

새로운 고효율 계통연계 1kW 연료전지용 PCS

김태진*[†]

*한국전기연구원

A Noval High Efficiency Grid Connected 1kW PCS for Fuel Cell

TAEJIN KIM*[†]

*Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)
70 Boolmosangil, Changwon,641-120, Korea

ABSTRACT

In this paper, a novel DC/DC low-voltage high-current converter circuit is proposed to improve the efficiency of power converter used in the grid-connected fuel-cell generator system. We proposed a novel high efficiency grid-connected power conditioning system for RPG fuel cell. On the result of that, the loss of system was decreased rapidly by driving stack within the condition of maximum efficiency. The peak currents of the current-type inductor and the transformer's coil are reduced by synchronizing switching frequency of Buck-type converter is increased twice as the Push-Pull converter's switching frequency. The novel structure of DC/DC converter is able to realize ZVS-ZCS in fuel-cell system is proposed. The proposed switching component of Push-Pull converter has the ZVS and ZCS function by using the circuit of new passive clamp.

KEY WORDS : Fuel cell(연료전지), Power conditioning system(전력변환장치), High effinency(고효율), Grid connecting(계통 연계)

Nomenclature

V : voltage, v
Q, D : switch, diode
L, C : reactor, capacitor

O, I : output, input
1, 2, 3 : serial number

Subscripts

[†] Corresponding author : tjkim@keri.re.kr

1. 서 론

계통연계를 위한 연료전지용 전력변환장치는 계통연계시 계통전압에 대해 고역률과 낮은 THD를 가져야 한다. 또, 연료전지 특성¹⁾상 낮은 입력

전압과 높은 전압 변동율에 대해 높은 출력전압으로 승압되므로 높은 승압비와 전압 변동률에 대해 높은 변환 효율을 요구한다^{2,3)}.

이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 다양한 전력변환장치가 적용되고 있으며, 크게 풀브리지, 하프브리지, 푸시풀 방식의 컨버터가 널리 적용되고 있다. 하지만 컨버터의 토폴로지에 따라 스위칭 소자의 내압 분담문제, 소자에 흐르는 전류 등은 크게 달라지면 각각의 장단점을 적절히 선택하여 설계하여 적용하고 있다^{4,5)}.

Fig. 1(a)는 1단 방식으로 구성이 간단하고 경제적인 장점이 있다. Fig. 1(b)는 2단 방식의 절연형 DC/DC 컨버터를 사용한 방식이다. 이 방식은 단 방식으로 스위칭 소자수의 증가와 전력 손실이 증가한다는 단점이 있으나, 출력전압 제어 변수가 두 개로 구성되어 있어 넓은 범위의 입출력 전압 구성이 용이하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 벽 컨버터와 푸시풀 컨버터가 2단 연결되고 중간 링크 커패시터가 없는 새로운 고효율 PCS회로를 제안하였다. 또 1kW급PCS를 제작하여 계통 연계를 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 제안된 고효율 1kW 연료전지용 PCS

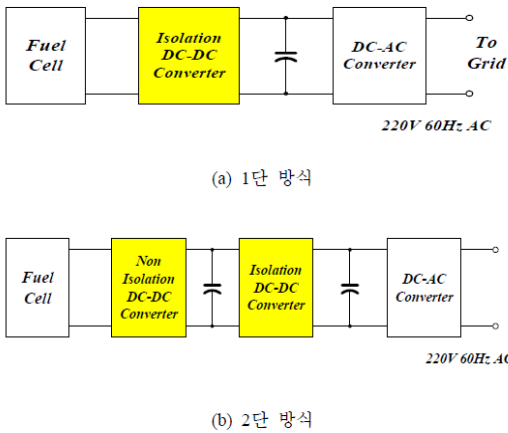


Fig. 1 Composition diagram of representative grid-connected PCS for fuel-cell

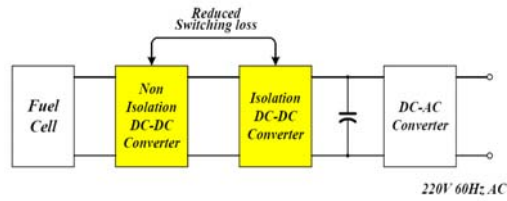


Fig. 2 Proposed composition diagram of PCS for fuel-cell

Fig. 2는 제안된 계통연계형 연료전지 전력변환기 구성도를 나타내고 있다. 제안된 방식은 비절연 DC/DC 컨버터의 인덕터와 전류원 인덕터를 공유하는 구조를 취함으로써 1단 방식과 같은 인덕터 수로 구성할 수 있으며, 중간 전압원 매개체인 콘덴서를 제거하였다. 또한 2단 DC/DC 컨버터를 연계하여 전력회로를 구성함으로써 DC/DC 컨버터의 ZVS, ZCS 스위칭이 가능토록 구성하였다.

Fig. 4는 제안된 연료전지용 DC/DC 컨버터 회로도를 나타내고 있다. 전력변환기는 크게 ZVS용 벽 컨버터와 ZVS, ZCS용 푸시풀 컨버터로 구성된다. 여기서 ZVS용 벽 컨버터는 기존의 컨버터를 사용하였으며, ZVS, ZCS용 푸시풀 컨버터는 본 논문에서 제안하는 방식이다. 기존의 승압형 푸시풀 컨버터와 제안된 컨버터에서 변압기 설계는 변동하는 입력전압 최저치에서 정격출력이 되도록 설계되므로 변압기의 권수비는 동일하여 최저 입력 전압에서 스위치에 인가되는 전압의 크기는 동일하다. 그러나 최대 입력전압이 최소 입력 전압의 2.5배 정도가 되는 일반적인 연료전지시스템에서 스위치 소자에 인가되는 전압은 최대 입력 전압의

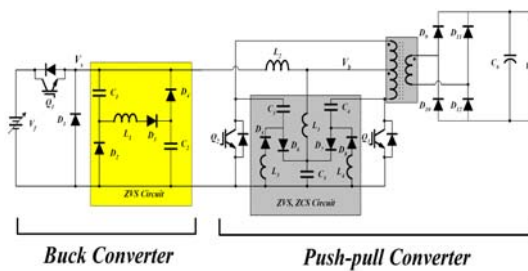


Fig. 3 Proposed DC/DC converter circuit

2배가 된다. 벡 컨버터와 결합한 제안된 푸시풀 컨버터에서는 최소 입력 전압의 2배가 되어 스위치에 인가되는 전압을 약 2.5배로 경감할 수 있다.

스위칭시 정격 전압이 낮게 형성됨에 따라서 기동저항이 낮은 스위치 소자 선택이 가능하여 스위칭 도통 손실을 저감할 수 있다. 또한 기존의 승압형 푸시풀 컨버터는 높은 입력 전압에서 낮은 시비율로 인하여 펄스성 출력 전류를 형성한다. 제안된 벡 컨버터와 결합된 푸시풀 컨버터는 입력 전압에 관계없이 시비율을 0.5로 할 수 있어 연속의 출력 전류를 형성할 수 있다. 또, 벡 컨버터의 스위칭 주파수를 푸시풀 컨버터의 스위칭 주파수에 비해 두배의 스위칭 주파수로 동작하게 함으로써 푸시풀 컨버터의 전류 피크치를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

Mode A : 푸시풀 컨버터의 Q_2 스위치가 on 상태에서 Q_3 스위치 신호가 on되는 시점부터 시작되며, Fig. 4(a)와 같은 전류루프를 형성한다. 변압기 1차측 양 권선이 단락되는 상태가 되어 푸시풀 컨버터의 2차측 전류는 zero가 된다. 또한 양의 극성으로 충전되어 있던 보조회로의 콘덴서 전압(V_{C4})은 C_4 - Q_3 - L_4 - D_4 를 루프를 통한 공진회로가 형성되어 스위치 소자의 off시 ZVS를 위해 부의 전압($-V_b$)으로 충전된다.

Mode B : 이 모드는 푸시풀 컨버터의 Q_2 스위치 신호가 off됨으로써 이루어지며, Fig. 4(b)와 같은 전류 루프를 형성한다. 스위치 소자에 흐르는 전류(I_{Q2})는 바로 zero가 되나, 스위치 off를 한 푸시풀 컨버터용 변압기의 1차측 전류는 ZVS를 위해 부의 전압으로 충전된 콘덴서(V_{C3}) 전압은 C_3 - D_6 - V_b 를 통한 전류 루프를 형성함으로써 D_6 전류에 의해 콘덴서 전압은 정전압으로 변하게 되며, 스위칭 소자에 인가되는 전압은 zero가 되어 스위치 off시 ZVS가 이루어진다.

Mode C : 이 모드는 스위치 off시 ZVS를 위해 콘덴서(C_3) 전류가 zero가 되는 시점부터 시작되며, Fig. 4(c)와 같은 전류 루프를 형성한다. 이 모드는 매우 짧게 존재하므로 해석상 무시하여도 무관하다.

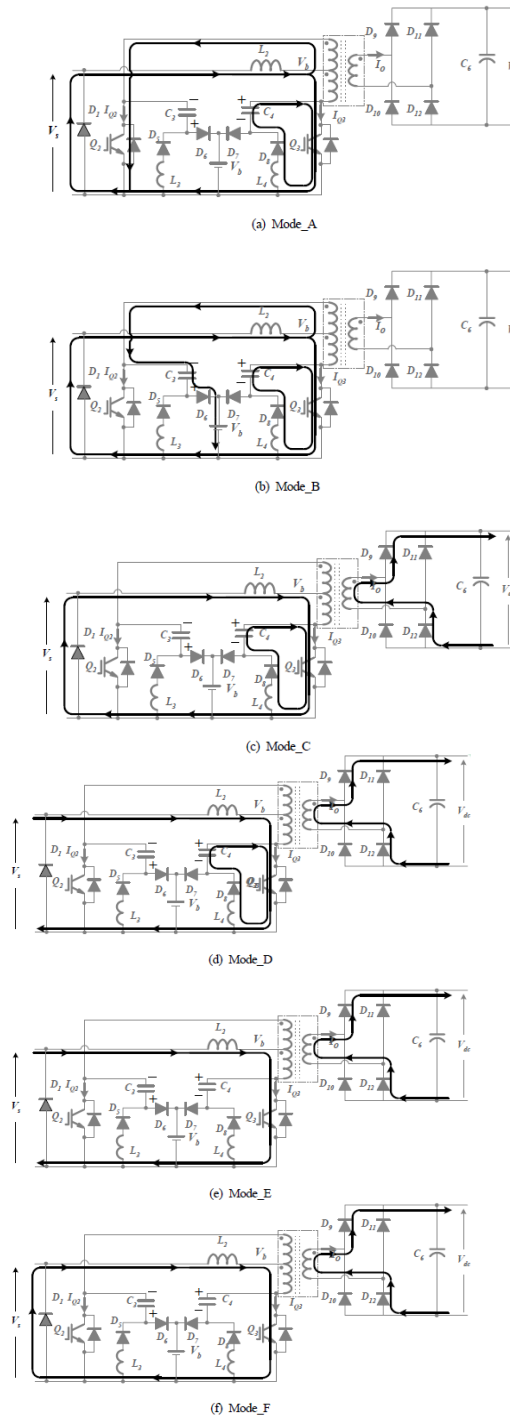


Fig. 4 Operating mode of the proposed push pull converter for ZVS

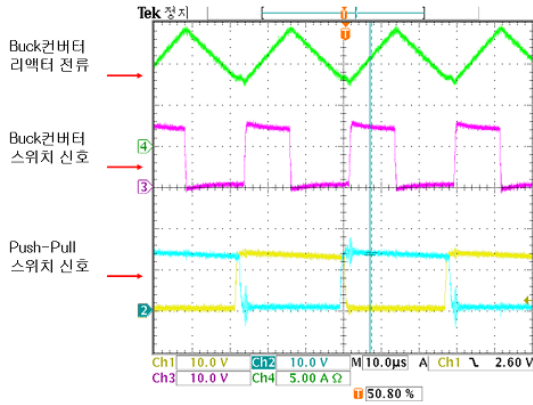


Fig. 5 Buck converter waveforms

Mode D : 이 모드는 앞단의 벅 컨버터의 Q 스위치 신호가 on함으로서 이루어지며, Fig. 4(d)와 같은 전류 루프를 형성한다. 이때 입력단의 전력이 출력단으로 전달되며, 푸시풀 컨버터용 변압기의 1차측 권선에 흐르는 전류의 기울기는 벅 컨버터 출력측에 연결되어 있는 인덕터(L_2)에 의해 결정되어 진다.

Mode E : 이 모드는 Mode A에서 시작한 보조 회로의 콘덴서 전압(V_{C4})과 Q_3 - L_3 - D_8 이 루프에 의한 공진이 완료되는 시점에서 이루어지며, Fig. 4(e)와 같은 전류 루프를 형성한다. 모드가 시작되기 전 스위치 off를 행하면, ZVS는 실패로 이어진다.

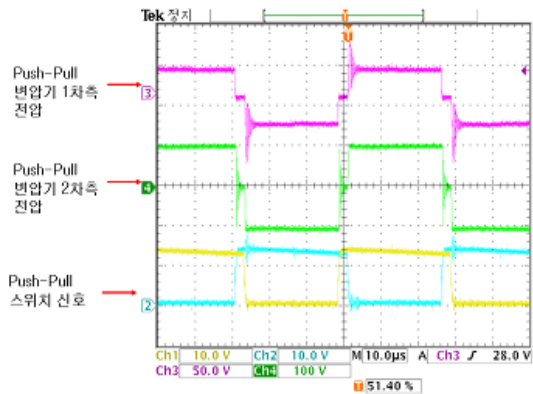


Fig. 6 Push-pull converter waveforms

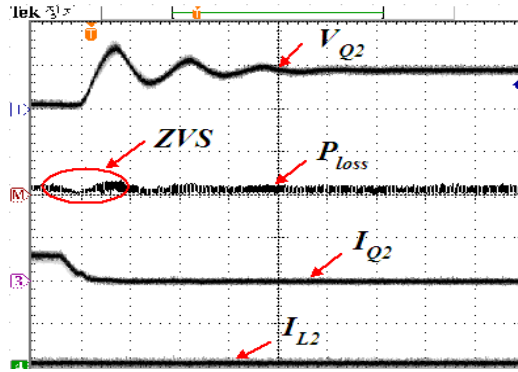


Fig. 7 Waveforms of each part in the proposed DC/DC converter for ZVS

Mode F : 이 모드는 앞단의 벅 컨버터의 Q 스위치 신호가 off함으로써 이루어지며, Fig. 4(f)와 같은 전류루프를 형성한다. 이 모드는 앞단 벅 컨버터의 스위칭 주파수가 푸시풀 컨버터의 스위칭 주파수의 두 배가 되고, 두 전력변환기 간의 스위칭 동기가 이루어지는 상태에서 발생한다.

3. 실험 결과

Fig. 5는 제안된 방식 PCS의 벅 컨버터의 리액터 전류와 스위치 신호, 푸시풀 컨버터의 스위치 신호이다. 스위칭 구간동안 전류가 상승하고 하강하는 것이 확인된다.

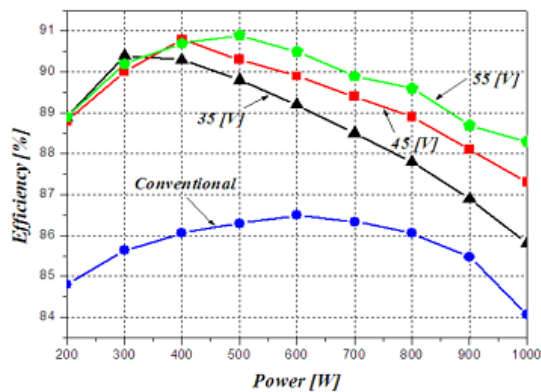


Fig. 8 Total efficiency characteristics of fuel cell power converter

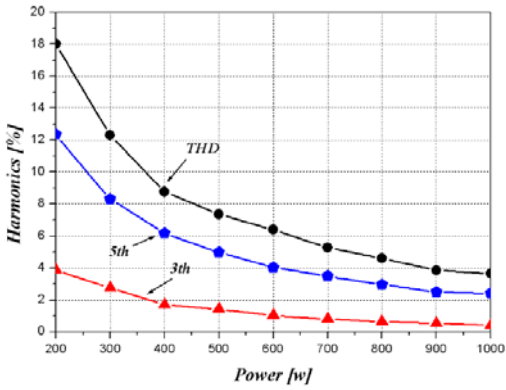


Fig. 9 Harmonics analysis of output total harmonic distribution 3, 5 type

Fig. 6은 푸시풀 컨버터의 변압기 1차측 전압과 2차측 전압 그리고 스위치 신호이다. 전압비는 1:2로 2배 증폭되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 제안된 PCS의 푸시풀 컨버터에서 스위칭 소자가 ZVS 동작되어 손실을 발생하지 않고 제안된 회로가 고효율로 동작됨을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 기존의 하드 스위칭 타입의 전류형 푸시풀 컨버터를 사용한 계통연계형 전력변환기와 제안된 방식의 연료전지용 전력변환 시스템의 총 효율 특성을 분석한 결과이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 입력전압 55[V]에서 하드 스위칭 타입은 1,000[W] 출력시 약 84[%]로 최소출력을 나타냈으며, 최대 효율은 600[W] 출력시 약 86.5[%]로 나타났다. 제안된 방식은 1,000[W] 출력시 약 88.2[%]로 나타났으며, 500[W] 출력시 약 91[%]로 우수하게 나타났다. 전압별로는 입력전압 55[V]에서 우수하게 나타났으며, 평균 효율은 제안된 방식이 기존 방식에 비하여 4.05[%]정도 높게 나타났다. 실험을 통해 얻은 결과 정격의 절반인 500[W]에서 연료전지용 전력변환 시스템은 최대 효율이 나타났으며, 이때 인버터의 효율은 약 97[%]이며, 컨버터의 총 효율은 약 94[%]가 되어 시스템의 총 효율은 약 91[%]로 나타났다.

Fig. 9은 3고조파, 5고조파 및 총고조파 왜형을 THD를 분석한 결과이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 부하가 적을수록 3고조파, 5고조파 및 총고조



Fig. 10 Proposed 1kW PCS for fuel cell with buck/push-pull converter

파 왜형율은 커지며, 출력이 증가함에 따라 그 값들이 작아짐을 알 수 있다. 기저부하인 200[W]에서 3고조파 성분은 약 3.8[%], 5고조파 성분은 약 12.3[%] 및 총고조파 왜형율은 약 18[%]로 나타났다. 정격부하인 1,000[W]에서 3고조파 성분은 약 0.4[%], 5고조파 성분은 약 2.4[%]로 나타났으며, 총고조파 왜형율은 약 3.65[%]로 양호하게 나타났다. 계통연계형 인버터에서 연계조건은 정격에서 3고조파 성분 및 5고조파 성분은 3[%] 이하이고, 총고조파 왜형율은 5[%] 이하로 규정하고 있다.

따라서 본 전력변환기는 계통연계를 위한 조건을 만족함을 알 수 있다.

Fig. 10은 제작된 1[kW]의 가정용 연료전지용 PCS의 시작품 사진이다.

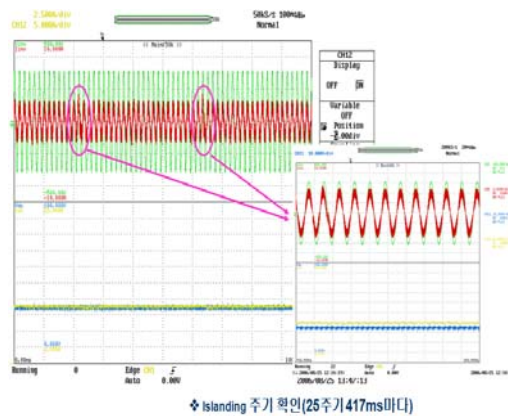


Fig. 11 Islanding monitoring

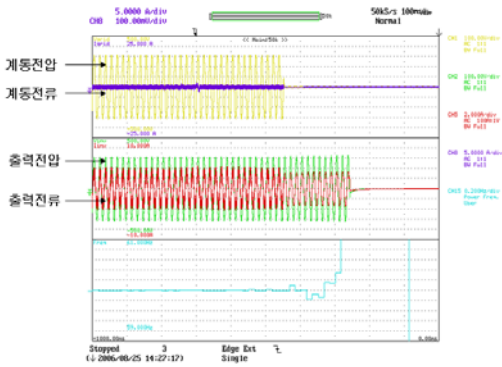


Fig. 12 Islanding test

Fig. 11의 계통 연계 조건에서 Islanding 현상이 발생한 경우 500[ms]이내에 검지되어 계통으로부터 분리하여 보호하는 기능 시험이다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 계통에서의 417[ms]보다 이상외란을 발생시키고 전압, 주파수 등을 감지하여 이상 발생시 계통으로부터 차단하는 것을 목적으로 하고 있다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 계통전압의 이상이 발생했고 이를 다음 500[ms]이내에 검지하여 연료전지용 PCS의 출력을 차단하였다. 즉 계통연계형 PCS로서의 성능을 충분히 만족함을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 벽컨버터와 푸시풀컨버터가 2단 연결되고 중간 링크 커패시터가 없는 새로운 고효율 PCS회로를 제안하고 1kW급 PCS를 제작하여 계통 연계를 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다. 제안된 푸시풀 컨버터의 스위치 소자는 새로운 수동 클램프 회로의 동작모드를 분류하고 ZVS 또는 ZCS가 이루어짐을 확인하였다. 또, ZVS, ZCS 기술로 최고 91[%]이고, 총 고조파 왜형률 THD도 정격 1[kW]에서 5[%]이하이고, Islanding 시험에서도 500[ms]이내에 계통에서 분리되어 계통 연계 시험 조건을 만족하는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 산업자원부의 지원으로 수행하는 에너지자원기술개발사업 중 대체에너지분야(수소연료전지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 안국영, 홍동진, 유상석, 이영덕, "가정용 연료전지 운전 모드 해석을 위한 동특성 모델 개발", 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 19, No. 4, 2008, pp. 313-321.
- 2) R. Gopinath, S.S. Kim, P. Enjeti, et al, "Development of a low cost fuel cell inverter with DSP control," IEEE PESC Conference record, June 2002, pp. 101-107.
- 3) P. Enjeti, P. Krein, J. Lai, "Power conditioning approaches to fuel cells and gas turbine hybrids," NTU short course (Sponsored by DOE), March 2002, pp. 231-240.
- 4) Sukumara, G.V.; Parthasarathy, A.; Shankar, V.R, "Fuel cell based uninterrupted power sources," Power Electronics and Drive Systems, Proceedings Vol. 2, 1997, pp. 728-733.
- 5) P. Enjeti and J. Howze, "A 2kW fuel cell based UPS system," Texas state energy conservation office and DOE sponsored project, Texas A&M University, 2002, pp. 45-55.