

MOSFET와 IGBT를 이용한 DC/DC 컨버터의 효율 증대

권형남, 전윤석, 반한식, 최규하, 배영찬*
건국대학교, 동진전원*

High Efficiency DC/DC converter using MOSFET and IGBT

H.N. Kwon, Y.S. Jeon, H.S. Ban, G.H. Choe, J.H. Bae*
Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ., Dong Jin Power Source Co.*

ABSTRACT

Recently, the demand of large capacity SMPS for industrial area is increasing. Full-bridge dc-dc converter with IGBT is most widely used for large capacity SMPS because IGBT has a low-conduction loss and large current capacity.

But most large capacity Full-bridge dc-dc converter using IGBT has low operating frequency because of switching loss at IGBT especially at turn-off by current tail and it's cause of relatively big converter size.

MOSFET has low switching losses has been widely used for high frequency SMPS but it has a problem to apply to large capacity SMPS because it has large conduction resistance causing large on-time losses.

In this paper, for reduction losses at switching device, MOSFET is applied at parallel with IGBT in full-bridge dc/dc converter.

1. 서 론

직류전원장치는 종래의 선형 증폭기에 비하여 고 효율, 소형, 경량화의 장점 때문에 전기, 전자, 통신 기기 등의 안정된 직류 전압이 필요한 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다. PWM 방식의 직류전원장치는 전력회로의 구조가 간단하고, 제어가 편리하며, 동작시 전력용 스위치의 전압 및 전류에 대한 낮은 스트레스 가지는 등의 특징을 가지고 있다. 따라서 전력용 반도체 소자의 발달과 제어기술의 고도화로 인해 통신 및 산업용 직류 전원 공급장치 등 기존의 전기응용 분야에서 전력변환 기술이 급속히 확산되고 있다.

일반적으로 IGBT는 낮은 도통손실을 가지며 큰 전류용량을 가지므로 대용량의 직류 전원장치를 설계하기 위해서는 IGBT를 사용한 전파정류형 컨버터가 많이 쓰이고 있다. 그러나 IGBT의 경우 스위칭시 긴 온-오프 지연시간을 가지므로 MOSFET에 비해 큰 스위칭 손실을 가지게 된다. 따라서 IGBT를 사용한 전파정류형 컨버터의 경우 고속의 스위칭을 할 경우 손실이 크게 증가함으로써 동작 주파수 영역이 제한되게 된다.

최근 대용량 SMPS의 소형 경량화를 이루기 위하여 DC-DC 컨버터의 고속 스위칭에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이를 위하여 스위칭시의 손실을 줄임이고 고속 스위칭을 이루기 위한 기법으로서 각종 소프트 스위칭 기법 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 현재까지 부분공진형 컨버터는 구조가 복잡하고 제어가 어려우며 동작영역 이외에서는 부분공진이 잘 이루어지지 않는 단점 등을 가지고 있으므로 일부 컨버터를 제외한 대부분의 컨버터에서는 그 적용에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

또한 대용량 직류전원장치의 소형 경량화를 이루기 위한 스위칭 주파수 증가를 위한 방법으로서 현재 널리 사용되고 있는 MOSFET의 사용을 검토할 수도 있으나 MOSFET의 경우 빠른 온-오프 시간을 가짐으로서 고속의 스위칭 주파수를 얻을수 있지만 도통시 도통손실은 MOSFET의 도통저항에 비례하게 되므로 전류가 커질수록 도통손실이 크게 증가하는 단점을 가지고 있다. 따라서 대용량 SMPS의 적용에 어려운 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 MOSFET를 IGBT에 병렬로 접속하여 보조 스위치로 사용함으로써 스위칭시 IGBT의 턴-오프 전류 테일링에 의한 스위칭 손실을 줄이는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 또한 이를 대용량 SMPS에 주로 사용되는 DC-DC Full-Bridge 컨버터에 적용하여 손실을 해석하였다.

2. 시스템 구성

2.1 병렬 스위칭 원리

그림 1은 병렬 스위치의 구성과 게이트 신호를 나타내고 있다. 한 개의 스위칭 소자의 블록은 메인 스위치의 역할을 하는 IGBT에 MOSFET를 병렬로 접속한 구조로서 MOSFET는 IGBT가 턴-온과 턴-오프시 영전압 스위칭을 하도록 하는 역할을 한다. 턴-온시에는 MOSFET의 빠른 턴-온과 도시간에 의하여 먼저 켜지게 되며 따라서 스위칭 소자의 양단은 MOSFET의 도통에 의한 전압강하 값으로 떨어지게 되며 상대적으로 느린 IGBT는 저전압에서 거의 영전압 스위칭을 하게 된다. 또한 턴-오프시에는 MOSFET가 IGBT에 비하여 시간 t_d 만큼의 지연시간을 가지고 꺼짐으로써 IGBT의 저전압에서 거의 영전압 스위칭처럼 턴-오프 하게 되며 이후 MOSFET가 빠르게 꺼진다. 따라서 턴-온 및 턴-오프시의 손실은 MOSFET의 낮은 스위칭 손실특성을 보이게 되며 도통구간에는 대부분의 전류가 낮은 전압강하 특성을 가지는 IGBT로 통전하게 되므로 MOSFET만을 사용한 경우에 비해 낮은 도통손실을 가지게 된다.

그림 2의 (a)와 (b)는 IGBT만 스위칭을 하였을 경우 및 IGBT-MOSFET를 병렬로 사용하였을 경

- V : 인가 전압
- I : 1차측에 흐르는 평균의 전류
- t_{rri}, t_{rim} : IGBT, MOSFET 턴온시 전류상승시간
- t_{fji}, t_{fjm} : IGBT, MOSFET 턴온시 전압하강시간
- t_{rvi}, t_{rvm} : IGBT, MOSFET 턴오프시 전압상승시간
- t_{fii}, t_{fim} : IGBT, MOSFET 턴오프시 전류하강시간
- t_{on} : IGBT의 도통구간
- f_s : 스위칭 주파수
- V_{oni} : IGBT의 도통시 전압강하
- V_{onp} : 병렬스위치의 도통시 전압강하
- V_{onm} : MOSFET의 도통시 전압강하

우의 스위칭 블록의 전압 전류 파형을 나타내고 있다.

2.2 병렬 스위칭 기법을 적용한 Full-Bridge 컨버터

그림 3은 대용량의 직류 전원장치에 주로 사용되는 Full-Bridge 컨버터의 구성을 나타내고 있다. 각각의 스위칭 소자는 전술한 바와 같이 주 스위치인 IGBT의 스위칭 손실을 줄이기 위하여 병렬로 MOSFET를 연결한 구조로 되어있으며 2차측 회로는 전파정류회로로서 구성되었다.

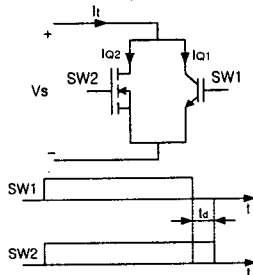
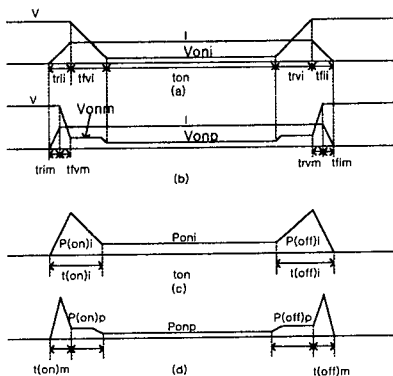


그림 1. 병렬 스위치와 게이트의 신호



- (a) IGBT의 전압-전류 파형
- (b) 병렬스위치의 전압-전류 파형
- (c) IGBT만 사용할 경우 순시전력
- (d) 병렬스위치의 경우 순시전력

그림 2. 스위칭 블록의 전압 전류 파형

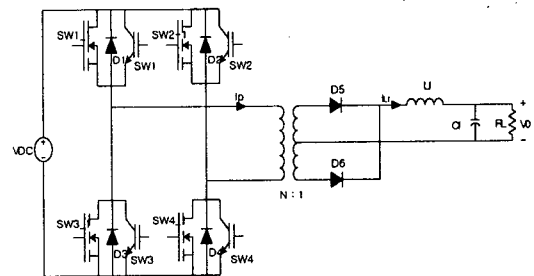


그림 3. IGBT-MOSFET 병렬 스위치를 이용한 Full-Bridge DC/DC 컨버터

3. Full-Bridge 컨버터의 모드별 해석

그림 4는 병렬 스위칭 기법을 적용한 Full-Bridge 컨버터의 각 부 파형을 나타내고 있으며 그림 5는 이때의 모드별 도통경로를 나타내고 있다. 이때 컨버터의 도통상태는 스위치의 온-오프의 상태에 따라 다음과 같이 크게 4개의 모드로 나눌 수 있다.

① Mode I : (t0 - t1)

초기 구간으로서 이때 MOSFET와 IGBT가 모두 켜져있는 구간이다. 이때 MOSFET는 큰 도통저

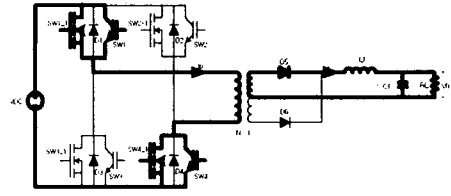
항을 가지므로 대 전류가 흐를 경우 큰 전압강하를 가지게 되므로 대부분의 전류는 상대적으로 낮은 전압강하를 가지는 IGBT로 흐르게 된다. 따라서 이때의 스위치 양단의 전압강하는 IGBT의 도통시 전압강하와 같이 되며 이때의 손실은 도통손실로서 IGBT만을 사용한 경우와 거의 유사하게 된다. 또한 이때 2차측으로 전력이 전달된다.

② Mode II : (t1 - t2)

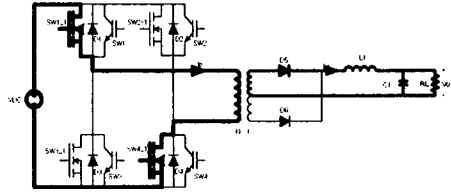
턴-오프 시 MOSFET는 도통상태를 유지하며 IGBT의 게이트 신호를 먼저 차단한 구간이다. 이때 IGBT의 전류는 긴 턴-오프 시간에 의하여 서서히 감소하게 되며 MOSFET의 전류는 계속적으로 증가하게 된다. 이때 스위치 양단의 전압은 MOSFET의 도통저항에 의하여 서서히 증가하다가 IGBT가 완전히 턴-오프 된 후 일정하게 유지된다. 이때 IGBT가 완전 턴-오프하게 될 때 전압은 저전압으로 유지가 되므로 IGBT는 거의 영전압 스위칭을 하게 된다. 일반적인 경우 IGBT의 대부분의 스위칭 손실은 턴-온 시 보다 턴-오프 시에 나타나므로 손실 저감의 효과가 뚜렷한 구간이다.

③ Mode III : (t2 - t3)

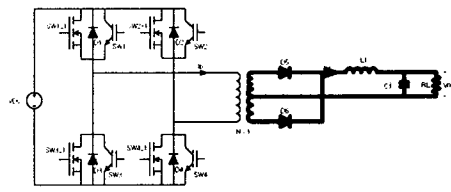
도통하던 스위치가 모두 꺼지는 구간으로서 MOSFET가 턴-오프 될 때 스위칭 손실을 가지게 되나 IGBT에 비해 빠른 턴-오프 특성을 가지므로 낮은 스위칭 손실 특성을 얻게 된다. 변압기의 인



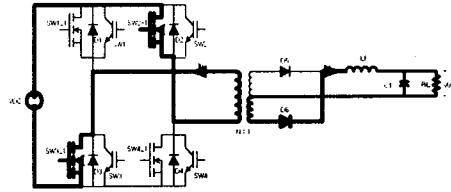
(a) 모드 I



(b) 모드 II



(c) 모드 III



(d) 모드 IV

그림 5. 각 모드별 도통경로

덕턴스 성분에 축적된 에너지는 병렬 다이오드를 통하여 전원측으로 환원되며, 2차측 전류는 D5, D6을 통하여 환류를 하게된다.

④ Mode IV : (t3 - t4)

도통을 위해 스위치를 다시 턴-온 시키는 구간으로서 병렬 스위치 블록에 턴-온 신호가 인가될 경우 MOSFET이 IGBT에 비해 빠르게 켜짐으로서 대부분의 전류는 MOSFET를 통하여 흐르면서 증가함으로서 스위칭 손실을 가지게 된다. 이때의 스위치 양단의 전압은 MOSFET의 도통전압까지 저하되며 이후 IGBT가 켜지면서 MOSFET에 흐르는 전류는 감소하며 IGBT의 전류는 서서히 증가하게 된다. 이때 IGBT는 턴-온시 저전압 스위칭을 하게 되므로 영전압 스위칭을 하는 효과를 나타낸다.

4. 손실

스위치의 손실을 각각의 모드 별로 구하면 각각 다음과 같다.

① 모드 I : (t0~t1)

IGBT와 MOSFET가 모두 켜져 있는 구간으로

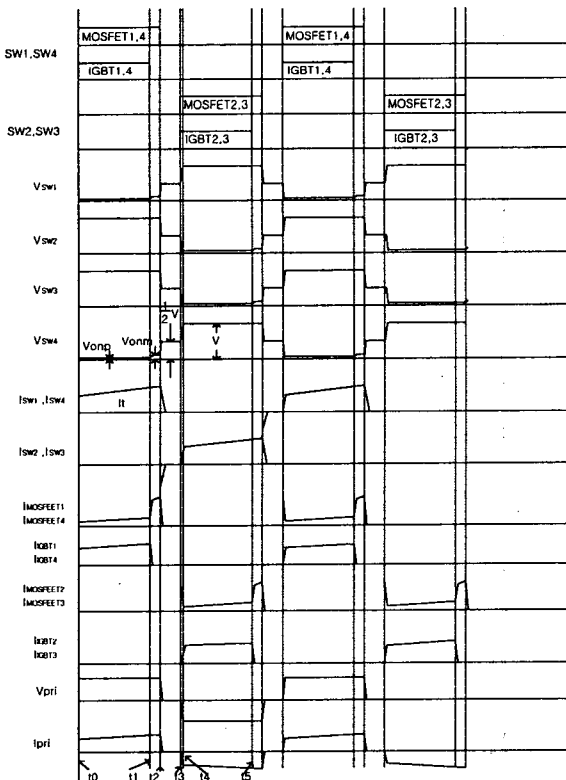


그림 4. 각부의 파형

대부분의 전류는 IGBT를 통하여 흐르게 되며 따라서 손실은 다음과 같다.

$$P_{onp} = 2V_{onp}I_{onp}f_s \quad (1)$$

② 모드 II : (t1~t2)

MOSFET만 도통하는 구간으로 따라서 손실은 다음과 같다.

$$P_{onm} = 2V_{onm}I_{onm}f_s \quad (2)$$

③ 모드 III : (t2~t3)

MOSFET의 턴-오프 손실이 존재하게 되며 다음과 같이 나타난다.

$$P_{(off)m} = \frac{1}{2}VI_{(off)m}f_s \quad (3)$$

④ 모드 IV : (t3~t4)

대부분의 손실은 MOSFET의 턴-온 손실이 되며 그 값은 다음과 같다.

$$P_{(on)m} = \frac{1}{2}VI_{(on)m}f_s \quad (4)$$

따라서 스위칭 소자의 손실은 한주기 동안 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} P_{totp} &= P_{onp} + P_{onm} + P_{(on)m} + P_{(off)m} \\ &= \frac{1}{2}I_{fs}(4V_{onp}t_{on} + 4V_{onm}t_{onm} \\ &\quad + V(t_{(off)m} + t_{(on)m})) \end{aligned} \quad (5)$$

또한 동일한 경우 IGBT만을 사용한 경우의 스위칭 손실을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} P_{toti} &= P_{oni} + P_{(on)i} + P_{(off)i} \\ &= \frac{1}{2}I_{fs}(4V_{oni}t_{on} + V(t_{(on)i} + t_{(off)i})) \end{aligned} \quad (6)$$

단, $P_{oni} = 2IV_{oni}t_{on}f_s$: IGBT의 도통손실

$$P_{(on)i} = \frac{1}{2}VI_{(on)i}f_s : \text{IGBT의 턴-온 손실}$$

$$P_{(off)i} = \frac{1}{2}VI_{(off)i}f_s : \text{IGBT의 턴-오프 손실}$$

이때 병렬 스위치 구조를 사용하였을 때의 손실 개선효과는 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} P_s &= P_{totp} - P_{toti} \\ &= \frac{1}{2}I_{fs}(4(V_{oni} - V_{onp})t_{on} - 4V_{onm}t_{onm} \\ &\quad + V(t_{(on)i} + t_{(off)i} - (t_{(on)m} + t_{(off)m}))) \end{aligned} \quad (7)$$

표 1 적용된 시스템의 파라미터

입력전압[V]	311V	f_s	25KHz
입력평균전류[I]	20.57A	t_{on}	12us
V_{oni}	2.7V	t_{onm}	3us
V_{onp}	1.27V	V_{onm}	4.93V
IGBT on시간	40ns	IGBT off시간	190ns
MOSFET on시간	38ns	MOSFET off시간	40ns

표 1은 본 연구에서 적용한 48V 100A급 Full-Bridge 컨버터에 적용하기 위하여 선택한 스위칭 소자의 파라미터를 나타내고 있으며 각각 MOSFET는 IXFN34N80를 선택하였으며 IGBT는 IXGH28N90을 선택을 하였다.

이때 병렬 스위치 기법을 구현하였을때와 IGBT만 사용하였을 때의 손실전력을 각각 계산하여 비교하면 다음과 같이 된다.

병렬 스위치 기법 사용시의 스위칭 손실

$$P_{totp} = 2(P_{oni} + P_{(on)i} + P_{(off)i}) = 74.22W$$

IGBT만을 사용하였을 경우의 스위칭 손실

$$P_{toti} = 2(P_{oni} + P_{(on)i} + P_{(off)i}) = 120.1W$$

$$\frac{P_{totp}}{P_{toti}} \times 100 = 38.2\%$$

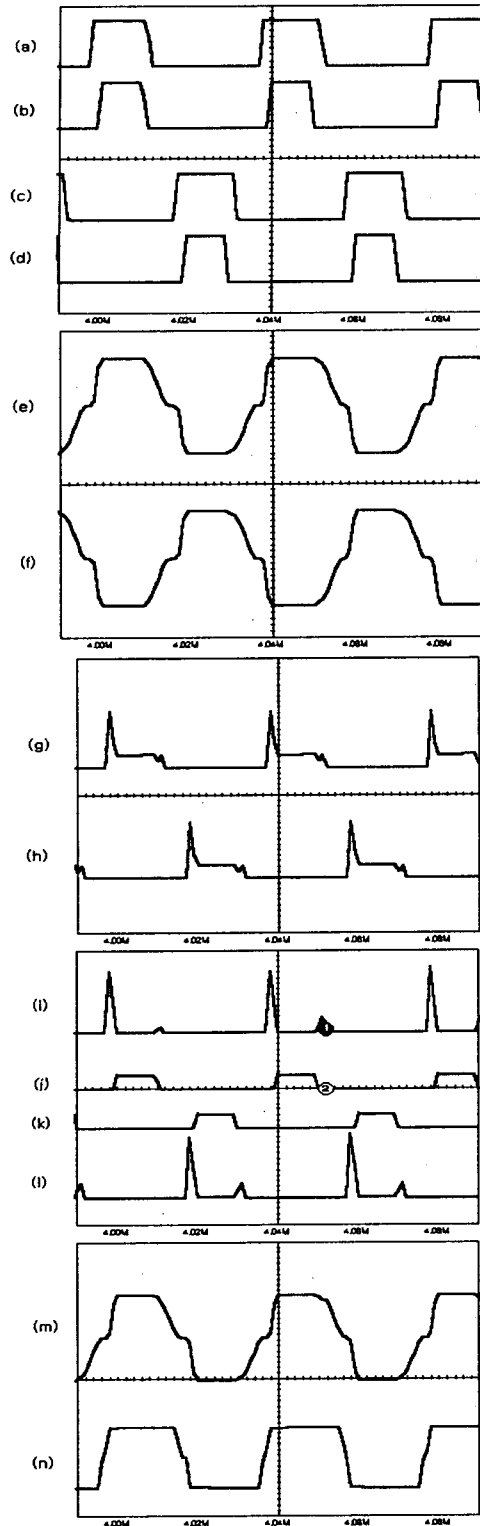
따라서 본 연구에서 예를 들은 시스템의 경우 병렬 스위칭 기법을 사용 시 스위칭 손실은 약 38.2%로 감소함을 알 수 있다.

5. 시뮬레이션

Isspice를 이용하여 IGBT-MOSFET 병렬스위치를 Full-Bridge DC/DC 컨버터에 적용을 하여 시뮬레이션을 하여 IGBT만 사용하였을 때의 손실과 비교분석을 하였다.

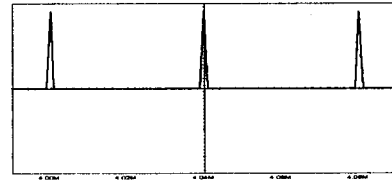
그림6에서는 Full-bridge의 각 부분에서의 전압과 전류의 파형을 보여주고 있으며 IGBT-MOSFET 병렬 스위치의 전압과 전류의 파형을 보여 주고 있다. 파형에서도 알 수 있듯이 MOSFET이 먼저 켜져서 MOSFET에 전류가 흘러서 IGBT가 영전압으로 켜짐을 보여주고 있고 꺼질 시에는 IGBT가 먼저 꺼진 후 모든 전류가 MOSFET에 흘러서 IGBT가 영전압으로 꺼지므로써 IGBT가 영전압 스위칭을 하는 것을 보여주고 있다., 다른 3개의 모든 스위치가 동일한 스위칭 파형을 보여주고 있으므로 영전압 스위칭을 하고 있음을 알 수가 있다.

그림 7(a)에서는 MOSFET-IGBT를 병렬로 연결을 시킨 것에 대한 효율을 보여 주고 있으며 7(b)의 그림에서는 IGBT만으로 구성을 하여 운용을 시킨 것을 보여주었으며 손실이 준 것을 볼 수가 다.

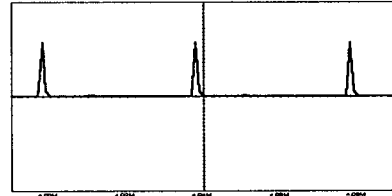


(a) MOSFET1,4 GATE signal (b) IGBT1,4 GATE signal
(c) MOSFET2,3 GATE signal (d) IGBT2,3 GATE signal
(e) $V_{sw2,3}$ (f) $V_{sw1,4}$ (g) $I_{sw1,4}$ (h) $I_{sw2,3}$
(i) $I_{mosfet1,4}$ (j) $I_{igbt1,4}$ (k) $I_{mosfet2,3}$ (l) $I_{igbt2,3}$
(m) V_{pri} (n) I_{pri}

그림 6. 컨버터의 각부의 파형



(a) IGBT만을 사용한 경우



(b) 병렬 스위치를 한 경우

그림 7. IGBT와 MOSFET의 병렬의 스위치 손실

6. 결 론

고효율을 요구하는 통신용 전원 장치에서 효율을 높이기 위해 스위치를 MOSFET와 IGBT를 병렬로 연결을 하여 사용하여 스위칭 시에 MOSFET가 먼저 켜지고 지연 시간을 가지고 꺼지므로써 IGBT가 영전압 스위칭이 되게 하여 손실을 줄였으며, IGBT와 MOSFET가 모두 도통이 되어지는 시간에는 IGBT의 낮은 순방향 특성을 유지하여 손실을 줄이고 있다. 그리고 빠른 스위칭의 특성을 가지는 MOSFET에 의하여 IGBT를 보다 높은 주파수에서 동작이 가능하게 되었다. 이로써 효율의 상승을 이루어짐을 보여주었으며, 이를 Full-Bridge DC/DC 컨버터에 적용하여 효율의 상승이 됨을 보여 주고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Y.M. Jiangm, G.C.Hua.E.Yang, and F.C.Lee, "Soft-Switching of IGBTs with the help of Mosfets" IEEE PESC Rec. pp. 151~157. 1993.
- [2] D.H.Lee and F.C.Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition and Zero-Current Transition Pulse-Width Modulation Converter" IEEE PESC Rec. pp. 233~239, 1997.
- [3] 장동렬, 서영민, 홍순찬, 윤덕용, 황용하, IGBT-MOSFET 병렬 스위치를 이용한 고효율 직류-직류 변환기" 전력전자학회논문지 제4권 제2호 pp. 152~158
- [4] N. Mohna. T. M. Undeland. and W. P. Robbins, Power Electronics - Converters. Applications and Design. John Wiley & Sons. Inc. 1995.
- [5] H.p. Yee, Ph.D. and Dean Lin " An ASIC to Control the Paralleling of an IGBT with a MOSFET" IEEE. 1997.