

비상전원용 연료전지 발전시스템의 고효율 컨버터에 관한 연구

곽동걸, 이승호, 김정섭, 정원석, 정도영
강원대학교 방재기술전문대학원

A Study on High Efficiency Converter of Fuel Cell Generator used to Emergency Electric Power Source

Dong-Kurl Kwak, Seung-Ho Lee, Jung-Seob-Kim,
Won-Seok Jung, Do-Young Jung
Professional Graduate School of Disasters Prevention Technology,
Kangwon University

1. 서 론

현재 주요 에너지원인 석유 및 화석연료 등 자원의 고갈과 함께 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 있으며, 최근에는 자연 도처에 풍부하게 산재되어 있는 수소를 이용한 연료전지(또는, 연료발전기)가 친환경적인 미래 대체 에너지로 관심이 집중되고 있는 추세이다.¹⁻²⁾ 연료전지는 연료(수소)의 화학적 반응에 의해 축적된 화학에너지를 전기에너지로 변환하여 직류(DC) 전기를 발생시키는 에너지원이다. 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 기존 2차전지를 대체할 새로운 전원공급장치로 부상된다.³⁾

본 논문에서는 예비 전력공급설비의 일환으로 비상시 소방 방재설비에 적용되는 연료전지 발전시스템에 대해 연구된다. 화재 및 재해발생시 상용 전력공급의 차단은 소방 방재용 장비 및 기기들을 무용지물로 만들어 더욱 큰 피해를 가져온다. 이를 대비한 비상용 전력공급장치로 연료전지 발전시스템이 활용된다. 연료전지 발전시스템의 출력을 최대한 활용하기 위해서는 발전시스템에서 손실량이 가장 큰 전력변환기부의 손실을 최대한 줄이는 것이다. 본 논문에서는 고효율의 연료전지 발전시스템을 개발하기 위한 새로운 고효율의 전력변환기가 제안된다. 전력변환기는 연료전지에서 출력된 낮고 시변적인 DC전압을 승압용 컨버터를 통해 부하가 요구하는 전압으로 승압시키고 정전압제어를 통해 전압을 안정화시키는 구조를 가진다.

본 논문에서는 1kW급 연료전지 발전시스템에 적용될 비절연형 고효율 승압용 컨버

터가 제안된다. 또한 승압용 컨버터에 사용된 제어스위치들은 새로운 소프트 스위칭 회로토폴로지에 의해 스위칭 손실을 현저히 감소시켜 시스템 효율을 더욱 증대시키는 이점이 주어진다.

2. 연료전지 발전시스템의 구성

2.1 고분자전해질형 연료전지

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. 또한 연료전지는 일정한 전력공급 후에 수명을 다하는 종래의 전지와는 달리 수소연료를 전지에 공급해 줌으로서 전력이 지속적으로 공급되는 전지(발전기)로써, 수소와 산소가 전기화학적 작용 중에 물과 열, 전기에너지로 변환되는 원리를 이용한 것이다.^{2,3)} 본 연구에 사용된 고분자전해질형 연료전지(PEMFC; Proton Exchange Membrane Fuel Cell)의 사양을 Table 1에 주어진다.³⁾ 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체(Membrane)로써 다른 연료전지와 구별된다.

Table 1. Specification of PEMFC

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

2.2 연료전지 발전시스템의 구성

본 논문에서 제안하는 연료전지(PEMFC) 발전시스템의 구성 블록도를 Fig. 1에 나타낸다.

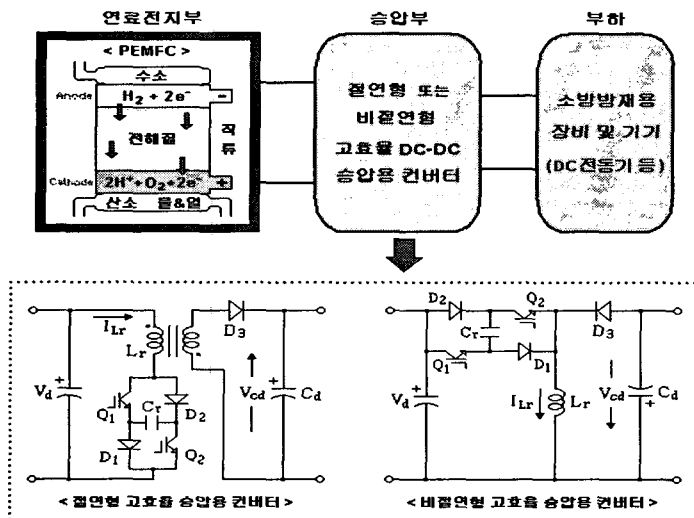


Fig. 1. Configuration of fuel cell generation system

시스템구성은 먼저 연료전지에서 전기화학반응에 의해 직류 전기에너지를 발생하면, 발생된 낮은 DC전압을 승압용 컨버터를 통해 부하가 요구하는 전압으로 승압된 후, 직류전원으로 구동되는 소방방재용 장비 및 기기들에 공급된다.

연료전지 발전시스템의 출력을 최대한 활용하기 위해서는 발전시스템에서 손실량이 가장 큰 전력변환기부(DC-DC 승압용 컨버터)의 손실을 최대한 줄이는 것이다. 또한 DC-DC 컨버터에서 발생하는 손실의 대부분은 사용된 전력용 반도체 스위치에서 발생하는 손실이다. 최근 이를 개선하기 위해 공진회로를 스위치와 조합시킨 소프트 스위칭 컨버터 회로들이 많이 연구되고 있다. 그러나 이들 컨버터들은 공진회로 추가에 따른 구성소자의 수가 증대되고 제어기법이 복잡한 문제점이 주어진다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 부분공진회로가 적용된 새로운 소프트 스위칭 DC-DC 컨버터를 제안하여 고효율의 연료전지 발전시스템을 설계하고자 한다.

3. 비절연형 고효율 승압용 컨버터 해석

3.1 회로구성

제안한 비절연형 고효율 승압용 컨버터의 주 회로도를 Fig. 2에 나타낸다. 회로구성은 기존의 승압용 DC-DC 컨버터의 입력측과 부하단 사이에 고효율을 이루기 위한 소프트 스위칭(영전류 및 영전압 스위칭)과 승압을 겸하는 부분공진 회로부를 접속한다.

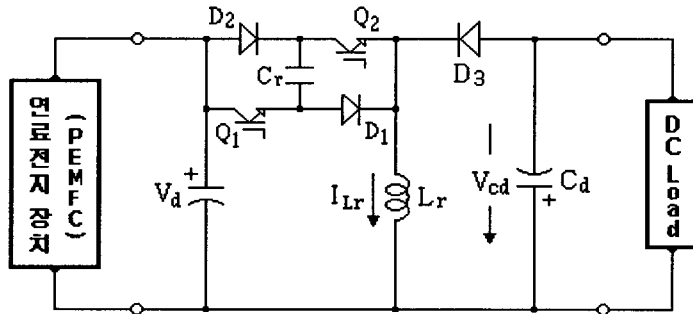


Fig. 2. A proposed high efficiency boost converter

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 제안된 컨버터는 소프트 스위칭에 의한 스위칭 손실이 감소되어 시스템의 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. Fig. 3은 스위칭 1주기(T_c)에 대한 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 4가지 동작모드로 구분된다.

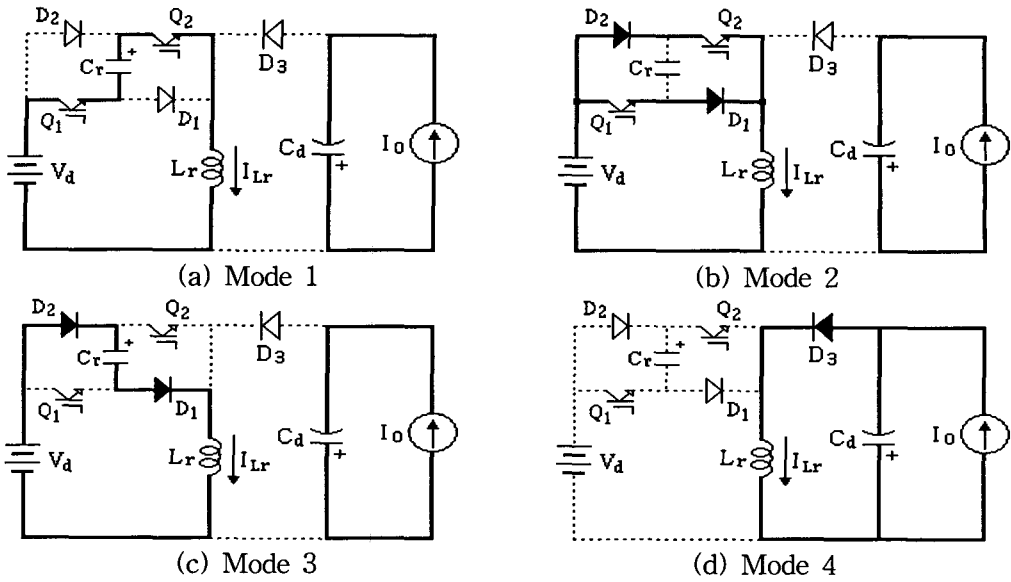


Fig. 3. Operational modes of proposed converter

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

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 $V_{cr} (= V_d + V_{cd})$ 와의 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 단락회로가 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 $D_2 - C_r - D_1$ 을 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 충전이 끝난 후 다이오드 D_3 를 통하여 인덕터 전류가 부하측으로 유입되는 모드이다. 이 때의 인덕터 전류 직선적으로 감소하며, 인덕터 전류가 영으로 되면 이 모드는 끝난다.

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 비절연형 고효율 승압용 컨버터의 동작특성을 확인하기 위해 PSIM으로 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수들을 Table 2에 나타낸다.

Table 2. Parameters of simulated circuit

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%

제안된 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각 부의 시뮬레이션 파형을 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4(a)에는 공진회로의 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr} 을 스위칭 동작에 대해 각 모드별로 나타내고 있으며, 또한 Fig. 4(b)에 제어스위치의 양단전압 v_{s1}, v_{s2} 와 전류 i_{s1}, i_{s2} 동작파형을 나타낸다.

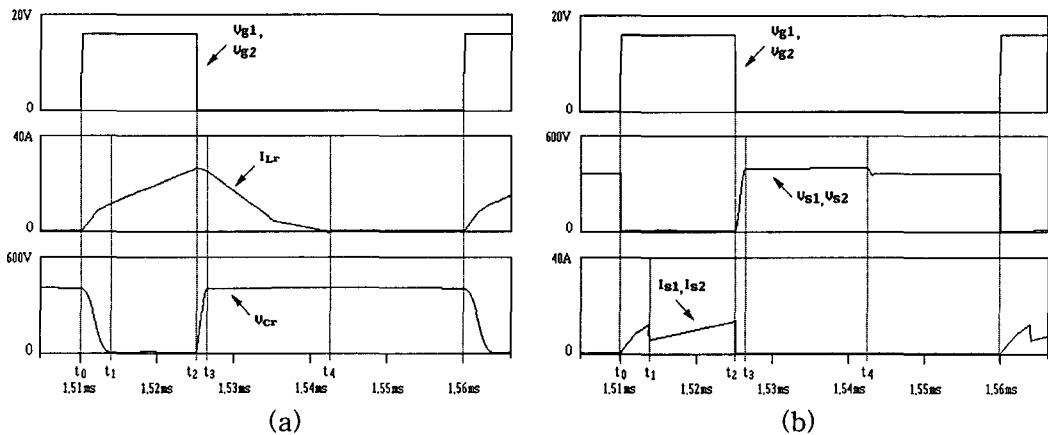


Fig. 4. Simulation waveforms for switching operation

Fig. 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 를 흐르는 전류 i_s 는 인덕터 전류 i_{Lr} 와 같고 스위치들은 영전류 스위칭으로 동작된다. 시각 t_1 에서 커패시터 전압 v_{cr} 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_{cr} 와 같고 스위치들은 영전압 스위칭으로 동작한다. 시각 t_3 에서 커패시터 전압 v_{cr} 은 V_d 와 V_{cd} 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.

Fig. 5는 제안된 비절연형 승압용 컨버터를 사용한 연료전지 발전시스템의 경우와 절연형 승압용 컨버터를 사용한 연료전지 발전시스템⁴⁾의 경우에 대한 시스템 효율측정 비교를 나타낸다. 절연형 컨버터를 사용한 경우 절연을 위해 사용된 변압기의 손실증분으로 인해 비절연형 컨버터를 사용한 경우에 비해 효율이 저하된 결과를 가져왔다.

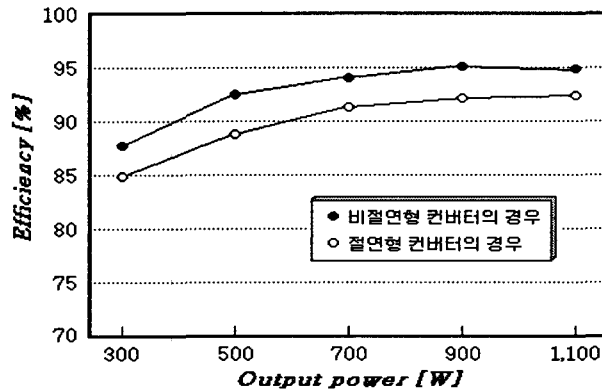


Fig. 5. Measured efficiency comparison

5. 결론

본 논문에서는 예비 전력공급설비의 일환으로 비상시 소방 방재설비에 적용되는 연료전지 발전시스템에 대해 연구되었으며, 또한 연료전지 발전시스템의 출력을 최대한 활용하기 위한 새로운 고효율의 전력변환기가 제안되었다. 제안된 고효율 승압용 컨버터는 비절연형으로 설계되고 사용된 제어스위치들은 새로운 소프트 스위칭 회로토폴로지에 의해 영전류 및 영전압으로 스위칭되어 스위치의 턴-온, 턴-오프 손실이 저감되어 시스템의 효율을 증대시켰다. 제안된 고효율 전력변환기는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이론적 해석의 타당성이 입증되었다. 또한 제안된 비절연형 전력변환기는 기존의 절연형 전력변환기와 비교되어 절연을 위한 변압기가 사용되지 않으므로 발전효율을 더욱 증대시키는 효과를 가져왔다. 다양한 분석결과들을 통해 제안된 비절연형 고효율 전력변환기가 적용된 연료전지(PEMFC) 발전시스템이 비상시 소방 방재설비 등의 예비 전력공급설비에 적합함이 확인되었다.

참고문헌

1. M. Momirlan, and T. N. Veziroghu, "Current Status of Hydrogen Energy", Renewable & sustainable energy reviews 6, pp. 141-179, 2002
2. A. E. Farrell, D. W. Keith, and J. J. Corbett, "A strategy for Introducing Hydrogen into Transportation", Energy Policy 31, pp. 1357-1367, 2003
3. K-A. Adamson, "Calculating the Price Trajectory of Adoption of Fuel Cell Vehicles", International Journal of Hydrogen Energy 30, pp. 341-350, 2005
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 Micro-electronics & Packaging Society, Vol. 13, No. 1, pp. 57-61, 2006