

위상이동 방식 Full-Bridge 컨버터의 손실 분석에 관한 연구

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

A Study on the Loss Analysis for the Phase-Shift Full-Bridge Converter

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

Abstract - This paper presents the loss analysis of Phase-Shift Full-Bridge Converter. Full-Bridge DC/DC Converter presented in this paper used a phase shift control in the primary side to achieve ZVS(Zero-Voltage-Switching) for main switch. Phase-Shift Full-Bridge converter have an effect on the high power system. This paper analyses the loss of each component and the various losses in the circuit assessed. The result of the analysis are verified using 2.5kW, 50kHz prototype.

1. 서 론

본 논문에서는 고전압·대용량 시스템에 일반적으로 사용되는 위상이동 방식 Full-Bridge 컨버터의 손실 분석에 관하여 논하였다. 위상이동 방식을 이용한 ZVS(영전압 스위칭) Full-Bridge 컨버터는 회로의 누설 인덕터와 스위치 기생 커패시터 사이의 공진 현상을 이용하기 때문에 별도의 부품을 추가하지 않고도 영전압 스위칭이 가능한 장점을 지닌다.[1]

진상-레그(leading-leg) 스위치의 경우 출력 인덕터에 저장된 에너지를 이용하기 때문에 영전압 스위칭 범위가 충분히 넓으나, 지상-레그(lagging-leg)의 경우 누설 인덕터에 저장된 에너지를 이용하므로 영전압 스위칭 범위가 충분하지 못한 단점을 지닌다. 따라서 최근에는 보조 회로를 사용하여 지상-레그(lagging-leg)의 ZCS(영전류 스위칭) 방법에 관하여 다각적으로 연구중이며, 좀더 향상된 효율 특성에 관하여 중점적으로 연구중에 있다.[2-6] 그러나 Full-Bridge 컨버터에서 발생하는 손실 분석에 관한 연구가 미비하고, 출력에 따른 손실 예측에 관한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 고전압·대용량 응용 분야에 적합한 Full-Bridge 컨버터의 효율 감소에 대한 주요 원인을 분석하고, 각 소자 및 부품의 손실을 수학적으로 모델링하며, 컨버터의 일반적인 손실 분포와 출력에 따른 각 소자 및 부품의 손실 특성을 예측하고, 실험 결과와 비교하였다.[7] 본 논문에서는 스위칭 소자로 IGBT를 사용하였으며, 40kHz의 스위칭 주파수로 동작하는 2.5kW급 시작품 대상으로 시뮬레이션과 실험을 하였다.

2. 본 론

2.1 위상이동 Full-Bridge 컨버터

그림 1은 위상이동 Full-Bridge DC/DC 컨버터 회로를 나타낸다. 주 스위치의 안정한 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설인덕터에 저장되는 에너지는 스위치 커패시터와 고주파 변압기의 기생 커패시터를 충·방전할 수 있도록 설계하여야 한다. 즉 누설 인

덕터에 저장된 에너지가 식(1)을 만족할 때 실제적인 ZVS 동작이 이루어진다.[1][7-10]

$$\frac{1}{2} L_{lk} I_{lk}^2 > \frac{4}{3} C_{mos} V_{in}^2 + \frac{1}{2} C_{tr} V_{in}^2 \quad (1)$$

여기서, C_{mos} : 일반적인 스위치 커패시터
 C_{tr} : 고주파 변압기의 권선간 커패시터 (기생 커패시터)

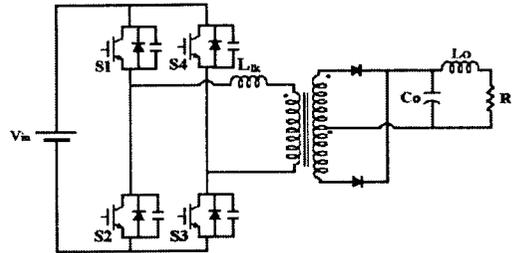


그림 1. 위상이동 Full-Bridge 컨버터 회로

일반적으로는 안정한 영전압 스위칭 동작 영역을 확보하기 위해 누설 인덕턴스(L_{lk})를 증가시키거나 또는 고주파 변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법이 사용된다.[7-10] 그러나 이러한 방법은 유효 듀티 사이클을 감소시키며, 누설인덕터에 축적된 에너지와 1차측으로 반영된 출력측 평활용 인덕터의 에너지가 환류하는 구간이 발생되어 컨버터의 도통손실이 증가되며, 고주파 변압기의 이용율이 낮아지는 단점을 지니게 된다. 또한 기존의 ZVS Full-Bridge 컨버터는 특정 부하영역에서 ZVS 조건을 잃는다. 따라서 ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계 전류는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.[1][7-10]

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

그림 2는 이론적인 위상이동 Full-Bridge 컨버터의 변압기 1차측 전압 및 전류 파형을 나타낸다.[1][7] 변압기 1차측의 $I_{in(2)}$ 는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$I_{in(2)} = \frac{N_s}{N_p} \left\{ I_o + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2} \right\} \quad (3)$$

여기서, N_p : 1차측 권선수
 N_s : 2차측 권선수
 ΔI : 출력 필터의 인덕터 전류 리플
 D : 1차측 듀티비

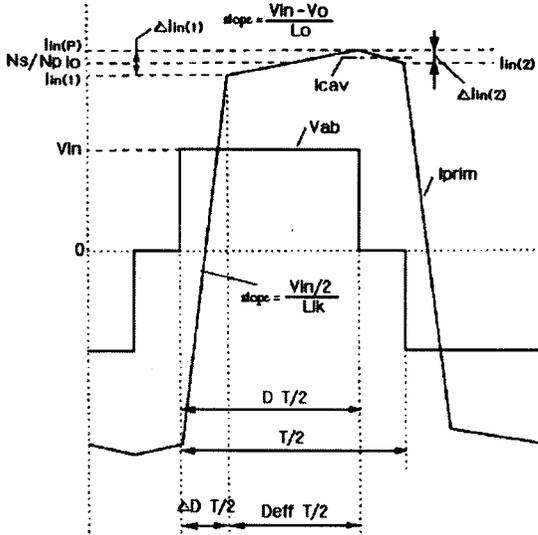


그림 2. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형 (이론치)

주 스위치의 ZVS 동작 조건은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.[1][7]

$$I_{in(2)} > i_{crit} \quad (4)$$

또한 식(2)와 식(3)에서 ZVS를 위한 출력 전류는 식(5)로 나타낼 수 있다.[1][7]

$$I_o > \frac{N_p}{N_s} I_{crit} - \frac{\Delta I}{2} + \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2} \quad (5)$$

위상이동 Full-Bridge 컨버터의 전압 이득은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} D_{eff} \quad (6)$$

여기서, D_{eff} 는 2차측 듀티비이며, 1차측 듀티비는 식(7)과 같다.

$$D = D_{eff} + \Delta D \quad (7)$$

여기서 ΔD 는 듀티비 감소분으로서 식(8),(9)로 나타낼 수 있다.[7]

$$\Delta D = \frac{I_{in(1)} + I_{in(2)}}{\frac{V_{in}}{L_{ik}} \frac{T}{2}} \quad (8)$$

$$\Delta D = \frac{N_s}{N_p} \left\{ 2I_o - \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2} \right\} \quad (9)$$

듀티비 감소분(ΔD)을 나타낸 식(8)로부터 $I_{in(1)}$ 의 크기는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.[7]

$$I_{in(1)} = \frac{V_{in}}{L_{ik}} \frac{\Delta D}{2} \frac{T}{2} \quad (10)$$

또한 $\Delta I_{in(1)}$ 은 식(11)을 통해서 구할 수 있다.

$$\Delta I_{in(1)} = \frac{V_{in} - V_o}{L_o} D_{eff} \frac{T}{2} \quad (11)$$

식(10),(11)로부터 $I_{in(P)}$ 는 식(12)와 같다.

$$I_{in(P)} = I_{in(1)} + \Delta I_{in(1)} \quad (12)$$

식(6)과 식(9)를 식(7)에 대입하면, 듀티비(D)는 식(13)으로 나타낼 수 있다.[1][7]

$$D = \frac{1 + \frac{4L_{lk}f}{R'_o} - \frac{L_{lk}}{L'_o}}{\frac{1}{D_{eff}} - \frac{L_{lk}}{L'_o}} \quad (13)$$

여기서,

$$R'_o = R_o \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 : 1차로 환산된 2차측 부하 저항$$

$$L'_o = L_o \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 : 1차로 환산된 2차측 출력 인덕턴스$$

식(13)은 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$D = D_{eff} \left\{ 1 + 4 \frac{L_{lk}}{R'_o} f \right\} \quad (14)$$

따라서 최대 듀티비(D_{max})는 식(15)와 같이 된다.[1]

$$\frac{N_s}{N_p} \frac{V_o}{V_{in}} \left\{ 1 + 4 \frac{L_{lk}}{R'_o} f \right\} \leq D_{max} \leq 1 \quad (15)$$

2.2 Full-Bridge 컨버터의 손실 분석

위상이동 Full-Bridge 컨버터의 손실 분석을 위해서 다음과 같이 가정한다.[7]

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 모든 소자의 온도 변화에 의한 파라메타 변동은 무시한다.
- 3) 변압기 2차측의 누설 인덕턴스는 무시한다.
- 4) 다이오드의 스너버에서 발생하는 손실은 무시한다.
- 5) 스위치와 다이오드의 온·오프 손실은 무시한다.
- 6) 커패시터의 ESR(Equivalent Series Resistance) 및 ESL(Equivalent Series Inductance)은 무시한다.
- 7) 변압기와 인덕터의 포화는 없는 것으로 가정한다.

1. 주 스위치 손실[1][7][11]

㉠ 스위치1(S₁)과 스위치4(S₄) 전도 손실

$$P_{S14} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{\Delta D}{2} + \left[\left(\frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} \right\} \quad (16)$$

여기서, R_{ds} : 스위치 온시 드레인과 소스 사이의 저항

㉡ 스위치2(S₂)와 스위치3(S₃) 전도 손실

$$P_{S23} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{\Delta D}{2} + \left[\left(\frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} + \left[(I_{cav})^2 + \frac{\Delta I_{in(2)}^2}{3} \right] (1-D) \right\} \quad (17)$$

여기서, I_{cav} 는 1차측 환류 전류

㉢ 스위치 커패시터 손실

$$P_{SC} = \frac{1}{2} C_{ds} V_{in}^2 f \quad (18)$$

여기서, C_{ds} : 스위치 커패시터

㉔ 스위치 내장 다이오드 손실

$$P_{SD} = V_{SD} \frac{I_{in(2)}}{2} \frac{\Delta D}{2} \quad (19)$$

여기서, V_{SD} : 스위치 내장 다이오드 전압강하

㉕ 스위치 온·오프 손실

$$P_{SW} = f \times \text{energy}(\text{Turn on} + \text{Turn off}) \quad (20)$$

㉖ 스위치 스너버 손실

$$P_{SNU} = C_{ds} V_{in}^2 \times f \quad (21)$$

㉗ 스위치 전체 손실

$$P_S = P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} + P_{S4} + 4 \times P_{SC} + 4 \times P_{SD} + P_{SW} + P_{SNU} \quad (22)$$

2. 2차측 환류 다이오드 손실[7][11]

$$P_{DC2} = V_{DC2} \times I_{cav2} \quad (23)$$

여기서 V_{DC2} : 2차측 환류 다이오드 전압강하
 I_{cav2} : 2차측 환류 전류

3. 2차측 정류 다이오드 손실[7]

그림 3은 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형을 나타낸다.

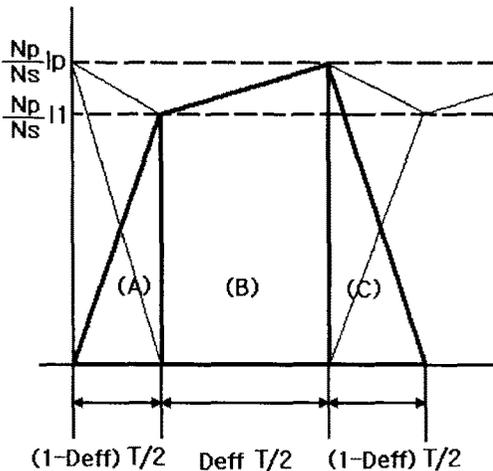


그림 3. 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형 (이론치)

㉘ 정류 다이오드 전도 손실

정류 다이오드의 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 전도 손실을 구하기 위해서 다이오드의 구간별 손실을 구한다. 그림 4에서 (A)구간에서 생기는 손실은 식(24)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DA} = \frac{1}{2} (1 - D_{eff}) \frac{N_P}{N_S} I_{in(1)} V_{Drec} \quad (24)$$

여기서, V_{Drec} : 2차측 정류 다이오드 전압강하

(B)구간에서 생기는 손실은 식(25)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DB} = \frac{1}{2} D_{eff} \frac{N_P}{N_S} \left(\frac{I_{in(P)} + I_{in(L)}}{2} \right) V_{Drec} \quad (25)$$

(C)구간에서 생기는 손실은 식(26)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{DC} = \frac{1}{2} (1 - D_{eff}) \frac{N_P}{N_S} I_{in(P)} V_{Drec} \quad (26)$$

따라서 정류 다이오드의 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 손실은 식(27)로 나타낼 수 있다.

$$P_{Drec} = \frac{1}{2} \frac{N_P}{N_S} (I_{in(P)} + I_{in(L)}) \left(1 - \frac{1}{2} D_{eff} \right) V_{Drec} \quad (27)$$

㉙ 정류 다이오드의 온·오프 손실

$$P_{DW} = f \times \text{energy}(\text{Turn on} + \text{Turn off}) \quad (28)$$

㉚ 정류 다이오드 전체 손실

$$P_D = 2 \times P_{Drec} + P_{DW} \quad (29)$$

4. 변압기 손실[7][12]

컨버터의 변압기는 하나의 손실원으로 그 손실은 철손과 동손으로 구성된다.

㉛ 철손

코어의 철손은 식(30)의 실험식에 의해 구할 수 있다.

$$P_{FE} = \gamma \times f^a \times B_s^\beta \times \text{Core weight} \quad (30)$$

여기서, PC40의 상수로서

γ : 1.363×10^{-4} (코어 계수)

a : 1.24 (주파수 계수)

B_s : 포화 자속 밀도

β : 2 (자속 밀도 계수)

㉜ 동손

일반적인 변압기의 동손을 구하면 식(31)로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{DC} \quad (31)$$

여기서, R_{DC} : DC 저항

그러나 고주파 응용의 경우 권선의 실제 손실은 식(31)의 결과보다 크게 발생되는데, 이것은 표피효과, 근접효과 등에 의해 권선의 저항이 증가하기 때문이다. 즉 고주파에서 전류는 권선의 표피로 집중되어 흐르기 때문에 권선의 유효 저항을 증가시킨다.

일반적으로 동손의 Skin depth(표피 깊이)는 식(32)로 나타낼 수 있다.[7][12]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{0.066}{\sqrt{f}} \quad (32)$$

여기서, μ : 동손 투자율

σ : 동손 전도도

식(32)의 표피 깊이를 고려한 고주파 저항 R_{AC} 는 식(33)으로 나타낼 수 있다.[7][12]

$$R_{AC} = R_{DC} \left(1 + \frac{(R_o/\delta)^4}{48 + 0.8 (R_o/\delta)^4} \right) \quad (33)$$

따라서 변압기 동손은 식(34)로 나타낼 수 있다.[7]

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{AC} \quad (34)$$

㉔ 변압기 전체 손실

$$P_{Tran} = P_{FE} + P_{CU} \quad (35)$$

5. 기타 손실

기타 손실로 커패시터 ESR에 의한 손실, 필터부에서 발생하는 손실, PWM IC 및 제어부에서 발생하는 손실 등이 있으나 이러한 손실은 매우 작으므로 무시한다.

2.2 손실 분석 시뮬레이션

제안된 이론의 타당성을 검증하기 위해서 C언어 수치 해석 프로그램을 이용하여 출력 전력에 따른 각 부분의 손실을 분석하였다.

표 1은 시뮬레이션 및 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타내며, 그림 4는 C언어에 의한 손실 계산을 위한 플로우 차트를 나타낸다.

표 1. 시뮬레이션 및 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력 전압	540 V
출력 전압	48 V
최대 출력	2.5 kW
주 변압기	EC 90의 1/2, TDK 20 : 4, L _{lk} = 15.3uH
변압기의 권선간 커패시터	4.79 nF
입력단 커패시터	470 uF
주 스위치	MG50Q2YS50, TOSHIBA
2차측 정류 다이오드	DSEI 2X61 × 2, IXYS
2차측 환류 다이오드	DSEI 30 × 2, IXYS
출력단 인덕터	30 uH
출력단 커패시터	10000 uF
스위칭 주파수	40 kHz
스위치 R _{ds}	0.168 Ω
스위치 커패시터	10.7 nF
포화 자속 밀도	500 mT
변압기 1차측 R _{DC}	0.167 Ω
변압기 2차측 R _{DC}	0.005 Ω
2차측 정류 다이오드 전압강하	1.05 ~ 1.48 V
1차측 환류 다이오드 전압강하	1.00 ~ 1.10 V
2차측 환류 다이오드 전압강하	1.00 ~ 1.28 V

그림 5는 출력(P_o)에 따른 출력 전류(I_o), 임계 전류(I_{crit}) ZVS를 만족하는 최소 출력 전류의 시뮬레이션 결과이다. 제안된 컨버터의 1차측 임계 전류(I_{crit})는 25.2A이며, 20~100% 부하 시 스위치 1.4는 ZVS 조건을 만족한다.

그림 6은 출력(P_o)에 따른 1차, 2차 듀티비 및 듀티비 감소분(ΔD)의 시뮬레이션 결과이다. 부하가 증가할수록 듀티비 감소분(ΔD)이 감소함을 알 수 있다.

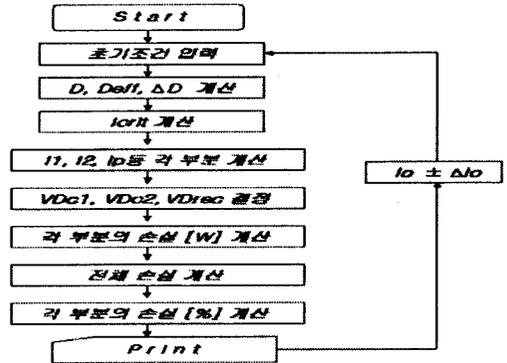


그림 4. 손실 계산을 위한 플로우 차트

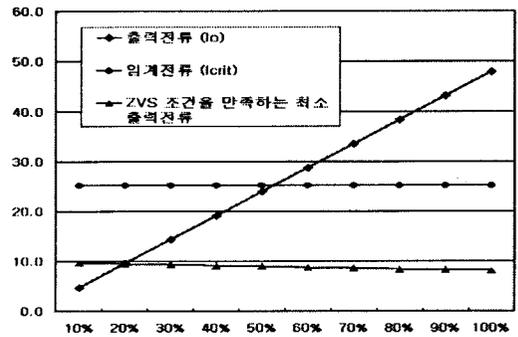


그림 5. 출력에 따른 출력 전류, 임계 전류 및 ZVS를 만족하는 최소 출력 전류

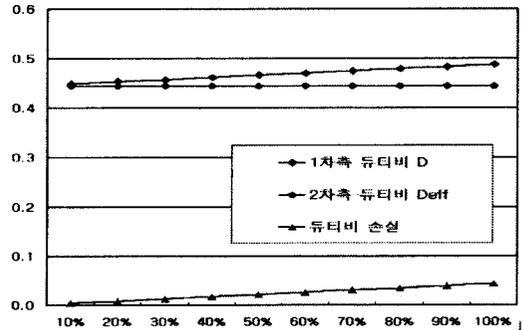


그림 6. 출력에 따른 1차, 2차 듀티비 및 듀티비 감소분

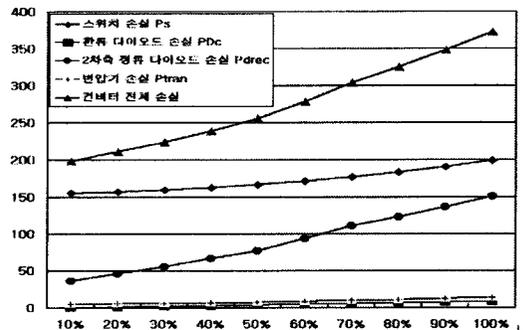


그림 7. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 손실

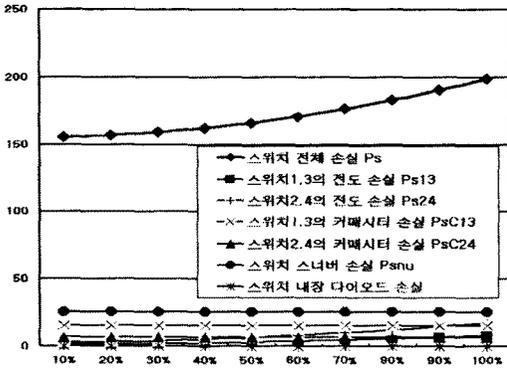


그림 8. 출력에 따른 스위치 각부의 손실

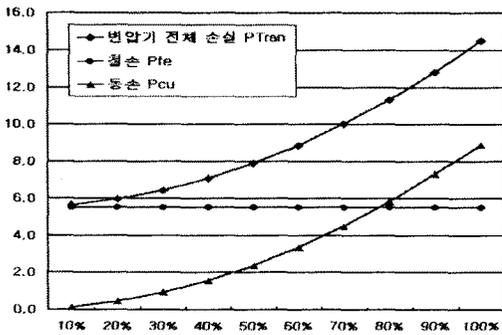


그림 9. 출력에 따른 변압기 각부의 손실

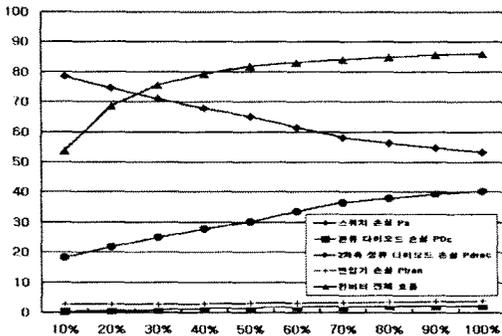


그림 10. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실

그림 7은 출력(P_o)에 따른 각 소자 및 부품의 손실에 대한 시뮬레이션 결과이며, 스위치와 2차측 정류 다이오드의 손실이 컨버터 손실의 대부분임을 알 수 있다.

그림 8은 출력(P_o)에 따른 스위치 각부의 손실에 대한 시뮬레이션 결과이다. 스위치 중 스너버 손실이 차지하는 비중이 가장 크며, 그 다음으로 스위치 커패시터 손실, 스위치 전도 손실, 스위치 내장 다이오드 손실 순으로 스위치 각부의 손실이 분석된다. 컨버터의 출력이 증가할수록 스위치 전도 손실이 증가됨을 알 수 있다. 그림 9는 출력(P_o)에 따른 변압기의 철손에 대한 시뮬레이션 결과이다. 변압기의 철손은 출력 전력의 변화에 무관하고, 동손은 전류의 제곱에 비례하여 손실이 발생함을 알 수 있다. 그림 10은 출력 전력(P_o)에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실을 나타낸다. 컨버터 전체 손실은 경부하에서 낮은 효율을 나타내고, 중부하 이상에서는 완만한 효율 특성을 보이며, 스위치 손실과 2차

측 정류 다이오드의 손실이 컨버터 손실에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

2.3 실험 결과

제안된 이론의 타당성을 검증하기 위해 40kHz, 2.5kW Full-Bridge DC/DC 컨버터를 제작하여 실험하였다.

그림 11은 전부하에서 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 전부하시 출력단 필터(L_o)에서 약간의 포화 현상이 발생함을 알 수 있다.

그림 12는 전부하에서 2차측 정류 다이오드(D_{rec})의 전압 및 전류 파형을 나타낸다.

그림 13은 출력에(P_o)에 따른 효율을 시뮬레이션과 실험에 의해 비교한 것으로, 경부하시 시뮬레이션 효율과 실험 효율에 오차가 크게 발생하는데, 이는 경부하의 경우 스위치와 다이오드에서 무시한 온·오프 손실이 증가하기 때문이라 생각한다.

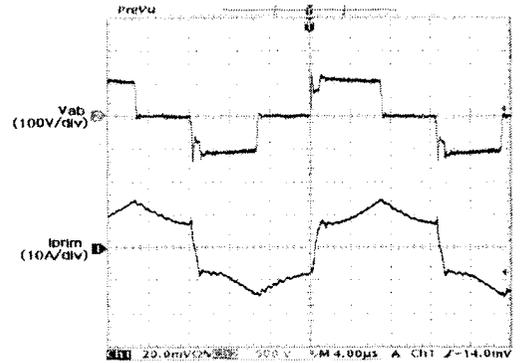


그림 11. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형

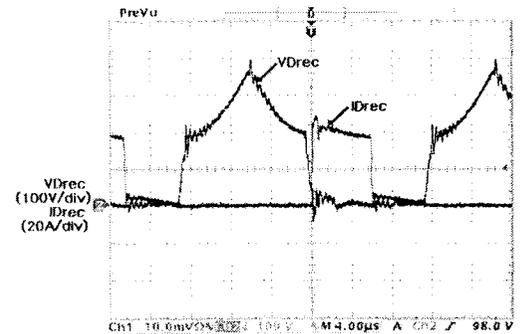


그림 12. 2차측 정류 다이오드의 전압 및 전류 파형

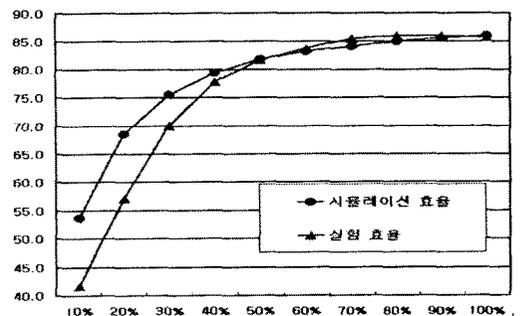


그림 13. 효율에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과 비교

본 논문에서는 위상이동 Full-Bridge 컨버터의 손실 분석에 관하여 논하였다. 변압기 전압 및 전류 파형의 모델링으로부터 듀티비와 각 부분의 손실을 정의하였고, C언어 수치해석 프로그램을 이용하여 출력 전력에 따른 각 소자 및 부품의 손실 특성을 분석하였으며, 실험 결과와 비교하여 제안된 손실 분석 모델링의 타당성을 입증하였다. 대전력 시스템에 적합한 Full-Bridge 컨버터에서 스위치와 2차측 정류 다이오드의 손실이 주된 손실로 나타나며, 특히 경부하시 하드 스위칭에 의한 스위치 손실 비율이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 본 손실 분석 해석을 바탕으로 고전압·대전력 컨버터의 효율 향상에 대한 연구와 해석이 필요할 것으로 생각된다.

(참 고 문 헌)

[1]J.A.Sabaté, V.Vlatkovic etc. "Design considerations for High Power Full-Bridge ZVS PWM Converter," APEC 1990 Rec., pp275~284, 1990.
 [2]E.S.Kim, K.Y.Cho etc "An Improved ZVZCS PWM FB DC/DC Converter using energy recovery snubber," APEC 1997 Rec., pp1014~1019, 1997.
 [3]J.G.Cho, J.W.Baek etc "Novel Zero-Voltage and Zero-Current-Switching (ZVZCS) Full Bridge PWM Converter Using Transformer Auxiliary Winding," IEEE Power Electronics Specialist Conf Rec., pp227~232, 1997.
 [4]E.S.Kim, K.Y.Joe etc "An Improved ZVZCS PWM FB DC/DC Converter using the Modified Energy Recovery Snubber," APEC 2000 Rec., pp119~124, 2000.
 [5]H.S.Choi, J.W.Kim etc "Novel-Zero-Voltage and Zero-Current-Switching(ZVZCS) Full-Bridge PWM Converter Using Coupled Output Inductor," APEC 2001 Rec., pp967~973, 2001.
 [6]J.G.Cho, C.Y.Jeong etc. "Zero Voltage and Zero Current-Switching Full Bridge Converter Using Secondary Active Clamp", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 13, No. 4, July 1998
 [7]배진용, 김용외, "Three Level 컨버터의 손실 분석에 관한 연구", 대한전기학회 EMECS 추계학술대회논문집, pp.177~182, 2002.
 [8]배진용, 김용외, "2차측 보조회로를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회논문집, pp.320~323, 2001.
 [9]배진용, 김용외, "2차측 결합인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 전기학회 논문지, 51권 5호, pp. 258~265, 2002.
 [10]Jin-Yong Bae, Yong Kim etc. "A Syudy on the ZVZCS Three Level DC/DC Converter without Primary Freewheeling Diodes", Proceedings of The ICEE'2002, Vol 2, pp.733~738, July, 2002.
 [11]김만고, "Two-transistor 포워드 컨버터에서 소프트 스위칭 기법의 손실 분석", 전력전자학회 논문지, 6권 5호, pp. 453~459, 2001.
 [12]Wen-Jine Gu, and Riu, Liu, "A study of volume and weight vs. frequency for high-frequency transformers", PESC '93 Record., 24th Annual IEEE, pp1123~1129, 1993.
 [13]F.Canales, J.M.Burdio etc. "A zero voltage switching three-level DC/DC converter", Telecommu nications Energy Conference, pp.512~517, 2000.

α : 변압기 코어의 주파수 계수
 β : 변압기 코어의 자속 밀도 계수
 B_s : 포화 자속 밀도
 γ : 변압기 코어의 계수
 C_{ds} : 스위치 커패시터[F]
 C_{mos} : 일반적인 스위치 커패시터[F]
 C_{tr} : 고주파 변압기의 권선간 커패시터[F]
 δ : 포피 깊이[m]
 σ : 동의 전도도
 D : 1차측 듀티비
 D_{eff} : 2차측 듀티비(유효 듀티비)
 ΔD : 듀티비 감소분
 f : 스위칭 주파수[Hz]
 ΔI : 출력 필터의 인덕터 전류 리플[A]
 I_{cav} : 1차측 환류 전류[A]
 i_{crit} : ZVS 동작을 위한 1차측 임계 전류[A]
 I_{in} : 입력 전류 [A]
 $I_{in(1)}$: 1차측 변압기의 첫 번째 변곡점의 전류[A]
 $I_{in(2)}$: 1차측 변압기의 환류 구간 끝점의 전류[A]
 $I_{in(P)}$: 1차측 변압기의 최대 전류[A]
 I_{rms} : 변압기 실효 전류[A]
 I_o : 출력 전류[A]
 L_{lk} : 누설 인덕턴스[H]
 $L'o$: 1차측으로 환산된 2차측 출력 인덕턴스[H]
 N_p : 1차측 권선수(Turn)
 N_s : 2차측 권선수(Turn)
 P_{cu} : 변압기 동손[W]
 P_D : 2차측 정류 다이오드 전체 손실[Ω]
 P_{DA} : 2차측 정류 다이오드 (A)구간에서 손실[W]
 P_{DB} : 2차측 정류 다이오드 (B)구간에서 손실[W]
 P_{DC} : 2차측 정류 다이오드 (C)구간에서 손실[W]
 P_{DC2} : 2차측 환류 다이오드 손실[W]
 P_{Drec} : 2차측 정류 다이오드 전체 손실[W]
 P_{DW} : 2차측 정류 다이오드 온·오프 손실[W]
 P_{FE} : 변압기 철손[W]
 P_S : 스위치 전체 손실[W]
 P_{S1} : 스위치1의 전도 손실[W]
 P_{S2} : 스위치2의 전도 손실[W]
 P_{S3} : 스위치3의 전도 손실[W]
 P_{S4} : 스위치4의 전도 손실[W]
 P_{SC} : 스위치 커패시터 손실[W]
 P_{SD} : 스위치 내장 다이오드 손실[W]
 P_{SW} : 스위치 온·오프 손실[W]
 P_{SNU} : 스위치 스너버 손실[W]
 R_{AC} : 변압기 AC 저항[Ω]
 R_{DC} : 변압기 DC 저항[Ω]
 R_{ds} : 스위치 온시 드레인과 소스 사이의 저항[Ω]
 $R'o$: 1차측으로 환산된 2차측 부하저항[Ω]
 T : 주기[Sec]
 μ : 동의 투자율
 V_{ab} : 변압기 1차측 전압[V]
 V_{DC2} : 2차측 환류 다이오드 전압강하[V]
 V_{Drec} : 2차측 정류 다이오드 전압강하[V]
 V_{in} : 입력 전압[V]
 V_o : 출력 전압[V]
 V_{SD} : 스위치 내장 다이오드 전압강하[V]