

3[kW]급 연료전지용 전력변환기 개발에 관한 연구

(A Study on the Development of 3[kW] Power Conversion System for Fuel Cell)

김세민* · 박성준 · 송성근**

(Se-Min Kim · Sung-Jun Park · Sung-Geun Song)

요 약

본 논문은 연료전지용 전력변환기 개발에 관한 연구로 높은 승압비를 갖는 DC/DC 컨버터를 구성함에 있어서 기존 방식과 달리 변압기의 2차측 출력을 직렬로 연결하여 다이오드와 콘덴서 및 리액터를 줄일 수 있는 구조의 새로운 멀티 DC/DC 컨버터의 구조를 제안한다. 이러한 구조는 직렬 연결된 변압기의 2차측의 정류부분과 필터부분이 하나의 모듈로 구성되는 장점을 가지며 레벨수의 증가가 용이하다. 또한 제안된 구조에서 출력전압 리플을 줄일 수 있는 새로운 가변 위상 변위형 스위칭 방식을 제안한다.

이러한 모든 사항을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증 하였으며, 제안된 컨버터는 넓은 영역의 출력이 요구되는 부하에 매우 유용할 것으로 사료된다.

Abstract

This paper is the research on the development of power conversion system for the fuel cell. In composing the DC/DC converters which have high boost voltage ratio, unlike the conventional method, a new multi DC/DC converter system is proposed that the diode and the condenser and the reactor can be reduced by connecting the secondary side output of the transformer. In this system, the rectifier part and the filter part of the secondary side in the power transformer that is connecting in series are composed into a single module, which is the strong advantage and the number of level can be easily increased. A new variable shift phase switching method is also suggested that it makes possible to reduce the output voltage ripples in the proposed system. All the factors mentioned above have been verified through simulations and experiments, and the proposed converter is considered very useful in the demanded load which requires a wide of the output.

Key Words : Fuel Cell Power System, Series DC/DC Converter, Variable Phase Shift Switching

1. 서 론

연료전지는 화석연료를 대체하는 에너지원으로 인류의 장래를 위해 반드시 개발해야 할 기술이란 점에서 연료전지 연구에 대한 그 의의가 매우 크다. 화석연료가 고갈될 경우 사용가능한 에너지는 환경

* 주저자 : 전남대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 전자부품연구원 선임연구원
Tel : 062-530-1741, Fax : 062-530-1749
E-mail : fid_111@naver.com
접수일자 : 2009년 3월 31일
1차심사 : 2009년 4월 6일
심사완료 : 2009년 4월 17일

성, 경제성, 기술성을 고려했을 때 현재로서는 연료 전지가 최적의 대안이라 할 수 있다[1].

일반적으로 높은 승압비를 갖는 DC/DC 컨버터를 구성하는 방법으로는 크게 다단 승압기를 갖는 방식과 여러 대의 DC/DC 컨버터를 사용하여 컨버터의 출력을 직렬 또는 병렬로 구성하는 방식이 있다. 전자의 방식에서 컨버터의 총 효율은 각 승압컨버터의 효율의 곱으로 나타나므로 컨버터의 효율을 증대시키는 방법으로는 바람직하지 않는 방식으로 알려져 있다. 후자의 방식은 전체 DC/DC 컨버터를 구성함에 있어 컨버터 수가 증가함에 따라 스위칭 소자 수가 비례적으로 증가되는 단점이 있다. 최근 다수의 컨버터를 이용하여 높은 승압비를 구현함과 동시에 컨버터의 성능향상을 위한 다양한 방법들이 제안되고 있다[2].

본 논문에서는 높은 승압비를 갖는 DC/DC 컨버터를 구성함에 있어 기존의 멀티 컨버터방식에서 다이오드, 콘덴서 및 리액터를 줄이고, 2차측 변압기 출력을 직렬 연결한 새로운 멀티 DC/DC 컨버터의 구조를 제안하고, 제안된 전력변환기 구조에서 출력 전압의 리플을 줄일 수 있는 새로운 가변 위상 변위형 스위칭 방식을 제안한다. 또한 제안된 컨버터의 구성에 대하여 3[kW]급 프로토타입 컨버터를 제작하여 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 컨버터는 넓은 영역의 출력 전압이 요구되는 부하에 매우 유용할 것으로 사료된다.

2. 본 론

2.1 연료전지 발전 시스템의 특성

일반적으로 연료전지 발전시스템은 상자형의 패키지 타입으로 개발되었으며 그림 1과 같은 구조로 되어 있다. 연료개질 장치, 연료전지 본체, 인버터 및 폐열 회수장치 등으로 구성된다.

연료전지 본체는 여러 개의 연료전지를 쌓아서 스택의 형태로 구성된 직류전기 발생 장치이며, 발전된 직류는 인버터에 의해 교류로 변환되어 계통에 연계되므로 분산형 단위 발전소로 볼 수 있다.

연료전지의 출력전압은 출력전류에 따라 변동 범

위가 2배 이상 크게 변화한다. 또한 연료전지는 저전압 대전류 특성을 갖고 있어, 계통과 연계를 위해서는 높은 승압비와 절연이 요구된다.

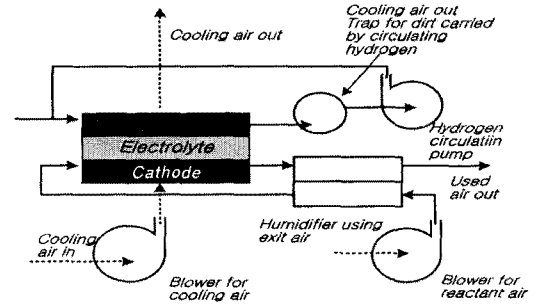


그림 1. 연료전지 시스템 블록도
Fig. 1. Fuel cell system block diagram

2.2 높은 승압비를 갖는 DC/DC 컨버터

플브릿지 타입의 절연형 DC/DC 컨버터를 사용하여 높은 승압비를 구현 할 경우 고주파 변압기의 제작에 어려움이 있을 뿐만 아니라 1개로 적정용량을 갖는 코어를 구하기가 어려운 경우가 있다. 이러한 문제점으로 인해 다수의 적은 용량의 DC/DC 컨버터를 사용하여 높은 승압비의 구성에 대한 적용사례가 증가하고 있다.

그림 2는 높은 승압비를 갖는 대표적인 멀티 DC/DC 컨버터의 구조를 나타내고 있다. 기존의 절연형 플브릿지 타입의 DC/DC 컨버터를 사용하여 출력 직류 측을 직렬로 연결하는 구조를 취함으로써 높은 승압비를 구성하게 하였다. 이러한 구성은 각 컨버터는 독립적인 필터회로를 가져야 하며, 이로 인한 소자의 개수는 컨버터 수에 비례하여 증가하게 된다. 이러한 컨버터에서 각 컨버터의 출력전압은 스위칭 소자의 변조비(Modulation index)에 의해서 제어되며 필터단 입력전압은 식 (1)과 같다.

$$V_{dc} = m a V_{dc} + a \frac{2V_{dc}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(k\pi m) e^{j(2\pi f_s k)t} \quad (1)$$

단, m : 변조비, a : 변압기 권수비,
fs : 스위칭 주파수

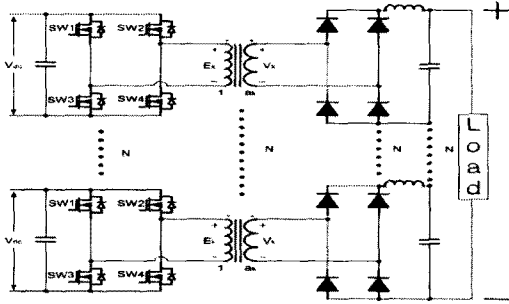


그림 2. 기존의 멀티 DC/DC 컨버터의 구조
Fig. 2. Preexisting structure of multi DC/DC converter

식 (1)에서 보는바와 같이 필터단 입력전압은 직류성분과 스위칭 주파수의 배수인 고조파 성분으로 구성된다. 고조파 성분이 제거된다면 출력전압은 직류성분만 나타나게 되어 입력력 관계식은 식 (2)와 같다.

$$V_c = m a V_{dc} \quad (2)$$

컨버터의 개수를 N개라고 가정하면 최종 출력전압은 식 (3)과 같다.

$$V_o = N V_c \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 전체 컨버터의 승압비는 식 (4)와 같다.

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = N m a \quad (4)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 전체 컨버터의 승압비는 컨버터의 개수의 함수로 컨버터의 개수를 증가시켜 높은 승압비를 구성할 수 있다. 각 DC/DC 컨버터에서 인덕터 전류 리플은 식 (5)와 같다.

$$\Delta I_L = \frac{a V_{dc} - V_c}{L} m T_s \quad (5)$$

각 인덕터의 전류 리플은 각 평활용 콘덴서의 전압 리플로 나타나며 출력전압 리플은 식 (6)과 같다.

$$\Delta v_c = \frac{1}{LC} \frac{a V_{dc} (1-m)m}{8f_s^2} \quad (6)$$

변조비에 따른 출력전압 최대 리플은 식 (6)을 미분함으로써 구해지며 그 값은 변조비가 0.5일 때이다. 따라서 변조비에 따른 최종 출력전압 최대 리플은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta v_o = \frac{N}{32} \frac{a V_{dc}}{LC f_s^2} \quad (7)$$

식 (7)에서 알 수 있듯이 각 DC/DC 컨버터의 출력전압의 리플은 스위칭 주파수, 인덕터 및 콘덴서의 용량, 변조비, 그리고 입력전압에 의해 결정되며 출력전압의 리플 저감을 위해서는 스위칭 주파수를 높이거나 필터용 인덕터 및 콘덴서의 용량을 키우거나 입력전압을 낮추어야 한다. 스위칭 주파수를 높이는 경우 스위칭 손실의 증가로 인하여 효율이 감소하는 등 한계가 따른다. 또한 인덕터나 평활용 콘덴서의 용량을 키우는 것은 사이즈 증가 및 경제성 문제가 발생한다.

2.3 제안된 직렬형 DC/DC 컨버터 및 DC/DC 컨버터의 스위칭 신호

그림 3은 높은 승압비를 갖는 제안된 멀티 DC/DC 컨버터의 구조를 나타낸다.

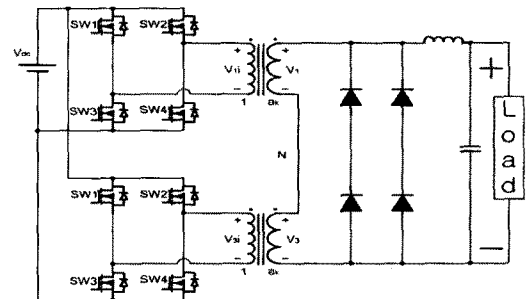


그림 3. 제안된 직렬형 DC/DC 컨버터
Fig. 3. Proposed series DC/DC converter

제안된 컨버터는 기존의 절연형 풀브릿지 타입의 DC/DC 컨버터를 사용하여 컨버터용 변압기 2차측

출력을 직렬로 구성함으로써 높은 승압비를 구성하였다. 고주파 변압기 2차측을 직렬로 구성함으로써 기존의 컨버터와 달리 정류부와 필터부를 하나로 사용하는 것이 가능하였다. 따라서 제안된 컨버터는 기존 컨버터에서 정류부분과 L-C필터부분을 일체화 한 것이 된다. 이러한 제안된 컨버터 구조에서 기존의 보편적인 스위칭 방식이나, 동일 위상 변위형 스위칭 방식을 사용할 경우 고주파 변압기의 출력에 무효전력이 발생하여 선형적인 출력전압을 형성할 수 없을 뿐만 아니라 높은 승압비를 구현할 수가 없다. 이러한 이유로 인해 제안된 구조의 컨버터의 사용이 없었다. 그러나 이러한 컨버터의 구조에 적합한 스위칭 방식을 구현하면 본 컨버터의 구성은 다이오드 및 L,C필터의 소자수를 대폭 저감할 수 있는 전력변환기의 구조가 된다. 그림 3의 제안된 컨버터와 그림 2의 기존의 컨버터에서 다이오드 수와 L, C 소자 수를 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 컨버터의 수동 소자 수 비교
Table 1. Passive element compare of converter

컨버터 수	기존컨버터	제안된 컨버터
다이오드	4N	4
리액터	N	1
콘덴서	N	1

기존의 컨버터 시스템은 높은 승압비를 구현하기 위해 컨버터 수를 증가시킬 경우 정류용 다이오드 및 필터용 L, C가 비례적으로 증가하여 컨버터 수의 증가에는 한계가 있다. 그러나 제안된 컨버터 시스템은 표 1과 같이 컨버터의 수가 증가하여도 정류용 다이오드 및 필터용 L, C의 증가가 없어 컨버터의 수 증가가 용의한 구조가 된다.

제안된 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 2레벨 컨버터를 그림 4와 같이 구성하였다.

그림 5는 기존의 동일 위상 변위 스위칭 신호 발생 방법으로 스위칭 한 경우의 두 컨버터 출력 전압파형과 컨버터용 변압기의 2차측 출력 파형을 나타내고 있다.

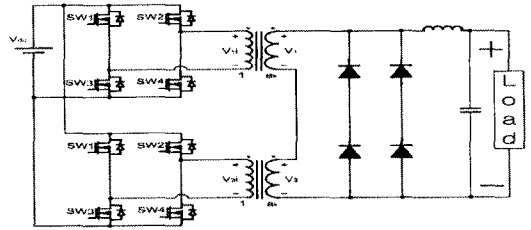
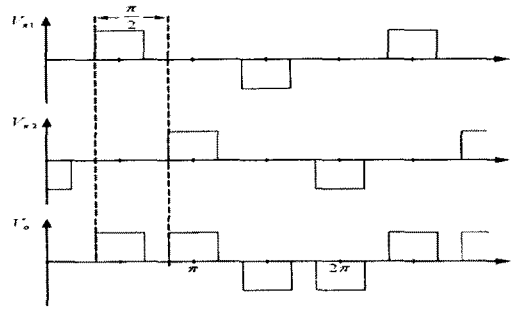
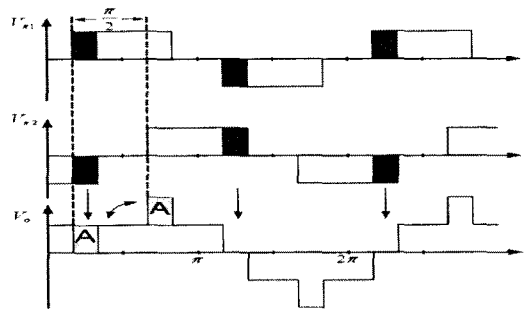


그림 4. 2-레벨 DC/DC컨버터
Fig. 4. 2-level DC/DC converter



(a)



(b)

그림 5. 동일 위상 변위 스위칭 방식
Fig. 5. Identified phase shift switching method

그림 5 (a)는 변조비가 1/3인 경우로 그림에서 보는 바와 같이 각 컨버터의 출력파형의 위상차는 90°로 나타나며 최종 출력전압의 주파수는 각 컨버터의 주파수의 2배 효과가 나타남을 알 수 있다. 변조비가 1/3인 경우는 출력전압의 정, 부 폭이 60°로 위상차 90°보다 적어 변압기 2차측에 무효전력 발생이 존재하지 않아 변조비에 비례하여 출력전압이 형성되는 영역이 된다. 그림 5(b)는 변조비가 2/3인 경우로 출력전압의 정, 부 폭이 120°로 위상차 90°

보다 30[°]가 크게 되어 30[°]영역동안 각 컨버터에서는 출력전압을 발생하나, 두 컨버터의 출력전압 극성이 반대가 되어 최종 출력전압이 0이 되는 부분이 나타난다. 이 영역 동안은 고주파 변압기 2차측 직렬 전압은 2배의 전압이 발생하여야 출력전압의 증대를 가지나, 이 영역과 2배의 전압을 발생하는 영역의 구간이 동일하게 존재하여 변조비를 증가시켜도 출력전압의 증대가 없는 영역이 된다. 따라서 변조비 0.5 이상에서는 변조비를 증대시키면 시킬수록 출력전압의 증대는 없이 변압기 2차측의 무효전력이 증대하는 악영향을 초래한다. 따라서 두 개의 직렬 형태를 취하지만 변조비는 0.5로 제한되어 출력전압은 한 개를 사용한 것과 동일하게 된다.

따라서 출력 전압은 기존의 방식대비 50[%] 이상 발생할 수가 없다. 그러므로 기존방식과 동일한 출력 전압 발생범위를 갖기 위해서는 제안된 전력변환기에 맞는 스위칭 신호의 발생이 필요하다.

본 논문에서는 그림 6과 같은 가변 위상 변위형 스위칭 신호 방식을 제안한다. 이 때 위상변위는 아래와 같은 식에 의해 결정된다.

$$\phi = (1-m)\frac{\pi}{2} \tag{8}$$

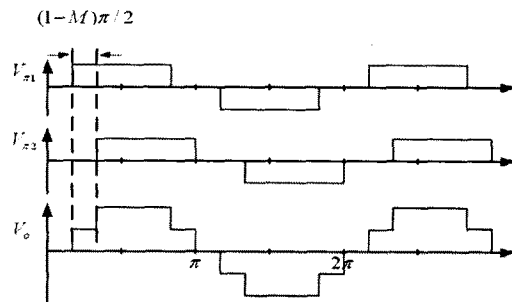


그림 6. 제안된 가변형 위상변위 스위칭 방식
Fig. 6. Proposed variable phase shift switching method

만일 N개의 컨버터를 사용할 경우 각 컨버터의 위상변위는 아래식과 같다.

$$\phi_n = \frac{(n+1)}{N}(1-m)\frac{\pi}{2} \tag{9}$$

단 n : 1,2,3--N-1

그림 6에서 보는 바와 같이 두 컨버터의 출력신호는 식 (9)와 같은 위상 변위 신호를 발생함으로써 각 컨버터의 출력극성이 부가되는 영역이 존재하지 않게 되고 이로 인해 컨버터의 고주파 변압기에는 무효전력이 발생하지 않게 되어 기존의 방식과 같은 출력 전압 범위를 갖게 된다.

2.4 시뮬레이션

본 연구에서 12[V] 배터리 4개를 사용한 DC/DC 컨버터를 적용하여 그 타당성을 검증하였으며, 전력 변환기의 사양은 표 2와 같다.

표 2. 전력변환기 사양
Table 2. Converter spec.

Rated power	3 [kw]
Operating voltage range	44-57.6[V]
Rated current of the converter	63[A]
Converter switches	IRFP90N20D
Winding ratio of the transformer	1 : 6
Converter diodes	APT100S20B
Inverter switches	SPW47N60C3
Switching frequency	16[kHz]
Inductor of converter	660[uH]
Capacitor of converter	555[uF]
Output voltage	AC220[V]

그림 7은 제안된 직렬형 DC/DC컨버터의 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다.

그림 8은 그림 7과 같은 컨버터 시스템에서 두 개의 컨버터를 사용한 경우의 시뮬레이션 결과이다.

각 컨버터의 상 신호는 동일한 스위칭 신호를 사용하여 고주파 교류파형을 형성하고, 각 정류기 및 필터회로를 통한 평활화된 두 직류전원을 직렬로 연결하여 출력전압을 형성한다.

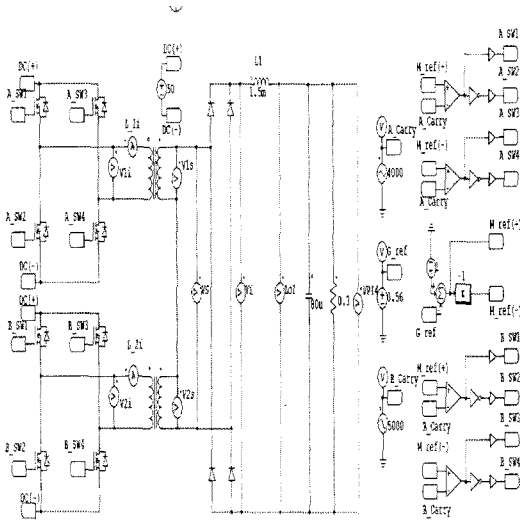


그림 7. 제안된 컨버터의 시뮬레이션 회로
Fig. 7. Simulation circuit of proposed converter

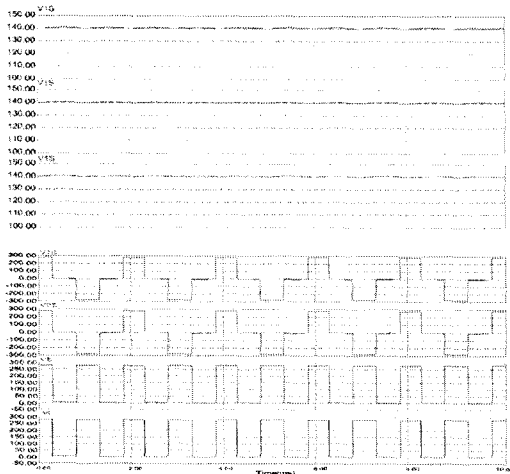


그림 8. 변조비 2/3일때 기존의 컨버터 파형
Fig. 8. Preexisting converter waveform by 2/3 duty rate

그림 8과 그림 9는 변조지수를 2/3로 설정한 경우의 제안된 컨버터에서 일정 위상 변위신호를 사용한 경우와 가변 위상변위 신호를 사용한 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 8과 그림 9에서 고주파 변압기 2차측에 발생하는 출력전압의 형상은 같으나 그림 8의 경우 두 컨버터의 위상차는 90° 를 가지며 그림 9의 경우 30.6° 의 위상차를 가진다. 이 위상차

로 인해 그림 8의 일정 위상 변위신호를 사용한 경우는 출력전압이 약 280[V]가 되며 가변 위상변위 신호를 사용한 그림 9의 경우는 출력전압이 약 380[V]가 됨을 알 수 있다. 따라서 제안된 가변 위상변위 신호를 사용할 경우 제안된 컨버터의 출력발생 범위를 최대한 발생하면서, 기존 컨버터에 비하여 다이오드 및 필터회로 수를 줄일 수 있다.

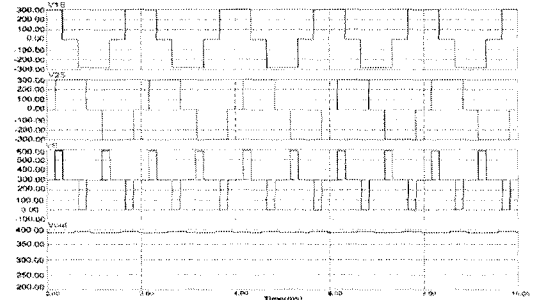


그림 9. 제안된 컨버터에서 가변 위상변위 변조비 2/3일 때 컨버터 파형
Fig. 9. Proposed method converter waveform by 2/3 duty rate

2.5 시스템 제작 및 실험결과 분석

본 개발에 사용된 PCB보드는 크게 제어기 보드, DC/DC컨버터 보드, DC/AC 인버터 보드로 구분할 수 있다. 주제어기는 연료전지용 컨버터, 인버터 제어 전용으로 설계하였으며 크게 CPU, 외부 신호와의 Interface를 위한 아날로그 신호처리부와 전력소자의 제어를 위한 신호 발생부 및 디지털 입출력부로 구성되어 있다. 제어기의 핵심적인 역할을 수행하는 CPU로는 Texas Instruments사의 TMS320F2812를 사용하였다.

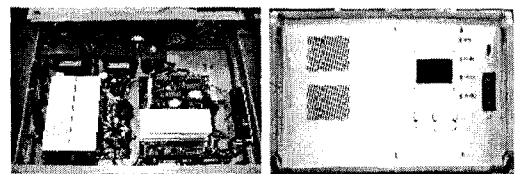


그림 10. 연료전지용 인버터 프로토타입
Fig. 10. Inverter prototype for Fuel cell

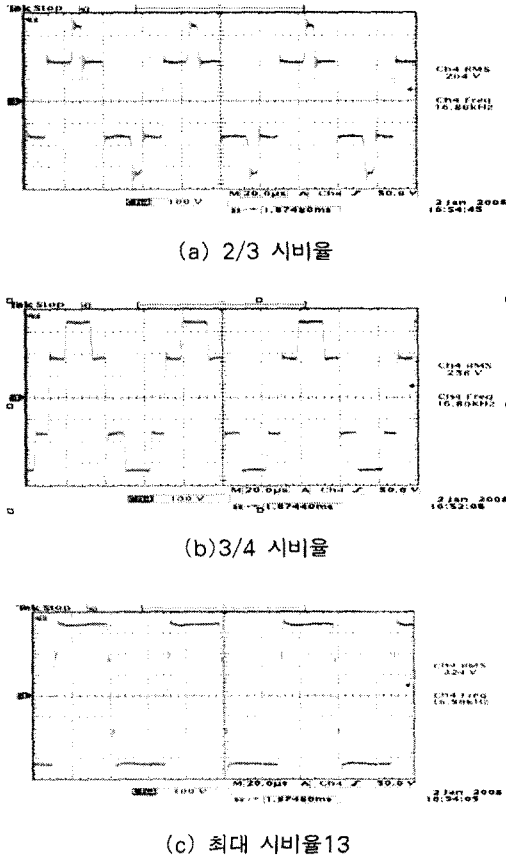


그림 11. 연료전지용 DC/DC 컨버터 출력파형
Fig. 11. DC/DC converter waveform for Fuel cell

그림 10은 개발된 연료전지 전력변환기를 나타내고 있다. 그림 11은 연료전지용 DC/DC 컨버터 특성을 분석하기 위한 다중레벨 DC/DC 컨버터의 변압기 2차측 출력전압을 나타내고 있다. 출력전압은 기저레벨과 함께 양호하게 나타남을 알 수 있다. 그림 11 (a)과 같이 레벨의 변동 경계선에서는 출력전압의 Chattering이 발생하나, 그림 11 (b), (c)에서는 이러한 현상이 없어짐을 알 수 있다. 그림 12은 연료전지용 DC/DC 컨버터 및 인버터 특성을 분석하기 위한 출력전압, 전류, 순시전력 파형을 나타내고 있다. 그림 12 (a), (b), (c)는 470[W], 1,000[W], 2,500[W], 출력인 경우이며, 출력전압, 전류 및 순시전력이 양호하게 나타남 알 수 있다. 그림 13은 출력에 따른 연료전지용 DC/DC 컨버터 및 인버터 시스

템의 총 효율 곡선을 나타내고 있다. 총 효율은 약 90 [%]로 양호하게 나타났다.

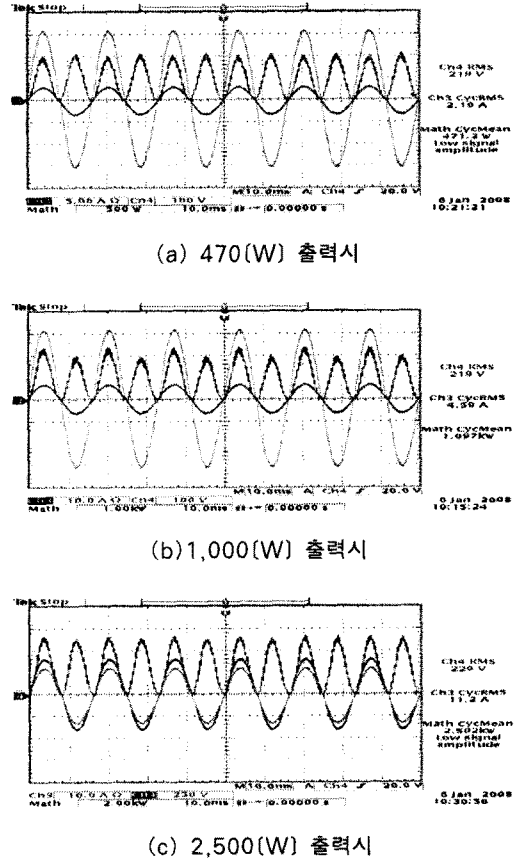


그림 12. 연료전지용 인버터 출력파형
Fig. 12. Inverter waveform for Fuel cell

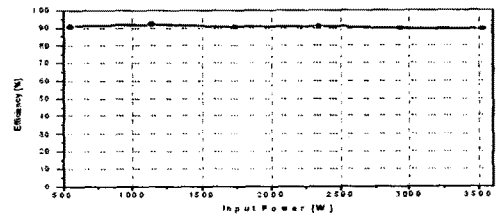


그림 13. 연료전지용 전력변환기의 총 효율 특성
Fig. 13. Total efficiency characteristics of power conversion system for Fuel Cell

3. 결 론

본 논문은 3[kW]급 연료전지용 전력변환기 개발에 관한 연구로 새로운 다중레벨 컨버터를 제안하고 이를 적용한 결과 90[%] 이상의 효율과 1[%]이하의 THD의 성능을 갖는 3.5[kW]급 전력변환 시스템을 개발하였다. 이를 위해 DC/DC 컨버터부는 절연형 플브릿지 컨버터에서 고주파 변압기의 2차측을 직렬로 연결할 경우, 구조적으로는 후단의 다이오드 부와 필터 부를 하나로 사용이 가능하나, 그 동작에 있어 기존의 스위칭 방식으로는 높은 승압비를 이룰 수 없는 단점을 극복하기 위해 제안된 멀티 DC/DC 컨버터 전용 상 스위칭 신호를 제안하였다. 제안된 전력변환기의 구조에 적합한 상 스위칭 신호방식은 변조지수에 따른 가변 위상변위 신호를 제안함으로써 기존의 멀티 DC/DC 컨버터의 높은 승압비를 해결하였다. 또한 제안된 컨버터의 고주파 변압기 2차측을 직렬로 연결한 새로운 전력변환기 기술로 출력 전압의 리플을 저감할 수 있었다. 제안된 컨버터는 기존 방식에 비해 정류부와 필터부의 일원화가 가능한 구조로 수동소자의 수를 대폭 줄일 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지인력양성사업의 연구 결과임.

References

- (1) 박성준, 강필순, 박노식, 김철우. “변압기 직렬 결합을 이용한 새로운 멀티 레벨 인버터”. 전력전자 학회 pp. 9~16, 2003. 02.
- (2) 강필순, 박성준, 김철우. “출력 전압 파형 개선을 위한 새로운 11 레벨 PWM 인버터” 전력전자 학회 pp. 99~106, 2003. 04.
- (3) A Month1, E Sant1, FPonc1, D Frazon1, “Fuel Cell Based Domestic Power Supply - A Student Project”, PESC 02 200 IEEE 33rd Annual, Volume 1, 2002 pp 315-320, vol 1.
- (4) F Santi, D Franzoni, A Monthi, D Patterson, F Pconci and N Barry, “A Fuel Based Domestic Uninterruptible Power Supply”, IEEE APEC 2002. Dallas, Texas, pp 605-613, March 10-14, 2002.

◇ 저자소개 ◇

김세민 (金世民)

1979년 6월 13일생. 2007년 조선대 전자정보 공과대 정보제어계측공학과 졸업. 현재 전남대학교 전기공학과 석사과정.

박성준 (朴晟濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(박사). 1996년 3월~2000년 2월 거제대 전기과 조교수. 2000년 3월~2003년 8월 동명대 전기과 조교수. 2003년 8월~현재 전남대 전기공학과 부교수.

송성근 (宋成根)

1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기동학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2004년 (주)프로컴 시스템 연구원. 2004~2005년 (주)세오전자 연구원. 현재 전자부품연구원 광주디지털 컨버전스센터 선임연구원.