

가정용 연료전지 전원시스템을 위한 고효율 푸쉬풀 컨버터의 설계에 관한 연구

조관석, 김태훈, 이종학, 이승준, 최우진
숭실대학교

A Study on the Design of High Efficiency Push-Pull Converter for Residential Fuel Cell Power System

Kwan-Seok Cho, Tae-Hoon Kim, Jong-Hak Lee, Seong-Joon Lee and Woojin Choi
Soongsil University

ABSTRACT

가정용 연료전지의 상용화를 위해서는 시스템의 신뢰성과 경제성 향상이 중요한 문제이며, 경제성 향상은 시스템의 가격 절감과 컨버터의 효율 향상을 통해서 달성될 수 있다. 본 논문은 1kW급 가정용 연료전지 시스템을 위한 새로운 고효율 푸쉬풀 컨버터의 토폴로지를 제안한다. 제안된 컨버터는 2차측을 낮은 정격 전압을 가진 정류 다이오드를 사용한 2단 정류구조로 구성하여 다이오드의 손실을 저감시키고, 다이오드의 접합 커패시턴스와 변압기의 누설 인덕턴스의 상호작용에 의해 발생하는 공진 전압의 크기를 저감시킴으로써 스너버에서 소모되는 전력을 줄여 효율을 향상시켰다. 실험에서는 일반적인 형태의 푸쉬풀 컨버터 1차측 회로와 고주파 변압기는 공유하고, 2차측 회로만 변경하는 방법으로 효율을 측정하여 비교함으로써 제안된 방식의 우수함을 증명하였다. 제안된 방식의 푸쉬풀 컨버터는 기존방식에 비해 특히 경부하에서 높은 효율을 나타내었으며, 전 부하 구간에서 효율의 변화가 크지 않아 부하가변 방식의 운전에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서론

지구온난화와 환경오염으로 인한 탄소배출 규제에 대한 대안으로 신재생에너지의 이용이 확대되고 있다. 그 중 가정용 연료전지 시스템은 양질의 전기와 열을 발생시키는 PEMFC를 위한 매우 적절한 응용이 된다. 일본에서는 가정용 연료전지의 대규모 실증사업이 진행 중이며, 국내에서도 모니터링 사업이 진행 중이다. 연료전지 상용화를 위해서는 신뢰성과 경제성이 중요하며, 특히 경제성확보를 위한 고효율 전력변환시스템의 제작은 필수적이다^[1]. 가정용 연료전지는 일반적으로 1kW 정도의 용량이 적절하나 연료전지의 저전압, 대전류 특성 때문에 고효율 전력변환기를 만들기가 용이하지 않다. 절연형 DC/DC 컨버터 중 중용량에 적합한 토폴로지로서 풀 브릿지와 푸쉬풀 컨버터를 고려할 수 있으나, 푸쉬풀 방식이 풀브릿지 방식에 비해 스위칭 소자수가 적고, 게이트 회로의 제작이 간단하여 저가형 전력변환기를 만드는 데 유리하다. 푸쉬풀 방식을 이용한 고효율 전력변환기의 설계에 관한 몇몇의 연구들은 손실을 줄이기 위해 1차측 스위치를 ZVS하는 방식을 사용하였다. ZVS를 이용하는 방식들은 스위칭 손실을 줄이는 장점이 있지만, 연료전지 시스템의 대전류 특성 때문에 실제로는 추가되는 스위치에 의한 도통손실의 증가로, 큰 효율향상을 기대하기는

어렵다^{[2][3]}. 또한 부품수가 증가하고 제어가 복잡하며, 특히 회로의 기생성분을 이용하는 경우 양산시 균일한 성능을 보장하기 어려운 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 푸쉬풀 컨버터의 손실을 부분별로 분석하고 이를 바탕으로 2차측 다이오드의 정류구조를 2단으로 변형한 새로운 구조의 푸쉬풀 컨버터를 제안한다. 제안된 푸쉬풀 컨버터는 접합 커패시턴스 값이 적은 저압 다이오드를 사용함으로써 역회복 손실을 줄이고 환류 전용 다이오드를 채용하여 소자증가로 인해 발생하는 통전 손실을 저감시켰다. 또한, 변압기 누설 인덕턴스와 공진에 의해 발생하는 전압을 줄여 스너버 손실을 저감시키고, 새로운 2차측 정류 다이오드 토폴로지에 적합한 방전-저지형 스너버를 채용하여 하드스위칭을 하면서도 전 부하 구간에서 효율이 높은 연료전지용 푸쉬풀 컨버터를 설계하였다.

2. 기존의 푸쉬풀 컨버터와 제안된 방식의 비교

2.1 2차측 정류회로의 손실 비교

기존 푸쉬풀 컨버터의 손실은 1차측 스위치의 도통 손실/스위칭 손실, 변압기의 동손/철손, 2차측 정류 다이오드의 도통 손실/스위칭 손실, 스너버에 의한 손실, 그 외에 입출력 필터, 게이트 회로 및 제어회로 전력손실 등으로 나뉜다. 일반적인 푸쉬풀 컨버터의 손실을 부하별로 분석해 보면 표 1과 같고, 그림 1에는 전부하에서의 손실을 그래프로 나타내었다. 그림 1에서 보듯이 1차측 스위치와 2차측 정류 다이오드에 의한 손실의 비중이 가장 큰 것을 알 수 있다. 2차측 풀브릿지 정류 다이오드에서 발생하는 손실은 식(1)과 같이 다이오드의 도통시 발생하는 도통손실과 식(2)와 같이 다이오드 오프시 역전류에 의해 발생하는 스위칭 손실로 나누어진다^[4].

$$P_{D_cond} = V_{df} \times I_d \times D \quad (1)$$

$$P_{D_swit} = \frac{1}{2} \times V_r \times I_{rrm} \times f_{sw} \times T_{rr} \quad (2)$$

여기서, I_d : 다이오드의 평균전류 값, T_{rr} : 다이오드 역회복시간, V_{df} : 다이오드 순방향 전압강하, V_r : 다이오드 오프시 역전압, I_{rrm} : 다이오드 오프시 역회복 전류의 최대값

기존 푸쉬풀 컨버터 토폴로지에서는 2차측 풀브릿지 정류 다이오드 전체손실은 1차측의 한쪽 스위치가 도통되는 한주기 동안 2개의 다이오드에서 도통손실이 발생하고, 1차측 스위치가 오

표 1. 기존의 푸쉬풀 컨버터의 손실 계산

Table 1. Loss calculation of the conventional push-pull converter

Lo ad	P cap	P mos	P tr	P dio	P sn	P etc	P tot	Eff %
100%	7.0	40.1	12.6	37.2	6.2	3.0	106.2	90.4
75%	3.0	22.9	7.9	23.6	7.1	3.0	67.5	91.9
50%	0.9	10.6	5.4	16.9	8.6	3.0	45.4	91.8
25%	0.1	2.8	4.5	9.0	10.2	3.0	29.7	89.3

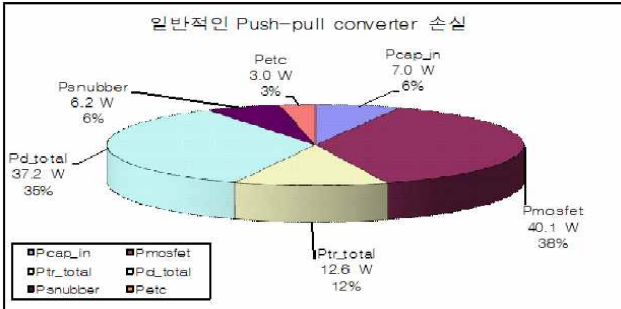


그림 1. 기존의 푸쉬풀 컨버터의 손실 분석 (100%부하)

Fig 1. Loss analysis of the conventional push-pull converter (100%load)

프턴 상태에서는 4개의 다이오드가 모두가 환류에 참여하여 도통 손실이 발생한다. 이후 1차측의 다른 한쪽 스위치가 켜지는 순간 4개의 다이오드 중 이전 반주기에서 도통되지 않던 한쌍의 다이오드가 도통될 때 턴 오프되는 쌍의 다이오드에서 역회복 전류와 역바이어스 전압에 의해 스위칭 손실이 발생하며 따라서 다이오드의 전체손실은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$P_{D_Total} = 2 \times \{2 \times V_{df} \times I_d \times D + 4 \times V_{df} \times 0.5 \times I_d \times (0.5 - D) + \frac{1}{2} \times V_r \times I_{rrm} \times T_{rr} \times 2 \times f_{sw}\} \quad (3)$$

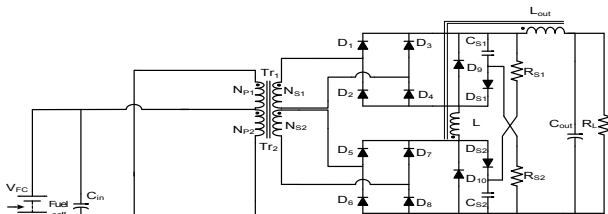
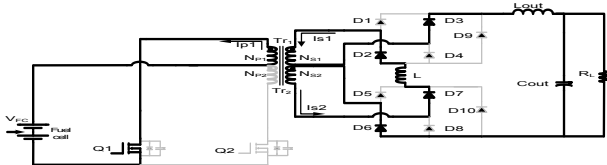
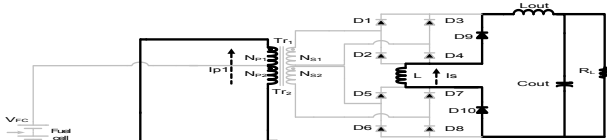


그림 2. 제안된 방식의 푸쉬풀 컨버터

Fig 2. Proposed push-pull converter



(a) Mode 1



(b) Mode 2

그림 3. 제안된 푸쉬풀 컨버터의 동작

Fig 3. Operation of the proposed push-pull converter

그림 2의 제안된 푸쉬풀 컨버터 토폴로지는 정류부를 2단 구조로 하여 내압이 적은 다이오드를 사용할 수 있는 장점이 있으며, 내압이 적은 다이오드는 역회복 시간이 짧고, 접합 커패시턴스가 적어 다이오드에서 발생하는 손실을 크게 줄일 수 있게 된다. 기존의 푸쉬풀 컨버터에서의 2차측 다이오드에서 발생하는 손실에 비해 제안된 토폴로지에서는 그림 2에서 보듯이 1차측 스위치의 턴 온 기간 동안 발생하는 정류 다이오드의 통전 손실은 약간 증가하지만 스위칭 손실을 좌우하는 역회복 시간에 있어서 내압이 낮은 다이오드가 표 2에서 보듯이 내압이 높은 다이오드에 비해 1/30~1/3이하로 짧아지기 때문에 식 (4)와 같이 계산되어 스위칭 손실이 매우 작아진다.

$$P_{D_Total} = 2 \times \{4 \times V_{df} \times I_d \times D + 2 \times V_{df} \times I_d \times (0.5 - D) + \frac{1}{2} \times V_r \times I_{rrm} \times T_{rr} \times 2 \times f_{sw}\} \quad (4)$$

표 2. 정류용 다이오드들의 특성 비교

Table 2. Comparison of the characteristics of rectifying diodes

Product Number	UGF 8JT	YG912 S6	YG225 D8	FFPF0 4F150S	ERD08 M-15
Voltage rating (V)	600	600	800	1500	1500
Maximum average forward current(A)	8	10	10	4	5
Forward voltage Drop (V)	1.75	1.7	1.5	1.5	1.2
Reverse recovery time max (ns)	50	50	400	170	1500

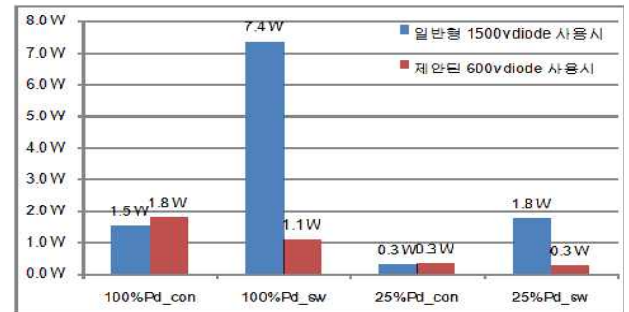


그림 4. 서로 다른 정격 전압을 가진 다이오드의 손실

Fig 4. Losses of the diodes with different voltage ratings

표 3. 제안된 푸쉬풀 컨버터의 손실 계산

Table 3. Loss calculation of the proposed push-pull converter

Lo ad	P cap	P mos	P tr	P dio	P sn	P etc	P tot	Eff %
100%	7.0	40.1	12.6	16.2	0.6	3.0	79.6	92.8
75%	3.0	22.9	7.9	11.8	1.1	3.0	49.7	94.0
50%	0.9	10.6	5.4	7.6	1.8	3.0	29.3	94.7
25%	0.1	2.8	4.5	3.7	2.7	3.0	16.7	94.0

2.2 2차측 스너버 회로의 손실비교

높은 턴수비를 사용하는 푸쉬풀 컨버터의 또 다른 문제는 트랜스포머의 누설인덕턴스와 정류용 다이오드의 접합 커패시턴스에 의해 공진전압이 발생하는 것이며 다이오드의 파괴를 막기 위한 스너버 회로의 채용이 필수적이다. 그러나 이러한 스너버는 방전저항에 의한 손실을 만들고 이로 인해 발생하는 열도 상당한 문제가 된다. 일반적인 RCD 스너버에서 발생하는 손실은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다. 그러나 연료전지와 같이

경부하 전압이 정격전압에 비해 2배 이상 큰 경우 경부하시 증대되는 2차측 서지전압에 의해 많은 손실을 초래하게 됨을 알 수 있다.

$$P_{snubber} = C_{sn} \times V_{pk}^2 \times f_{sw} \quad (5)$$

따라서 본 논문에서는 2단 구조의 2차측에 적합한 RCD 클램프 타입의 방전-저지형 스너버 회로를 채용하여 출력 전압보다 높은 서지 전압(V_{pk})이 스너버 회로에 가해지는 경우 스너버 다이오드(D_{s1} , D_{s2})가 순바이어스 되면서 브리지 다이오드의 양단 전압을 출력 전압으로 클램핑 하도록 회로를 구성하여 스너버 커패시터에 충전된 에너지가 평상시 방전되지 않도록 하여 저항에서 소모되는 에너지를 줄임으로써 효율을 높였다^[6]. 이때 스너버 회로에서 발생하는 손실은 식 (6)과 같이 계산되고, 스너버 커패시터의 값은 식 (7)과 같이 계산한다. 방전 회로의 저항값은 방전회로의 시정수를 스위칭 주파수에 비해 6배정도 빠르게 할 수 있도록 식 (8)과 같이 계산하여 사용한다.

$$P_{snubber} = C_{sn} \times (V_{pk}^2 - V_{desired}^2) \times f_{sw} \quad (6)$$

$$C_{sn} = L_s \times I_o^2 / (V_{pk} - V_{desired})^2 \quad (7)$$

$$R_{sn} \leq \frac{1}{6 \times C_{sn} \times f_{sw}} \quad (8)$$

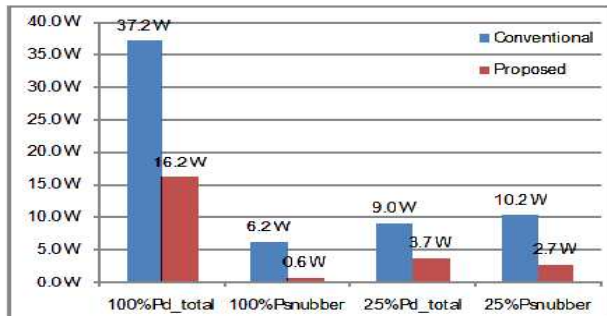


그림 5. 기존 방식과 제안된 방식의 푸시풀 컨버터의 손실 비교
Fig 5. Comparison of the losses of the conventional and proposed push-pull converter

그림 5는 앞서 전술한 손실 계산식들을 이용하여 기존 방식과 제안된 방식의 푸시풀 컨버터의 정류 다이오드 손실 및 스너버 손실을 계산하여 비교한 그림이며, 그림에서 보듯이 전부하에서 정류 다이오드의 손실이 약 56% 감소되고, 스너버에서는 약 90% 손실이 감소함을 알 수 있다. 또한, 25%의 경부하에서 약 60% 및 74%정도의 손실이 각각 감소함을 알 수 있다.

3. 실험 및 고찰

제안된 방식의 푸시풀 컨버터의 우수함을 실험을 통해 증명하기 위해 본 논문에서는 1차측 회로와 고주파변압기 1차측을 공유하고, 2차측만 다르게 제작하여 실험을 실시하고, 효율을 측정하였다. 효율은 Yokogawa사의 전력분석기 WT1600을 이용하여 측정되었으며, 기존 방식과 제안된 방식의 푸시풀 컨버터의 1차측 스위치가 1개일 때와 2개일 때를 각각 측정하여 비교하였다. 그림 6에서 보듯이 제안된 방식은 기존방식의 컨버터에 비해 전부하 구간에서 높은 효율을 나타내었고, 특히 경

부하로 갈수록 효율 상승폭이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 부하 감소에 따라 1차측 스위칭 손실의 비중이 적어지는 것에 반해 2차측 정류다이오드에서의 손실 비중이 상대적으로 커지면서 다이오드 손실의 저감 효과가 더욱 두드러져서 생기는 현상이다. 또한, 전술한 바와 같이 경부하에서 연료전지의 전압 상승으로 인해 스너버에서 발생하는 손실이 증대하게 되는데, RCD 스너버를 사용하는 기존 방식의 푸시풀 컨버터와 방전 저지형 스너버를 사용하는 제안된 토폴로지 사이의 손실 차가 전부하 시에 비해 경부하 시 더욱 커지면서 나타나는 현상이다. 이러한 특성으로 인해 전부하 구간에서 효율 변화가 크지 않은 특성을 갖게 되며, 이러한 특성은 부하 가변운전시 경부하에서의 연료 효율을 높일 수 있게 되어 매우 유용하다.

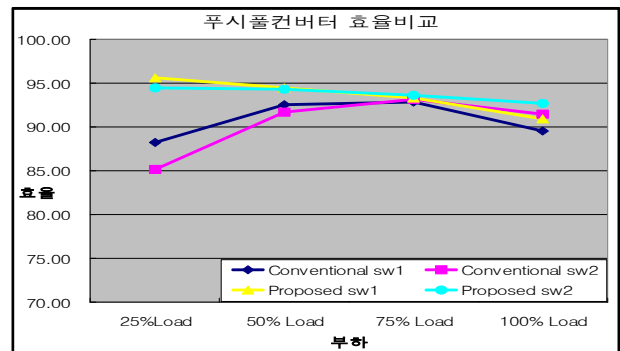


그림 6. 기존 방식과 제안된 방식의 푸시풀 컨버터의 효율 비교
Fig 6. Comparison of the efficiency of the conventional and proposed push-pull converter

4. 결론

본 논문에서는 1kW급 가정용 연료전지 전원 시스템을 위한 고효율 푸시풀 컨버터의 새로운 구조를 제안하고 실험을 통해 그 유용함을 검증하였다. 제안된 방식은 전 부하구간에서 효율의 변화가 크지 않으므로, 가정용 연료전지 시스템의 운전에 있어서 부하 가변 운전 방식에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 하드스위칭을 하면서도 약 93% 이상의 높은 효율을 나타내어 저가의 컨버터 제작을 통해 연료전지의 경제성을 향상시키는데 일조할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 박달영, "가정용연료전지 개발 및 실증사업현황" 한국가스공사, 2009
- [2] B. SWAMINATHAN AND V. RAMANARAYANAN "A novel resonant transition push - pull DC-DC converter" 2004 Indian Institute of Science, pp217~232
- [3] Ryuji Yamada, Nobuyuki Kobayashi Kazuaki Mino "A 1kW Grid-Connected Converter System for PEFC" 2007 IEEE pp. 448~454
- [4] "SMPS Components and their effects on System Dsign" Microchip Webseminars, 2006
- [5] Rahul Chokhawala, Saed Sobjani, "Switching Volgace Transient Protection Schemes For High Current IGBT Modules" International Rectifire Corporation. 1994 IEEE pp.459~468