

Buck and Half Bridge Series DC- DC Converter

金 昌 宣^{*}
(Chang-Sun Kim)

Abstract - We considered of the buck and half bridge series DC-DC converter. It has good applications in areas with low voltage/high current, wide input voltage. The buck converter ratings and the half bridge converter ratings are 36~72V input and 22V/5A output, 19~24V input and 3.3V/30A output, respectively. Developed the buck and half Bridge series DC-DC converter ratings are of 36~72V input and 3.3V/30A output. The buck converter is operated with zero voltage switching process to reduce the switching losses. The 80.1%~97.6% of the efficiency is measured at 18.4μH output filter inductance of buck converter. In the half bridge converter, the 86%~96.4% efficiency is measured at 150kHz switching frequency with PQI core. In the case of synchronized the buck and half bridge DC-DC converter, the measured efficiency is higher than that of the unsynchronized converter. In the synchronized converter, the maximum efficiency is measured up to 92.3% with PQI core at 150kHz, 7A output.

Key word : Low Output Voltage, High Output Current, Wide Input Voltage Applications, Zero Voltage Switching, Buck And Half Bridge Series DC-DC Converter

1. 서 론

현재 집적 회로기술은 급속하게 발달해 가고 있다. 요구되는 전원 전압으로는 5V, 3.3V, 1.5V, 1.2V, 0.8V 등으로 감소하고 있고 소비 전력은 점점 더 증가하고 있다. 따라서 집적 회로용 전원 장치는 저전압 출력과 대전류 출력에 적합해야 한다. 저전압 출력과 대전류 출력에 적합한 회로는 현재 많이 제안되어져 왔다. 그러나 이 컨버터들은 전달함수가 매우 복잡하고, 동적응답, 효율, 컨버터의 사이즈를 고려하여 최적 설계를 해야 한다는 어려움이 있다. 이미 제안된 컨버터 형태로 두-스테이지 형태의 컨버터가 있으며 제어부분과 절연부분으로 구성되어져 있다. 제어부분으로 비절연형인 강압형 컨버터(Buck converter), 승압형 컨버터(Boost converter), 강압승압형 컨버터(Buck-Boost converter)등이 사용되고 절연부분으로는 절연형 컨버터인 포워드 컨버터(Forward converter), 하프 브리지 컨버터(Half Bridge converter), 풀 브리지 컨버터(Full Bridge converter), 푸시 풀 컨버터(Push-pull converter)등이 사용된다. 그리고 절연형 컨버터의 2차 측 정류 방식으로는 효율을 높이기 위해 저전압 출력에 사용되는 동기 정류 방식(Synchronous Rectification)을 사용한다.[1]-[5]

본 연구에서는 여러 가지 종류의 두 개의 스테이지 컨버터 중 하나인 강압형과 하프 브리지 직렬형 컨버터(Buck and Half Bridge series converter)의 특성에 대해 고찰하고자 한

다. 컨버터의 사양은 입력 전압 36~72V, 출력 전압은 3.3V, 출력 전류는 30A이고 스위칭 주파수가 150kHz이다. 강압형 컨버터는 Quasi-Square-Wave 형태의 영전압 스위칭(Zero-voltage Switching) 동작을 하고 하프 브리지 컨버터의 2차 측 정류 방식은 효율을 높이기 위해 자가운전 동기정류 방식(Self-driven synchronous rectification)을 사용하여 설계하였다. 또한 강압형 컨버터와 하프 브리지 컨버터의 제어 회로를 따로 분류하여 동기 시켰을 때와 동기 시키지 않았을 때의 특성을 비교 분석하였다.

2. 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터

강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터는 넓은 입력 범위를 갖는 저전압 출력과 대전류 출력에 매우 적합한 회로이다. 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터는 그림 1과 같이 강압형 컨버터와 하프 브리지 컨버터로 구성되고 강압형 컨버터의 출력전압이면서 하프 브리지 컨버터의 입력전압인 V_{BUS} 전압은 일정하게 유지한다. 기본적으로 하프 브리지 컨버터는 시비율이 50%로 일정하며 강압형 컨버터는 출력 전압을 제어한다. 따라서 백 컨버터는 선행 레귤레이터(pre-regulator)로 사용되며 하프 브리지 컨버터는 절연시키기 위한 변압기 역할을 한다. 시비율이 50%인 하프 브리지 컨버터는 누설 인덕턴스와 데드타임이 존재하며 2차 측 정류 회로는 동기 정류 방식을 적용한다. 이는 매우 작은 출력 필터 인덕터를 요구하고 동기 정류기의 동작을 최적화 시킬 수 있다. 동기 정류기는 환류 다이오드의 전압강하로 인한 손실을 없애기 위해 전력용 MOSFET을 사용하고 스위칭 손실을 줄이기 위해 영전압 스위칭 동작을 하도록 백 컨버터의 인덕

* 교신저자, 正會員 : 木浦大學 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail : cskim@mokpo.ac.kr

接受日字 : 2005年 8月 29日

最終完了 : 2005年 10月 11日

터 값을 설계한다. 이와 같이 동기 강압형 컨버터는 경부하 일 때도 불연속 모드(discontinuous mode)로 들어가지 않기 때문에 부하에 따른 전달함수는 같다. 따라서 강압형과 하프 브리지 직렬형 컨버터의 정상상태에서의 입출력 전압비는 다음과 같다.

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot d}{2 \cdot n} \quad (1)$$

여기서

V_{out} : 출력전압, V_{in} : 입력전압,
 d : 시비율, $n=N_s/N_p$: 권선비

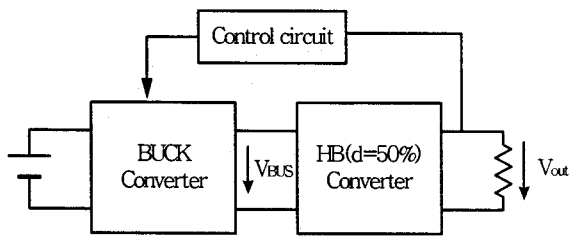


그림 1 컨버터의 블럭도
 Fig. 1 Converter block diagram

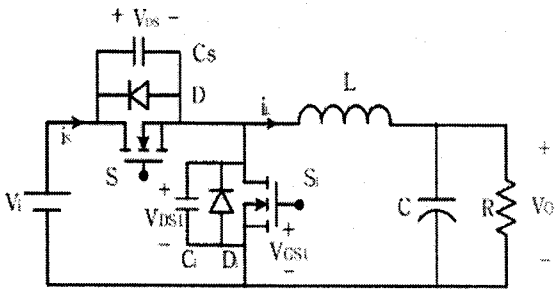


그림 2 영전압 스위칭 강압형 컨버터
 Fig. 2 Buck ZVS QSW converter

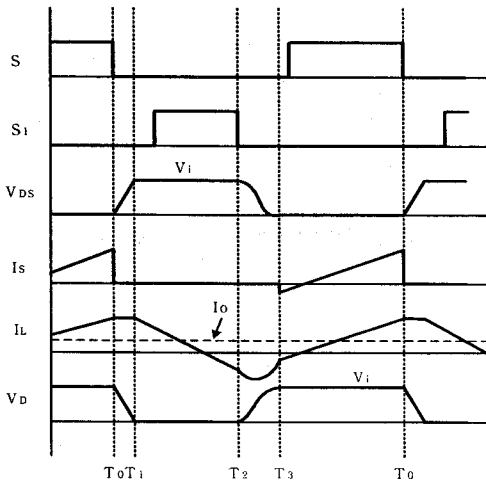


그림 3 강압형 컨버터 이론적인 파형
 Fig. 3 Buck converter theoretical waveforms

2.1 강압형 ZVS QSW 컨버터

일반적인 강압형 컨버터에 있어서 효율을 높이기 위해 환류 다이오드 대신에 전력용 MOSFET를 사용하는 동기 정류 방식을 적용한다. 동기 정류 방식은 다이오드 순방향 전압강하로 인한 손실을 MOSFET의 온 저항($R_{DS(ON)}$)의 손실로 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 고주파 스위칭에 따라 증가하는 스위칭 손실을 줄이기 위해 영전압 스위칭이 되도록 한다. 그림 2와 그림 3은 영전압 스위칭 강압형 컨버터와 이론적인 파형을 나타낸다.

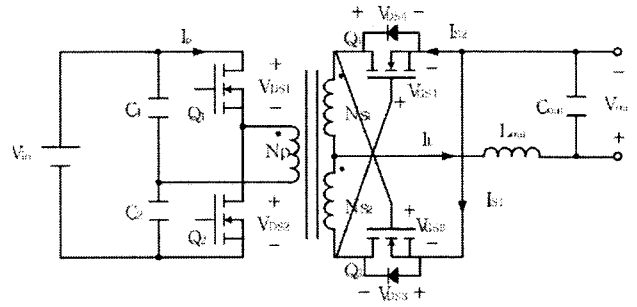


그림 4 하프 브리지 컨버터
 Fig. 4 Half bridge converter

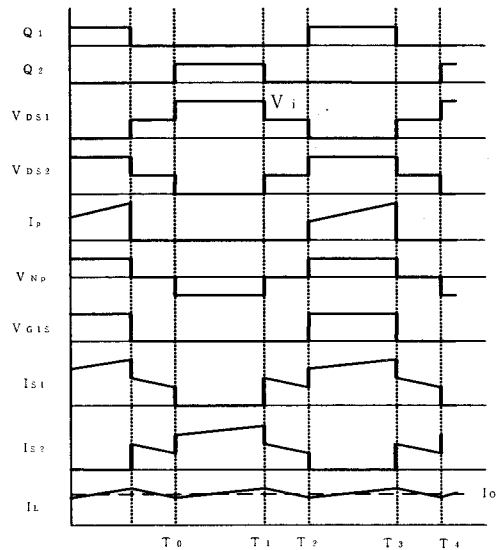


그림 5 하프브리지 컨버터 이론적인 파형
 Fig. 5 Theoretical waveforms of the half bridge converter

2.2 하프 브리지 컨버터

하프 브리지 컨버터의 입력전압은 강압형 컨버터의 출력전압이므로 거의 일정하게 유지된다. 따라서 하프 브리지 컨버터의 주 스위치 시비율을 50%로 일정하게 고정하여 동작시킬 수 있다. 이와 같이 전체 컨버터(강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터)에서 불 때 하프 브리지 컨버터는 입력측과 출력측의 절연 역할을 하는 변압기 역할을 한다. 2차측 정류 회로는 손실을 줄이기 위해 다이오드 대신에

MOSFET을 사용하는 동기 정류 방식과 중간 탭 정류기 (Center-tapped rectifier) 방식을 적용하였다. 그림 4와 그림 5는 하프 브리지 컨버터와 이론적인 파형을 나타낸다.

3. 실험적인 고찰

강압형 컨버터, 하프 브리지 컨버터를 각각 설계하여 실험하였고 가장 효율이 좋은 영역을 구하여 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터를 제작하여 실험하였다. 각각의 컨버터 설계사양은 다음과 같다.

1. 강압형 ZVS QSW 컨버터(Buck ZVS QSW Converter)

- 입력 전압 : DC 36 ~ 72V
- 출력 전압 : DC 22V(19 ~ 24V)
- 출력 전류 : 0.1 ~ 5A
- 스위칭 주파수 : 150kHz

2. 하프 브리지 컨버터(Half Bridge Converter)

- 입력 전압 : DC 19 ~ 24V
- 출력 전압 : DC 3.3V
- 출력 전류 : 1 ~ 30A
- 스위칭 주파수 : 150kHz

3. 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터 (Buck and Half Bridge Series DC-DC Converter)

- 입력 전압 : DC 36 ~ 72V
- 출력 전압 : DC 3.3V
- 출력 전류 : 1 ~ 30A
- 스위칭 주파수 : 150kHz

3.1 강압형 ZVS QSW 컨버터

각 부의 실험 파형은 입력전압 48V, 출력전압 21.9V, 출력 전류 5A 일 때 측정하였다. 주 스위치의 드레인-소스간의 전압과 스위치 전류는 그림 6, 보조 스위치 동작 파형은 그림 7에 나타내었다. 그림 8은 스위칭 주파수를 150kHz로 일정하게 고정시키고 인덕턴스 값을 변화시키면서 강압형 컨버터의 효율을 측정한 것이다. 이와 같이 인덕턴스 값이 증가함에 따라 효율 곡선도 증가하다가 어느 정도의 인덕턴스 값을 넘어서면 다시 효율곡선이 떨어지게 된다. 따라서 전 부하 범위에서 영전압 스위칭 동작을 시켜서 스위칭 손실을 줄이는 방법으로 효율을 높일 수 있겠지만 어느 정도의 한계가 존재한다. 여기서 인덕턴스 값이 18.4μH일 때 가장 좋은 효율 곡선을 나타낸다. 그림 9는 강압형 컨버터의 출력 필터 인덕턴스 값이 18.4μH일 때 효율 특성 곡선이다. 1.3A이하에서는 영전압 스위칭 동작을 하고 1.3A이상에서는 하드 스위칭 동작을 한다. 효율 결과 값을 보면 영전압 스위칭에서 하드 스위칭으로 바뀌는 부분에서 가장 좋은 효율이 나타난다.

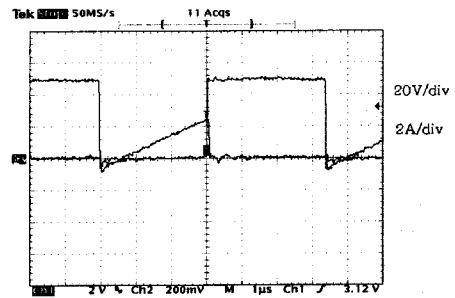


그림 6 주 스위치 전압, 전류 파형
Fig. 6 Main switch voltage and current waveform (V_{DS} , i_s)

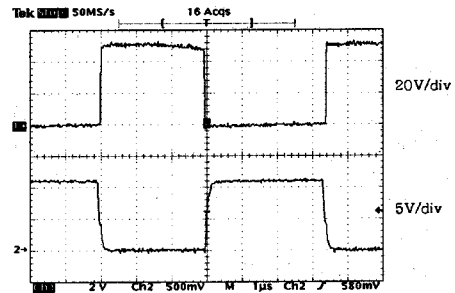


그림 7 보조 스위치 동작 파형
Fig. 7 Auxiliary Switch Voltage Waveform(V_{DS1} , V_{GS1})

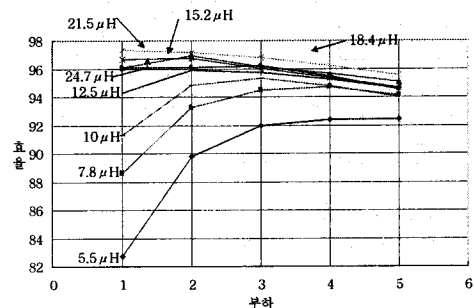


그림 8 인덕터 값에 따른 강압형 컨버터 효율
Fig. 8 Buck converter efficiency according to filter inductance

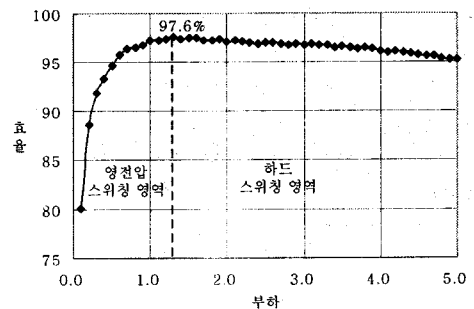


그림 9 $L=18.4\mu H$ 일 때 효율 곡선
Fig. 9 Efficiency when $L=18.4\mu H$

3.2 하프 브리지 컨버터

하프 브리지 컨버터의 각 부분 실험파형은 입력전압 22V, 출력전압 3.3V, 출력전류 22A일 때 측정하였다. 주스위치의 게이트 구동 전압 및 드레인-소스간의 전압은 그림 10, 동기 정류기 동작 파형은 그림 11에 나타내었다.

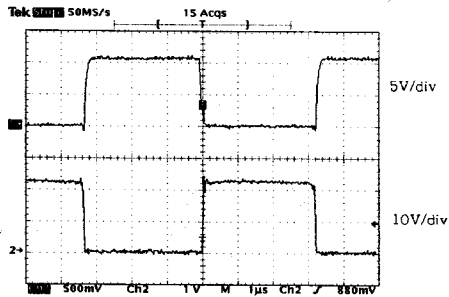


그림 10 주 스위치 동작 파형

Fig. 10 Main Switch Waveforms(V_{GS2} , V_{DS2})

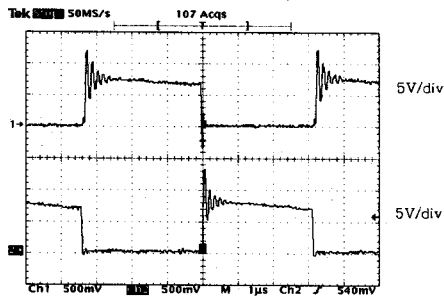


그림 11 동기 정류기 동작 파형

Fig. 11 Synchronous Rectifier Waveforms(V_{GS4} , V_{DS4})

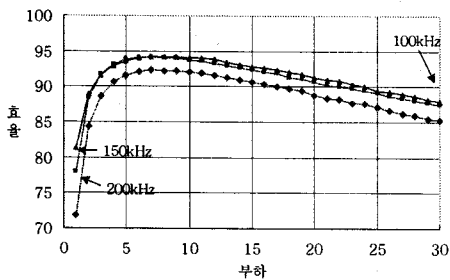


그림 12 하프 브리지 컨버터의 스위칭 주파수에 따른 효율

Fig. 12 Half bridge converter efficiency according to switching frequency.

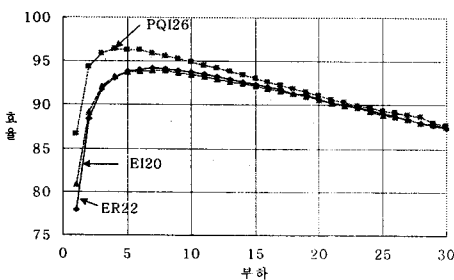


그림 13 코어에 따른 효율 곡선

Fig. 13 Efficiency according to cores

그림 12은 스위칭 주파수에 따른 하프 브리지 컨버터의 효율을 나타낸 곡선이다. 본 실험에서는 스위칭 주파수를 각각 100kHz, 150kHz, 200kHz로 나누어 효율을 측정해 보았다. 실험결과와 마찬가지로 스위칭 주파수가 증가하면 변압기의 코어 손실은 증가하지만 B_{max} 값이 떨어지게 되므로 이 두 가지의 경우를 고려하여 코어 손실을 계산해야 한다. 그리고 스위칭 주파수를 계속 감소시킨다고 해서 효율이 좋아지는 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 그림 13은 변압기 형태와 재질에 따른 효율 특성곡선이다. EI20/6.5/15형태의 변압기의 재질은 ML25D, ER22/7.5/15형태의 재질은 NC-2H와 PQ126/11.5형태의 재질은 PC44로 사용하였다. PC44 PQ126/11.5의 플래너 페라이트 코어를 사용한 변압기가 가장 좋은 효율 곡선을 나타낸다. 그러나 부하전류가 높아짐에 따라 효율이 급속히 떨어지는데 이는 변압기의 권선 저항손실이 높아지기 때문이다. 따라서 설계에 있어서 부하 전류에 해당되는 권선을 선택하여 설계하여야 한다.

3.3 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터

앞에서 가장 좋은 효율을 갖는 강압형 컨버터와 하프 브리지 컨버터에 대해 고찰하였다. 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터는 가장 효율이 좋았을 때 직렬로 구성하면 된다. 따라서 출력 필터 인덕터가 $18.4\mu\text{H}$ 일 때의 벅 컨버터와 PC44 PQ126/11.5로 제작한 변압기를 사용한 하프 브리지 컨버터를 사용하여 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터를 제작하여 실험하였다. 스위칭 주파수는 강압형 컨버터와 하프 브리지 컨버터가 동일하게 150kHz로 설정하였다. 그리고 강압형 컨버터의 제어 회로와 하프 브리지 컨버터의 제어 회로를 동기 시켰을 때와 동기 시키지 않았을 때를 구분하여 실험하고 측정하였다. 그림 14은 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터의 제어 시스템을 나타낸다.

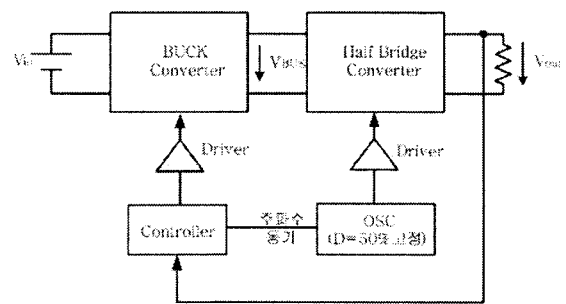


그림 14 컨버터 제어 시스템

Fig. 14 Converter control system

그림 15는 강압형 컨버터와 하프 브리지 컨버터의 제어를 동기 시키지 않았을 때의 입력 전압에 따른 효율 곡선을 나타낸 것이다. 입력전압과 부하전류가 높아짐에 따라 컨버터의 효율이 감소한다는 것을 알 수 있다. 입력전압이 36V일 때 93.7%(부하 전류가 6A), 48V일 때 92.3%(부하전류가 8A), 72V일 때는 89.9%(부하전류가 10A)로 가장 효율이 좋다. 경부하일 때를 제외하고 가장 효율이 낮은 부분은 부하전류가 가장 높을 때이며 입력전압이 36V일 때 84.8%, 48V일 때

84.5%, 72V일 때 82.9%로 나타난다. 그림 16는 강압형 컨버터와 하프 브리지 컨버터의 제어를 동기 시켰을 때의 입력 전압에 따른 효율 곡선을 나타낸 것이다. 입력전압과 부하전류가 높아짐에 따라 컨버터의 효율이 감소한다는 것을 알 수 있다. 입력전압이 36V일 때 93.6%(부하전류가 6A), 48V일 때 92.3%(부하전류가 7A), 72V일 때는 89.9%(부하전류가 9A)로 가장 효율이 좋다. 경부하일 때를 제외하고 가장 효율이 낮은 부분은 부하전류가 가장 높을 때이며 입력전압이 36V일 때 85.5%, 48V일 때 85.1%, 72V일 때 83.9%로 나타난다. 그림 17은 강압형 컨버터와 하프 브리지 컨버터의 제어를 동기 시켰을 때와 동기 시키지 않았을 때의 효율을 비교하여 나타내었다. 효율은 비슷하지만 부하가 상승하면 약간의 차이가 나타났다. 그리고 그림 18은 실험 제작한 강압형과 하프 브리지 직렬형 컨버터의 입력전압에 따른 영전압 스위칭 영역을 표시한 것이다.

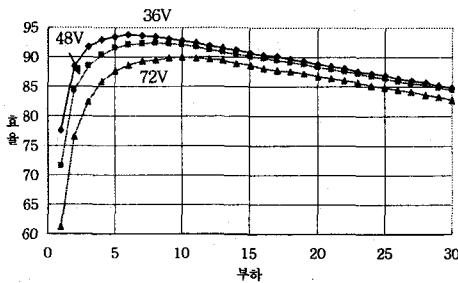


그림 15 비동기 제어일 경우 입력전압에 따른 효율
Fig. 15 Efficiency according to input voltage (with asynchronous control circuit)

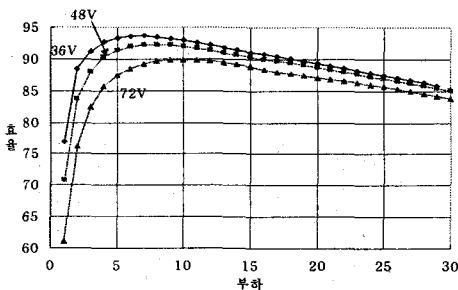


그림 16 동기 제어일 경우 입력전압에 따른 효율
Fig. 16 Efficiency according to Input Voltage (with synchronous Control Circuit).

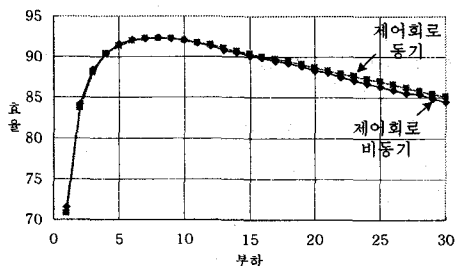


그림 17 입력전압 48V일 때 제어방식에 따른 효율
Fig. 17 Efficiency according to control methods (when 48V input Voltage).

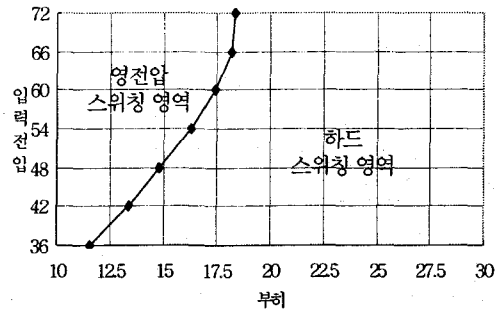


그림 18 부하에 따른 영전압 스위칭 영역
Fig. 18 Zero voltage switching areas according to the load

4. 결 론

본 논문에서는 넓은 입력 범위를 가지고 저전압 출력과 대전류 출력에 매우 적합한 강압형과 하프 브리지 직렬형 DC-DC 컨버터를 설계하여 특성을 분석하였다. 강압형 컨버터는 환류 다이오드 대신에 동기정류기를 사용하여 효율을 높이고 스위칭 손실을 줄이기 위해 영전압 스위칭 동작을 한다. 하프 브리지 컨버터의 경우는 스위칭 주파수의 변화와 코어 형태에 따른 효율을 비교하였다. 스위칭 주파수가 감소하면 변압기의 코어 손실은 감소하여 컨버터의 효율이 올라가지만 코어의 최대 자속 밀도 값이 상승하여 어느 정도의 스위칭 주파수 대역이 되면 거의 일정해 지거나 떨어지게 된다. 코어 형태에 따른 효율 비교에서는 PQI 형태의 플래너 코어를 사용한 변압기가 가장 좋은 효율 곡선을 나타냄을 알 수 있다. 실험 결과, 입력전압이 36V일 때 93.6%(부하전류가 6A), 48V일 때 92.3%(부하전류가 7A), 72V일 때는 89.9%(부하전류가 9A)로 효율이 가장 좋게 나타났다. 경부하일 때를 제외하고 가장 효율이 낮은 부분은 부하전류가 가장 높을 때이며 입력전압이 36V일 때 85.5%, 48V일 때 85.1%, 72V일 때 83.9%로 측정되었다.

참 고 문 헌

- [1] P. Alou, J. Oliver, J.A. Cobos, O. Garcia, J. Uceda, "Buck+Half Bridge(d=50%) Topology Applied to very Low Voltage Power Converter", IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC'01),2001
- [2] Martin F. Schlecht "High Efficiency Power circuit" US Patent Number : 5,999,417
- [3] J.A. cobos, O. Garcia, J. Uceda, F. Aldana, "Optimized Synchronous Rectification srage for Low Output Voltage DC/DC Converter", IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC'94),1994
- [4] 박남진, 김창선, 김태식, 임범선, 우승훈, "벅+하프 브리지 컨버터의 출력 인덕턴스 값과 스위칭 주파수, 변압기 코어 형태에 따른 효율 특성", 전력전자학회 하계학술대회 논문집(1), pp.62-65, 2003.7. 14-17

- [5] 박남진, 김창선, 김태식, 임범선, 우승훈, "벽+하프 브리지 컨버터의 효율 특성 고찰", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp.1229-1231, 2003.7.21-23

저 자 소 개



김 창 선(金 昌 宣)

1990년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 목포대학교 전기공학과 부교수