

전력용 반도체의 전도손실 분석을 통한 Three-Level 컨버터와 Full-Bridge 컨버터의 손실모델 및 특성비교에 관한 연구

배진웅* · 김 옹* · 권순도** · 이은영**
*동국대학교, **대림대학

A Study on the loss Model and Characteristic Comparison of Three-Level Converter and Full-Bridge Converter through the Conduction loss Analysis of Power devices

Jin-Yong Bae* · Yong Kim* · Soon-Do Kwon** · Eun-Young Lee**
*Dongguk University, **Daelim College

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.[1-4]

2. 본 론

2.1 Three-Level 컨버터

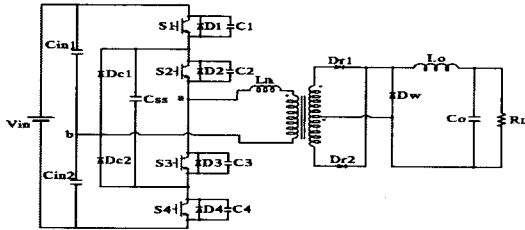


그림 1. Three Level 컨버터 회로

ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계 전류는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.[1-4]

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

그림 2는 이론적인 Three Level 컨버터의 변압기 1차측 전압 및 전류 파형을 나타낸다.[3-4]

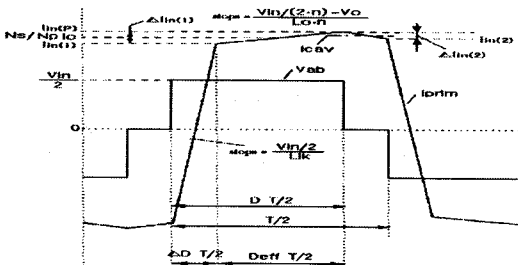


그림 2. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형 (이론치)

2.2 Full-Bridge 컨버터

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

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

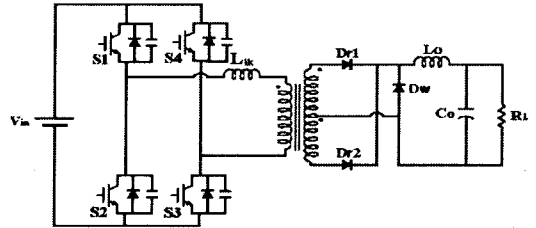


그림 3. Full-Bridge 컨버터 회로

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

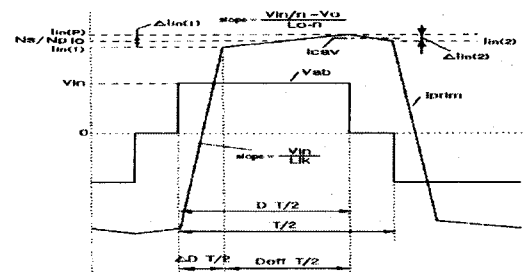


그림 2. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형 (이론치)

2.3 컨버터의 손실 분석

가. 주 스위치 손실[1-4][9]

1) 스위치1(S1)과 스위치4(S4) 전도 손실(TL 컨버터)

$$P_{S1,4} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{\Delta D}{2} + \left[\left(\frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} \right\} \quad (3)$$

여기서,

R_{ds} : 스위치 온시 드레인과 소스 사이의 저항

2) 스위치2(S2)와 스위치3(S3) 전도 손실(TL 컨버터)

$$P_{S2,3} = R_{ds} \left\{ \left(\frac{I_{in(1)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{\Delta D}{2} + \left[\left(\frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{\Delta I_{in(1)}^2}{3} \right] D_{eff} + \left[(I_{cav})^2 + \frac{\Delta I_{in(2)}^2}{3} \right] (1-D) \right\} \quad (4)$$

여기서, I_{cav} 는 1차측 환류 전류

3) 스위치1(S1)과 스위치2(S2) 전도 손실(FB 컨버터)

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

4) 스위치3(S3)과 스위치4(S4) 전도 손실(FB 컨버터)

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

5) 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

6) 스위치 커패시터 손실(FB 컨버터)

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

7) 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

8) 스위치 온·오프 손실(TL, FB 컨버터)

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

9) 스위치 전체 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_S = P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} + P_{S4} + 4 \times P_{SC} + 4 \times P_{SD} + P_{SW} \quad (11)$$

나. 환류 다이오드 손실[3-4]

1) 1차측 환류 다이오드 손실(TL 컨버터)

$$P_{DC1} = V_{DC1} \left\{ \frac{N_S}{N_P} I_o (1-D) \right\} \quad (12)$$

여기서, V_{DC1} : 1차측 환류 다이오드 전압강하

2) 2차측 환류 다이오드 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_{DC2} = V_{DC2} \times I_{cav2} \quad (13)$$

여기서 V_{DC2} : 2차측 환류 다이오드 전압강하

I_{cav2} : 2차측 환류 전류

3) 환류 다이오드 전체 손실(TL 컨버터)

$$P_{DC} = 2 \times P_{DC1} + P_{DC2} \quad (14)$$

4) 환류 다이오드 전체 손실(FB 컨버터)

$$P_{DC} = P_{DC2} \quad (15)$$

다. 2차측 정류 다이오드 손실[3-4]

그림 5는 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형을 나타낸다.

1) 정류 다이오드 전도 손실(TL, FB 컨버터)

정류 다이오드의 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 전도 손실을 구하기 위해서 다이오드의 구간별 손실을 구한다. 그림 5에서 구간(A)에서 생기는 손실은 식(16)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{DA} = \frac{1}{2} (1-D_{eff}) \frac{N_P}{N_S} I_{in(1)} V_{Drec} \quad (16)$$

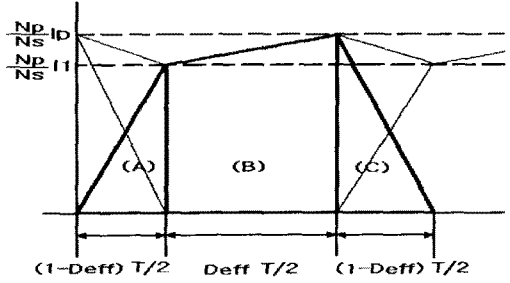


그림 5. 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형 (이론치)

여기서, V_{Drec} : 2차측 정류 다이오드 전압강하 구간(B)에서 생기는 손실은 식(17)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DB} = \frac{1}{2} D_{eff} \frac{N_P}{N_S} \left(\frac{I_{in(P)} + I_{in(1)}}{2} \right) V_{Drec} \quad (17)$$

구간(C)에서 생기는 손실은 식(18)로 나타낼 수 있다.

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

따라서 정류 다이오드 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 손실은 식(19)로 나타낼 수 있다.

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

2) 정류 다이오드 온·오프 손실(TL, FB 컨버터)

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

3) 정류 다이오드 전체 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_D = 2 \times P_{Drec} + P_{DW} \quad (21)$$

라. 변압기 손실[3-4][8]

1) 철손(TL, FB 컨버터)

코어의 철손은 식(22)의 실험식에 의해 구할 수 있다.

$$P_{FE} = v \times f^a \times B_S^b \times \text{Core weight} \quad (22)$$

여기서, PC40의 상수로서

v : 1.363×10^{-4} (코어 계수)

a : 1.24 (주파수 계수)

B_S : 포화 자속 밀도

β : 2 (자속 밀도 계수)

2) 동손(TL, FB 컨버터)

일반적인 변압기의 동손을 구하면 식(23)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{DC} \quad (23)$$

여기서, R_{DC} : DC 저항

일반적으로 동손의 Skin depth(표피 깊이)는 식(24)로 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{0.066}{\sqrt{f}} \quad (24)$$

여기서, μ : 동손 투자율

σ : 동손 전도도

표피 깊이를 고려한 고주파 저항 R_{AC} 는 식(25)로 나타낼 수 있다.

$$R_{AC} = R_{DC} \left\{ 1 + \frac{(R_o/\delta)^4}{48+0.8 (R_o/\delta)^4} \right\} \quad (25)$$

따라서 변압기 동손은 식(26)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{AC} \quad (26)$$

㉔ 변압기 전체 손실(TL, FB 컨버터)

$$P_{Tran} = P_{FE} + P_{CU} \quad (27)$$

마. 기타 손실[3-4]

기타 손실은 매우 작으므로 무시한다.

2.4 전력용 반도체의 전도손실 분석

기존의 전력 변환장치의 손실분석의 경우 R_{ds} 와 V_D 의 값이 일정하다는 가정에서 전도손실을 분석하였으나, 본 논문에서는 전류 변화에 따른 R_{ds} 와 V_D 의 변화를 실측하여 전력 변환장치의 손실분석을 하고자 한다. 일반적으로 전력용 반도체의 전도손실은 전류량 및 온도 등에 영향을 받으며, 비선형적인 특성을 지니고 있다. 전력용 스위치와 다이오드의 전도손실 모델은 식(28),(29)와 같이 나타낼 수 있다.[4]

$$P_s = R_{ds} \times I_s^2 \quad (28)$$

$$P_D = V_D \times I_D \quad (29)$$

여기서, R_{ds} : 스위치 온시 드레인과 소스 사이의 저항
 I_s : 스위치 실효 전류
 V_D : 다이오드 전압강하
 I_D : 다이오드 실효 전류

그림 6은 주 스위치의 전류변화에 대한 R_{ds} 변화와 토폴로지에 따른 스위치 전류의 범위를 나타내며, 전 부하 영역에 걸쳐서 TL 컨버터의 R_{ds} 가 FB 컨버터보다 작음을 알 수 있다. 따라서 TL 컨버터의 주 스위치 손실이 FB 컨버터에 비하여 저감될 것을 예측할 수 있으며, 동시에 경부하에서 컨버터의 효율은 스위칭 손실과 더불어 R_{ds} 의 증가로 급격히 감소됨을 알 수 있다.

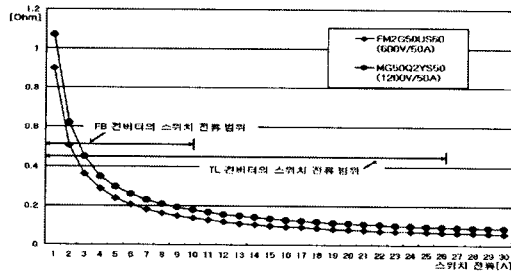


그림 6. 주 스위치의 R_{ds} 변화 및 전류 범위 (TL/FB 컨버터)

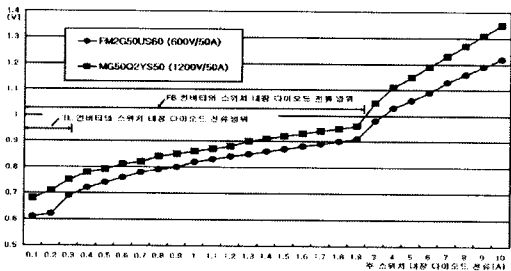


그림 7. 주 스위치 내장 다이오드의 V_{SD} 변화 및 전류 범위 (TL/FB 컨버터)

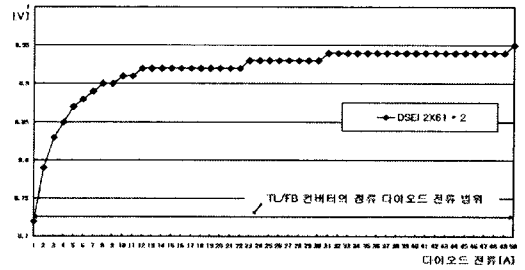


그림 8. 정류 다이오드 V_{Drec} 변화 및 전류 범위 (TL/FB 컨버터)

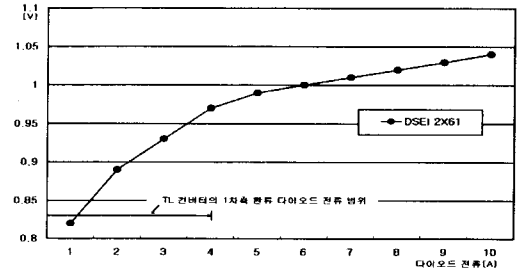


그림 9. 1차측 환류 다이오드 V_{DC1} 변화 및 전류 범위 (TL 컨버터)

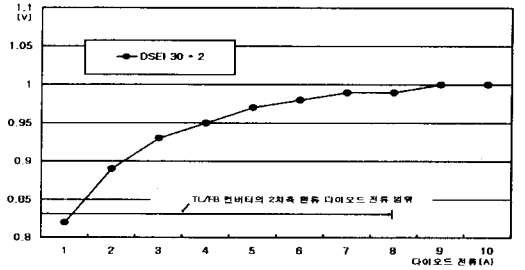


그림 10. 2차측 환류 다이오드 V_{DC2} 변화 및 전류 범위 (TL/FB 컨버터)

그림 7은 주 스위치 내장 다이오드 전류변화에 대한 V_{SD} 변화와 토폴로지에 따른 내장 다이오드 전류의 범위를 나타내며, TL 컨버터의 V_D 가 FB 컨버터에 비하여 작으므로, TL 컨버터의 환류 손실이 저감됨을 예측할 수 있다.

그림 8은 정류 다이오드의 전류변화에 대한 V_{Drec} 변화와 토폴로지에 따른 다이오드 전류의 범위를 나타내며, 동일한 정격의 TL/ FB 컨버터에서 2차측 정류 다이오드 손실은 비슷하게 됨을 예측할 수 있다.

그림 9는 1차측 환류 다이오드의 전류변화에 대한 V_{DC1} 변화와 환류 다이오드 전류의 범위를 나타내며, TL 컨버터에서 추가적으로 나타나는 손실이다. FB 컨버터의 환류 전류는 주 스위치 내장 다이오드를 통하여 도통되므로, TL 컨버터에서 TL 컨버터에 비하여 스위치에 열적 스트레스가 집중됨을 예측할 수 있으며, 이러한 열적 스트레스는 전력용 반도체의 성능을 저하시키고, 동시에 R_{ds} 의 증가를 도모하여 전력 변환장치의 효율을 저감시키게 된다.

그림 10은 2차측 환류 다이오드의 전류변화에 대한 V_{DC2} 변화와 토폴로지에 따른 다이오드 전류의 범위를 나타내며, 동일한 정격의 TL/ FB 컨버터에서 2차측 환류 다이오드 손실은 비슷하게 됨을 예측할 수 있다.

2.5 전도손실을 고려한 손실분석

표 1은 시뮬레이션 및 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타내고, 그림 11은 손실 계산을 위한 플로우 차트를 나타낸다.

표1. 시뮬레이션 및 하드웨어 제작에 사용된 소자와 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. $L_{lk} = 7\mu\text{H}$
주 변압기(FB 컨버터)	EC 90의 1/2. TDK 20 : 4. $L_{lk} = 15.3\mu\text{H}$
입력단 커패시터	470 μF
Flying 커패시터	100 μF
주 스위치(TL 컨버터)	FMG2G50US60. FAIRCHILD
주 스위치(FB 컨버터)	MG50QZYS50. TOSHIBA
2차측 정류 다이오드	DSEI 2X61 x2. IXYS
1차측 환류 다이오드	DSEI 2X61. IXYS
2차측 환류 다이오드	DSEI 30 x2. IXYS
출력단 인덕터	30 μH
출력단 커패시터	10000 μF
스위칭 주파수	40 kHz

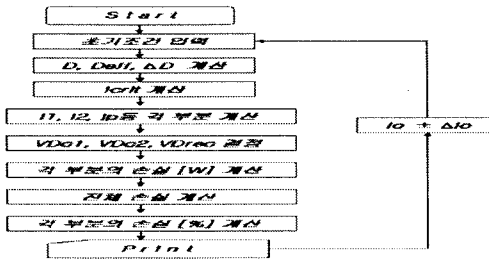


그림 11. 손실 계산을 위한 플로우 차트

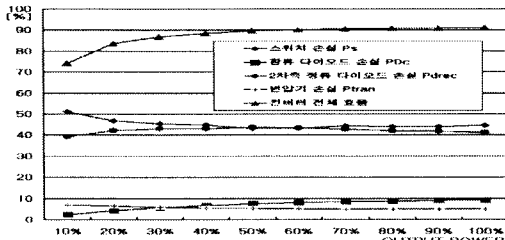


그림 12. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실(TL 컨버터)

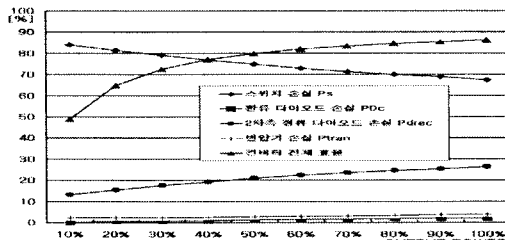


그림 13. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실(FB 컨버터)

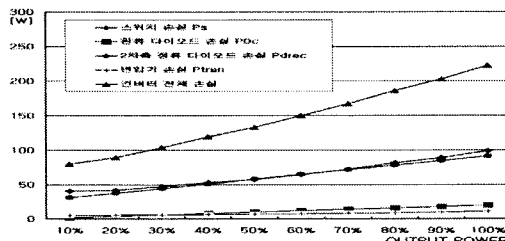


그림 14. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 손실(TL 컨버터)

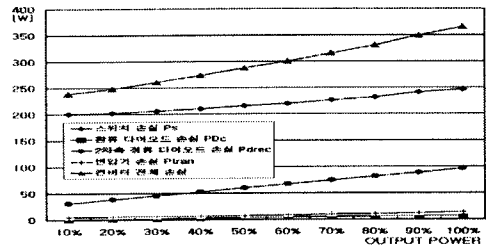


그림 15. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 손실(FB 컨버터)

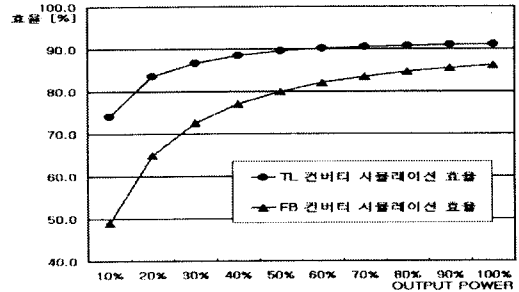


그림 16. 효율에 대한 시뮬레이션 결과 비교

3. 결 론

본 논문에서는 전력용 반도체의 전도손실 분석을 통한 Three-Level 컨버터와 Full-Bridge 컨버터의 손실모델 및 특성비교에 관하여 논하였다. 전력용 반도체의 전도손실 분석을 바탕으로 R_{ds} 와 V_D 의 변동을 분석하고, 변압기 전압 및 전류 파형으로부터 Three-Level과 Full-Bridge 컨버터의 듀티비와 각 전류를 모델링하였으며, 스위치와 다이오드에 흐르는 전류량을 바탕으로 컨버터의 주요 손실을 정의하였다. 수치해석 프로그램을 이용하여 출력 전력에 따른 각 소자 및 부품의 손실 특성을 분석하였다.

[참 고 문 헌]

- [1]J.A. Sabaté, V. Vlatkovic, R.B. Ridley, F.C. Lee and B.H. Cho, "Design considerations for High Power Full-Bridge ZVS PWM Converter", APEC 1990 Rec., pp275~284, 1990.
- [2]Qing Chen, Ashraf Lotfi and Fred C. Lee, "Design Trade-off For 5-V Output off-line Zero-Voltage-Switched PWM Converters", INTELEC'91, 13th International, pp. 616~623, 1991.
- [3]배진용, 김용, "Three Level 컨버터의 손실 분석에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol 52B, No.10, pp. 514~521, 2003.
- [4]배진용, 김용외, "Three Level 컨버터와 Full-Bridge 컨버터의 손실분석 비교에 관한 연구", 전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1069~1071, 2003.
- [5]배진용, 김용외, "2차측 결합인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 전기학회 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 포워드 컨버터에서 소프트 스위칭 기법의 손실 분석", 전력전자학회 논문지, 6권 5호, pp. 453~459, 2001.