

Three-Level 컨버터와 Full-Bridge 컨버터의 손실분석 비교에 관한 연구

배진용* · 김 용* · 백수현* · 김필수** · 최근수***
 *동국대학교, **대림대학, ***디지아이

A Study on the Loss Analysis Comparison for Three-Level Converter and Full-Bridge Converter

Jin-Yong Bae* · Yong Kim* · Soo-Hyun Baek* · Pili-Soo Kim** · Geun-Soo Choi***
 *Dongguk University, **Daelim College, ***DGI

Abstract - This paper presents the loss analysis comparison for Three-Level Converter and Full-Bridge converter. The result of the analysis is verified with 2.5kW prototype.

1. 서 론

본 연구에서는 고전압·대용량 응용 분야에 적합한 Three-Level 컨버터와 Full-Bridge 컨버터의 효율 감소에 대한 주요 원인을 비교·분석하고, 각 소자 및 부품의 손실을 수학적으로 모델링하여 시뮬레이션 한 결과를 바탕으로 각각의 컨버터의 대하여 출력에 따른 각 소자 및 부품의 손실 특성을 예측하고, 실험 결과와 비교하였다.[2-3]

2. 본 론

2.1 Three-Level 컨버터

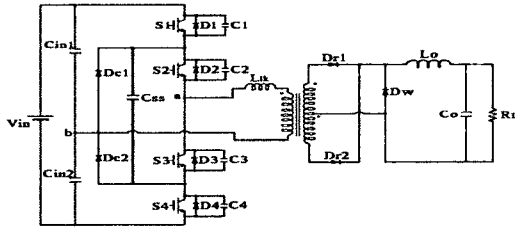


그림 1. Three Level 컨버터 회로

ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계 전류는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.[3-6]

$$i_{crit} = \frac{V_{in}}{2} \sqrt{\frac{2}{L_{lk}} \left\{ \frac{4}{3} C_{mos} + \frac{1}{2} C_{tr} \right\}} \quad (1)$$

그림 2는 이론적인 Three Level 컨버터의 변압기 1차측 전압 및 전류 파형을 나타낸다.[3]

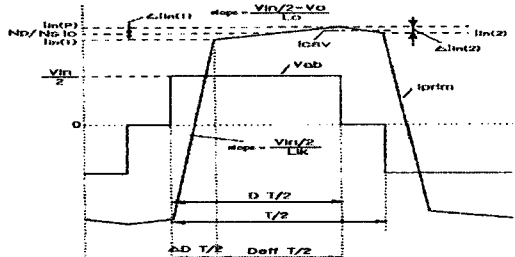


그림 2. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형 (이론치)

2.2 Full-Bridge 컨버터

ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계 전류는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$i_{crit} = V_{in} \sqrt{\frac{2}{L_{lk}} \left\{ \frac{4}{3} C_{mos} + \frac{1}{2} C_{tr} \right\}} \quad (2)$$

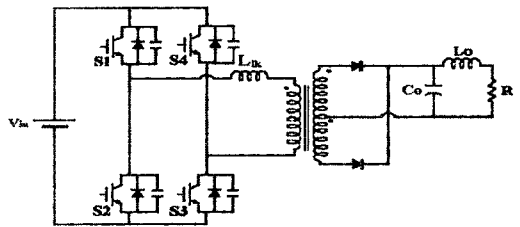


그림 3. Full-Bridge 컨버터 회로

그림 4는 이론적인 Full-Bridge 컨버터의 변압기 1차측 전압 및 전류 파형을 나타낸다.[1-2]

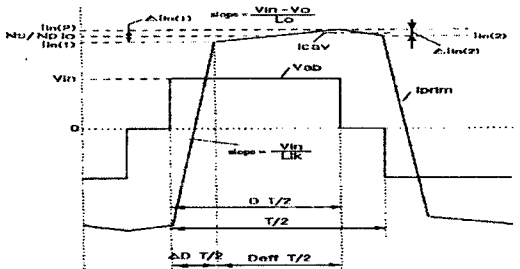


그림 4. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형 (이론치)

2.3 컨버터의 손실 분석

1. 주 스위치 손실[1-3]

㉠ 스위치1(S1)과 스위치4(S4) 전도 손실(TL 컨버터)

$$P_{s14} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{4D}{2} + \left[\left(\frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} \right\} \quad (3)$$

여기서,

R_{ds} : 스위치 온시 드레인파 소스 사이의 저항

㉡ 스위치2(S2)와 스위치3(S3) 전도 손실(TL 컨버터)

$$P_{s23} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{4D}{2} + \left[\left(\frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} + \left[(I_{cav})^2 + \frac{\Delta I_{in(2)}^2}{3} \right] (1-D) \right\} \quad (4)$$

여기서, I_{cav} 는 1차측 환류 전류

㉔ 스위치1(S₁)과 스위치2(S₂) 전도 손실(FB 컨버터)

$$P_{S1,2} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{\Delta D}{2} + \left[\left(\frac{N_S}{N_P} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} \right\} \quad (5)$$

㉕ 스위치3(S₃)과 스위치4(S₄) 전도 손실(FB 컨버터)

$$P_{S3,4} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{\Delta D}{2} + \left[\left(\frac{N_S}{N_P} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} + \left[(I_{cav})^2 + \frac{\Delta I_{in(2)}^2}{3} \right] (1-D) \right\} \quad (6)$$

㉖ 스위치 커패시터 손실(TL 컨버터)

$$P_{sc} = \frac{1}{2} C_{ds} \left(\frac{V_{in}}{2} \right)^2 f \quad (7)$$

여기서, C_{ds} : 스위치 커패시터

㉗ 스위치 커패시터 손실(FB 컨버터)

$$P_{sc} = \frac{1}{2} C_{ds} V_{in}^2 f \quad (8)$$

㉘ 스위치 내장 다이오드 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_{sd} = V_{sd} \frac{I_{in(2)}}{2} \frac{\Delta D}{2} \quad (9)$$

여기서, V_{sd} : 스위치 내장 다이오드 전압강하

㉙ 스위치 온·오프 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_{sw} = f \times \text{energy}(\text{Turn on} + \text{Turn off}) \quad (10)$$

㉚ 스위치 스너버 손실(FB 컨버터)

$$P_{SNU} = C_{ds} V_{in}^2 \times f \quad (11)$$

㉛ 스위치 전체 손실(TL 컨버터)

$$P_s = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} + 4 \times P_{sc} + 4 \times P_{sd} + P_{sw} \quad (12)$$

㉜ 스위치 전체 손실(FB 컨버터)

$$P_s = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} + 4 \times P_{sc} + 4 \times P_{sd} + P_{sw} + P_{SNU} \quad (13)$$

2. 환류 다이오드 손실[2-3]

㉝ 1차측 환류 다이오드 손실(TL 컨버터)

$$P_{Dc1} = V_{Dc1} \left\{ \frac{N_S}{N_P} I_o (1-D) \right\} \quad (14)$$

여기서, V_{Dc1} : 1차측 환류 다이오드 전압강하

㉞ 2차측 환류 다이오드 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_{Dc2} = V_{Dc2} \times I_{cav2} \quad (15)$$

여기서 V_{Dc2} : 2차측 환류 다이오드 전압강하
I_{cav2} : 2차측 환류 전류

㉟ 환류 다이오드 전체 손실(TL 컨버터)

$$P_{Dc} = 2 \times P_{Dc1} + P_{Dc2} \quad (16)$$

㊱ 환류 다이오드 전체 손실(FB 컨버터)

$$P_{Dc} = P_{Dc2} \quad (17)$$

3. 2차측 정류 다이오드 손실[2-3]

그림 5는 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형을 나타낸다.

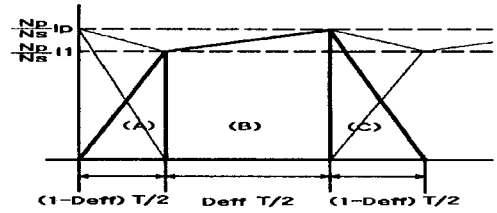


그림 5. 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형 (이론치)

㊲ 정류 다이오드 전도 손실(TL, FB 컨버터)

정류 다이오드의 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 전도 손실을 구하기 위해서 다이오드의 구간별 손실을 구한다. 그림 5에서 (A)구간에서 생기는 손실은 식(18)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DA} = \frac{1}{2} (1-D_{eff}) \frac{N_P}{N_S} I_{in(1)} V_{Drec} \quad (18)$$

여기서, V_{Drec} : 2차측 정류 다이오드 전압강하

(B)구간에서 생기는 손실은 식(19)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DB} = \frac{1}{2} D_{eff} \frac{N_P}{N_S} \left(\frac{I_{in(P)} + I_{in(1)}}{2} \right) V_{Drec} \quad (19)$$

(C)구간에서 생기는 손실은 식(20)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{DC} = \frac{1}{2} (1-D_{eff}) \frac{N_P}{N_S} I_{in(P)} V_{Drec} \quad (20)$$

따라서 정류 다이오드 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 손실은 식(21)로 나타낼 수 있다.

$$P_{Drec} = \frac{1}{2} \frac{N_P}{N_S} (I_{in(P)} + I_{in(1)}) \left(1 - \frac{1}{2} D_{eff} \right) V_{Drec} \quad (21)$$

㊳ 정류 다이오드 온·오프 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_{DW} = f \times \text{energy}(\text{Turn on} + \text{Turn off}) \quad (22)$$

㊴ 정류 다이오드 전체 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_D = 2 \times P_{Drec} + P_{DW} \quad (23)$$

4. 변압기 손실[2-3][8]

㊵ 철손(TL, FB 컨버터)

코어의 철손은 식(24)의 실험식에 의해 구할 수 있다.

$$P_{FE} = \gamma \times f^\alpha \times B_S^\beta \times \text{Core weight} \quad (24)$$

여기서, PC40의 상수로써

γ : 1.363×10^{-4} (코어 계수)

α : 1.24 (주파수 계수)

B_S : 포화 자속 밀도

β : 2 (자속 밀도 계수)

㊶ 동손(TL, FB 컨버터)

일반적인 변압기의 동손을 구하면 식(25)로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{DC} \quad (25)$$

여기서, R_{DC} : DC 저항

표피 깊이를 고려한 고주파 저항 R_{AC}는 식(26)으로 나타낼 수 있다.

$$R_{AC} = R_{DC} \left\{ 1 + \frac{(R_o/\delta)^4}{48 + 0.8 (R_o/\delta)^4} \right\} \quad (26)$$

따라서 변압기 동손은 식(27)로 나타낼 수 있다.

$$P_{Cu} = I_{rms}^2 R_{AC} \quad (27)$$

㉔ 변압기 전체 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_{Tran} = P_{FE} + P_{Cu} \quad (28)$$

5. 기타 손실(2-3)

기타 손실은 매우 작으므로 무시한다.

표 1. 시뮬레이션 및 하드웨어 제작에 사용된 소자의 회로 파라미터

입력 전압	540 V
출력 전압	48 V
최대 출력	2.5 kW
주 변압기(TL 컨버터)	EC 90의 1/2. TDK 12 : 4. L _{lk} = 7uH
주 변압기(FB 컨버터)	EC 90의 1/2. TDK 20 : 4. L _{lk} = 15.3uH
입력단 커패시터	470 uF
Flying 커패시터	100 uF
주 스위치(TL 컨버터)	FMG2G50US60. FAIRCHILD
주 스위치(FB 컨버터)	MG50Q2YS50. TOSHIBA
2차측 정류 다이오드	DSEI 2X61 x 2. IXYS
1차측 환류 다이오드	DSEI 2X61. IXYS
2차측 환류 다이오드	DSEI 30 x 2. IXYS
출력단 인덕터	30 uH
출력단 커패시터	10000 uF
스위칭 주파수	40 kHz
스위치 R _{ds} (TL 컨버터)	0.140 Ω
스위치 R _{ds} (FB 컨버터)	0.168 Ω

2.4 손실 분석 시뮬레이션 및 실험 결과

표 1은 시뮬레이션 및 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타내고, 그림 6은 C언어에 의한 손실 계산을 위한 플로우 차트를 나타낸다.

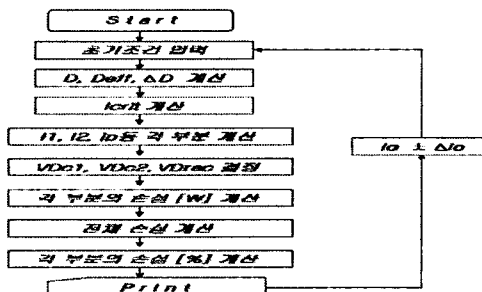


그림 6. 손실 계산을 위한 플로우 차트

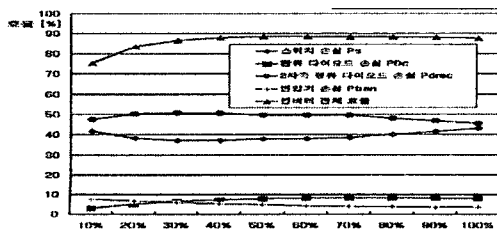


그림 7. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실(TL 컨버터)

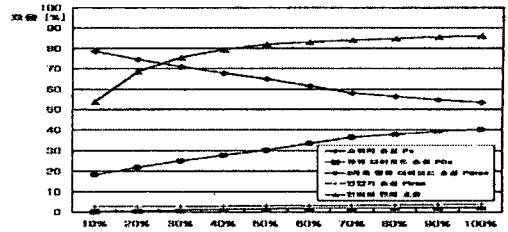


그림 8. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실(FB 컨버터)

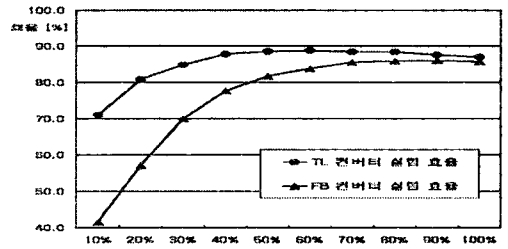


그림 9. 효율에 대한 실험 결과 비교

3. 결 론

본 논문에서는 Three-Level 컨버터와 Full-Bridge 컨버터의 손실분석 비교에 관하여 논하였다. 고입력, 대전력 시스템의 경우 스위치와 2차측 정류 다이오드의 전도 손실이 주된 손실로 나타나며, TL 컨버터가 FB 컨버터에 비하여 더욱 적합하다는 것을 손실분석 모델링을 통하여 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] J.A.Sabaté, V.Vlatkovic etc, "Design considerations for High Power Full-Bridge ZVS PWM Converter," APEC 1990 Rec., pp275~284, 1990.
- [2] 배진용, 김용의, "위상이동 Full-Bridge 컨버터의 손실 분석에 관한 연구", 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회는논문집, pp.157~162, 2003.
- [3] 배진용, 김용의, "Three Level 컨버터의 손실 분석에 관한 연구", 대한전기학회 EMECS 추계학술대회는논문집, pp.177~182, 2002.
- [4] 배진용, 김용의, "2차측 보조회로를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회는논문집, pp.320~323, 2001.
- [5] 배진용, 김용의, "2차측 결합인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 전기학회의 논문지, 51권 5호, pp. 258~265, 2002.
- [6] Jin-Yong Bae, Yong Kim etc, "A Study on the ZVZCS Three Level DC/DC Converter without Primary Freewheeling Diodes", Proceedings of The ICEE'2002, Vol 2. pp.733~738, July, 2002.
- [7] F.Canales, J.M.Burdio etc, "A zero voltage switching three-level DC/DC converter", Telecommunications Energy Conference, pp.512~517, 2000.
- [8] Wen-Jine Gu, and Riu, Liu, "A study of volume and weight vs. frequency for high-frequency transformers", PESC '93 Record., 24th Annual IEEE, pp.1123~1129, 1993.
- [9] 김만고, "Two-transistor 파워드 컨버터에서 소프트 스위칭 기법의 손실 분석", 전력전자학회 논문지, 6권 5호, pp. 453~459, 2001.