

## 고분자전해질형 연료전지 발전시스템의 안전운전을 위한 고성능 전력변환기에 관한 연구

곽 동 걸

한중대학교 전기전자공학과

### A Study on High Efficiency Power Conditioning System for Safety Operation of PEMFC\_type Fuel Cell Generation System

Dong-Kurl Kwak

Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Hanzhong University

**초 록:** 연료전지는 연료(수소)의 화학적 반응에 의해 축적된 화학에너지를 전기에너지로 변환하여 직류 전기를 발생시키는 에너지원이다. 연료전지는 질소나 유황산화물 등의 유해한 물질을 방출하지 않으며 기계적 동력부가 없고 거의 무소음으로 운전되는 이점을 가진다. 수소연료에 의한 연료전지는 그들의 부산물로서 열과 물을 방출한다. 연료전지를 이용한 응용분야의 확대에 의해 화석연료나 수입 석유의 의존도를 현저히 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 연료전지(PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)의 출력을 최대한 활용하고 발전시스템의 안전운전을 위한 전력변환기(PCS, Power Conditioning System)에 대해 연구하였다. 본 논문에서는 고효율로 운전하는 새로운 전력변환 회로토폴로지를 설계하고, 발전시스템에 적용하여 각종 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다. 그 결과 연료전지 발전시스템은 고성능으로 동작되는 전력변환기에 의해 발전시스템의 효율과 성능을 향상시키게 된다.

**Abstract:** Fuel cells are direct current (DC) power generators. They generate electricity through an electrochemical process that converts the energy stored in a fuel directly into electricity. Fuel cells have many benefits, which produce no particulate matter, nitrogen or sulfur oxides. And they have few moving parts and produce little or no noise. When fueled by hydrogen, they yield only heat and water as byproducts. Their wide application can reduce our dependence on fossil fuels and foreign sources of petroleum. This paper is studied on a high efficiency power conditioning system (PCS) applied to the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) generation system. This paper is designed to a novel PCS circuit topology of high efficiency. Some experimental results of the proposed PCS is confirmed to the validity of the analytical results.

**Keywords:** Fuel cell, High efficiency power conditioning system, Fuel cell generation, PEMFC

### 1. 서 론

세계 에너지 수요가 산업의 발전과 인구증가에 따라 계속 증가하는 추세에 있으나 현재 주요 에너지원인 석유 및 화석연료 등 자원의 고갈과 함

께 환경오염에 따른 지구온난화 등 부작용을 초래하고 있다. 이에 최근 친환경적이면서 충분한 부존자원을 해결하고 확보될 대체에너지에 대한 요구가 절실한 실정이다. 이러한 대체에너지로 태양, 풍력, 조력 등 여러 가지가 개발, 상용화되고 있으

\*Corresponding author  
E-mail: dkkwak@hanzhong.ac.kr

며, 최근에는 자연 도처에 풍부하게 산재되어 있는 수소를 이용한 연료전지(또는, 연료발전기)가 친환경적인 미래 대체 에너지로 관심이 집중되고 있는 추세이다.<sup>1-3)</sup>

연료전지는 일정한 전력공급 후에 수명을 다하는 종래의 전지와는 달리 수소연료를 전지에 공급해 줌으로서 전력이 지속적으로 공급되는 전지(발전기)로써, 수소와 산소가 전기 화학적 작용 중에 물과 열, 전기에너지로 변환되는 원리를 이용하는 것이다. 최근 연료전지의 응용보급은 자동차, 가정 난방 및 전력공급, 전자기기 등에 상용화가 진행되어 미국과 일본을 필두로 하여 유럽과 해외 자원에 의존도가 높은 우리나라에서도 관심이 집중되고 있으며, 특히, 자동차와 가정용 발전기, 그리고 IT산업 중 모바일분야인 노트북, PC 휴대폰, 고성능 카메라 모듈 등 전력소모량이 급증하는 전자통신시스템들에서 기존 2차전지를 대체할 새로운 전원공급장치로 부상된다.<sup>4,5)</sup>

본 논문에서는 이러한 연료전지(PEMFC) 발전시스템을 최대한 활용하기 위한 출력측의 전력변환기(PCS)에 대해 연구된다. 연구결과로써, 고효

율로 운전하는 새로운 전력변환 회로토폴로지를 설계하고 발전시스템에 적용하여 각종 실험을 통하여 그 타당성을 입증시킨다. 그 결과 연료전지 발전시스템은 고효율로 동작되는 전력변환기에 의해 발전효율과 성능을 향상시키게 되는 결과를 얻는다.

## 2. 연료전지(PEMFC)의 재검토

본 연구에 사용된 연료전지인 고분자전해질형 연료전지(PEMFC)와 기타 연료전지의 간략한 비교검토를 Table 1과 Table 2에 나타낸다.<sup>6)</sup>

여기서 고분자전해질형 연료전지를 살펴보면, 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체(Membrane)로써 다른 연료전지와 구별된다. 인산형 및 알칼리형 연료전지 시스템과 비슷하게 멤브레인을 이용하는 연료전지는 촉매로써 백금을 사용한다. 멤브레인 연료전지의 개발목표는 최소 1.5 g/kW의 백금 촉매를 쓰는 것이다. 이 백금 촉매는 일산화탄소에 의한 부식에 민감하므로 일산화탄소의 농도는 1000ppm 이하로 유지하여야 한다. 고

**Table 1.** Classification of fuel cell

연료전지 형태	전 해 질	촉 매	운전 온도
인산형 (PAFC)	인산 (액체)	platinum on PTFE/carbon	200°C
알칼리형 (AFC)	수산화칼륨 (액체)	platinum on carbon	80°C
고분자전해질형(PEMFC)	나피온 Dow 폴리머 (고체)	platinum on carbon	85-100°C
용융탄산염형 (MCFC)	Lithium or potassium carbonate (액체)	니켈 또는 니켈 화합물	650°C
고체산화물형 (SOFC)	Ytria-stabilized zirconia (고체)	니켈/ Zirconia cermet	1000°C
직접메탄올형 (DMFC)	Polymer Membrane (고체)	Pt-Ru or Pt/C	25-130°C

**Table 2.** Specification of fuel cell

종 류	발전온도	전 해 질	주연료	기술수준	적용대상
고분자전해질형 (PEMFC & DMFC)	상온-100°C	이온(H+) 전도성 고분자 막	수소메탄올	개발 및 실증단계	소형전원 자동차
인산형 (PAFC)	150-200°C	인산(H3PO4)	천연가스 메탄올	상용화단계	분산전원
용융탄산염 (MCFC)	600-700°C	용융탄산염 (Li2CO3-K2CO3)	천연가스 석탄가스	개발단계	복합발전 열병합발전
고체산화물 (SOFC)	700-1000°C	고체산화물 Ytria-stabilized zirconia	천연가스 석탄가스	개발단계	복합발전 열병합발전
알칼리형 (AFC)	상온-100°C		수소	사용중	특수목적

분자전해질형 연료전지 시스템의 소형화는 자동차 응용에 가장 중요한 역할을 한다. 개발사업은 인산형 연료전지보다 약 10년이 뒤져 있지만, 인산형에 비해 저온에서 동작되며, 출력 밀도가 크므로 소형화가 가능하며, 기술이 인산형과 유사하여 응용 기술의 적용이 쉽기 때문에 현재는 고분자전해질형 연료전지의 이용 규모가 적을지라도 상업화할 수 있다. 더욱이 현재 몇 개의 시범용 고분자전해질형 연료전지의 전원에 의한 자동차는 실험결과 우수성이 입증되어 더 많은 연구 계획을 진행 중에 있다.

### 3. 연료전지 발전시스템의 구성과 PCS 해석

#### 3.1 연료전지 발전시스템의 구성

본 논문에서 제안하는 연료전지(PEMFC) 발전시스템의 전력흐름 블록도를 Fig. 1에 나타낸다. 시스템구성은 먼저 연료전지에서 전기화학반응에 의해 직류 전기에너지를 발생하면, 발생된 낮은 직류전압을 승압용 PCS인 승압용 컨버터를 통해 높은 직류전압으로 승압된 후, 일반 가정 및 산업용 전기기기들이 이용할 수 있는 교류전원으로 바꾸기 위한 역변환 PCS인 DC-AC 인버터를 거쳐 부하로 공급되는 일련의 전력흐름체계를 가진다.

#### 3.2 고효율의 전력변환기(PCS)의 구성 및 동작원리

연료전지시스템의 발생전력을 최대한 활용하기 위한 본 논문에서 제안하는 고효율의 PCS(승압용 컨버터와 DC-AC 인버터) 회로토폴로지를 Fig. 2에 보인다. 연료전지에서 출력된 직류전압은 새로운 절연형 DC-DC 부스트 컨버터에 의해 승압된다. 여기서 부스트 컨버터는 부분공진의 기법에 의해 사용된 스위칭 소자( $Q_1, Q_2$ )를 무손실로 동작

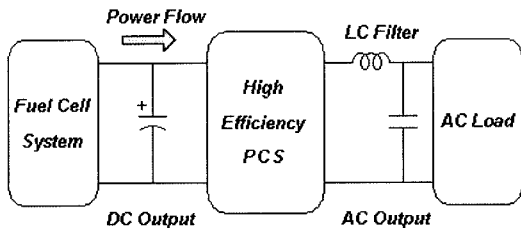


Fig. 1. Power flow diagram of fuel cell generation system.

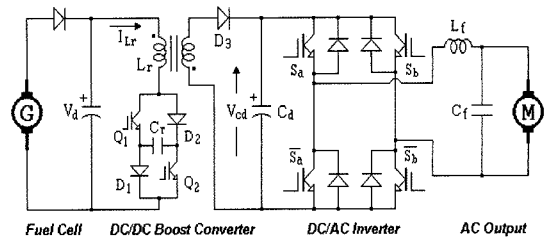


Fig. 2. Circuit topology of a proposed high efficiency PCS.

시키게 되어 컨버터의 효율을 증대시킨다. 또한 승압된 직류전압은 DC-AC 인버터에서 교류전원으로 출력측에 공급된다.

제안된 고효율의 전력변환기(PCS)의 스위칭 동작에 대한 동작원리를 살펴보면 4개의 동작모드로 해석된다. 먼저 초기조건으로 스위치  $Q_1, Q_2$ 는 오프, 커패시터  $C_r$ 에는 입력측 단자전압과 출력전압  $V_{cd}$ 의 합으로 충전되어 있다.

#### < Mode 1 ; 구간 $T_1$ >

스위치  $Q_1$ 과  $Q_2$ 를 동시에 온하면, 회로경로는  $V_{d+} - L_r - Q_1 - C_r - Q_2 - V_{d-}$ 로써 직렬공진회로를 형성한다. 스위치 온 직전의 리액터 전류  $i_{Lr}$ 는 영이므로  $Q_1, Q_2$ 는 영전류스위칭(ZCS)으로 동작한다.

#### < Mode 2 ; 구간 $T_2$ >

모드 2는 커패시터  $C_r$ 의 전압이 영으로 되어 다이오드  $D_1, D_2$ 가 도통되어, 스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 리액터  $L_r$ 의 전류는  $Q_1 - D_1, D_2 - Q_2$ 의 두 회로로 분류한다. 이 때의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다.

#### < Mode 3 ; 구간 $T_3$ >

스위치  $Q_1, Q_2$ 를 동시에 오프하면, 리액터  $L_r$ 의 전류는  $D_2 - C_r - D_1$ 를 통해서 흐르며,  $L_r$ 와  $C_r$ 는 다시 직렬공진을 하여  $C_r$ 를 충전시킨다.  $C_r$ 와 병렬로 배치된 스위치  $Q_1, Q_2$ 의 오프 동작은 공진초기 커패시터  $C_r$ 의 전압이 영이므로 영전압스위칭(ZVS)로 동작된다. 이와 같이 사용된 제어스위치의 ZCS,와 ZVS 동작에 의해 스위칭손실이 발생하지 않아 컨버터의 효율의 증대시키게 된다.

#### < Mode 4 ; 구간 $T_4$ >

모드 4는 커패시터  $C_r$ 의 전압이 출력전압  $V_{cd}$ 로 충전된 후, 리액터의 축적에너지가 변압기 2차측을 통하여 부하측으로 유입되는 모드로써 리액터의 전류는 직선적으로 감소된다. 이 모드는 리액터전류  $i_{Lr}$ 가 영으로 되면 종료된다.

### 4. 시뮬레이션 검토 및 실험결과

상기의 DC-DC 컨버터부의 동작모드별 동작원리를 확인하기 위하여 Table 3의 회로정수를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션(PSIM 6.0)을 실행한 결과를 Fig. 3에 나타낸다.

직류를 교류로 변환시키는 인버터부는 PWM 제어방식에 의해 제어스위치( $S_a \sim S_b$ )를 동작시킨다. 출력측 인버터부의 동작을 확인하기 위하여 Fig. 4에 시뮬레이션 동작파형을 나타낸다.

사용된 PWM 방식은 1.44[kHz]의 삼각파 캐리어 신호와 60[Hz]의 정현파 변조신호를 이용하였으며, 변조도는 0.8, 그리고 부하는 100Ω 저항부하를 사용하였다.

이들 시뮬레이션 파형들은 앞서의 동작원리 및 회로토폴로지의 타당성이 입증된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 제안된 연료전지 발전시스템의 동적응답 특성을 확인하기 위한 연료전지(PEMFC;

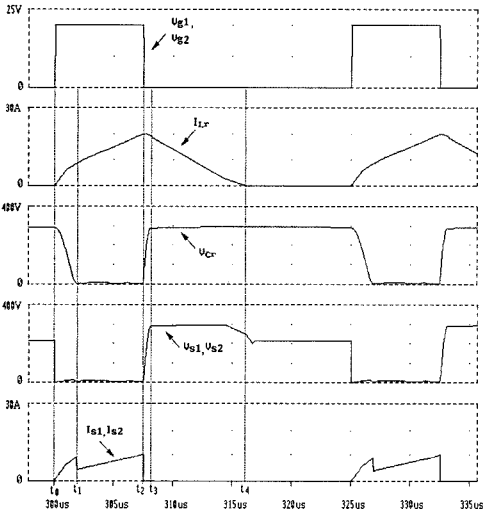


Fig. 3. Operation waveforms for DC-DC converter.

Table 3. Circuit parameters

연료전지 출력용량( $V_d$ )	1.2kW(24V)	출력 평활용커패시터 $C_d$	2000 $\mu$ F
출력전압( $V_{cd}$ )	300V	인버터 등가 부하전류원 $I_o$	3A
리액터 $L_r$	90 $\mu$ H	스위칭 주파수 $f_c$	40kHz
출력 필터리액터 $L_f$	7mH	출력 필터커패시터 $C_f$	50 $\mu$ F
공진커패시터 $C_r$	50nF	듀티율 $D_c$ ( $T_{on}/T_c$ )	30%

1.2kW Ballard Nexa Power Module)를 사용한 실험 측정파형을 나타낸다. Fig. 5는 무부하에서 500

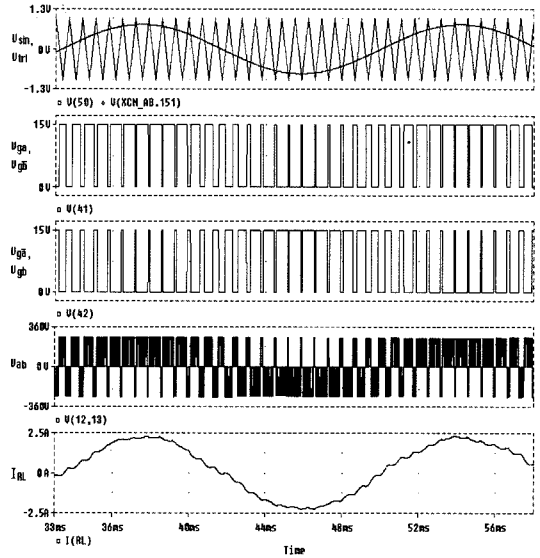


Fig. 4. Waveforms for PWM control of DC-AC inverter.

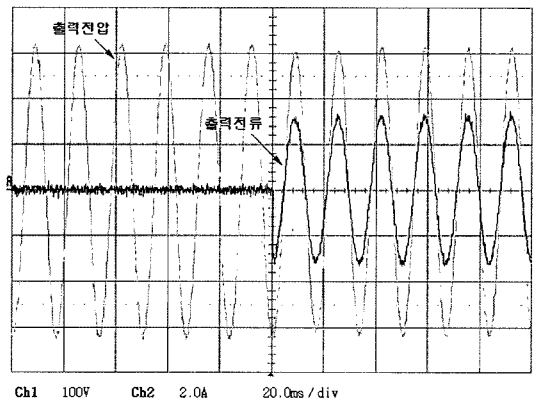


Fig. 5. Dynamic response of a proposed fuel cell system (Case of "no load  $\rightarrow$  500[W]")

[W]로 부하변동을 시켰을 경우와 Fig. 6은 500[W]의 부하상태에서 운전 중에 무부하로 변동시켰을 경우에 대한 출력전압과 출력전류의 파형을 나타내고 있다. 두 경우 모두, 부하 급변 시에 지령에 대한 빠른 응답과 안정적인 동작특성을 보였다.

Fig. 7은 제안된 연료전지 발전시스템과 기존의 발전시스템에 대한 효율측정결과를 나타낸다. 이는 기존의 PCS가 적용된 연료전지 발전시스템의 효율과 비교해서 상당히 높은 효율을 가지는 것으로서, 제안된 전력변환기는 사용된 제어스위치들의 스위칭 손실이 무시되어 부하의 증대와 더불어 높은 효율을 보인 결과이다.

상기의 측정분석들에 의해 본 논문에서 제안된

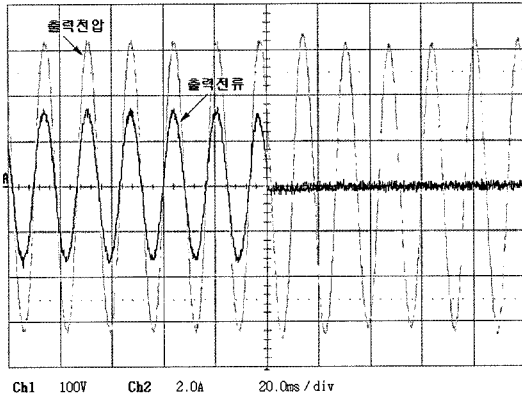


Fig. 6. Dynamic response of a proposed fuel cell system (Case of "500[W] → no load").

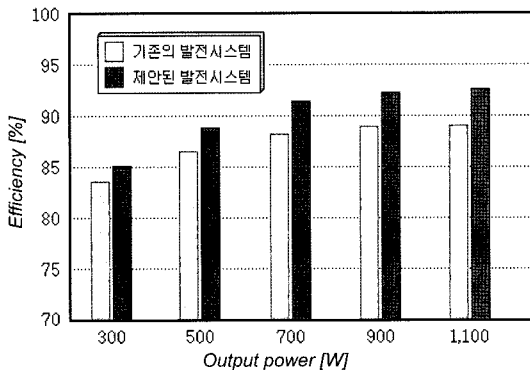


Fig. 7. Measured efficiency comparison.

고효율 전력변환기가 연료전지(PEMFC) 발전시스템에 적합함을 확인시켰으며 실용성을 입증시켰다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 연료전지(PEMFC) 시스템에서 출력되는 전기에너지를 최대한 활용하기 위한 고효율의 전력변환기에 대해 연구되었다. 제안된 전력변환기는 사용된 제어스위치들의 손실이 주어지지 않는 새로운 회로토폴로지로 설계되어 이론적 해석과 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다. 특히 제안된 DC-DC 부스트 컨버터부에 사용된 제어스위치들은 공진 동작에 의해 영전류스위칭 및 영전압스위칭으로 동작되어 스위칭의 턴-온, 턴-오프 손실을 거의 무시할 수 있었다. 그 결과 연료전지 발전시스템은 고효율로 동작되는 전력변환기에 의해 발전시스템의 효율을 증대시키는 이점을 가지고 있다. 또한 실측 분석결과들에 의해 제안된 고효율의 전력변환기가 연료전지(PEMFC) 발전시스템에 적합함을 알 수 있었고 그 실용성을 입증하였다.

## 참고문헌

1. R. R. Moore, and V. Raman, "Hydrogen Infrastructure for Fuel Cell Transportation", Journal of hydrogen energy 23, 617-620, 1998.
2. A. E. Farrell, D. W. Keith, and J. J. Corbett, "A strategy for Introducing Hydrogen into Transportation", Energy Policy 31, 1357-1367, 2003.
3. T. Oi, and K. Wada, "Feasibility Study on Hydrogen Refueling Infrastructure for Fuel Cell Vehicles using the Off-peak Power in Japan", International Journal of Hydrogen Energy 29, 347-354, 2004.
4. K-A. Adamson, "Calculating the Price Trajectory of Adoption of Fuel Cell Vehicles", International Journal of Hydrogen Energy 30, 341-350, 2005.
5. T. O'Garra, S. Mourato, and P. Pearson, "Analysing Awareness and Acceptability of Hydrogen Vehicles: A London Case Study", International Journal of Hydrogen Energy 30, 649-659, 2005.
6. M. Momirlan, and T. N. Veziroghu, "Current Status of Hydrogen Energy", Renewable & sustainable energy reviews 6, 141-179, 2002.