연료전지시스템용 Push-Pull 컨버터의 손실 해석

권완성, 김영식, 이영진, 한동화, 바이사, 정병환*, 신우석**, 최규하
건국대학교, 삼성 탈레스*, 두원공과대학교**

The Analysis of Push-Pull Converter Loss for Fuel-Cell System

Wan-Sung Kwon, Young-Sik Kim, Young-Jin Lee, Dong-Hwa Han, Bayasgalan,
Byung-Hwan Jeong*, Woo-Seok Shin**, Gyu-Ha Choe
Konkuk University, Samsung, Samsung Thales*, Doowon Technical College**

ABSTRACT

DC-DC 컨버터, DC-AC (계통연계형)인버터, 입·출력 필터 등으로 구성된 연료전지용 PCS에서 DC-DC 컨버터가 전체 효율에 가장 많은 영향을 미친다고 할 수 있는데 본 논문에서는 Push-Pull 컨버터를 선정하여 손실에 관하여 해석하였다.

1. 서론

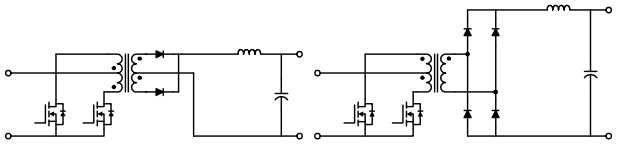
연료전지 스택에서 출력되는 전압은 부하의 변동에 따라 급격하게 큰 값으로 변동하므로 이를 안정된 전원으로 유지하기 위한 DC-DC 컨버터가 필수적이며 이를 교류로 변환하기 위해 DC-AC 인버터 또한 필수적인 구성요소가 된다. 여기에 부가적으로 필터 등이 추가되어 연료전지 PCS(Power Conditioning System)가 된다. 연료전지 PCS에서 DC-DC 컨버터의 효율이 전체 시스템 성능에 큰 비중을 차지한다. 여기에는 Boost, Half-Bridge, Full-Bridge, Push-Pull 컨버터 등이 적용되며 한 예로 선진국에서는 하나의 시스템에 두가지 컨버터를 적용하여 전체 시스템에서 높은 효율을 나타내기도 한다. 본 논문에서는 스위치 양단에 걸리는 전압이 입력 전압의 2배가 되어 전압 스트레스로 영향을 받지만 Full-Bridge에 비해 스위치 개수가 절반이고 고주파 변압기의 절연 특성으로 인해 저전압 대전류의 특성에서 주로 사용되는 Push-Pull 컨버터를 선정하였고 구성요소 각각의 손실을 중점적으로 해석하였으며 Full-Bridge 인버터와 함께 PCS를 구성하여 실험을 통해 효율을 측정하였다.

2. Push-Pull Type PCS

2.1 구성 및 동작원리

Push-Pull 컨버터는 그림 1과 정류 방식에 따라 두가지로 구분될 수 있다. 그림 1(a)에서는 반파 정류기를 사용하며 스위칭 사이클의 한주기내에 권선의 절반만 에너지를 전달하기 때문에 변압기 이용률이 낮은 단점이 있으나 그림 1(b)처럼 전파 정류기를 사용하면 중간 탭을 이용하지 않아 변압기 이용률이 증가하므로 부피를 줄일 수 있으며 저렴한 컨버터 구현이 가능한 장점이 있다[1]. 따라서 본 논문에서는 그림 1(b)의 회로를 기준으로 기술하였다. 입력전압이 저전압일 경우 단 하나의 스위치 전원과 직렬로 연결되어 스위칭 손실이 낮은 장점이 있어 스위칭 소자의 손실 저감이 요구되는 시스템에서 일반적으로 Push-Pull 컨버터가 사용되어지고 있다[2][3].

변압기의 2차측 전압은 구형파가 음과 양이 서로 번갈아 나타나며 그 폭은 한주기내에 스위치가 on 되는 시간만큼이 된다. 두 개의 스위치는 규칙적으로 on/off를 반복하는데, 서로 180°의 위상차로 번갈아 켜지는 방식으로 동작한다[4][5].



(a) 반파 정류기를 이용한 회로 (b) 전파 정류기를 이용한 회로

그림 1 Push-Pull 컨버터의 회로도
Fig. 1 Push-Pull converter scheme

2.2 Push-Pull 컨버터의 설계

일반적인 Push-Pull 컨버터는 두 개의 스위치, 승압을 위한 변압기, 정류기, 출력 LC 필터로 구성되며 표 1에서 주어진 전기적 사양과 아래에 전개된 수식들에 의해 설계된다.

표 1 Push-Pull 컨버터 전기적 사양
Table 1 Push-Pull converter specification

정격 전력	1.1[kW]
정격 입력전압(V_i)	50[V]
입력 전압범위($V_{i(\min\sim\max)}$)	30[V] ~ 70[V]
스위칭 주파수	20[kHz]
정격 출력전압(V_o)	360[V]
출력 전류범위($V_{o(\min\sim\max)}$)	0.1[A] ~ 4[A]

1) 고주파 변압기 코어 손실 밀도 및 1·2차측 권선수

$$N_p = \frac{V_{i(\min)} \cdot Duty_{\max} \cdot T_s}{\triangle B \cdot A_e}[Turn] \quad (1)$$

$$N_s = \frac{V_o + V_F + V_l}{Duty_{\max} \cdot 2V_{i(\min)}} \cdot N_p[Turn] \quad (2)$$

여기서 T_s : 주기, $\triangle B$: 자속밀도, A_e : 코어의 단면적
V_F : 다이오드 전압강하, V_l : 인덕터 전압강하

2) 스위치의 듀티비

$$D_{\max} = \frac{N_p}{2N_s} \cdot \frac{V_o}{V_{i(\min)}},\ D_{\min} = \frac{N_p}{2N_s} \cdot \frac{V_o}{V_{i(\max)}} \quad (3)$$

3) 1·2차측 권선에 흐르는 전류의 실효값

$$I_{L1r} = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_{o(\max)} \cdot \sqrt{2D_{\max}}[A] \quad (4)$$

$$I_{L2r} = \frac{1}{2} \cdot I_{o(\max)} \cdot \sqrt{1+2D_{\max}}[A] \quad (5)$$

4) 스위치 양단의 전압과 흐르는 전류

$$V_{DS(\max)} = 2\,V_{i(\max)}[V] \quad (6)$$

$$I_{DS(\max)} = \frac{N_s}{N_p} \cdot (I_{o(\max)} + I_{o(\min)})[A] \quad (7)$$

5) 다이오드의 역저지 전압과 흐르는 전류의 최대치

$$V_R = \frac{N_s}{N_p} \cdot 2\,V_{i(\max)}[V] \quad (8)$$

$$I_{F(\max)} = I_{o(\max)} + I_{o(\min)}[A] \quad (9)$$

6) 출력필터의 인덕터와 권선수

$$L \geq \frac{V_o(\frac{1}{2} - D_{\min})\,T_s}{2\Delta I}[mH] \quad (\triangle I: \text{출력전류 리플}) \quad (10)$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}\,[Turn] \quad (A_L: \text{인덕턴스 계수}) \quad (11)$$

7) 출력필터 커패시터

$$C = \frac{V_o(\frac{1}{2} - D_{\min})}{8L\Delta v_o f^2}[uF] \quad (\triangle v_{o(rms)} = \frac{\triangle v_o}{2\sqrt{3}}) \quad (12)$$

2.3 Push-Pull 컨버터의 손실해석

컨버터에서는 스위치, 다이오드, 변압기 등에서 손실이 발생하며 아래에 전개된 수식들에 의해 해석되었다.

1) 고주파 변압기 손실

$$P_{fc} = k \cdot f^m \cdot B^n[W/m^3] \quad (k, m, n: \text{상수}) \quad (13)$$

$$P_{h+e} = \text{단위체적당 손실} \times \text{부피}[W] \quad (14)$$

$$P_{cu1} = I_{p_rms}^2 \times R_{T1}[W] \quad (15)$$

$$P_{cu2} = I_{s_rms}^2 \times R_{T2}[W] \quad (16)$$

$$R_{T1(2)} = \rho \frac{N_{1(2)} \cdot (MLT)}{A_w}[\Omega] \quad (17)$$

여기서 MLT:턴당 평균 길이, N:턴수, A_w:전선단면적

2) MOSFET 손실

$$P_{sw}(t_{on}) = \frac{1}{2} \cdot V_s \cdot I_D \cdot f_{sw} \cdot t_{on} \quad (18)$$

$$P_{sw}(t_{cond}) = I_D^2 \cdot R_{DS} \cdot t_{cond} \cdot f_{sw} \quad (19)$$

$$P_{sw}(t_{off}) = \frac{1}{2} \cdot V_s \cdot I_D \cdot f_{sw} \cdot t_{off} \quad (20)$$

$$P_{sw_total} = P_{sw-on} + P_{sw-off} + P_{sw-cond} \quad (21)$$

여기서 V_S : 스위치 양단전압, I_D : MOSFET의 도통전류
f_{sw} : 스위칭 주파수, t_{cond} : 스위치 도통시간
t_{on} : 턴온 천이시간, t_{off} : 턴오프 천이시간
R_{DS} : MOSFET의 Drain-Source간의 on저항

$$t_{on} = t_{ri} + t_{fv} \quad (22)$$

$$t_{ri} = R_G C_{iss} \ln\left(\frac{g_m \cdot V_G}{g_m(V_G - V_{GS(TH)}) - I_D}\right) \quad (23)$$

$$t_{fv} = \frac{C_{GD}(V_S - I_D \cdot R_{DS})}{i_G} \quad (24)$$

$$t_{off} = t_{rv} + t_{fi} \quad (25)$$

$$t_{rv} = \frac{V_s R_G C_{GD}}{V_{GS}^{'}} \quad (26)$$

$$t_{fi} = R_G C_{iss} \ln\left[\frac{V_{GS}^{'}}{V_{GS(TH)}}\right] \quad (27)$$

여기서 t_{ri}, t_{fi} : 드레인 전류 상승, 하강시간
t_{rv}, t_{fv} : 스위치 양단전압 상승, 하강시간
i_G, R_G : 게이트 입력 전류, 저항
C_{iss} : MOSFET 입력 커패시턴스
C_{GD} : 게이트와 드레인간의 커패시턴스
$V_{GS(TH)}$: MOSFET 컷 오프 전압

3) 정류기 손실

$$\frac{1}{T}\int_0^T (V_{DO} \times i_D(t))dt + \frac{1}{T}\int_0^T (r \times i_D^2(t))dt \quad (28)$$

$$= V_{DO} \times \frac{1}{T}\int_0^T i_D(t)\,dt + r_D \times \frac{1}{T}\int_0^T i_D^2(t)\,dt$$

$$P_{diode} = V_{DO} \times I_{D(mean)} + r_D \times (i_{D(rms)})^2 \quad (29)$$

여기서, $\frac{1}{T}\int_0^T i_D(t)\,dt = I_{D(average)}$

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_D^2(t)dt = (i_{D(\text{실효치})})^2$$

4) 인덕터 동손 및 코어 손실

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \times R_L[W] \quad (30)$$

$$P_L = 1.07\,B^{2.03} f^{1.39}[W] \quad (31)$$

5) 커패시터 손실

$$P_{cap} = \frac{1}{T}\int_0^T i_c^2(t) R_c dt = R_{ESR} \cdot I_{c_rms}^2 \quad (32)$$

$$I_{c(rms)} = \frac{\triangle i}{2\sqrt{3}} \quad (33)$$

$$ESR = \frac{\Delta v_{o(rms)}}{I_{c(rms)}} \quad (34)$$

표 2 Push-Pull 컨버터 설계 결과
Table 2 Push-Pull converter design result

구 분	소자 선정 및 정격	
고주파변압기	권선비	5:70
MOSFET	듀티비	0.18 ~ 0.43
	IRFP460	500[V], 80[A]
다이오드	DSEP30	2000[V], 7[A]
인덕터	CM777124	4.8[mH]
캐피시터	-	2.2[uF]

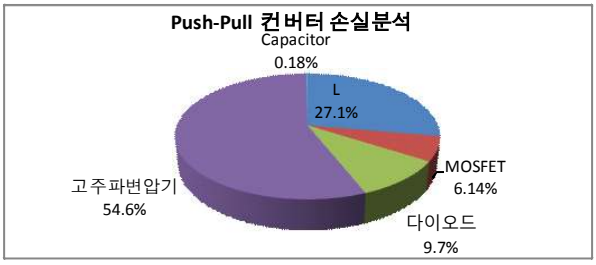


그림 2 Push-Pull 컨버터 이론적 손실분석
Fig. 2 The analysis of push-pull converter loss

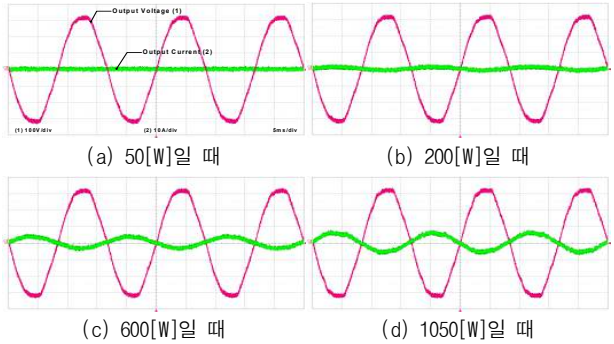
그림 2는 정격운전조건에서 컨버터의 손실분석을 나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있듯이 고주파 변압기의 손실이 54.6[%]로 가장 크고 커패시터의 손실이 0.18[%]로 가장 낮았다.

2.4 Push-Pull Type PCS 실험

Push-Pull 컨버터의 손실을 분석하기 위해 구간별로 PCS 전체 효율에 관한 실험을 수행하였고 정격영역에서 효율이 88[%] 정도로 나타났으며 그림 4는 실험결과를 바탕으로 저전력에서 정격전력까지 구간별로 전체 효율 및 손실을 그래프로 나타낸 것이다.

표 3 저전력에서 정격전력까지의 Push-Pull Type PCS 출력특성

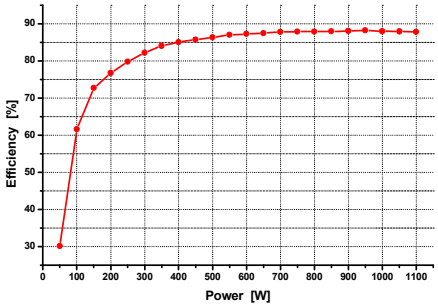
입력 전력 [W]	입력 전압 [V]	입력 전류 [A]	출력 전력 [W]	출력 전압 [V]	출력 전류 [A]	효율 [%]
48.02	49.93	0.962	14.452	226.7	0.064	30.096
201.70	50.24	4.015	154.67	226.8	0.682	76.683
595.40	50.22	11.856	519.4	227.8	2.280	87.235
1009.70	50.19	20.118	888.5	229.6	3.870	87.996
1068.80	50.12	21.325	939.7	229.6	4.093	87.921
1109.40	50.04	22.170	973.6	229.3	4.246	87.759



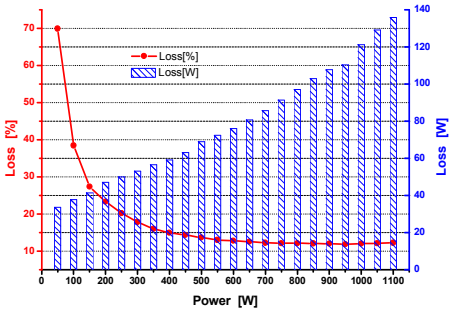
(a) 50[W]일 때 (b) 200[W]일 때

(c) 600[W]일 때 (d) 1050[W]일 때

그림 3 구간별 Push-Pull Type PCS 출력 전압 및 전류
Fig. 3 Output voltage & current Waveform of Push-pull type PCS



(a) 효율



(b) 손실

그림 4 구간별 Push-Pull Type PCS 효율 및 손실
Fig. 4 Push-Pull type PCS efficiency & loss

3. 결론

실험된 PCS의 전체 효율은 약 88[%]를 나타내었는데 일반적인 Full-Bridge 인버터의 효율을 약 95[%]라 한다면 필터 등을 고려한 컨버터의 효율은 약 94[%]정도로 비교적 낮은 효율이 되는 것을 예상할 수 있다. 이는 이론적 손실분석에서 알 수 있듯이 높은 승압비에 따른 변압기 동손, 인덕터의 손실이 비교적 높았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 우선 전체 효율을 대해 이론적으로 분석을 한 것이며 추가적인 실험으로 이론적인 손실과 실제 손실을 비교할 예정이다.

이 논문은 지식경제부(R-2007-1-015-01) 지원에 의하여 연구되었슴

참 고 문 헌

[1] 송성근, 박성준, 김동옥, 임영철, 김광헌, "공통암을 이용한 3상 변압기 절연 멀티레벨 인버터", 전력전자학회논문지, 제12권 제2호, pp. 149 ~ 156, 2007. 4.

[2] 손경종, "계통연계형 연료전지 전력변화 시스템의 고효율화에 관한 연구", 전남대학교 대학원 박사학위논문, 2007. 2.

[3] Michael J. Ryan, William E. Brumsickle, Deepark M. Divan, "A New ZVS LCL-Resonant Push-Pull DC-DC Converter Topology", IEEE Trans., Vol.34, No.5, pp. 1164 ~ 1174, September/October, 1998.

[4] Keith H. Billings, "Switch Mode Power Supply Handbook", McGraw-Hill. 1999.

[5] Abrahan I. Pressman, "Switching Power Supply Design", McGraw-Hill. 1998.