

Three Level 컨버터의 손실 분석에 관한 연구

배진용\* , 김 용\* , 백수현\* , 윤석호\*\* , 김필수\*\*\*  
 \*동국대학교, \*\*김천대학, \*\*\*대림대학

A Study on the Loss Analysis of Three Level Converter

Jin-Yong Bae\* , Yong Kim\* , Soo-Hyun Baek\* , Suk-Ho Yoon\*\* , Pill-Soo Kim\*\*\*  
 \*Dongguk University, \*\*Kimcheon College, \*\*\*Daelim College

**Abstract** - This paper presents the loss analysis of Three Level Converter. Three Level DC/DC Converter presented in this paper used a phase shift control with a flying capacitor in the primary side to achieve ZVS for the outer switch. This converter reduces the voltage stress across the main switch to half of input voltage. 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 prototype.

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

1. 서 론

입력 전압의 승압화와 입력단 역률 개선 컨버터의 적용으로 기존의 풀브리지 컨버터는 스위칭 소자의 전압 정격 상승, 스위칭 손실의 증가 및 스위칭 주파수의 한계로 인해 고효율을 이루기 어려우며, 이러한 문제점의 해결을 위해 Three Level 컨버터에 대한 연구가 진행 중이다.[1-7] Three Level 컨버터는 1차측 회로를 Three Level 결선하고, 여기에 위상이동 스위칭 방법을 이용하여, 스위치 전압 스트레스가 저감되는 장점을 가지고있다. 본 논문에서는 고전압, 대용량 응용 분야에 적합한 Three Level 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. 본 실험에서는 IGBT를 사용하여 2.5kW 급 시작품 제작, 40kHz에서 실험하였다.

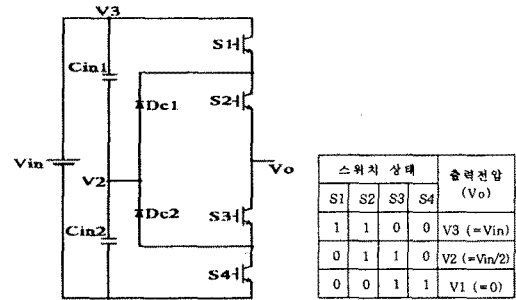


그림 1. Three Level 결선 및 스위치 상태에 따른 출력 전압

2. 본 론

2.1 Three Level 컨버터

그림 1은 Three Level 결선을 나타낸다. Three Level 결선은 4개의 스위치, 2개의 다이오드, 2개의 커패시터에 의해 구성되며, 각 스위치의 스위칭 상태에 따라 서로 다른 출력전압이 나타나게 된다.[1-3]

그림 2는 Three Level DC/DC 컨버터 회로를 나타낸다. 주 스위치의 안전한 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설인덕터가 저장하는 에너지가 스위치 커패시터와 고주파 변압기의 기생 커패시터를 충·방전할 수 있도록 설계하여야 한다. 즉 누설 인덕터에 저장된 에너지가 식(1)을 만족할 때 실제적인 ZVS 동작이 이루어진다.[1-4][8]

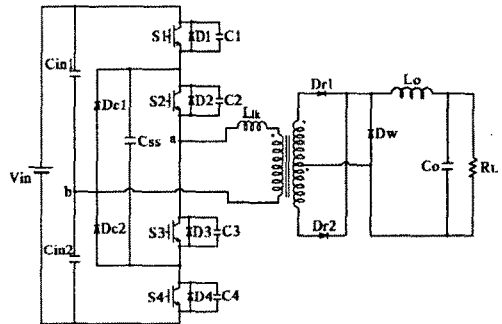


그림 2. Three Level 컨버터 회로

일반적으로 안전한 영전압 스위칭 동작 영역을 확보하기 위해 누설 인덕턴스( $L_{lk}$ )를 증가시키거나 또는 고주파 변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법이 사용된다.[4] 그러나 이러한 방법은 유효 듀티 사이클을 감소시키며, 누설인덕터에 축적된 에너지와 1차측으로 반영된 출력측 평활용 인덕터의 에너지가 환류하는 구간이 발생되어 컨버터의 도통손실이 증가하며, 고주파 변압기의 이용률이 낮아지는 단점을 지니게 된다. 또한 기존의 ZVS Three Level 컨버터는 특정 부하영역에서 ZVS 조건을 잃는다. 따라서 ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계 전류는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.[1-4][8]

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

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

그림 3은 이론적인 Three Level 컨버터의 변압기 1차측 전압 및 전류 파형을 나타낸다. [1][4][8]

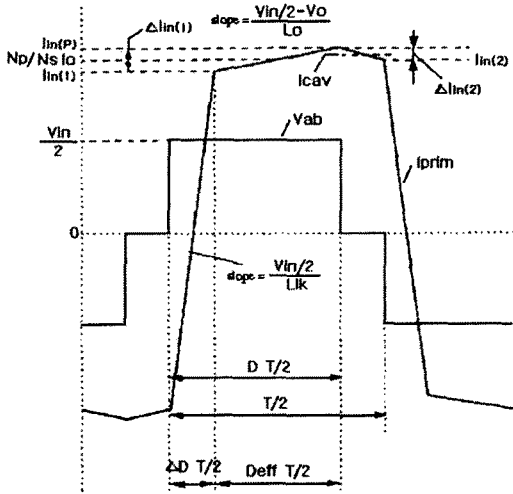


그림 3. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형 (이론치)

변압기의 1차측의  $I_{in(2)}$ 는 식(3)으로 나타낼 수 있다. [4][8]

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

여기서,  $N_P$  : 1차측 권선수  
 $N_S$  : 2차측 권선수  
 $\Delta I$  : 출력 필터의 인덕터 전류 리플  
 $D$  : 1차측 듀티비

주 스위치의 ZVS 동작 조건은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. [8]

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

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

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

Three Level 컨버터의 전압 이득은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_{in}/2} = \frac{N_S}{N_P} D_{eff} \quad (6)$$

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

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

여기서  $\Delta D$ 는 듀티비 감소분으로서 식(8),(9)로 나타낼 수 있다.

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

$$\Delta D = \frac{N_S}{N_P} \frac{2I_o - \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2}}{\frac{V_{in}/2}{L_{lk}} \frac{T}{2}} \quad (9)$$

듀티비 감소분( $\Delta D$ )을 나타낸 식(8)로부터  $I_{in(1)}$ 의 크기를 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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. [8]

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

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.

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

따라서 최대 듀티비( $D_{max}$ )는 식(15)와 같이 된다. [8]

$$\frac{N_S}{N_P} \frac{V_o}{V_{in}/2} \left\{ 1 + 4 \frac{L_{lk}f}{R'_o} \right\} \leq D_{max} \leq 1 \quad (15)$$

## 2.2 Three Level 컨버터의 손실 분석

Three Level 컨버터의 손실 분석을 위해서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 모든 소자의 온도 변화에 의한 파라메타 변동은 무시한다.
- 3) 변압기 2차측의 누설 인덕턴스는 무시한다.
- 4) 스위치와 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[8][10]

㉠ 스위치1(S<sub>1</sub>)과 스위치4(S<sub>4</sub>) 전도 손실

$$P_{s14} = R_{ds} \left\{ \left( \frac{I_{in(l)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{4D}{2} + \left[ \left( \frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{4I_{in(l)}^2}{3} \right] D_{eff} \right\} \quad (16)$$

여기서,

R<sub>ds</sub> : 스위치 온시 Drain과 Source 사이의 저항

㉡ 스위치2(S<sub>2</sub>)와 스위치3(S<sub>3</sub>) 전도 손실

$$P_{s23} = R_{ds} \left\{ \left( \frac{I_{in(l)}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{4D}{2} + \left[ \left( \frac{N_s}{N_p} I_o \right)^2 + \frac{4I_{in(l)}^2}{3} \right] D_{eff} + \left[ (I_{cav})^2 + \frac{4I_{in(2)}^2}{3} \right] (1-D) \right\} \quad (17)$$

㉢ 스위치 커패시터 손실

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

여기서, C<sub>ds</sub> : 스위치 커패시터

㉣ 스위치 내장 다이오드 손실

$$P_{sd} = V_{sd} \frac{I_{in(2)}}{2} \frac{4D}{2} \quad (19)$$

여기서, V<sub>sd</sub> : 스위치 내장 다이오드 전압강하

㉤ 스위치 온·오프 손실

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

㉥ 스위치 전체 손실

$$P_s = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} + 4 \times P_{sc} + 4 \times P_{sd} + P_{sw} \quad (21)$$

2. 환류 다이오드 손실[8][10]

㉦ 1차측 환류 다이오드 손실

$$P_{Dc1} = V_{Dc1} \left\{ \frac{N_s}{N_p} I_o (1-D) \right\} \quad (22)$$

여기서, V<sub>Dc1</sub> : 1차측 환류 다이오드 전압강하

㉧ 2차측 환류 다이오드 손실

$$P_{Dc2} = V_{Dc2} \times I_{cav2} \quad (23)$$

여기서 V<sub>Dc2</sub> : 2차측 환류 다이오드 전압강하  
I<sub>cav2</sub> : 2차측 환류 전류

㉨ 환류 다이오드 전체 손실

$$P_{Dc} = 2 \times P_{Dc1} + P_{Dc2} \quad (24)$$

3. 2차측 정류 다이오드 손실

그림 4는 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형을 나타낸다.

㉩ 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(25)로 나타낼 수 있다.

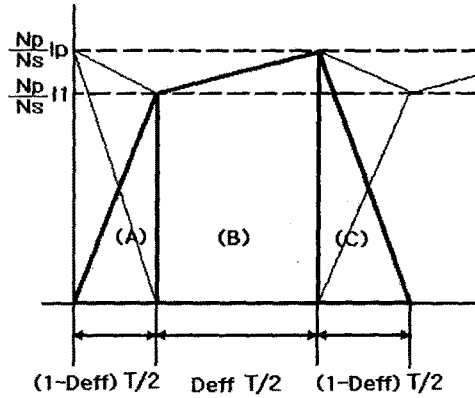


그림 4. 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형 (이론치)

$$P_{DA} = \frac{1}{2} (1-D_{eff}) \frac{N_p}{N_s} I_{in(l)} V_{Drec} \quad (25)$$

여기서, V<sub>Drec</sub> : 2차측 정류 다이오드 전압강하

(B)구간에서 생기는 손실은 식(26)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{DB} = \frac{1}{2} D_{eff} \frac{N_p}{N_s} \left( \frac{I_{in(P)} + I_{in(l)}}{2} \right) V_{Drec} \quad (26)$$

(C)구간에서 생기는 손실은 식(27)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DC} = \frac{1}{2} (1-D_{eff}) \frac{N_p}{N_s} I_{in(P)} V_{Drec} \quad (27)$$

따라서 정류 다이오드 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 손실은 식(28)로 나타낼 수 있다.

$$P_{Drec} = \frac{1}{2} \frac{N_p}{N_s} (I_{in(P)} + I_{in(l)}) \left( 1 - \frac{1}{2} D_{eff} \right) V_{Drec} \quad (28)$$

㉪ 정류 다이오드 온·오프 손실

$$P_{DW} = f \times \text{energy}(\text{Turn on} + \text{Turn off}) \quad (29)$$

㉫ 정류 다이오드 전체 손실

$$P_D = 2 \times P_{Drec} + P_{DW} \quad (30)$$

4. 변압기 손실[9]

컨버터의 변압기는 하나의 손실원으로 그 손실은 철손과 동손으로 구성된다.

㉬ 철손

코어의 철손은 식(31)의 실험식에 의해 구할 수 있다.

$$P_{FE} = \gamma \times f^a \times B_s^\beta \times \text{Core weight} \quad (31)$$

여기서, PC40의 상수로서

γ : 1.363 × 10<sup>-4</sup> (코어 계수)

α : 1.24 (주파수 계수)

B<sub>s</sub> : 포화 자속 밀도

β : 2 (자속 밀도 계수)

㉭ 동손

일반적인 변압기의 동손을 구하면 식(32)로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{DC} \quad (32)$$

여기서,  $R_{DC}$  : DC 저항

그러나 고주파 응용의 경우 권선의 실제 손실은 식(32)의 결과 보다 크게 나오는데, 이것은 표피효과, 근접효과 등에 의하여 권선의 저항이 증가하기 때문이다. 즉 고주파에서 전류는 권선의 표피로 집중되어 흐르기 때문에 권선의 유효 저항을 증가시킨다.

일반적으로 동선의 Skin depth(표피 깊이)는 식(33)으로 나타낼 수 있다.(9)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{0.066}{\sqrt{f}} \quad (33)$$

여기서,  $\mu$  : 동선의 투자율  
 $\sigma$  : 동선의 전도도

식(33)의 표피 깊이를 고려한 고주파 저항  $R_{AC}$ 는 식(34)로 나타낼 수 있다.

$$R_{AC} = R_{DC} \left( 1 + \frac{(R_o/\delta)^4}{48 + 0.8 (R_o/\delta)^4} \right) \quad (34)$$

따라서 변압기 동손은 식(35)로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{AC} \quad (35)$$

⊕ 변압기 전체 손실

$$P_{Tran} = P_{FE} + P_{CU} \quad (36)$$

## 5. 기타 손실

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

표1. 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 12 : 4. $L_{lk} = 7\mu H$
입력단 커패시터	470 $\mu F$
Flying 커패시터	100 $\mu F$
주 스위치	FMG2G50US60. FAIRCHILD
2차측 정류 다이오드	DSEI 2X61 $\times 2$ . IXYS
1차측 환류 다이오드	DSEI 2X61. IXYS
2차측 환류 다이오드	DSEI 30 $\times 2$ . IXYS
출력단 인덕터	30 $\mu H$
출력단 커패시터	10000 $\mu F$
스위칭 주파수	40 kHz
스위치 $R_{ds}$	0.17 $\Omega$
스위치 커패시터	1480 pF
포화 자속 밀도	500 mT
변압기 1차측 $R_{DC}$	0.1 $\Omega$
변압기 2차측 $R_{DC}$	0.005 $\Omega$
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

## 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 나타내고, 그림 5는 C언어에 의한 손실 계산을 위한 플로우 차트를 나타낸다.

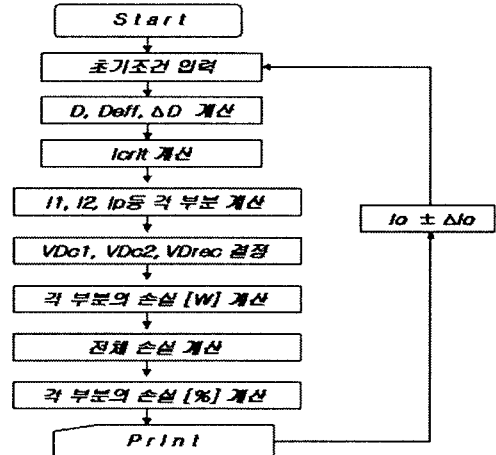


그림 5. 손실 계산을 위한 플로우 차트

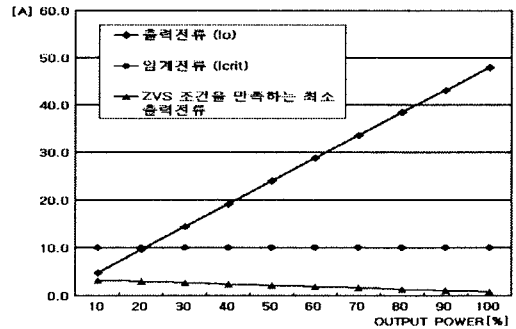


그림 6. 출력에 따른 출력 전류, 임계 전류 및 ZVS를 만족하는 최소 출력 전류

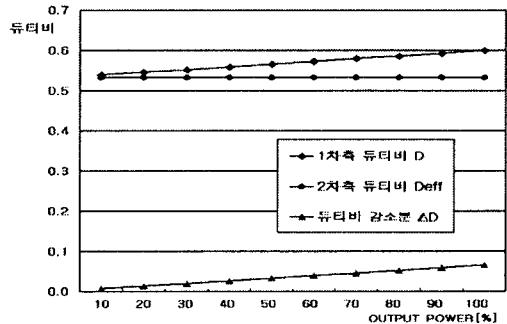


그림 7. 출력에 따른 1차, 2차 듀티비 및 듀티비 감소분

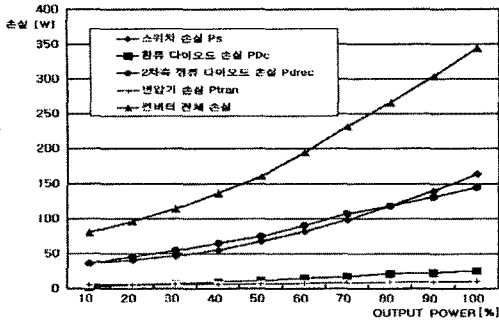


그림 8. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 손실

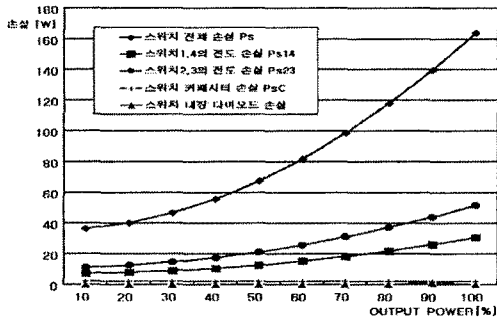


그림 9. 출력에 따른 스위치 각부의 손실

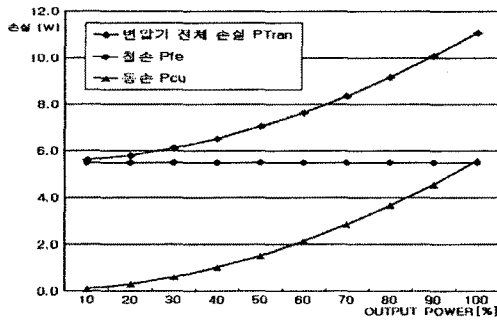


그림 10. 출력에 따른 변압기 각부의 손실

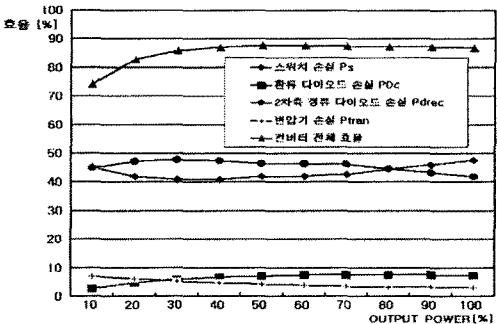


그림 11. 출력에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실

그림 6은 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 9.972A이며, 10~100% 부하시 스위치 1.4는 ZVS 조건을 만족한다.

그림 7은 출력( $P_o$ )에 따른 1차, 2차 듀티비 및 듀티비 감소분( $\Delta D$ )의 시뮬레이션 결과이다. 부하가 증가할수록 듀티비 감소분( $\Delta D$ )이 감소함을 알 수 있다.

그림 8은 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 9는 출력( $P_o$ )에 따른 스위치 각부의 손실에 대한 시뮬레이션 결과이다. 스위치 손실 중 전도 손실이 차지하는 비중이 스위치 커패시터 손실이나 스위치 내장 다이오드 손실에 비해 매우 크다. 컨버터의 출력이 증가할수록 스위치 1.4와 스위치 2.3의 전도 손실의 차가 커짐을 알 수 있으며, 스위치 사이에 전력 불균형 현상이 나타남을 알 수 있다.

이러한 스위치 사이의 상이한 손실은 컨버터의 신뢰도 저감이라는 문제점을 발생시키며, 최대 부하에서 20.88[W]의 전력 불균형이 발생하여 고온 열분포와 향상된 신뢰도를 얻을 수 없다는 문제점을 내포하고 있다.

그림 10은 출력( $P_o$ )에 따른 변압기 손실에 대한 시뮬레이션 결과이다. 변압기의 철손은 출력 전력의 변화에 무관하고, 동손은 전류의 제곱에 비례하여 손실이 발생함을 알 수 있다. 그림 11은 출력 전력( $P_o$ )에 따른 각 소자 및 부품의 백분율 손실을 나타낸다. 컨버터 전체 손실은 경부하시 낮은 효율을 나타내고, 중부하 이상에서는 완만한 효율 특성을 보이며, 스위치 손실과 2차측 정류 다이오드의 손실이 컨버터 손실에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### 2.3 실험 결과

제안된 이론의 타당성을 검증하기 위해 40kHz, 2.5kW Three Level DC/DC 컨버터를 제작하여 실험하였다.

그림 12는 전부하에서 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 전부하시 출력단 필터( $L_o$ )에서 약간의 포화 현상이 발생함을 알 수 있다.

그림 13과 14는 전부하에서 스위치 1( $S_1$ )과 스위치 3( $S_3$ )의 전압 및 전류 파형을 각각 보여주고 있다. 스위치 1( $S_1$ )보다 스위치 3( $S_3$ )에서 환류 구간에 흐르는 전류에 의해 추가적인 전도 손실이 나타남을 알 수 있으며, 따라서 스위치 사이에 전력 불균형 현상이 나타남을 알 수 있다.

그림 15는 전부하에서 2차측 정류 다이오드( $D_{rec}$ )의 전압 및 전류 파형을 나타낸다.

그림 16은 효율에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과를 비교한 것이다. 경부하시와 전부하시 시뮬레이션 효율과 실험 효율에 오차가 크게 나타내, 이는 경부하시 스위치

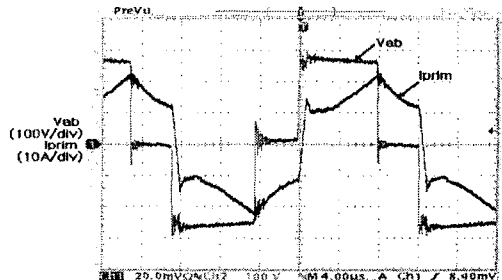


그림 12. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형

와 다이오드에서 무시한 온·오프 손실의 증대와 전부하 시의 경우 출력 인덕터의 포화 현상 때문이라 생각한다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 Three Level 컨버터의 손실 분석에 관하여 논하였다. 변압기 전압 및 전류 파형의 모델링 으로부터 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. 고입력, 대전력 시스템에 적합한 Three Level DC/DC 컨버터에서 스위치와 2차측 정류 다이오드의 전도 손실이 주된 손실로 나타나며, 특히 스위치 1,4와 스위치 2,3의 전력 불균형 현상으로 각 스위치에서의 발열에 차이가 발생하며, 또한 신뢰도 저감의 문제점을 나타내게 됨으로 앞으로 이 점을 개선하는 소프트 스위칭 방법의 연구와 해석이 필요할 것으로 생각된다.

### (참 고 문 헌)

- [1]배진용, 김용외, "2차측 보조회로를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회논문집, pp.320~323, 2001.
- [2]배진용, 김용외, "2차측 절함인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구" 전기학회 논문지, 51권 5호, pp. 258~265, 2002.
- [3]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.
- [4]F.Canales, J.M.Burdio etc, "A zero voltage switching three-level DC/DC converter", Telecommunications Energy Conference, pp.512~517, 2000.
- [5]F.Canales, P.M.Barbosa etc, "A Zero Voltage and Zero Current Switching Three Level DC/DC Converter", Proceedings of The APEC'2000, pp.314~315, Feb. 2000.
- [6]조용현, 김윤호외, "에너지 회생 스너버를 적용한 3레벨 DC/DC 컨버터", 전력전자학회 논문지, 6권 1호, pp. 64~73, 2001.
- [7]김은수, 김윤호, "렘-인덕터와 스너버-캐패시터를 적용한 3 Level 영전압·영전류 스위칭 DC/DC 컨버터", 전력전자 학회 논문지, 6권 2호, pp. 209~215, 2001.
- [8]J.A.Sabaté, V.Vlatkovic etc, "Design Guidelines for High Power Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converter," Proceeding of IEEE Applied Power Electronics Conference, 1990.
- [9]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.
- [10]김관고, "Two-transistor 포워드 컨버터에서 소프트 스위칭 기법의 손실 분석", 전력전자학회 논문지, 6권 5호, pp. 453~459, 2001.

### (기 호 설 명)

- $I_{in(1)}$  : 1차측 변압기의 첫 번째 변곡점의 전류 [A]
- $I_{in(2)}$  : 1차측 변압기의 환류 전류 끝점의 전류 [A]
- $I_{in(P)}$  : 1차측 변압기의 최대 전류 [A]
- $I_{cav}$  : 1차측 환류 전류[A]
- D : 1차측 듀티비
- $D_{eff}$  : 2차측 듀티비 (유효 듀티비)
- $\Delta D$  : 듀티비 감소분

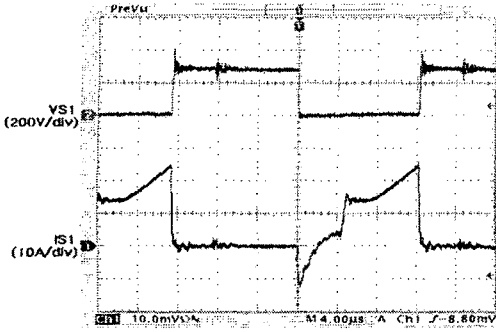


그림 13. 스위치1의 전압 및 전류 파형

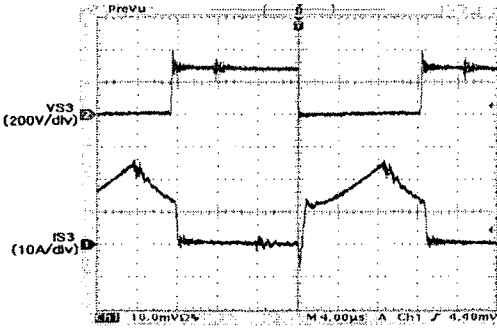


그림 14. 스위치3의 전압 및 전류 파형

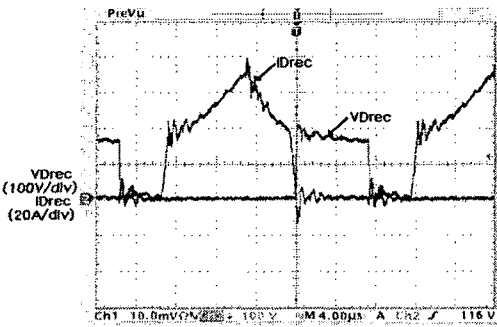


그림 15. 2차측 정류 다이오드의 전압 및 전류 파형

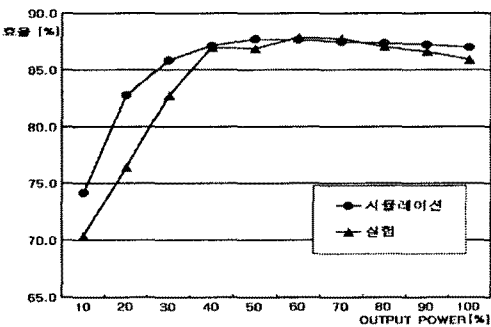


그림 16. 효율에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과 비교