여 스위칭 주파수 성분을 제거하여 정현파의 교류전압으로 변환한다.

셋째, 연료전지의 응답속도는 매우 느리므로 순간적인 부하의 변동에 대하여 즉시 필요한

양의 전력을 공급해주고 연료전지의 출력이 증가하여 부하전력을 충분히 공급할 수 있으면 잉여전력을 저장할 수 있는 Battery 나 Super-capacitor와 같은 에너지 저장장치가 독립형 연료전지 발전시스템에서는 필요하며 Battery를 사용하는 경우 이를 충전 또는 방전할 수 있는 양방향 DC-DC 컨버터가 필요하다. 양방향 DC-DC 컨버터는 DSP에 의해 계산된 전류 지령치를 제어하여 충전과 방전동작을 한다.

2.2 Front-end DC-DC 컨버터

그림 2는 제안한 Front-end DC-DC 컨버터의 토폴로지를 나타내고 있다. Front-end DC-DC 컨버터는 부하에 따라 변동되는 연료전지의 22V~41V의 낮은전압을 인버터에서 요구되는 출력전압을 만들어 줄 수 있는 DC-link 전압인 400V_{dc}로 승압시켜준다. Phase-shift 스위칭 방식에 의해 영 전압 스위칭을 구현하여 스위칭 손실을 줄여주고, 시스템의 효율을 향상시켜 주기 위하여 1차측에는 Full-bridge 방식의 토폴로지를 선택하였다[2]. 또한, 고주파 변압기는 2.5KW급 2개를 병렬연결하여 사용하였으며, 2차측의 각각 2대의 다이오드 브리지와 직렬연결되어 각각 200V_{dc} 전압을 출력해서 인버터의 입력전압 400V_{dc}를 만들어 준다.

그림 3는 Front-end DC-DC 컨버터의 제어블럭도를 나타내고 있다. 출력 DC-link전압을 400V_{dc}로 조정하기 위해 PI 제어를 구현하였다. 연료전지 제어기(FCC)로부터 출력가능 전류값에 의한 전류제어는 부하의 과도상태동안 시스템의 동작특성을 향상시켜주고, 전력소자들의 전류정격을 낮출 수 있도록 해준다. 또한, 사용자의 외부확장을 통해서 다양한 기능을 수행할 수 있고, 초기 구동시 돌입전류를 막아줄 수 있는 소프트 스타트 기능과 컨트롤러 자체적인 보호기능 등을 가지고 있는 저가격의 UCC3895로 Phase-shifting 방식의 PWM을 구현하였다.

2.3 인버터

그림 4는 DC-AC 인버터 토폴로지를 나타내고 있다. 두 대의 Half-bridge 인버터로 서로 180°위상차를 갖는 120V_{ac} 전압 V_a, V_b를 만들고, 단자 A, B 사이로 240V_{ac}를 출력한다. 또한, PWM에 의한 스위칭 리플전압과 부하에서 발생하는 고조파 전류를 제거하기 위한 L-C 필터를 설계했다[3]. 그림 5는 DC-AC 인버터 제어블럭도를 나타내고 있다. 부하의 변동에 대해서 출력전압을 조정하며, 커패시터 전압을 균등하게 하기 위한 제어를 DSP에 의한 디지털 제어로 구현했다. 각 상의 부하의 불균형에 의한 커패시터 전압 불균형은 이론적으로는 없으나, 실제로는 발생할 수 있고, 이는 출력전압의 찻수차 고조파 발생의 원인이 되므로 출력전압조정을 위한 제어와 이와 같은 커패시터 전압 불균형 해결을 위한 제어를 그림 5와 같이 동시에 구현했다. 인버터 및 전체 시스템의 효율적인 제어를 위해 저가격의 DSP인 TMS320LF2407을 사용했다. 인버터에서 사용한 DSP 컨트롤러의 역할은 다음과 같다.

- 인버터의 IGBT스위치의 게이트 신호 발생
- 부하변동에 대한 출력전압의 조정
- 전체 시스템의 감시와 보호기능구현
- 시스템과 연료전지 제어기와의 통신

- 부하변동에 따른 양방향 DC-DC 컨버터의 충·방전 전류지령치 계산

2.4 양방향 DC-DC 컨버터

DC-link단으로 고전압 배터리를 직접 연결하여 사용할 수 있으나, 이 경우 배터리의 비싼 가격과 장시간 사용시 배터리 불균형이 발생 할 수 있다. 따라서 그림 6과 같이 양방향 DC-DC 컨버터를 이용하여 저전압 배터리를 연결하는 경우 충전과 방전의 전류지령 제어를 통해 부하의 변동에 대한 연료전지와 시스템의 과도상태응답특성을 향상시킬 수 있다[4]. 즉, 배터리는 부하의 급격한 증가에 대하여 연료전지의 출력전력과 부하의 요구량의 차이만큼 전력을 순간적으로 방전시켜 연료전지의 느린 응답을 보완한다. 연료전지로부터의 출력이 증가하여 부하전력을 충분히 공급할 수 있는 시점에서 양방향 DC-DC 컨버터를 충전모드로 변환시켜 배터리를 충전시킨다. 이와 같은 방전전류 지령치나 충전전류 지령치는 DSP 컨트롤러에서 지령전류를 순시적으로 계산하여 양방향 DC-DC 컨버터로 지령한다. 그림 7은 양방향 DC-DC 컨버터의 제어블럭도를 보여주고 있다. 양방향 DC-DC 컨버터는 인버터의 DSP에서 계산된 전류지령치에 따라 충·방전 동작을 한다. 충전과 방전의 각각의 모드에 대하여 두 개의 PWM 컨트롤러 UCC3895, UC3825를 사용했다.

3. 실험 결과

5KW급 Front-end DC-DC 컨버터와 양방향 DC-DC 컨버터 및 10KW급 DC-AC 인버터를 제작하였다.

그림 8은 4.4KW 저항부하에 대한 출력전압, 전류파형을 보여준다. 왜율이 2%로 정현파에 가까운 파형을 발생시킴을 알 수 있다. 그림 9(a)~(d)는 부하가 2KW에서 2.7KW로 변동하는 경우의 과도상태응답에 대한 각부 파형을 보여주고 있다. 그림 9(a)는 출력 전압과 전류 파형이며, 부하증가시 전압의 왜곡은 없으며, 전압의 조정(regulation)이 잘 되고 있는 것을 알 수 있다. 부하의 증가로 인하여 전류가 증가되는 것을 보여준다. 그림 9(b)는 인버터 입력 전류파형을 보여준다. 부하 증가시 양방향 DC-DC 컨버터에서 부하의 증가량에 대한 전류를 출력해주므로 전류가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 9(c)는 Front-end DC-DC 컨버터의 출력전압과 전류파형을 보여준다. 부하의 증가시점에서 전류의 리플은 약간 상승 하지만 평균값에는 변화가 없음을 보여주고, 출력 전압 400V_{dc}로 제어되고 있음을 보여준다. 이는 부하증가량에 대해 양방향 DC-DC 컨버터측에서 전류가 출력되기 때문이다. 그림 9(d)는 양방향 DC-DC 컨버터의 배터리측의 출력 전류파형을 보여주는데 인버터의 영향으로 전류리플이 거의 없음을 보여준다. 또한, 출력의 부하변동에 대하여 양방향 DC-DC컨버터는 빠른 응답속도를 가지고 있음을 보여준다. 표 1은 설계기준과 본 시스템의 실험결과로 나타난 성능을 비교했다. 효율을 제외하고 대회에서 제시한 대부분의 성능을 만족하였다. 그림 10은 본 논문에서 제안한 시스템을 설계, 제작한 10KW급 시제품 외관 사진이다.

4. 결 론

본 논문은 미국의 에너지부(U.S. Department of Energy) 및 IEEE가 주최한 국제대회인 "2003 International Future Energy Challenge"에 출품한 "SOFC를 위한 10KW급 독립형 전력변환장치"의 개발에 관한 것이다. 본 시스템은 5KW급의 SOFC와 저전압 배터리를 복합전원으로 하는 10KW급 독립전력변환장치로서 연료전지로부터의 저전압을 상승시키기 위한 Front-end DC-DC 컨버터, 안정된 교류전원으로 변환하기 위한 DC-AC 인버터, 저전압 배터리를 충·방전하기 위한 양방향 DC-DC 컨버터로 구성된다. 각 토폴로지의 제안과 제어방식에 대해 기술하였다. 10KW급 시작품을 제작하여 실험결과 대부분 설계기준사양을 만족하는 것을 알 수 있다. 전력변환 장치가 시스템의 최종 출력의 질을 결정하므로 부하에서 요구하는 사양을 만족하는 최적의 전력변환장치에 관한 연구는 연료전지 스택 및 개질기에 관한 연구와 함께 매우 중요하다고 하겠다.

5. Reference

- [1] "2003 International Future Energy Challenge Competition" 공식 홈페이지 <http://www.energychallenge.org>
- [2] F. Tsai, "Small-signal and Transient Analysis of a Zero-Voltage-Switched, Phase-Controlled PWM Converter Using Average Switch Model", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 29, No. 3, pp. 493~499, May/June 1993.
- [3] R. Gopinath, S. Kim, J. Hahn, M. Webster, J. Burghardt, S. Campbell, D. Becker, P. Enjeti, M. Yeary, J. Howze, "Development of a low cost fuel cell inverter system with DSP control", *IEEE PESC Record*, pp. 309~314 Vol.1, 2002.
- [4] T. Reimann, S. Szeponik, G. Berger, J. Petzoldt, "A novel control principle of bi-directional DC-DC power conversion", *IEEE PESC Record*, pp. 978~984, Vol 2, 1997.

표 1. 설계기준과 본 시스템의 성능비교

설계항목	설계기준사양	본 시스템 실험결과
Output Frequency	60Hz±0.1Hz	59.95Hz~60.09Hz
Output Voltage Regulation	± 6%	-2.4%~0.2%
Output THD	5% 이하	3% 이하
Total Efficiency	90% (5KW에서)	88% (4.4KW에서, DC-DC 90%, Inv 97%)

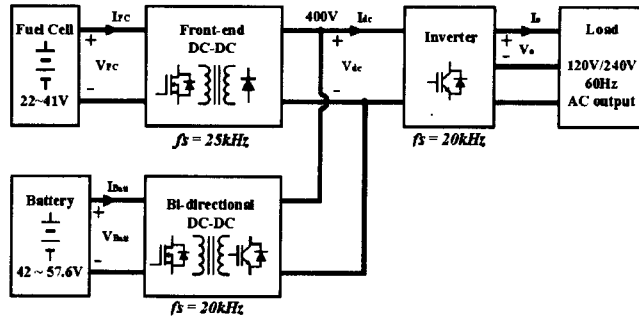


그림 1. SOFC-배터리를 위한 독립전력변환장치 구성도

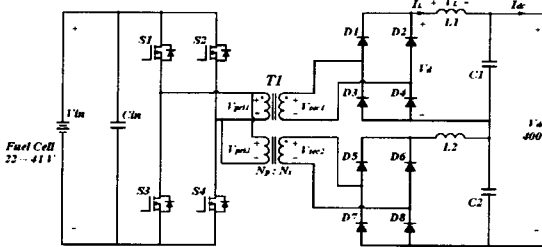


그림 2. Front-end DC-DC 컨버터

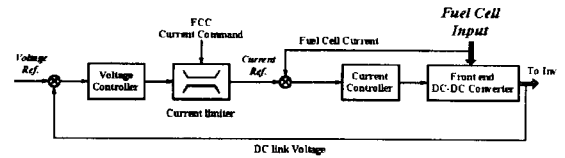


그림 3. Front-end DC-DC 컨버터 제어블럭도

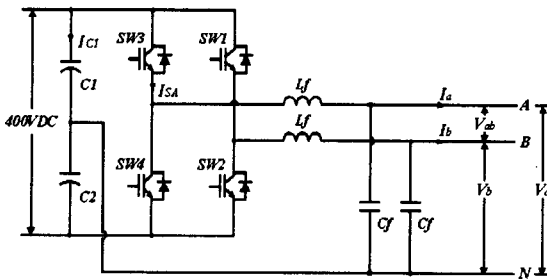


그림 4. DC-AC 인버터

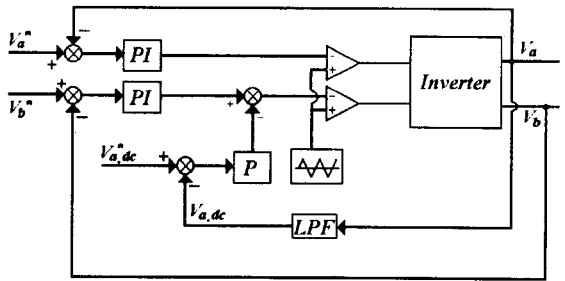


그림 5. DC-AC 인버터 제어블럭도

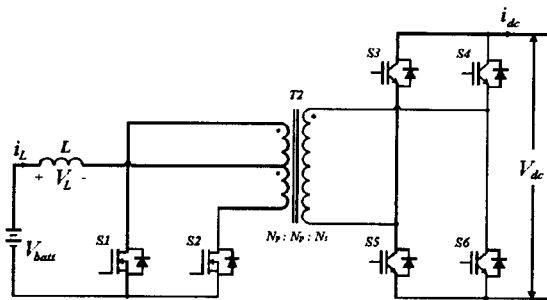


그림 6. 양방향 DC-DC 컨버터

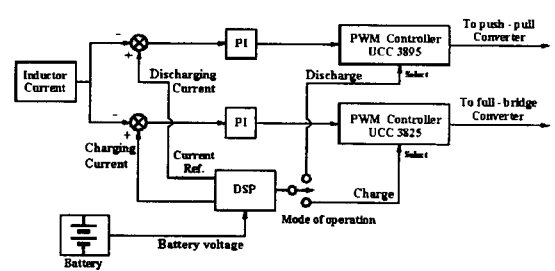


그림 7. 양방향 DC-DC 컨버터 제어블럭도

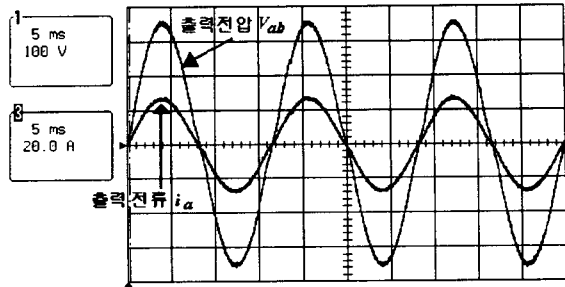
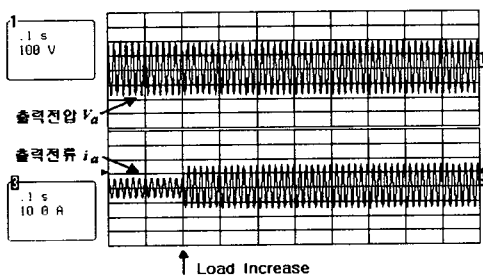
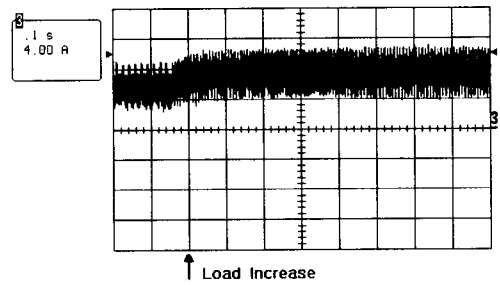


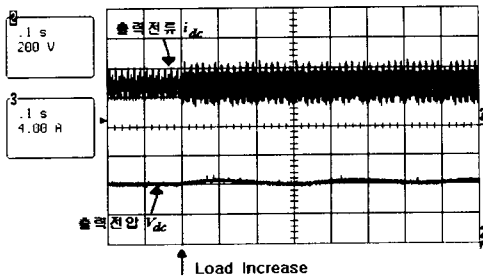
그림 8. 정상상태에서의 인버터 출력전압 V_{ab} , 전류 i_a (부하 4.4KW)



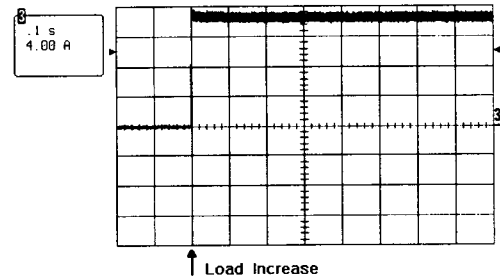
(a) 인버터 출력전압 V_a 와 전류 i_a



(b) 인버터 입력전류



(c) Front-end DC-DC 컨버터 출력전압과 전류



(d) 양방향 DC-DC 컨버터 Battery측 출력전류

그림 9. 과도상태에서의 실험파형 (부하 2KW→2.7KW)

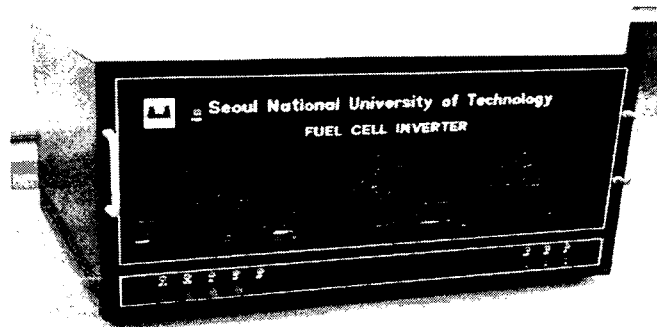


그림 10. 작품외관 사진