

Three-Level 컨버터의 효율특성에 관한 연구

배진용^{*}, 김 용^{**}, 이은영^{***}, 계상범[§], 임태민^{||}, 백수현^{**}
^{*}특허청, ^{**}동국대학교, ^{***}대림대학, [§]메디슨, ^{||}티엠에스

Efficiency Characteristic of Three-Level Converter

Jin-Yong Bae^{*}, Yong Kim^{**}, Eun-Young Lee^{***}, Sang-Bum Gye[§], Tae-Min Eom^{||}, Soo-Hyun Baek^{**}
^{*}Korean Intellectual Property Office, ^{**}Dongguk University, ^{***}Daelim College, [§]Medison, ^{||}TMS

Abstract - This paper presents the Efficiency Characteristic of Three-Level Converter. Three-Level DC/DC Converter presented in this paper is 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 for efficiency variation. The result of the analysis are verified using 3kW prototype.

1. 서 론

현재 산업 및 가전기기의 전원공급시스템은 고주파로 전력을 제어하는 컨버터의 사용이 일반화되고 있으며, 최근 에너지 절약과 고품질 전원의 요구의 증대로 고역률·고효율 전력변환장치에 대한 관심이 집중되고 있다. 이에 따라서 다각적인 역률개선 회로와 효율향상 방안이 수많은 연구와 논문을 통해서 제시되고 있으며, 경제적이면서 고주파로 동작하며, 더욱 역률 및 효율 특성이 향상된 초고품질의 전원공급장치에 대한 요구가 증대되고 있다.⁽¹⁻¹⁰⁾

본 논문에서는 전원공급시스템의 여러 특성 중 가장 관심이 있는 효율특성에 대하여 집중적으로 논하고자 한다. 일반적으로 전원공급시스템 이용자(User) 및 설계 기술자가 가장 원하는 효율특성은 정격(Rated Power)에서 최고의 효율을 추구하는 것이다. 효율을 향상시키기 위하여 수많은 연구자에 의하여 ZVS, ZCS, ZVT 및 ZCT 등의 다양한 소프트스위칭 기법과, 공진 방식, 동기정류방식 및 액티브 클램프 방식 등에 대한 연구가 수행되었으나, 효율특성의 변화 및 주 원인에 대한 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고전압 입력 및 대전류 출력(전자기기 및 통신장비)의 전원공급장치로 각광받고 있는 Three-Level 컨버터를 대상으로 입·출력 전압 및 부하에 따라서 효율특성은 어떻게 바뀌는지 분석하고, 효율 이론에 대하여 기술하고자 한다.

본 논문의 효율 시뮬레이션은 C-언어로 수행하였고, 3kW급 시작품을 제작하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1 일반적인 전원공급시스템의 효율특성

서론에서 언급한 바와 같이 전원공급시스템 설계 기술자가 가장 원하는 효율특성은 정격(Rated Power)에서 최고의 효율을 추구하는 것이다. 이것은 부하가 요구하는 출력(Output Power)에서 최고의 효율을 나타내도록 하는 시스템 설계(최적 설계)를 하는 것이다.

그림 1은 부하의 특성에 따라서 전원공급시스템의 일반적인 효율 곡선을 나타내고 있다. 그림 1의 (a)는 고전

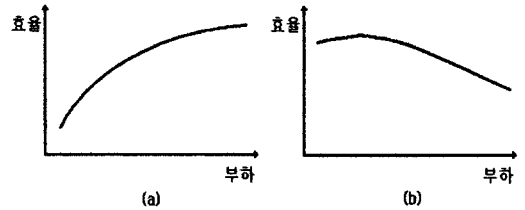


그림 1. 부하의 특성에 따른 효율곡선
 (a) 고전압/소전류 부하 (b)저전압/대전류 부하

압/소전류를 요구하는 부하에 대한 일반적인 효율 곡선이며, (b)는 저전압/대전류를 요구하는 부하에 대한 일반적인 효율 곡선을 나타낸다⁽¹⁻⁶⁾.

동일정격(Rated Power)이라는 가정하에서, 고전압/소전류를 요구하는 부하는 100% 부하(정격)에서 최고효율을 나타내지만, 저전압/대전류를 요구하는 부하는 경부하(10~50% 부하)에서 최고효율을 보이고 있다. 그림 1의 부하(a)와 (b)의 차이는 단지 저항값의 차이이며 부하(a)의 저항이 부하(b)보다 높다는 것은 손쉽게 예측할 수 있다.

그림 2는 수 kW급 대용량 컨버터에서 출력(Output Power)에 따른 효율 곡선을 나타낸다⁽¹¹⁻¹⁸⁾.

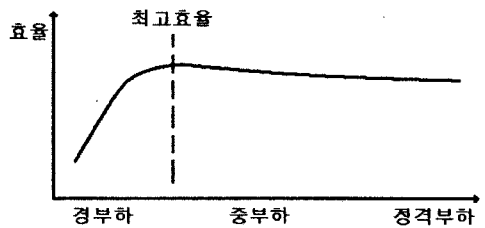


그림 2. 대용량 컨버터의 출력에 따른 효율 곡선

그림 2로부터 경부하에서 중부하까지는 일반적으로 효율이 상승하고, 경부하와 중부하 사이에서 최고 효율을 나타내며, 정격부하로 다다를수록 효율이 완만한 특성을 보이고 있다. 그렇다면, 그림 1의 고전압/소전류를 요구하는 부하(a)는 그림 2의 경부하에서 중부하까지 상태이고, 저전압/대전류를 요구하는 부하(b)는 그림 2의 중부하에서 정격부하 사이를 의미한다고 가정할 수 있을 것이다.

2.2 Three-Level 컨버터의 모델링

본 연구에서는 효율특성의 변화 및 주 원인에 대한 분석의 대상으로 고전압 입력 및 대전류 출력에 적합한 Three-Level 컨버터를 분석대상으로 하였다. 그림 3은 Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다.

안정된 주 스위치의 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설 인덕터는 스위치 커패시터와 고주파 변압기의 기생 커패시터를 충·방전할 수 있도록 설계하

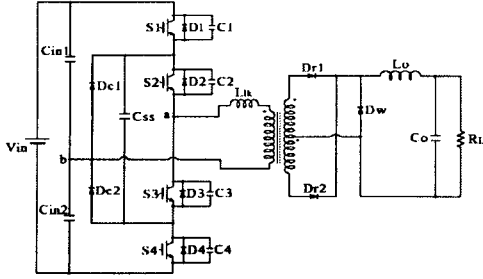


그림 3. Three-Level 컨버터 회로

여야 한다. 즉 누설 인덕터에 저장된 에너지가 식(1)을 만족할 때 실제적인 ZVS 동작이 이루어진다^[1-4].

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

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

ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계 전류는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다^[1-4].

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

그림 4는 Three-Level 컨버터의 변압기 1차측 전압 및 전류에 대한 이론적인 파형을 나타낸다^[1-2].

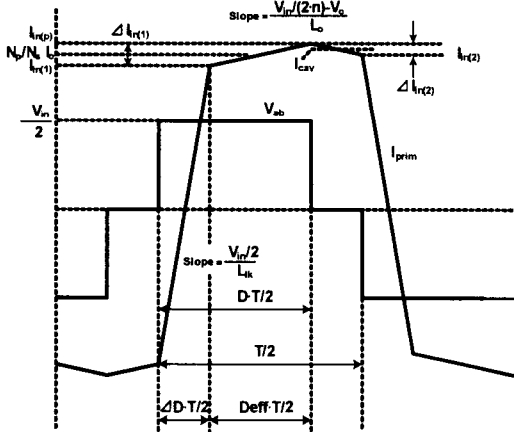


그림 4. 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형

$$I_{in(1)} = \frac{V_{in}/2}{L_{lk}} \frac{\Delta D}{2} \frac{T}{2} \quad (3)$$

$$\Delta I_{in(1)} = \frac{V_{in}/2 - V_o}{L_o} D_{eff} \frac{T}{2} \quad (4)$$

$$I_{in(P)} = I_{in(1)} + \Delta I_{in(1)} \quad (5)$$

$$I_{in(2)} = \frac{N_p}{N_s} \left\{ I_o + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2} \right\} \quad (6)$$

여기서, ΔD : 듀티비 감소분
 D_{eff} : 2차측 듀티비
 N_p : 1차측 권선수
 N_s : 2차측 권선수
 ΔI : 출력 필터의 인덕터 전류 리플
 D : 1차측 듀티비

컨버터의 각 듀티 D_{eff} , ΔD , D , D_{max} 는 식(7)~(11)로 나타낼 수 있다.

$$D_{eff} = \frac{N_p}{N_s} \frac{V_o}{V_{in}/2} \quad (7)$$

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

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

$$D = D_{eff} + \Delta D \quad (10)$$

$$D = \frac{1 + \frac{4L_{lk}f}{R'_o} - \frac{L_{lk}}{L'_o}}{\frac{1}{D_{eff}} - \frac{L_{lk}}{L'_o}} \quad (11)$$

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(11)은 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$D = D_{eff} \left\{ 1 + 4 \frac{L_{lk}f}{R'_o} \right\} \quad (12)$$

$$\frac{N_p}{N_s} \frac{V_o}{V_{in}/2} \left\{ 1 + 4 \frac{L_{lk}f}{R'_o} \right\} \leq D_{max} \leq 1 \quad (13)$$

여기서, D_{max} : 최대 듀티비
 주 스위치의 ZVS 동작을 위한 출력 전류는 식(14), (15)의 조건을 만족하여야 한다.

$$I_{in(2)} > i_{crit} \quad (14)$$

$$I_o > \frac{N_p}{N_s} I_{crit} - \frac{\Delta I}{2} + \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2} \quad (15)$$

2.3 손실분석을 통한 효율특성 분석

본 논문에서는 효율특성의 변화 및 주 원인에 대한 분석을 위하여 손실분석을 수행하였다. 2.2절의 각 듀티와 전류 식을 바탕으로 Appendix 1~3의 계산방법에 의하여 손실분석 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5는 입력 450[V] 출력 40[V] Three-Level 컨버터에서 출력전력에 따른 각 소자 및 부품의 손실을 나타낸다.

주된 손실을 스위치와 정류 다이오드 손실임을 알 수 있다. 스위치와 정류 다이오드가 효율특성의 변화에 크게 영향을 미치는 점을 고려하여 본 절에서는 스위치와 정류 다이오드 손실에 대하여 집중적으로 고찰하였다.

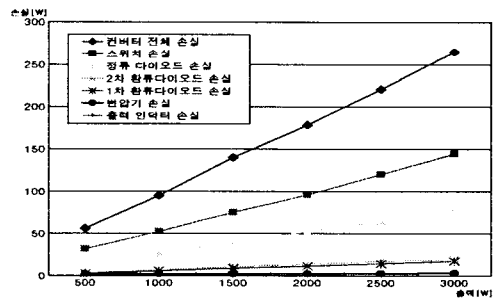
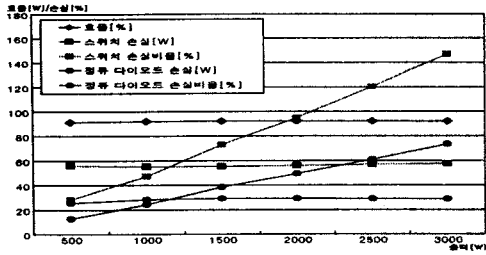


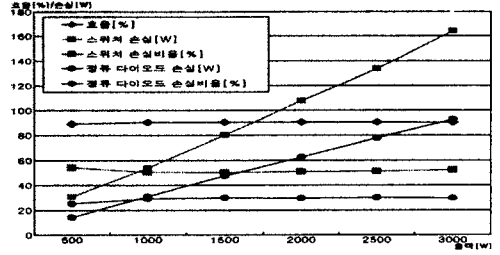
그림 5. 출력전력에 따른 각 소자 및 부품의 손실 (입력 450V, 출력 40V)

그림 6, 7은 입력전압의 변화에 따라서 또는 출력전압의 변화에 따라서 주요 손실분석을 나타낸 것이다.

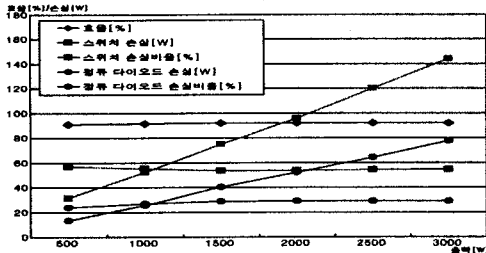
그림 6과 7의 (a)~(c)는 동일한 Three-Level 컨버터의 입력과 출력에 따라서 스위치와 정류 다이오드의 손실 및 손실비율을 나타낸 것이다.



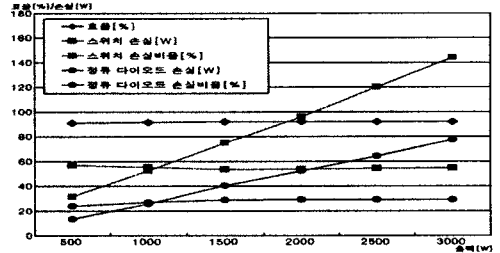
(a) 입력 400V, 출력 40V



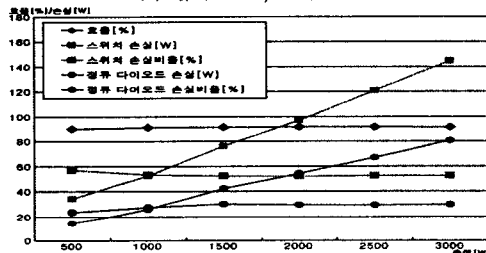
(a) 입력 450V, 출력 35V



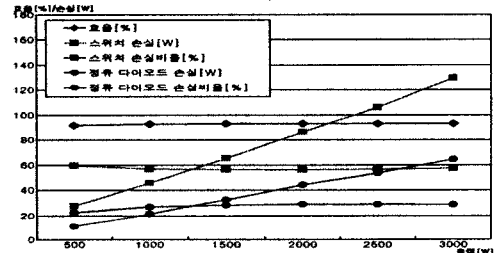
(b) 입력 450V, 출력 40V



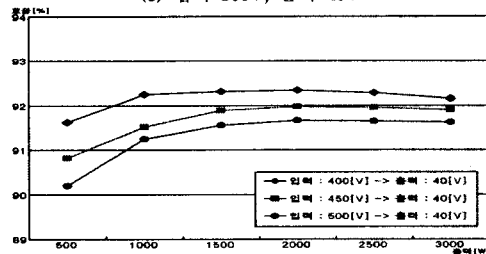
(b) 입력 450V, 출력 40V



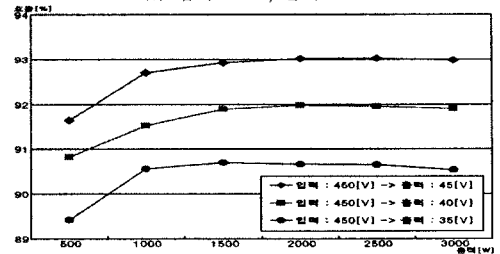
(c) 입력 500V, 출력 40V



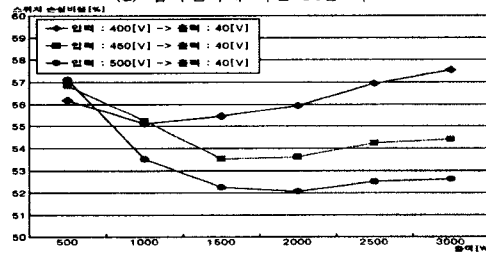
(c) 입력 450V, 출력 45V



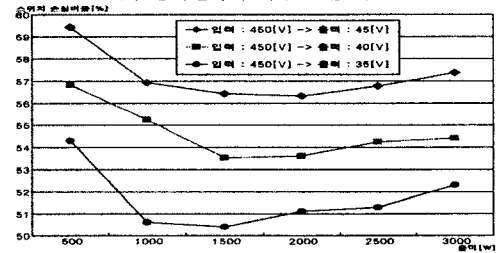
(d) 입력변화에 따른 효율 비교



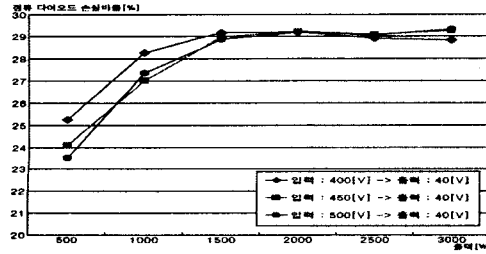
(d) 출력변화에 따른 효율 비교



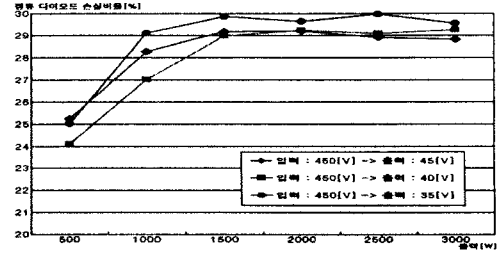
(e) 입력변화에 따른 스위치 손실비율 비교



(e) 출력변화에 따른 스위치 손실비율 비교



(f) 입력변화에 따른 정류 다이오드 손실비율 비교
그림 6. 입력변화에 따른 주요 손실분석



(f) 출력변화에 따른 정류 다이오드 손실비율 비교
그림 7. 출력변화에 따른 주요 손실분석

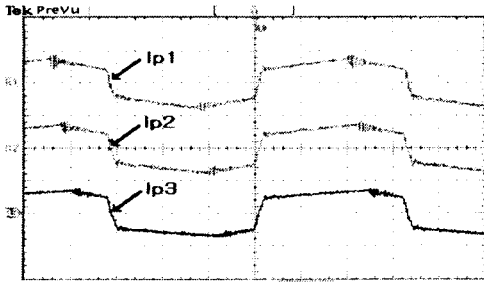


그림 8. 변압기 전류 파형(40A/div,4us/div)
 Ip1 : 입력전압 500[V] → 출력전압 40[V]
 Ip2 : 입력전압 450[V] → 출력전압 40[V]
 Ip3 : 입력전압 400[V] → 출력전압 40[V]

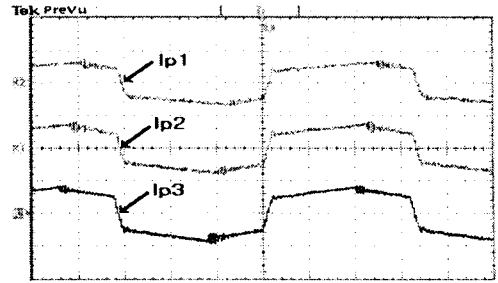


그림 9. 변압기 전류 파형(40A/div,4us/div)
 Ip1 : 입력전압 450[V] → 출력전압 45[V]
 Ip2 : 입력전압 450[V] → 출력전압 40[V]
 Ip3 : 입력전압 450[V] → 출력전압 35[V]

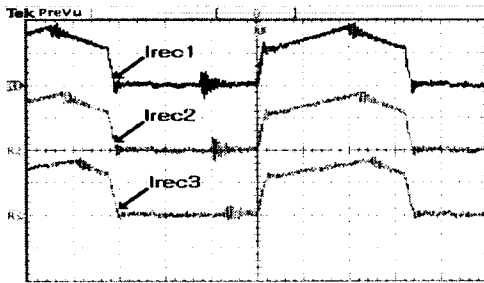


그림 10. 정류 다이오드 전류 파형(50A/div,4us/div)
 Irec1 : 입력전압 500[V] → 출력전압 40[V]
 Irec2 : 입력전압 450[V] → 출력전압 40[V]
 Irec3 : 입력전압 400[V] → 출력전압 40[V]

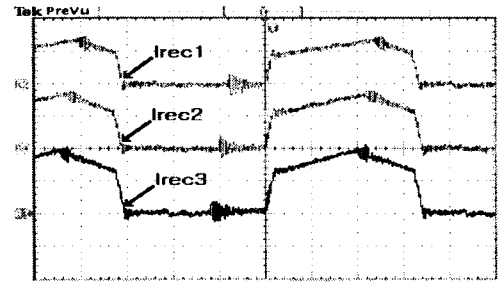


그림 11. 정류 다이오드 전류 파형(50A/div,4us/div)
 Irec1 : 입력전압 450[V] → 출력전압 45[V]
 Irec2 : 입력전압 450[V] → 출력전압 40[V]
 Irec3 : 입력전압 450[V] → 출력전압 35[V]

그림 6과 7의 (a)~(c)에 효율, 스위치 손실비를 및 정류 다이오드 손실비율을 자세히 살펴보면 (d)~(f)와 같이 나타낼 수 있다.

Three-Level 컨버터의 손실분석을 통하여 효율을 대략적으로 89[%]에서 93[%]로 분포함을 알 수 있다.

그림 6의 (a)~(f)는 입력을 100[V]씩 변화시켰을 때 주요 손실분석을 나타내는데, 그림 6의 (d)로부터 40[V]의 출력에서 입력이 가장 낮을 때(입력 400[V]) 효율이 가장 높게 나타난다.

또한 그림 7의 (a)~(f)는 출력을 5[V]씩 변화시켰을 때 주요 손실분석을 나타내는데, 그림 7의 (d)로부터 450[V]의 입력에서 출력이 가장 높을 때(출력 45[V]) 효율이 가장 높게 나타난다.

이것은 강압형 방식의 컨버터에서 입력이 낮을수록 또한 출력이 높을수록 효율이 높아지는 특성을 보이며, 입력과 출력의 차이가 적을수록 효율은 증가하는 특성을 보인다.

또한, 그림 6과 7의 (d)로부터 입력전압의 변화보다 출력전압의 변화가 시스템 효율에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

그림 6과 7의 (e)~(f)이러한 효율 변화의 근본적 원인이 스위치에 있음을 예측할 수 있는 근거이다.

정류 다이오드의 손실비율인 그림 6과 7의 (f)와 스위치의 손실비율인 그림 6과 7의 (e)로부터 정류 다이오드 손실비율은 최대 2[%] 이내에서 거의 유사한 비율로 나타남을 알 수 있었다.

그러나 이와 반대로 스위치 손실비율은 나타내는 그림 6과 7의 (f)로부터 스위치 손실은 최대 6[%] 차이가 발생함을 보이며 곡선의 차이도 상당함을 알 수 있다.

따라서 스위치 손실이 시스템 효율에 미치는 영향이 좀 더 지배적이라는 것을 예측할 수 있다.

또한, 효율의 변화에 대하여 그림 2에서 보인 것과 같이 경부하시 감소하다가 최고점을 보이고, 그 이후에 점차 감소하는 특성이 모든 효율결과에서 나타나고 있다.

무엇보다 그림 7의 (f)로부터 출력전압이 높은 경우(출

력 45[V])의 효율에 비하여 출력전압이 낮은 경우(출력 35[V])에서 효율이 2[%]이상 낮음을 알 수 있다.

이러한 이유는 동일 정격에서 출력 전압이 낮으면 상대적으로 출력 전류가 높아지고, 전력손실이 증가하기 때문이다. 따라서 최근 저전압·대전류를 요구하는 부하가 급증하는데, 효율을 높이는데 매우 장애가 됨을 예측할 수 있다.

또한 그림 7의 (f)로부터 출력전압에 따라서 최대효율이 나타나는 위치가 서로 차이가 남을 알 수 있다.

출력이 가장 높은(출력 45[V])에서 최대효율은 2[kW]에서 보이지만 출력이 가장 낮은(출력 35[V])에서 최대효율은 1.5[kW]에서 나타나며, 정격인 출력 3[kW]에서는 효율이 상당히 감소 된다는 것을 알 수 있다.

그림 6의 (f)를 살펴보면 입력이 변화하여도 최대효율이 나타나는 지점(출력 2[kW])이 영향을 받지 않으나, 그림 7의 (f)로부터 출력이 변화하면 최대효율이 나타나는 지점이 서로 달라지며, 저전압 출력(출력 35[V])에서는 최대효율이 나타나는 지점(출력 1.5[kW])이고 고전압 출력(출력 45[V])에서 최대 효율이 나타나는 지점(출력 2[kW])은 변동됨을 알 수 있다.

즉, 정격에서 최고 효율을 나타내는 시스템을 설계하기 위하여 고전압 출력이 더욱 유리함을 알 수 있다.

이러한 효율에 영향을 미치는 주된 원인은 스위치의 손실임을 그림 6과 7의 (e)로부터 알 수 있다. 무엇보다 스위치의 손실이 증가하면, 컨버터 전체의 효율은 감소하는 경향을 보인다.

특히, 경부하시 효율이 감소하는 원인은 Appendix 2의 그림 A.2의 스위치의 온저항이 경부하시 급증하는 것과 매우 깊은 관계가 있는 것으로 보인다.

무엇보다 다양한 소프트 스위칭 방식을 통하여 스위치 손실을 저감하는 것은 컨버터 효율에 직접적인 영향을 주게 된다는 것을 예측할 수 있다.

그림 6과 7의 (e)로부터 스위치 손실이 가장 낮을 때 효율은 최대를 나타내고, 스위치 손실비율이 가장 높을 때 효율은 최저 효율을 보임을 알 수 있다.

그림 6과 7로부터 컨버터의 효율은 스위치 손실비율과 매우 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있으며, 또한 출력 전압의 변화가 최고 효율을 나타내는 지점에 영향을 미치는 것 과 입·출력의 전압 비율이 작을수록 컨버터의 효율이 증가함을 알 수 있었다.

그림 8, 9는 정격(출력 3[kW])에서 입력전압과 출력전압의 변화에 따른 변압기 전류 파형을 나타낸다. 그림 8과 9로부터 입력전압이 감소하면 컨버터의 듀티비는 증가함을 알 수 있으며, 출력전압이 증가하면 컨버터의 듀티비는 감소된다.

무엇보다 동일정격에서 변압기의 최대전류는 입력전압과 출력전압의 변화와 상관없이 거의 일정함을 알 수 있으며, 듀티비가 높을수록 효율이 증가함을 예측할 수 있다.

따라서 컨버터의 최적설계를 위하여 제어가 가능한 최대 범위의 듀티에서 정격부하를 공급하도록 컨버터의 변압기 권선비를 설계하는 것이 효율을 최고로 유지하는 가장 좋은 방법이라고 할 수 있을 것이다.

그림 10, 11은 정격(출력 3[kW])에서 입력전압과 출력전압의 변화에 따른 정류 다이오드의 전류 파형을 나타내며, 변압기의 듀티변화와 동일하게 듀티가 변화됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 고전압 입력 및 대전류 출력에 적합한 Three-Level 컨버터를 대상으로 효율특성에 대하여 분석하였다. 그러나 이러한 분석을 통하여 산업과 가정용 전자기기의 전원공급장치로 가장 많이 사용되는 DC/DC 컨버터 시스템의 효율 특성에 대하여 유추할 수 있으리라 생각된다.

본 논문을 통하여 동일정격(Rated Power)에서 컨버터의 효율특성(효율이론)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- ◆ 컨버터의 효율은 입력전압, 출력전압 및 부하에 따라 영향을 받는다.
- ◆ 컨버터의 효율은 입력전압이 감소할수록 증가한다.
- ◆ 컨버터의 효율은 출력전압이 증가할수록 증가한다.
- ◆ 컨버터의 효율은 입·출력 전압의 차가 작을수록 증가한다.
- ◆ 컨버터의 최대효율 지점(Point)은 입력전압의 변화와는 관계없다.
- ◆ 컨버터의 최대효율 지점(Point)은 출력전압과 부하변화에 관계가 있으며, 출력전압이 감소하면, 경부하쪽으로 최대효율 지점이 변화하고, 출력전압이 증가하면, 전부하쪽으로 최대효율 지점이 변화된다. 즉, 저전압 출력이 고전압 출력에 비하여 효율이 감소된다.
- ◆ 컨버터의 효율특성은 스위치 손실비율과 가장 밀접한 관계가 있다.
- ◆ 스위치 손실 비율이 가장 낮을 때 컨버터의 효율을 최대를 나타낸다. 즉, 스위치 손실은 컨버터 효율에 가장 핵심적인 열쇠(Key)라 할 수 있다.
- ◆ 강압형 방식(Buck Type, 현재 우리가 사용하는 컨버터 시스템은 대부분 강압형임)의 경우 입력전압의 변동에 비하여 출력전압의 변동이 효율변화에 더욱 크게 영향을 미친다.
- ◆ 스위치 제어 듀티가 증가할 수록 컨버터의 효율은 증가한다.
- ◆ 컨버터의 최적설계는 제어가 가능한 최대 범위의 듀티에서 정격부하를 공급하도록 설계하는 것이다.

A.1. 손실계산을 위한 플로우 차트^[1-2]

Appendix에서는 컨버터의 손실계산을 위한 기법을 추 가적으로 기술하고자 한다.

Appendix 1에서는 Three-Level 컨버터의 손실계산을 위한 C-언어 플로우 차트를 나타낸다. 입·출력과 회로의 각 파라미터를 입력하여 프로그램을 시작하면, 먼저 식(7)~(11)에 의해 컨버터의 각 듀티(duty)를 계산하고, 이후 식(2)~(5)의 각 부분의 전류를 계산한다. 이를 바탕으로 Appendix 2에 의해 스위치의 온저항(R_{sw})와 각 다이오드의 전압강하(V_D)를 결정하고, Appendix 3에 의하여 각 부분의 손실과 전체손실을 계산하고 이를 전체 손실에서 차지하는 손실비율(손실[%])로 환산한 다음 출력한다. 출력전압 및 전류를 변경하여 손실분석을 수행하였다.

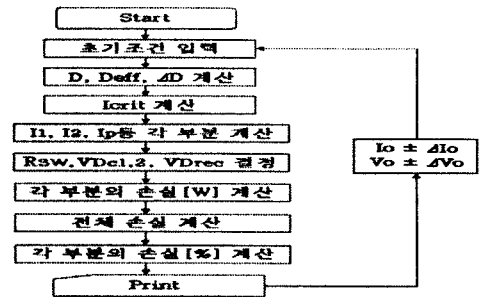


그림 A.1. 손실 계산을 위한 플로우 차트

A.2. 전력용 반도체의 전도손실 분석^[2]

본 논문에서는 컨버터의 손실분석을 더욱 정확하게 하기 위하여 전력용 반도체의 전류 변화에 따른 R_{sw} 와 V_D 의 변화를 실측하여 전력 변환장치의 손실분석에 적용하였다. 일반적으로 전력용 반도체의 전도손실은 온도에 영향을 받으나 본 논문에서는 온도 특성은 고려하지 않았으며, 전류량에 따른 R_{sw} 와 V_D 를 바탕으로 전도손실 모델은 식(A.1), (A.2)와 같이 나타내며, 이를 손실분석에 사용하였다.

$$P_s = R_{sw} \times I_s^2 \quad (A.1)$$

$$P_D = V_D \times I_D \quad (A.2)$$

여기서, R_{sw} : 스위치 온시 온저항

I_s : 스위치 실효 전류

V_D : 다이오드 전압 강하

I_D : 다이오드 실효 전류

그림 A.2는 주 스위치의 전류 변화에 대한 온저항(R_{sw})변화를 나타내며, 스위치 전류가 증가하면 R_{sw} 가 급격히 감소하고, 정격부하에서 가장 R_{sw} 가 작으며, 스위치 전류가 작으면 R_{sw} 가 매우 증가함을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성은 경부하에서 스위치 손실이 증가하며, 따라서 컨버터의 전체손실이 저감됨을 예측할 수 있다.

그림 A.3은 주 스위치 내장 다이오드 전류 변화에 대한 전압강하(V_{SD})변화를 나타낸다. Three-Level 컨버터에서 내장 다이오드에 전류가 흐르는 경우는 듀티비 감소분(ΔD) 시간에 흐르는 전류로서 매우 작다. Full-Bridge 컨버터의 경우, 환류구간에서 순환전류가 Full-Bridge 주 스위치의 내장 다이오드를 통해서 흐르므로, 스위치 온시는 스위치 온저항(R_{sw})에 의한 전도손실이 발생하고 스위치 오프시는 스위치 내장 다이오드의 전압강하(V_{SD})에 의해 손실이 발생하므로 스위치에 열손실이 집중되는 경향을 보이나, Three-Level 컨버터에서는 이러한 문제점이 해결되는 장점이 있다.

그림 8은 정류 다이오드의 전류 변화에 대한 전압강하(V_{Drec})변화를 나타낸다. 정류 다이오드의 전압강하(V_{Drec})는 정류 다이오드의 전류가 증가할수록 특정전압에서 점차 포화되는 특성을 보인다.

본 연구에서는 1, 2차 환류 다이오드도 전압강하를 분석하고 그 특성을 손실분석에 사용하였다.

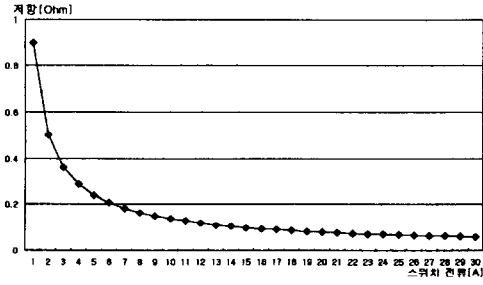


그림 A.2. 주 스위치의 온저항(R_{sw})변화

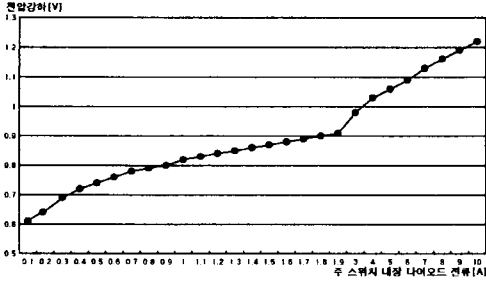


그림 A.3. 주 스위치 내장 다이오드 전압강하(V_{SD})변화

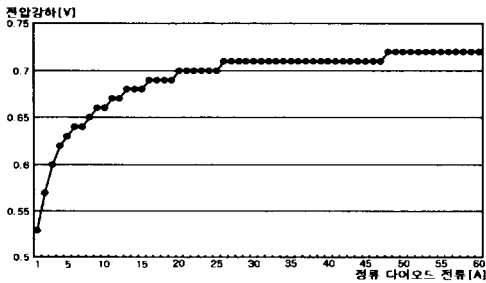


그림 A.4. 정류 다이오드 전압강하(V_{Drec})변화

A.3 컨버터의 손실 분석^[1-2]

컨버터의 손실 분석을 위해서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자의 온도 변화에 의한 파라메타 변동은 무시한다.
- 2) 변압기 2차측의 누설 인덕턴스는 무시한다.
- 3) 스위치와 다이오드의 온·오프 손실은 무시한다.
- 4) 커패시터와 인덕터의 ESR(Equivalent Series Resistance) 및 ESL (Equivalent Series Inductance)은 무시한다.
- 5) 변압기와 인덕터의 포화는 무시한다.

가. 주 스위치 손실

- 1) 스위치1(S₁)과 스위치4(S₄) 전도 손실

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

여기서,

R_{sw} : 스위치 온저항

- 2) 스위치2(S₂)와 스위치3(S₃) 전도 손실

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

여기서, I_{cav}는 1차측 환류 전류

- 3) 스위치 커패시터 손실

$$P_{sc} = \frac{1}{2} C_{sw} \left(\frac{V_{in}}{2} \right)^2 f \quad (A.5)$$

여기서, C_{sw} : 스위치 커패시터

- 4) 스위치 내장 다이오드 손실

$$P_{sd} = V_{sd} \frac{I_{in(2)}}{2} \frac{\Delta D}{2} \quad (A.6)$$

여기서, V_{sd} : 스위치 내장 다이오드 전압강하

- 5) 스위치 온·오프 손실

$$P_{sw} = f \times \text{energy}(\text{Turn on} + \text{Turn off}) \quad (A.7)$$

- 6) 스위치 전체 손실

$$P_s = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} + 4 \times P_{sc} + 4 \times P_{sd} + P_{sw} \quad (A.8)$$

나. 환류 다이오드 손실

- 1) 1차측 환류 다이오드 손실

$$P_{DC1} = V_{DC1} \left\{ \frac{N_s}{N_p} I_o (1-D) \right\} \quad (A.9)$$

여기서, V_{DC1} : 1차측 환류 다이오드 전압강하

- 2) 2차측 환류 다이오드 손실

$$P_{DC2} = V_{DC2} I_o (1-D) \quad (A.10)$$

여기서 V_{DC2} : 2차측 환류 다이오드 전압강하

I_{cav2} : 2차측 환류 전류

- 3) 환류 다이오드 전체 손실

$$P_{DC} = 2 \times P_{DC1} + P_{DC2} \quad (A.11)$$

다. 2차측 정류 다이오드 손실

그림 A.5는 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형을 나타낸다.

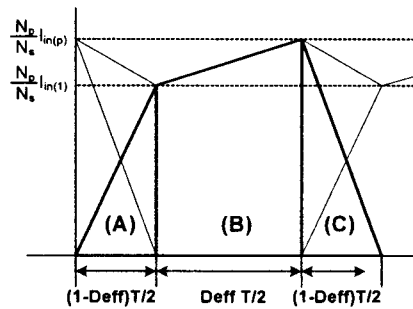


그림 A.5. 이론적인 정류 다이오드와 출력 인덕터의 전류 파형

- 1) 정류 다이오드 전도 손실

정류 다이오드의 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 전도 손실을 구하기 위해서 다이오드의 구간별 손실을 구한다. 그림 A.5에서 구간(A)에서 생기는 손실은 식(A.12)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DA} = \frac{1}{2} (1-D_{eff}) \frac{N_p}{N_s} I_{in(1)} V_{Drec} \quad (A.12)$$

여기서, V_{Drec} : 2차측 정류 다이오드 전압강하

구간(B)에서 생기는 손실은 식(A.13)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{DB} = \frac{1}{2} D_{eff} \frac{N_p}{N_s} \left(\frac{I_{in(P)} + I_{in(L)}}{2} \right) V_{Drec} \quad (A.13)$$

구간(C)에서 생기는 손실은 식(A.14)로 나타낼 수 있다.

$$P_{DC} = \frac{1}{2} (1 - D_{eff}) \frac{N_p}{N_s} I_{in(P)} V_{Drec} \quad (A.14)$$

따라서 정류 다이오드 순방향 전압 강하에 의해서 생기는 손실은 식(A.15)로 나타낼 수 있다.

$$P_{Drec} = \frac{1}{2} \frac{N_p}{N_s} (I_{in(P)} + I_{in(L)}) \left(1 - \frac{1}{2} D_{eff} \right) V_{Drec} \quad (A.15)$$

2) 정류 다이오드 온·오프 손실

$$P_{DW} = f \times \text{energy}(\text{Turn on} + \text{Turn off}) \quad (A.16)$$

3) 정류 다이오드 전체 손실

$$P_D = 2 \times P_{Drec} + P_{DW} \quad (A.17)$$

라. 변압기 손실^[9-10]

1) 철손(Core Loss)

코아의 철손은 식(A.18)의 실험식에 의해 구할 수 있다.

$$P_{FE} = \gamma \times f^\alpha \times B_s^\beta \times \text{Core weight} \quad (A.18)$$

여기서, PC40의 상수로서

γ : 1.363×10⁻⁴ (코아 계수)

α : 1.24 (주파수 계수)

B_s : 포화 자속 밀도

β : 2 (자속 밀도 계수)

2) 동손(Copper Loss)

일반적인 변압기의 동손을 구하면 식(A.19)로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU-DC} = I_{rms}^2 R_{DC} \quad (A.19)$$

여기서, R_{DC} : DC 저항

일반적으로 동손의 표피 깊이(Skin depth)는 식(A.20)으로 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{0.066}{\sqrt{f}} \quad (A.20)$$

여기서, μ : 동손의 투자율

σ : 동손의 전도도

표피 깊이를 고려한 고주파 저항 R_{AC} 는 식(A.21)로 나타낼 수 있다.

$$R_{AC} = R_{DC} \left\{ 1 + \frac{(R_o/\delta)^4}{48 + 0.8 (R_o/\delta)^4} \right\} \quad (A.21)$$

따라서 변압기 동손은 식(A.22)로 나타낼 수 있다.

$$P_{CU-AC} = I_{rms}^2 R_{AC} \quad (A.22)$$

3) 변압기 전체 손실

$$P_{Tm} = P_{FE} + P_{CU-AC} \quad (A.23)$$

마. 기타 손실

기타 손실은 스너버에서 발생하는 손실 및 입·출력 커패시터의 기생 손실과 입·출력 필터에서 발생하는 손실 등이 있으나 이것들은 매우 작으므로 무시하였다.

[참고 문헌]

- [1]배진용, 김용, "Three Level 컨버터의 손실 분석에 관한 연구," 대한전기학회논문지, Vol 52B, No.10, pp. 514~521, 2003.
- [2]Jin-Yong Bae, Yong Kim, Dong-Hyun Lee, Soon-Do Kwon, Pill-Soo Kim, and Dae-Hee Han, "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," Proceeding of The IECON'2004, Nov. 2004.
- [3]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., pp.275~284, 1990.
- [4]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.
- [5]배진용, 김용, 백수현, 김필수, 권순도, "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 Soo-Hyun Baek, and Eun-Young Lee, "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, and F.C.Lee, "A zero voltage switching three-level DC/DC converter," Telecommu nications Energy Conference, pp.512~517, 2000.
- [8]김만고, "Two-transistor 포워드 컨버터에서 소프트 스위칭 기법의 손실 분석," 전력전자학회 논문지, 6권 5호, pp. 453~459, 2001.
- [9]Sanjaya Maniktala, "Switching Power Supply Design & Optimization," McGRAW-HILL, pp. 269~271, 2004
- [10]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.