

PEMFC 발전시스템용 고효율 PCS 개발에 관한 연구

곽동걸, 정원석, 정도영, 김춘삼, 심재선
강원대학교

A Study on Development of High Efficiency PCS using in PEMFC Generation System

Dong-Kurl Kwak, Won-Seok Jung, Do-Young Jung, Choon-Sam Kim, Jae-Sun Shim
Kangwon National University

Abstract - In this paper, authors deal with a power conditioning system (PCS) of high efficiency for a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) generation system. Fuel cells are a 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 studies on a novel PCS circuit topology of high efficiency using in PEMFC generation system. The controlling switches in the PCS is operated to soft switching. Some digital simulation results and experimental results for the proposed PCS is confirmed to the validity of the analytical results.

1. 서 론

세계 에너지 수요가 산업의 발전과 인구증가에 따라 계속 증가하는 추세에 있으나 현재 주요 에너지원인 석유 및 화석연료 등 자원의 고갈과 함께 환경오염에 따른 지구온난화 등 부작용을 초래하고 있다. 이에 최근 친환경 경적이면서 충분한 부존자원을 해결하고 확보될 대체에너지에 대한 요구가 절실한 실정이다. 이러한 대체에너지로 태양, 풍력, 조력 등 여러 가지가 개발, 상용화되고 있으며, 최근에는 자연 도처에 풍부하게 산재되어 있는 수소를 이용한 연료전지(또는, 연료발전기)가 친환경적인 미래 대체 에너지로 관심이 집중되고 있는 추세이다.^{1,2)} 연료전지는 일정한 전력공급 후에 수명을 다하는 종래의 전지와는 달리 수소연료를 전지에 공급해 줌으로써 전력이 지속적으로 공급되는 전지(발전기)로써, 수소와 산소가 전기 화학적 작용 중에 물과 열, 전기에너지로 변환되는 원리를 이용한 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 전자통신시스템 등에서 기존 2차전지를 대체할 새로운 전원공급장치로 부상된다. 또한 최근 연료전지 발전시스템의 출력을 최대한 활용하기위하여 발전시스템에 사용되는 전력변환장치(PCS)의 고효율화에 큰 관심을 가지고 있다.^{2,3)} 이는 PCS에 사용된 전력용 반도체 스위치의 손실전력이 연료전지 발전시스템에서 공급되는 전체 전력의 10~15% 이상을 차지하는 것으로 보고되고 있다. 그러므로 고효율의 PCS를 개발하기 위해서는 PCS에 사용된 전력변환

용 반도체 스위치의 스위칭 손실을 최소화시키는 것으로써, 저손실의 PCS 회로토폴로지 개발이 연료전지 발전시스템의 주요한 요소가 된다.

이에 준하여 본 논문에서는 고분자전해질형 연료전지(PEMFC) 발전시스템을 최대한 활용하기 위한 고효율의 PCS에 대해 연구한다. 연구결과로써, 고효율로 운전하는 새로운 전력변환 회로토폴로지를 설계하고 발전시스템에 적용하여 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 그 타당성을 입증시킨다. 그 결과 연료전지 발전시스템은 고효율로 동작되는 전력변환기에 의해 발전효율과 성능을 향상시키게 되는 결과를 얻는다.

2. PEMFC 발전시스템의 구성

2.1 고분자전해질형 연료전지 (PEMFC)

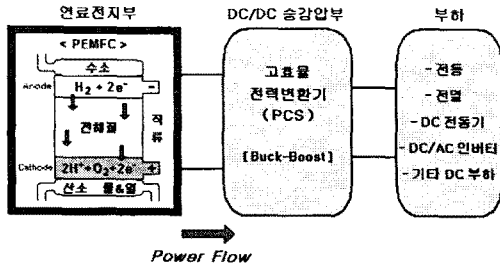
연료전지는 연료(수소)의 화학적 반응에 의해 축적된 화학에너지를 전기에너지로 변환하여 직류 전기를 발생시키는 에너지원이다. 연료전지는 질소나 유황산화물 등의 유해한 물질을 배출하지 않으며 기계적 동력부가 없고 거의 무소음으로 운전되는 이점을 가진다. 또한 연료전지는 일정한 전력공급 후에 수명을 다하는 종래의 전지와는 달리 수소연료를 전지에 공급해 줌으로써 전력이 지속적으로 공급되는 전지(발전기)로써, 수소와 산소가 전기화학적 작용 중에 물과 열, 전기에너지로 변환되는 원리를 이용한 것이다.^{1,2)} 본 연구에 사용된 고분자전해질형 연료전지(PEMFC)의 사양을 표 1에 주어진다.²⁾ 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체(Membrane)로써 다른 연료전지와 구별된다.

<표 1> PEMFC의 주요 사양

발전온도	상온-100℃	촉매	platinum on carbon
전해질	나파온 Dow 폴리머(고체)	기술수준	개발 및 실증단계
주연료	수소메탄올	적용대상	소형전원, 자동차 등

2.2 PEMFC 발전시스템의 구성

본 논문에서 제안하는 PEMFC 발전시스템의 구성 블록도를 그림 1에 나타낸다. 시스템구성은 먼저 연료전지에서 전기화학반응에 의해 직류 전기에너지를 발생하면, 발생된 DC전압을 승강압용 컨버터를 통해 부하가 요구하는 전압으로 승강압된 후, 직류전원으로 구동되는 각종 전기, 전자 및 통신기기들에 공급되는 일련의 전력흐름 체계를 가진다. 연료전지 발전시스템의 출력을 최대한 활용하기 위해서는 발전시스템에서 손실량이 가장 큰 전력변환부(PCS)의 손실을 최대한 줄이는 것이다.



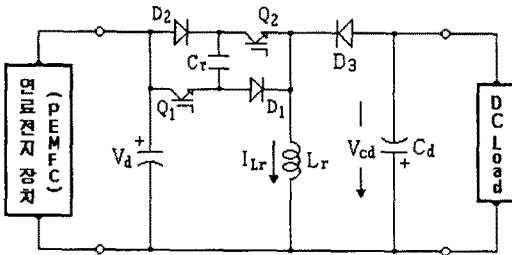
<그림 1> PEMFC 발전시스템의 구성 블록도

이는 PCS용 DC/DC 승강압용 컨버터에서 발생하는 손실의 대부분이 사용된 전력용 반도체 스위치에서 발생하는 손실이다. 최근 이를 개선하기 위해 공진회로를 스위치와 조합시킨 소프트 스위칭 컨버터 회로들이 많이 연구되고 있다.³⁾ 그러나 이들 컨버터들은 공진회로 추가에 따른 구성소자의 수가 증대되고 제어방법이 복잡한 문제점이 주어진다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 부분공진회로⁴⁾가 적용된 새로운 소프트 스위칭 DC/DC 컨버터를 제안하여 고효율의 연료전지 발전시스템을 설계하고자 한다.

3. 제안한 고효율 PCS 회로구성 및 동작원리

3.1 회로구성

제안한 PCS용 고효율 승강압용 컨버터의 주 회로도를 그림 2에 나타낸다. 회로구성은 기존의 승강압용 DC/DC 컨버터의 입력측과 부하단 사이에 고효율을 이루기 위한 소프트 스위칭(영전류 및 영전압 스위칭)과 승강압을 겸한 부분공진 회로부를 접속한다.



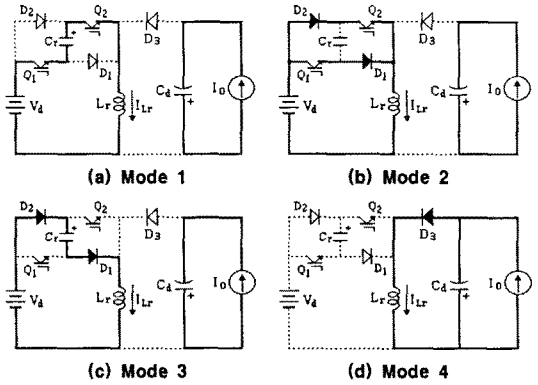
<그림 2> 제안한 고효율 승강압용 DC/DC 컨버터

소프트 스위칭 회로토폴로지를 위한 공진회로부는 제어용 반도체소자들과 승압용 인덕터(L_r) 그리고 공진용 커패시터(C_r)로 구성되며, 커패시터에 축적된 에너지는 스위치 Q_1 , Q_2 의 턴-온 시 공진동작에 의해 입력측으로 유입되는 모드를 가진다. 스위치 Q_1 , Q_2 의 턴-온은 인덕터 L_r 의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭으로 되고, 턴-오프는 공진회로의 동작에 의한 커패시터 C_r 의 전압이 영으로 될 때 동작되어 영전압 스위칭으로 된다. 그 결과 제안한 컨버터는 소프트 스위칭에 의한 스위칭손실이 감소되어 시스템 효율을 증대시킨다.

3.2 동작원리

출력 부하측 인덕턴스가 공진용 인덕턴스와 비교하여 충분히 큰 것으로 가정하면, 공진 1주기 동안에는 부하를 정전류원 I_o 로 볼 수 있다. 그림 3은 스위칭 1주기 (T_c)에 대한 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 다음과 같은 4가지 동작모드로 구분된다.

공진회로부의 초기조건으로 스위치 Q_1 , Q_2 는 오프, 커패시터 C_r 에는 입력전압 V_d 와 출력전압 V_{cd} 의 합으로 충전되어 있다.



<그림 3> 제안한 고효율 컨버터의 각 동작모드별 등가회로

모드 1 ($T_1 = t_1 - t_0$)

시각 t_0 에서 스위치 Q_1 과 Q_2 를 동시에 턴-온하면, 회로경로는 $V_d - Q_1 - C_r - Q_2 - L_r - V_d$ 의 직렬공진 회로가 형성된다. 스위치 턴-온 직전의 인덕터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 영이므로 Q_1 , Q_2 는 영전류 스위칭으로 동작한다. 그리고 전원전압 V_d 와 커패시터 충전전압 V_{cr} 과의 합이 인덕터 L_r 에 인가되어 L_r 와 커패시터 C_r 는 직렬공진을 하고 C_r 가 방전한다.

모드 2 ($T_2 = t_2 - t_1$)

모드 2는 커패시터 전압 v_{cr} 이 영으로 되어 다이오드 D_1 , D_2 가 도통되는 모드이다. 제어스위치들에 의한 단락 회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 $Q_1 - D_1$, $D_2 - Q_2$ 의 두 회로로 분류한다. 이 모드의 기간에서 인덕터 L_r 는 에너지를 축적한다.

모드 3 ($T_3 = t_3 - t_2$)

시각 t_2 에서 스위치 Q_1 , Q_2 를 오프하면, 인덕터 L_r 의 전류 i_{Lr} 는 $D_2 - C_r - D_1$ 를 통하여 흐르고 인덕터 L_r 와 커패시터 C_r 는 다시 직렬공진을 하여 C_r 를 충전시킨다. 커패시터 C_r 와 병렬로 배치된 스위치들의 턴-오프 동작은 공진초기에서 C_r 의 전압이 영이므로 영전압 스위칭으로 동작된다.

모드 4 ($T_4 = t_4 - t_3$)

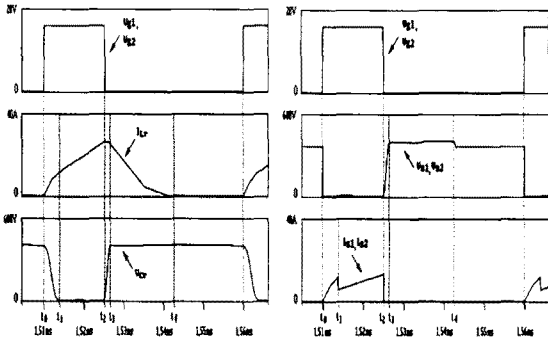
모드 4는 커패시터 C_r 의 충진이 끝난 후 다이오드 D_3 를 통하여 인덕터 전류가 부하측으로 유입되는 모드이다. 이 때의 인덕터 전류는 직선적으로 감소하고, 인덕터 전류가 영으로 되면 이 모드는 끝난다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안한 고효율 승강압용 PCS의 동작특성을 확인하기 위해 PSIM으로 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수들을 표 2에 나타낸다.

<표 2> 시뮬레이션의 회로정수

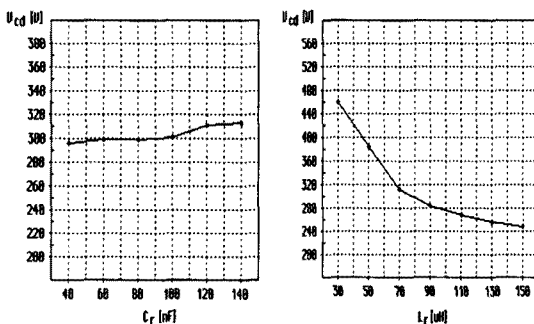
연료전지 (PEMFC) 출력	1.2kW (100V)	평활용 커패시터 C_d	2000 μ F
출력전압 V_{cd}	300V	부하전류원 I_o	3A
공진 인덕터 L_r	60 μ H	스위칭 주파수 f_c	20kHz
공진 커패시터 C_r	90nF	듀티율 D_c (T_{on}/T_c)	30%



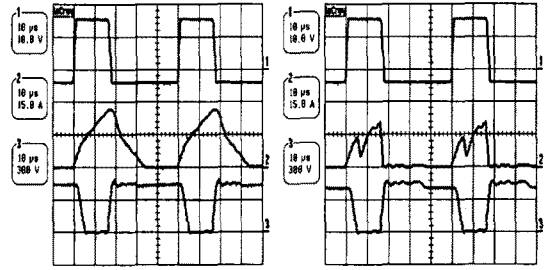
<그림 4> 스위칭 동작에 대한 각부 시뮬레이션 파형

제안된 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각 부의 시뮬레이션 파형을 그림 4에 나타낸다. 그림 4의 시뮬레이션 결과파형을 검토해보면, 시각 t_0 에서 스위치 Q_1, Q_2 를 턴-온하면 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r 가 방전을 시작하고 인덕터 L_r 는 에너지를 축적하게 된다. 이 시점에서의 스위치 Q_1, Q_2 에 흐르는 전류 i_s 는 인덕터 전류 i_{Lr} 와 같고 스위치들은 영전류 스위칭으로 동작된다. 시각 t_1 에서 커패시터 전압 v_c 가 영으로 되면 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 이 시점의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 스위치 Q_1 과 Q_2 로 분류된다. 시각 t_2 에서 스위치를 오프하면 다시 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r 가 충전을 시작한다. 그리고 이 시점에서의 스위치 Q_1, Q_2 양단전압은 커패시터 전압 v_c 와 같고 스위치들은 영전압 스위칭으로 동작한다. 시각 t_3 에서 커패시터 전압 v_c 은 V_o 와 V_{cr} 의 합으로 되고, 인덕터 전류 i_{Lr} 는 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소하여 시각 t_4 에서 영으로 된다. 이상의 시뮬레이션 결과들은 앞서의 이론적 해석의 타당성을 입증시켜준다. 공진용으로 이용된 스너버 커패시터 C_r 의 용량변화에 대한 출력전압 V_{cr} 의 변화와 공진 인덕터 L_r 의 용량변화에 대한 출력전압 V_{cr} 의 변화를 그림 5에 나타낸다. 출력전압은 공진용 커패시터의 용량변화에는 거의 변화가 없으나 공진용 인덕터의 변화에는 크게 변화된 모습을 보인다.

실험회로 구성은 입력으로 연료전지(PEMFC) 100V, 1.2kW급을 사용하였으며, 부하는 저항 100Ω을 사용하였다. 전력용 스위치는 IGBT를 사용하였고 다이오드는 고속 역회복용(FRD)을 사용하였다. 기타 회로정수들은 표 2를 기준하였다. 그림 6은 제어스위치 Q_1, Q_2 의 스위칭 주파수 20kHz, 듀티율 30%인 게이트 제어신호에 대한 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_c 의 파형과 스위치 Q_1, Q_2 에 흐르는 전류 i_s 와 스위치 양단에 걸리는 전압 v_s 의 파형을 나타낸다.

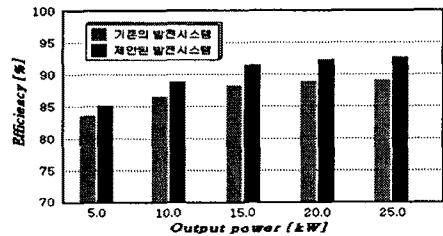


<그림 5> 공진용 소자의 변화에 대한 출력전압 관계



<그림 6> 스위칭 동작에 대한 각부 실험 파형

그림 6의 실험파형에서 공진회로는 공진 1주기 동안 지속적으로 이루어지지 않고 스위치의 턴-온과 턴-오프시에만 부분적인 공진동작을 볼 수 있으며, 이러한 동작에 의해 공진소자들의 용량분담과 스트레스를 줄이고, 출력전류가 증가할 경우 공진손실이 감소된다. 그리고 제어스위치들은 공진동작에 의해 영전류에서 턴-온되며 영전압에서 턴-오프되는 소프트 스위칭 동작을 보인다. 이것은 스위칭 손실이 적게 되어 컨버터의 효율을 증대시켰다. 그림 7은 제안한 고효율 PCS가 적용된 연료전지 발전시스템과 기존의 PCS가 적용된 연료전지 발전시스템에 대한 효율측정 비교를 나타낸다. 제안한 발전시스템이 기존의 발전시스템 보다 높은 효율을 보였다.



<그림 7> 효율측정 비교

5. 결론

본 논문에서는 연료전지 발전시스템의 출력을 최대한 활용하기 위한 새로운 고효율의 PCS가 제안되었다. 제안한 고효율 승강압용 컨버터는 새로운 소프트 스위칭 회로토폴로지에 의해 영전류 및 영전압으로 스위칭되어 스위치의 턴-온, 턴-오프 손실이 저감되어 시스템의 효율을 증대시켰다. 제안한 고효율 PCS는 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 이론적 해석의 타당성이 입증되었다.

- 감사의 글 -

본 연구는 강원대학교 산학협력단 산학공동연구 지원사업으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] A. E. Farrell, D. W. Keith, and J. J. Corbett, "A strategy for Introducing Hydrogen into Transportation", Energy Policy 31, pp. 1357-1367, 2003
- [2] K-A. Adamson, "Calculating the Price Trajectory of Adoption of Fuel Cell Vehicles", International Journal of Hydrogen Energy 30, pp. 341-350, 2005
- [3] D. Sadarnac, W. Abida, and C. Karimi, "The Double Discontinuous Mode Operation of a Converter: A method for soft switching", IEEE Trans. on PE, Vol. 19, No. 2, pp. 453-460, 2004
- [4] D. K. Kwak, "A Study on High Efficiency Power Conditioning System for Safety Operation of PEMFC_type Fuel Cell Generation System", Journal of the Microelectronics & Packaging Society, Vol. 13, No. 1, pp. 57-61, 2006