

분산전원용 연료전지 인버터 운전에 관한 연구

장수진, 이태원, 송상훈*, 김준호**, 원충연, 김윤호***
 성균관대학교, 산업기술시험원*, 기술표준원**, 중앙대학교***

A Study on Fuel Cell Inverter Operation for Distributed Generation

S.J. Jang, T.W. Lee, S.H. Song*, J.H. Kim**, C.Y. Won, and Y.H. Kim***
 Sung Kyun Kwan University, Korea Testing Laboratory*,
 Korean Agency for Technology and Standards**, Chung Ang University***

ABSTRACT

Recently, a fuel cell is remarkable for new generation system. The fuel cell generation system converts the chemical energy of a fuel directly into electrical energy.

The fuel cell generation is characterized by low voltage and high current. For connecting to utility, it needs both a step up converter and an inverter. The step up converter makes DC link and the inverter changes D.C to A.C.

In this paper, full bridge converter and the single phase inverter are designed and installed for fuel cell. Simulation and experiment verify that fuel cell generation system could be applied for the distributed generation.

1. 서 론

경제성장과 산업·사회활동의 고도화에 따라서 전력수요는 급격히 증가하고 있으나 이에 대비하기 위한 발전설비의 확대계획은 발전소 건설에 따르는 막대한 소요자금과 부지확보의 한계 등으로 어려움을 겪고 있다.

에너지원의 97[%]를 수입에 의존하며, 석유의존도가 60[%] 이상을 점하고 있는 우리나라의 에너지 상황을 고려하여 전력수급의 장기적 안정을 확보하기 위해서는 발전시스템의 설비확대 및 효율향상과 더불어 에너지원의 다변화 정책도 필요하다.^[1] 분산형전원의 개발과 도입에 대해서는 에너지절약, 에너지관리의 향상, CO₂ 배출대책 등의 환경 측면에서 유리하다. 예를 들면 연료전지 등의 신재생

에너지에 의한 발전, 폐기물 처리 시 배열을 이용하는 발전 및 열병합 발전 등의 전원도입이 예상된다.

그리고 전력수급의 지역간 불평형을 완화함으로써 전력시스템 측면에서의 효과도 기대되고 있다.

그림 1은 분산전원 발전시스템이 적용되어진 배전계통을 나타내고 있다.

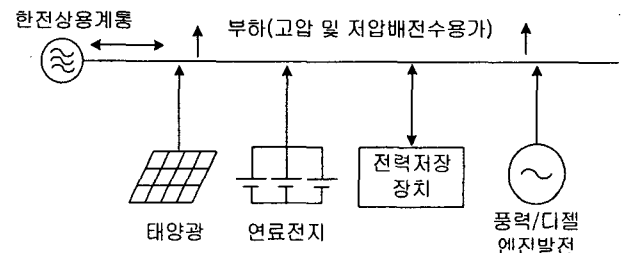


그림 1. 배전계통에 적용된 분산전원 구성도
 Fig 1. Block diagram of distributed generation

분산전원 발전시스템중 하나인 연료전지 발전시스템은 신 에너지 기술로서 산업용 및 업무용에서부터 가정용, 자동차, 휴대용 기기에 이르기까지 넓은 범위에서 보급이 기대되고 있다.^[2]

본 논문에서는 분산전원에 적용 가능한 연료전지용 전력변환장치를 설계하고 제작하여 상용계통에 연계시험을 하였다.

2. 연료전지 발전시스템 구성 및 제어

2.1 연료전지 발전시스템

연료전지는 연료(수소)의 화학에너지가 전기에너지로 직접 변환되어 직류 전력을 생산하는 능력을 갖는 전지(Cell)로 정의되며, 종래의 전지와는 다르

계 외부에서 연료와 공기를 공급하여 연속적으로 전기를 생산한다.

연료전지 발전시스템의 전력을 상용부하에 공급하려면 직류에서 교류로 변환하여야 하기 때문에 인버터가 필수적이다.

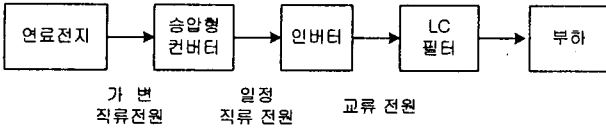


그림 2. 독립형 연료전지 발전시스템의 전력 흐름도
Fig 2. Power flow chart of stand alone fuel cell generation system

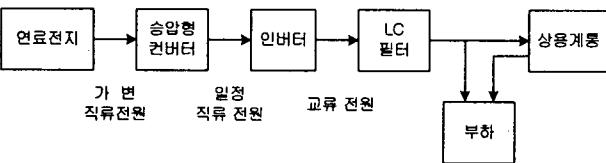


그림 3. 연계용 연료전지 발전시스템의 전력 흐름도
Fig 3. Power flow chart of utility connecting fuel cell generation system

그림 2와 3은 연료전지 발전시스템을 독립운전 및 계통연계 운전 시 전력 흐름도와 구성을 나타내고 있다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 상용 계통 연계 시험을 하였다.

2.1.1 연료전지 발전시스템 구성

그림 4는 계통 연계가 가능한 전압형 인버터 구성도이다.

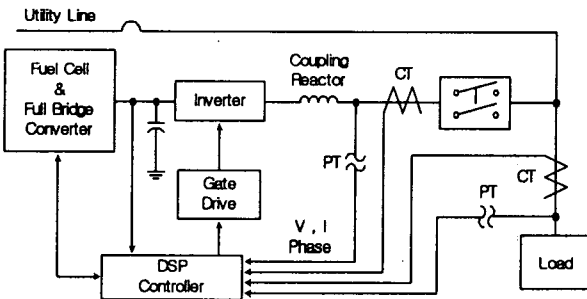


그림 4. 계통연계용 전압형 인버터 구성도
Fig 4. VSI inverter block diagram for utility connection

연료전지 발전시스템을 위한 연계용 인버터는 경우에 따라 자립운전을 하여 독립적으로 부하에 전력을 공급할 수 있는 기능이 있어야 한다.^{[3][4]}

그림 5는 연료전지 발전시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다.

연료전지와 연료전지의 출력전압을 승압하기 위한 풀 브리지 DC-DC 컨버터, 상용 계통에 전력을 공급하기 위한 풀 브리지 DC-AC 인버터로 구성되어 있다.

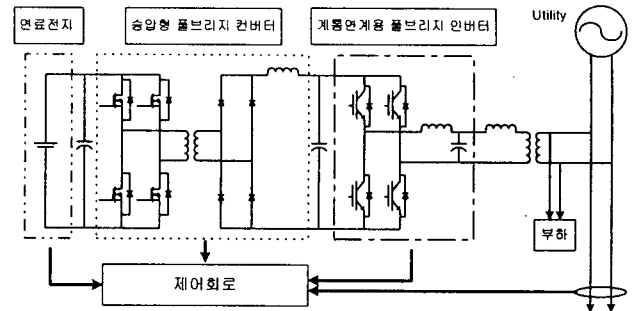


그림 5. 연료전지 발전시스템 전체 구성도
Fig 5. The overall block diagram of fuel cell generation system

인버터 출력과 계통선 사이에 60[Hz] 절연 변압기를 설치함으로써 연료전지 발전시스템 내부사고 시 계통으로 과급되지 않도록 절연을 행할 수 있다. 또한 변압기 자체가 계통 측으로 주입되는 고조파 전류를 허용치 이하로 줄이는데 기여하는 직렬리액터 역할을 하므로 인버터와 계통선 전압의 인터페이스를 용이하게 해준다.

2.2 변환장치의 제어방식

변환장치의 제어는 연계운전 시에는 유효전력과 무효전력의 제어를 행하고, 독립운전 시에는 일정 전압과 정주파수 제어를 행하여야 한다.

연계용 인버터는 계통선과 연계 시 순시 전압차를 해결하기 위하여 연계리액터를 삽입하여 계통선과 병렬 접속한다. 인버터는 그림 6과 같이 연계리액터 L을 통해 계통과 연결하며 부하는 인버터 출력 측과 계통사이에 병렬로 연결한다.

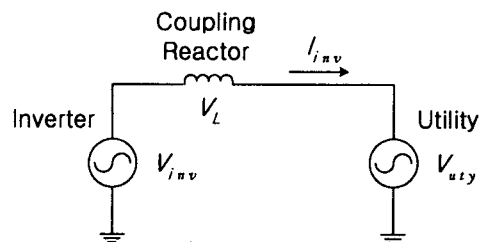


그림 6. 시스템 등가회로
Fig 6. An equivalent circuit of system

두 시스템의 전원을 병렬 운전하는 경우 인버터의 위상을 동기 시키며 주파수와 전압을 조절하여

부하에 대한 전력을 분담한다.

이를 위하여 일반적으로 출력전압의 진폭이나 위상을 조정하여 부하에 공급되는 무효 및 유효전력을 제어한다.

변환장치의 전력제어는 인버터 출력전압 V_{inv} 를 계통전압 V_{uty} 에 대해 위상 θ 만큼 제어하는 경우가 있다. 인버터 출력전류 I_{inv} 가 부하전류 I_{load} 와 동상이 되도록 인버터 출력전압을 계통전압에 대해 θ 만큼 변화시킬 때 인버터와 계통 사이에 흐르는 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있다.

그림 6의 등가회로에서 인버터 출력전압은 식 1과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{inv} = V_L + V_{uty} \quad (1)$$

식 1에서 인버터 출력전압 V_{inv} 과 출력전류 I_{inv} 를 이용해 연계리액터에 걸리는 전압을 구하면 식 2와 같다.

$$V_L = Z_L \times I_{inv} \quad (2)$$

식 1과 식 2에 대응되는 벡터도를 그리면 그림 7의 (a)와 같이 나타낼 수 있다.

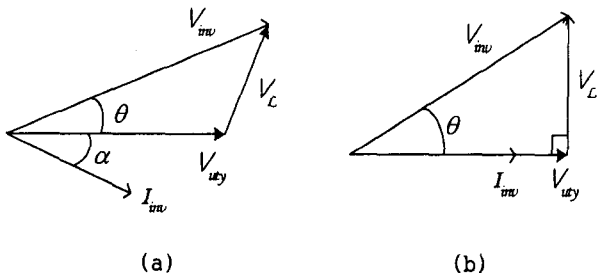


그림 7. 위상차 θ 를 가질 때의 전압 전류 벡터도
 Fig 7. Voltage and current vector diagram at the phase difference θ

- (a) 인버터 전류가 계통전압 보다 임의의 위상차 α 를 가질 때
- (b) 인버터 전류가 계통전압과 동상일 때

여기서 인버터 출력전류 I_{inv} 는 계통전압 V_{uty} 보다 임의의 위상차 α 만큼 뒤지며 그림 7의 벡터도로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_{inv} \sin \theta = V_L \cos \alpha = Z_L I_{inv} \cos \alpha \quad (3)$$

$$V_{inv} \cos \theta = V_{uty} + Z_L I_{inv} \sin \alpha \quad (4)$$

또한 인버터의 출력전류는 식 5와 같이 나타낼 수

있다.

$$I_{inv} = \frac{V_{inv} - V_{uty}}{Z_L} = \frac{V_L}{Z_L} \quad (5)$$

따라서 계통으로 공급되는 유효전력 P와 Q는 식 3과 4, 5를 적용하여 구할 수 있다. 유효전력은 인버터 출력전류와 계통전압과의 곱으로 구해지며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= I_{inv} \times V_{uty} = \frac{V_{inv} \sin \theta}{Z_{inv}} V_{uty} \\ &= \frac{(V_{inv} \times V_{uty}) \sin \theta}{Z_{inv}} \end{aligned} \quad (6)$$

무효전력은 인버터 출력전류 I_{inv} 와 연계리액터에 걸리는 전압 V_L 의 곱으로부터 구한다.

$$\begin{aligned} Q &= I_{inv} \times V_L = \frac{V_{inv} \sin \theta}{Z_{inv}} V_{inv} \sin \theta \\ &= \frac{V_{inv}^2}{Z_{inv}} (1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

그림 7의 (b)와 같이 단위 역률($\cos \alpha = 1$)을 만족하기 위해서는 인버터 출력전압의 위상이 계통전압의 위상보다 항상 앞서도록 출력전압의 크기와 제어각 θ 를 동시에 제어하여야 한다.

시스템이 단위역률로 제어되고 있는 경우의 인버터 출력전류는 식 8과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{inv} = \frac{V_{inv} - V_{uty}}{Z_L} = \frac{V_L}{Z_{inv}} = \frac{V_{inv} \sin \theta}{Z_{inv}} \quad (8)$$

이상과 같이 인버터 출력 전압의 진폭과 위상을 상용 전력계통 전압에 대해서 변화시켜 인버터와 상용 전력 계통간의 무효전력 및 유효전력을 제어한다.^{[3][4]}

2.3 승압형 풀 브리지 컨버터

연료전지에서 발생하는 전압은 저압의 직류이므로 상용전원 시스템에 적용하기 위해서는 승압하여야 한다.

연료전지 발전 시스템에는 그림 5와 같이 연료전지와 DC-AC 인버터 사이에 인버터를 구동하기 위한 직류 링크 전압으로 사용하기 위하여 승압형 풀 브리지 컨버터가 사용된다.

표 1은 승압형 풀 브리지 컨버터의 파라미터를 나타내고 있다.

표 1. 승압형 풀 브리지 컨버터 파라미터
Table 1. Parameter of full bridge converter

파라미터	정격
입력 전압	39~72[Vdc]
스위칭주파수	15[kHz]
변압기 권수비(1차:2차)	1:13
출력 전압	400[Vdc]
출력 전류	7.5[A]
출력 인덕턴스	2.5[mH]
출력 커패시턴스	2200[μF]

2.4 계통연계용 풀 브리지 인버터 제어

그림 8은 인버터의 전력 흐름도를 나타내고 있다.

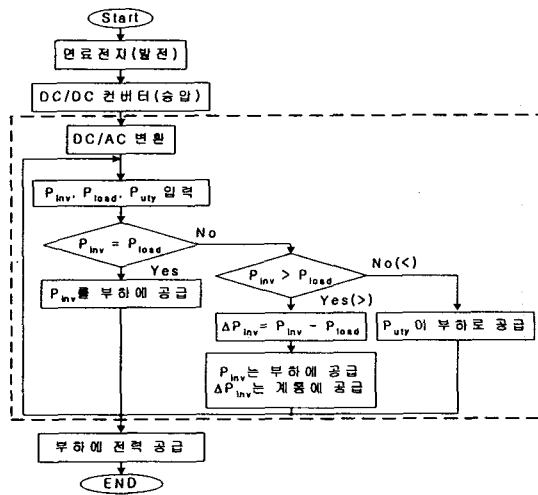


그림 8. 연료전지 발전시스템의 전력 흐름도
Fig 8. Power flow chart of fuel cell generation system

연료전지의 발전 전력을 부하에 공급하고 잉여 전력 발생 시 계통에 공급하기 위한 인버터 제어는 그림 8의 점선 내부와 같이 이루어진다.

인버터 제어는 첫째, 부하에서 필요한 전력이 인버터의 출력과 같다면 계통에서의 공급량은 0이다. 둘째, 인버터의 출력이 부하에서 필요한 전력보다 클 경우 부하 공급 전력 이상의 잉여 전력은 계통의 다른 부하로 공급되어 진다.

셋째, 인버터의 출력전력이 부하에서 필요한 전력보다 작을 경우 부족 전력량은 계통에서 부하로 공급되어지도록 제어가 된다.

계통 연계용 인버터가 갖추어야 할 주요 기본 기능을 설명하면 다음과 같다.^[6]

- ① 위상 동기회로: PLL회로를 사용하여 인버터

와 계통전원의 위상이 동기 되도록 제어한다.

- ② 주파수 조정회로: 주파수 편차가 60 ± 1 [Hz] 이내로 제어하여 주파수가 이탈되지 않도록 조정한다.

- ③ 전압 조정회로: 전압 편차가 제어범위 이내로 추종 하도록 제어한다.

- ④ PWM 제어회로: 인버터 출력전압을 제어하기 위한 기준 정현파와 삼각파를 비교하여 IGBT를 구동하기 위한 게이트 신호를 발생한다.

- ⑤ 출력 LC필터: 인버터 출력 파형이 정현파에 근사하도록 고조파 성분을 제거한다.

표 2는 계통연계 실험에 적용되어진 풀 브리지 인버터의 파라미터를 나타내고 있다.

표 2. 풀 브리지 인버터 파라미터
Table 2. Parameter of full bridge inverter

파라미터	정격
용량	1.5[kW]
입력 전압	400[Vdc]
스위칭주파수	10[kHz]
출력 전압	220[Vac]
출력 인덕턴스	2[mH]
출력 커패시턴스	10[μF]

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

연료전지 시스템에 대한 시뮬레이션은 Matlab simulink를 사용하였고, 각각의 세부적인 회로 구성은 subsystem으로 구성하였다.

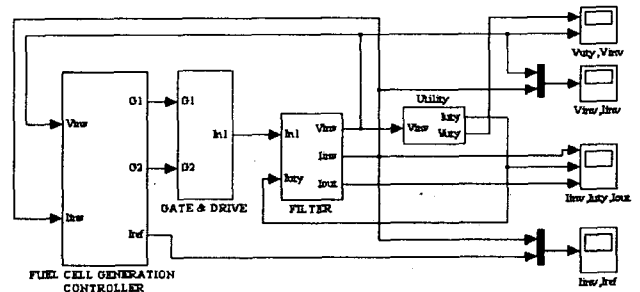


그림 9. 계통연계용 인버터 시뮬레이션 회로
Fig 9. Inverter simulation circuit for utility connection

인버터로 공급되어지는 승압형 컨버터의 출력은 400[Vdc]이고, 인버터의 출력전력은 인버터에서 부하로 공급하고자 하는 전류의 지령치(그림 9의 fuel cell generation controller subsystem)에 의해 결정이 된다.

또한 인버터 출력전류가 부하에 공급 시 부하변동

으로 발생할 수 있는 잉여 전력은 계통(그림 9의 utility subsystem)으로 공급되어 진다.

그림 10은 1[kW] 부하 시 25[%]는 인버터 출력에서 75[%]는 계통에서 부하로 전력을 공급할 때의 인버터 출력전류, 계통전류, 부하전류를 나타내고 있다.

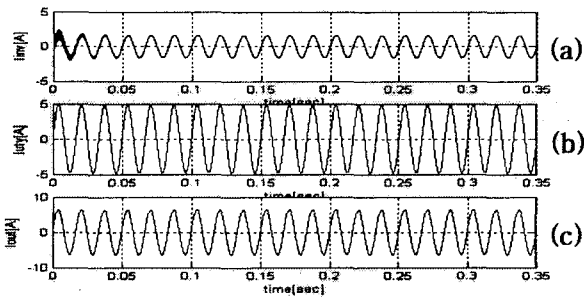


그림 10. (a)인버터 출력전류, (b)계통전류, (c)부하전류(1kW)
Fig 10. (a)Inverter output, (b)utility, (c)load current

2-4절의 그림 8와 같이 인버터의 전력 공급량이 부하에서 필요한 전력량보다 작을 때 부족 전력량은 계통에서 부하로 공급되고 있음을 파형을 통해 확인할 수 있다.

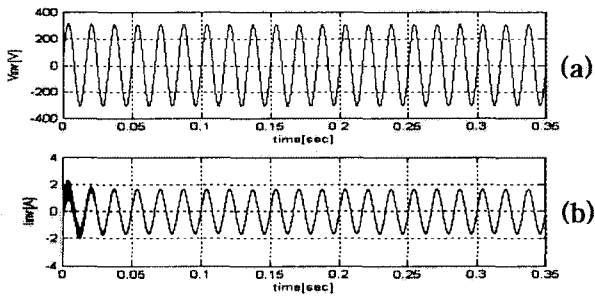


그림 11. (a)인버터 출력전압과 (b)출력전류 파형 (1kW 부하)
Fig 11. (a)Inverter output voltage and (b)current

그림 11은 인버터 출력전압과 출력전류 파형이다. 인버터의 출력전압은 60[Hz], 220[Vac]를 유지하고 있음을 파형을 통해 확인할 수 있다.

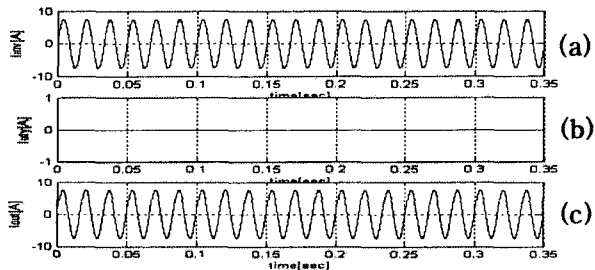


그림 12. (a)인버터, (b)계통, (c)부하전류 파형 (독립운전)
Fig 12. (a)Inverter, (b)utility, (c)load current

그림 12는 독립운전(1.1kW) 시 전류 파형을 나타내고 있다. 부하에 공급되어지는 전류는 계통에 의존하지 않고 모두 인버터에서 공급하고 있다.

3.2 실험 결과

본 논문에서는 직접 제작한 승압형 풀 브리지 컨버터, 인버터로 구성되어진 연료전지 발전시스템을 구동시켜 부하에 전력을 공급하였다.



그림 13. (a)인버터 출력전압과 (b)부하전류 파형 (무부하)
Fig 13. (a)Output voltage and (b)load current
(200V/div, 5A/div, 5ms/div)

그림 13은 설계·제작한 연료전지 발전시스템의 인버터 출력파형을 나타내고 있다.

독립운전(무부하) 시 인버터 출력이 정현화 필터를 통과한 후의 전압/전류 파형이다.

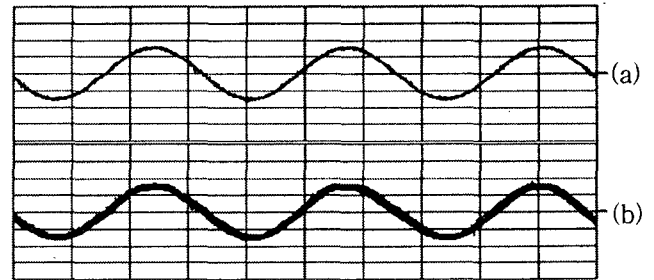


그림 14. (a)인버터 출력전압과 (b)부하전류 파형 (1.1kW 부하)
Fig 14. (a)Output voltage and (b)load current
(200V/div, 5A/div, 5ms/div)

그림 14는 1.1[kW] 부하 시 인버터 출력 전압/전류 파형을 나타내고 있다. 제작한 연료전지 발전시스템이 안정적으로 부하에 전력을 공급하고 있음을 확인할 수 있다.

다음은 연료전지 시스템을 시제품인 1.5[kW] 급 계통연계용 인버터(HPC-GC-1.5 : 효성중공업)에 적용하여 전체적인 시스템의 안정성을 확인하였다.

그림 15는 1[kW] 저항부하 시 인버터 출력전압과 부하전류 파형을 나타내고 있다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축 지원사업의 지원에 의해서 수행된 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] 김호용외, “분산형전원의 배전계통 도입전망과 대책”, 전기학회지 제 45권 10호, 1996.
- [2] 나카야마 토시오, “연료전지 발전시스템 개발상황”, 전기기술, pp. 40~49, 2000.
- [3] 엄주경, “태양광 발전용 계통선 연계형 인버터의 시 제작 및 특성에 관한 연구”, 고려대학교 석사학위논문, 1990.
- [4] Takami kagotani, “A novel ups using high frequency switch mode rectifier and high frequency PWM inverter”, IEEE, 1989.
- [5] W.I.Lu, S.n.Yeh, “Development of a single phase half bridge active power filter with the function of uninterruptible power supplies”, Proc-Electr, IEE, 2000.
- [6] L.n.Arruda, S.m.Silva, B.j.c.Filho, “PLL structures for utility connected system.”, IEEE, 2001.

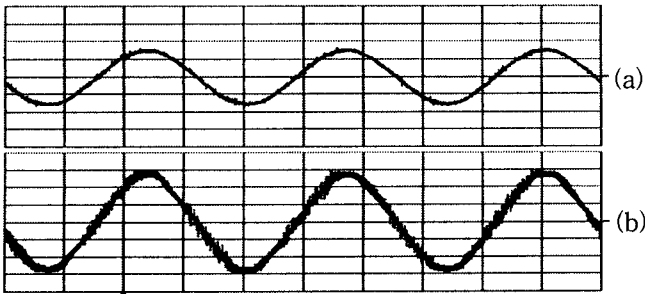


그림 15. (a)인버터 출력전압과 (b)부하전류 파형 (1[kW] 부하)
Fig 15. (a)Output voltage and (b)load current
(200V/div, 2A/div, 5ms/div)

그림 16의 파형은 25[%]는 인버터가 75[%]는 계통이 부하 분담하여 흐르는 전류를 나타내고 있다. (a)는 부하에 흐르는 전류를 나타내고, (b)는 계통에서 공급되어지는 파형을 나타낸다.

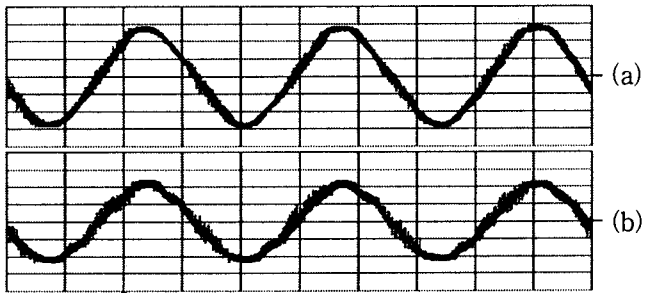


그림 16. (a)부하전류와 (b)계통전류 파형 (1[kW] 부하)
Fig 16. (a)Load current and (b)utility current
(200V/div, 2A/div, 5ms/div)

실제 인버터에서 부하로 공급되어지는 전류는 실장 문제로 인하여 측정하지 못했지만, 부하전류(a)와 계통전류(b)의 차만큼 인버터에서 공급하고 있음을 파형을 통해 알 수 있다. 그림 15, 16을 통해서 제작한 연료전지 발전시스템이 계통연계 시에도 안정적으로 부하에 전력을 공급하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

연료전지 발전시스템의 저전압·대전류 특성에 따른 효율적이고 안정적인 운전을 위하여 승압형 풀 브리지 컨버터를 설계·제작하였다.

본 논문에서는 분산전원용 연료전지 발전시스템에서 독립 운전과 연계 운전 시 계통 전원과 같은 60[Hz], 220[Vac]를 안정적으로 유지하고 있음을 실험과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.