

3[kW]급 주택용 연료전지시스템에 사용되는 새로운 DC-DC 컨버터

이수호·문상필·이현우·서기영·권순걸
경남대학교

A novel DC-DC Converter for 3[kW] Fuel Cell System Residential Application

S.H. Lee, S.P. Mun, H. W. Lee, K.Y. Suh, S.K. Kwon
Kyungnam University

Abstract - This paper presents a novel DC-DC Converter for 3[kW] Fuel Cell System Residential Application. Phase shifted control is employed to regulate the output voltage and achieve soft switching. The transformer leakage inductance is utilized effectively to achieve zero voltage turn on for the power semiconductor switches. The current doubler rectifier has only one diode drop. The transformer secondary winding current rating is one half the load current. The overall efficiency of the converter is improved.

1. 서 론

최근 급속한 산업 발달과 생활수준의 증대로 인하여 전력 소비가 점차적으로 증대하고 있다. 이러한 전력 소비의 급증은 화석연료의 의존도가 높은 우리나라의 경우 국제환경 규제에 의한 온실가스 배출량의 감축 및 동결로 인한 산업활동의 위축을 가져오게 한다. 그래서 신재생 에너지의 개발이 큰 관심이 되고 있다. 신재생 에너지를 이용한 새로운 발전 방식중 비교적 용량이 작은 발전설비는 태양광 발전, 풍력발전, 연료전지발전 등이 있고 그중 청정 에너지원으로서 많은 주목과 연구의 대상으로 연료전지를 들 수 있다. 연료전지는 저전압 대전류의 특성을 지니고 부하에 따라 전압이 크게 변동하는 특성을 가지므로 기존의 DC-DC컨버터나 범용 인버터로는 연료전지를 위한 전력변환장치의 효율을 만족시키기 어렵다. 전력변환장치의 효율이 낮아지면 전단의 스택 및 개질기의 용량이 커져야 하며 전체 연료전지 시스템의 부피가 커지게 되고 가격을 상승하게 한다. 계통 연계 또는 독립 운전으로 동작하는 경우 상용 전압을 만들때 연료전지의 저전압의 특성에 의하여 승압형 컨버터의 개발을 필요로 하고 있다. 본 논문은 배전류 정류방식을 이용한 풀 브릿지 PWM DC-DC 컨버터를 제안하여 위상 천이 PWM 제어로 출력 전압을 변화 시키고 영전압 스위칭을 달성 하여 스위칭 손실을 줄이려 한다. 또한 배전류 정류기를 변압기 2차측에 사용하여 고주파 변압기의 사양을 보다 간단하게 하며 변환장치의 무게와 부피를 줄이고자 한다.

2. 배전류 정류 방식을 이용한 위상천이 풀 브릿지 PWM DC-DC 컨버터

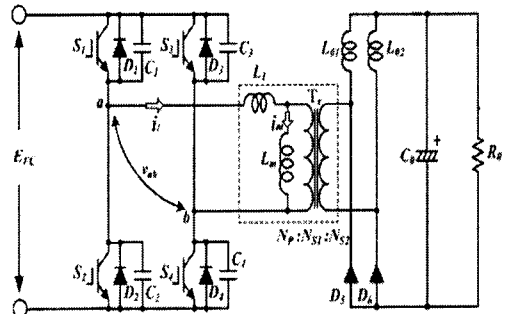


그림 1 제안한 배전류 정류기를 이용한 위상천이 풀 브릿지 PWM DC-DC컨버터

Fig. 1 Proposed Phase shifted Full Bridge PWM DC-DC Converter with Current Doubler Rectifier

그림 1은 제안한 배전류 정류기를 이용한 위상천이 풀 브릿지 PWM DC-DC컨버터를 나타내고 있다. 전력용 반도체 스위치 각각에 ZVS용 무손실 커패시터를 병렬 접속한 풀 브릿지형으로 구성하였고 모든 스위치는 Dead Time을 포함해 반주기동안 턴온 하고, S1을 턴온 하고 임의의 위상 차이를 두고 S4에 턴온 신호를 주어 출력전력을 얻는 위상천이 PWM 제어를 한다. 스위치 S2와 S3는 스위치 S1과 S4와 반대의 주기에 턴온 신호를 인가한다. 이 제어법을 이용하여 부분 공진에 의한 ZVS를 실현하여, 일정 스위칭 주파수와 및 전력 반도체 소자의 스위칭 손실이나 피크 전압·전류의 저감을 피할 수 있다^{[3][5]} 변압기는 회로의 해석을 간단하게 하기 위해 누설 인덕턴스 L_l, 여자 인덕턴스 L_m 및 권수비 n(=N_{s2}/N_{s1})의 고주파 변압기로 역L자형 등가 회로로 구성한다. 고주파 변압기에 의해 전달된 전압·전류는 출력 인덕터를 2개 사용한 배전류 정류기 및 출력 커패시터에 의해 정류·평활 되어 출력 저항에 직류의 전압·전류를 공급한다.

그림 2는 게이트 신호를 포함한 각부의 동작 파형을 나타내고 있으며 그림 3은 제안한 회로의 동작 모드 천이와 등가 회로를 나타낸 것이며, 동작원리를 설명하면 다음과 같다. 모드 천이 설명은 스위치 S2와 스위치 S3가 모두 온 상태인 부하에 전력을 공급하는 Mode10 이후의 모드에서 동작 설명을 시작한다.

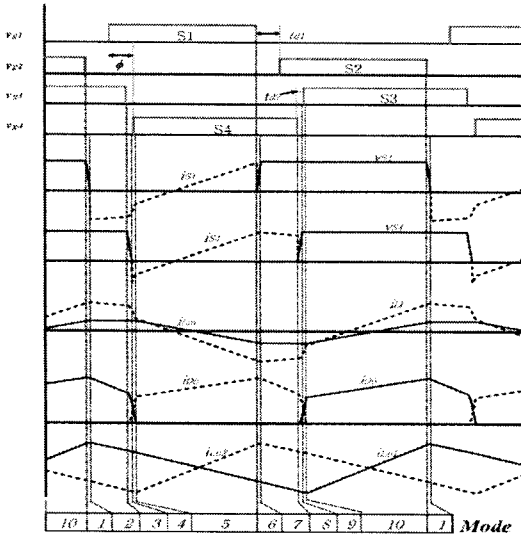


그림 2 제안한 배전류 정류기를 이용한 위상천이 풀 브릿지 PWM DC-DC 컨버터의 동작 파형

Fig. 2 Operating waveforms of proposed Phase shifted Full Bridge PWM DC-DC Converter with Current Doubler

Mode1 전상상태 ZVS 환류기간(t0-t1)

Mode10이후 스위치 S2를 턴-오프 하는 모드이다. 이때 인버터 출력 전류에 의해, 커패시터 C1이 방전되고 C2가 충전된다. 이 기간 동안 인버터 출력 전류를 일정하다고 가정하면 스위치 S2에 걸리는 전압은 다음과 같이 된다.

$$V_{(s2)} = \frac{1}{2C}(i_{Lm}(t_0) + n \times i_2(t_0))t \quad (1)$$

여기서, C = 무손실커패시터,

$i_{Lm}(t_0)$ = t0일때의 여자 전류

n = 변압기 권수비(N_{S2}/N_{S1})

$i_2(t_0)$ = t0일때의 변압기 2차측전류

t = 시간

이 전압식으로 부터 C1=0, C2=E가 될때 다음 모드로 천이 한다. 전상상태의 데드타임(Dead Time)은 C1과 C2의 충전 전 시간보다 길게 설계해야 한다.

Mode2 전류 환류 기간(t1-t2)

위상 전상상태에서 스위치의 전환이 완료되면 커패시터 C1에 흐르고 있던 전류는 다이오드 D1을 통해 전류(轉流)하여 전류(電流)환류 한다. 이때 다이오드 D1이 도통될때 스위치 S1을 턴-온 하여, ZVS 및 ZCS 턴온을 달성한다. 이 기간동안 인버터부에는 ZVS, ZCS를 달성하기 위한 순환 전류가 흐르고 있어 소프트 스위칭을 이루기 위한 순환 전류가 흐른다. 또한 배전류 정류기부에서는 전류 평활을 위한 순환 전류가 흐르는 상태가 된다.

Mode3 위상 지상상태 ZVS 전환 기간(t2-t3)

전류 환류 기간동안 스위치 S3를 턴-오프 하여 ZVS 전환 기간이 된다. 이때의 인버터 출력 전류에 의해 커패시터 C3가 충전되고 C4가 방전된다. 모드 3이 되면 변압기 2차측 전압은 0이 되어 단락으로 간주 할수 있다. 그래서 스위치 S3에 걸리는 전압 및 인버터 출력 전류는 다음과 같게 나타낼 수 있다.

$$V_{(s3)} = \sqrt{\frac{L_1}{2C}}(i_{Lm}(t_2) + n \times i_2(t_2))\sin \frac{t}{\sqrt{2CL_1}} \quad (2)$$

$$i_{(inv)}(i_{Lm}(t_2) + n \times i_2(t_2))\cos \frac{t}{\sqrt{2CL_1}} \quad (3)$$

여기서, $i_{Lm}(t_2)$ = t2일때 여자 전류값

$i_2(t_2)$ = t2일때 변압기 2차측 전류값

L_1 = 누설 인덕턴스 및 모든 인덕턴스의 합계

식(2)와 식(3)으로 부터 커패시터 C3충전 및 C4방전 완료 후 스위치 S4를 턴온 하여 S4의 ZVS, ZCS 턴온을 달성한다.

Mode4 배전류 정류기 전류(轉流)기간(t3-t4)

커패시터C3와 C4가 충·방전되는 모드이다. 이 때, C4에 흐르는 전류는 다이오드 D4로 전환되고, D4가 도통되고 있는 상태에서 스위치S4는 ZVS, ZCS로 턴-온 된다.

Mode5 전력 공급 기간(t4-t5)

다이오드 D6으로부터 D5로 전환이 끝나면 전원으로 부터 부하에 전력이 공급되는 모드이다. 이 기간을 듀티율에 의해 조절하는 것으로, 임의의 출력전압을 얻을 수 있다.

이상은 배전류 정류기를 이용한 위상 천이 풀 브릿지 PWM DC-DC 컨버터의 반 주기에 있어서 동작모드를 설명한 것이며, Mode5의 상태에서 스위치 S1을 턴-오프 하면 Mode6으로 천이된다. Mode6로부터 Mode10에 대해서는, Mode1에서부터 Mode5에 준해 천이하며 전압 및 전류의 식도 전반의 모드와 같기 때문에, 자세한 언급은 본 연구에서는 생략하였다.

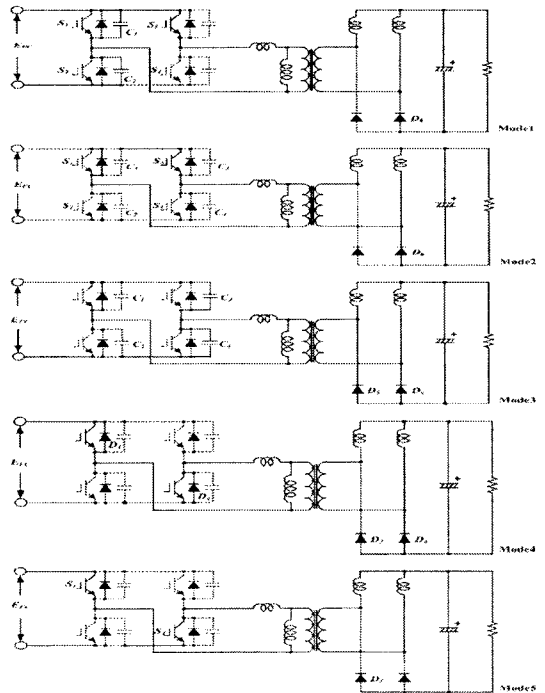


그림 5 제안한 DC-DC컨버터의 동작모드
Fig. 5 Mode of the proposed DC-DC Converter

3. 실험 결과 및 고찰

표 1은 본 논문에서 제안한 DC-DC 컨버터의 실험에 사용된 회로 경수를 나타낸 것이다. DC-DC 컨버터회로의 제어시스템은 원칩 위상 시프트 PWM의 전압 구동 신호를 만드는 ML4828로 구성 하였다.

표 1 실험에 사용된 회로 경수

Table 1 Circuit parameters used in experiment

입력 직류전압(V_{IN})	DC37~60[V]
정격출력 (P_{out})	3.0[kw]
스위칭 주파수(f_s)	40[kHz]
스위치	2in1IGBT 모듈
무손실 스너버 커패시터(C_1 - C_4)	18[nF]
배전압 정류기 다이오드	USR120PP6A
여자 인덕턴스(L_m)	2.42[mH]
누설 인덕턴스(L_l)	10[uH]
평활 리액터(L_o)	50[uH]
평활 커패시터(C_o)	1.2[mF]
고주파 변압기	권수비-1:10
출력 전압	311[V]

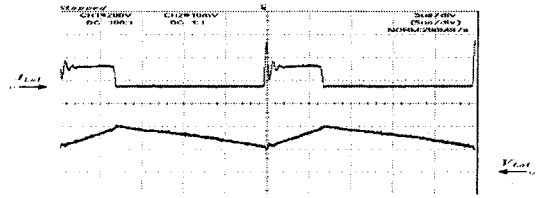


그림 10 출력 인덕터 전압, 전류 파형

Fig 10 Inductor voltage and current waveforms at the output side (200V/div), (10A/div)

그림 6은 스위치의 영전압, 영전류 스위칭 동작 파형을 나타낸 것이다. 턴 온-오프시 ZVS, ZCS동작을 하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 그림 7은 변압기 1차측 전류 전압 파형을 나타내고 있고 그림 8은 변압기 2차측 전류 전압 파형을 나타내고 있다. 그림 9는 다이오드 D5의 파형을 그리고 그림 9는 출력 인덕터 L_o 파형을 나타내고 있다. 그림 8과 그림 9에서 알수 있듯이 배전류 정류기의 효과에 의해 변압기2차측 전류의 실효치가 부하 전류의 반이 되고 있음을 확인할 수 있다. 연료전지는. 고효율 및 청정 에너지원으로 미래의 새로운 대체에너지원으로 기대되고 있다. 본 논문에서는 위상 천이 PWM 제어를 사용하여 소프트 스위칭을 달성하였으며, 변압기 2차측에 인덕터 2개를 사용한 정류방식을 사용하여 변압기 2차측의 전류가 부하 전류의 반으로 되는 새로운 방식을 제안하여 변환장치의 무게와 부피를 줄였다. DC-DC 컨버터의 효율은 95[%]를 얻었다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라우축사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김호용, 김재언, 김용상, 이승재, "분산형전원의 배전계통도 입전망과 대책", 전기학회지, 제45권, 10호, pp.23~31, 1996.
- [2] 최세환 "연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술", 전력전자학회지, 제8권, 제4호, pp.30~35, 2003.
- [3] Xinbo Ruan, Jiangang Wang, Qianhong Chen, " An Improved Current-Doubler-Rectifier ZVS P WM Full-Bridge Converter", PESC. Vol 4, pp.1749 ~ 1754, 2001
- [4] G.Hua, F.C.Lee and M.M.Jovanovic "An improved Zero-Voltage-Switched PWM Converter Using a saturable Inductor", Proceedings of IEEE PESC, pp.189-194, 1991
- [5] J. A Sabate, V.Vlatkovic, R. B. Ridley, F.C. Lee, B.H. Cho, "Design Considerations for High-Voltage High Power Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converter", IEEE APEC Conf. pp 275~284,1990
- [6] Wang. J. Peng. F.Z, Anderson. J, Joseph. A, Buffenbarger. R, "Low cost fuel cell inverter system for residential power generation", APEC Vol.104, pp.367 - 373, 2004

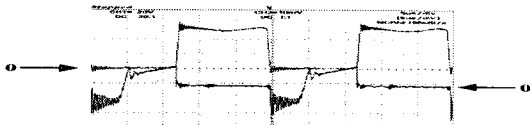


그림 6 영전압 영전류스위칭 파형

Fig. 6 ZVS, ZCS waveforms (20V/div), (40A/div)

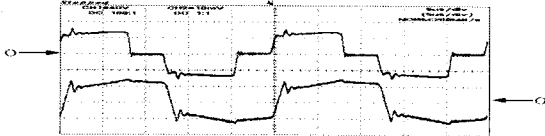


그림 7 변압기 1차측 전압 전류 파형

Fig. 7 Primary side voltage and current waveforms of transformer (40V/div), (100A/div)



그림 8 변압기 2차측 전압 전류 파형

Fig. 8 Secondary side voltage and current waveforms of transformer (200V/div), (20A/div)

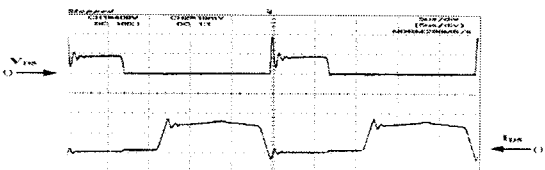


그림 9 배전류 정류다이오드 전압, 전류 파형

Fig. 9 Current Doubler rectifier diode voltage and current waveforms (400V/div), (10A/div)