

FB-ZVS 콘버터를 이용한 대용량·고주파 충전회로의 해석 및 설계

이기영^o 차영길 정종진 김홍근

경북대학교 전기공학과

Analysis and Design of High-Power, High-Frequency Charging Circuit using FB-ZVS Converter

Ki-Young Lee^o Young-Kil Cha Jong-Jin Jung Heung-Geun Kim
Kyung-Pook National University

Abstract

DC/DC converter is widely used in computer, electronic communication and industrial apparatus where the regulated dc supply is needed. FB-ZVS converter is suitable for high-power, high-frequency and constant frequency control. Because the voltage stress of the diode rectifier is high due to the ring effect, the clamp circuit is essential to reduce the voltage stress. The nondissipative active clamp circuit eliminates ring effect.

Analysis of FB-ZVS converter and the validity of the active clamp circuit are studied through the simulation, and the experimental results show the superior characteristics of the proposed system.

1. 서론

DC/DC 콘버터는 컴퓨터, 전자통신기기등에 안정된 직류를 공급하기 위해 널리 사용되고 있는데 콘버터의 스위칭방식에는 하드 스위칭, 공진형 스위칭, 준공진형 스위칭, 멀티 공진형 스위칭, 소프트 스위칭등이 있다.

DC/DC 콘버터 종류에는 여러가지 형태가 있지만 일·출력 절연형 콘버터가 널리 사용되고 있다. 절연형 콘버터를 소형·경량화 하기 위해서는 고주파 스위칭이 필요하나 고주파 스위칭시 스위칭 손실과 소자 스트레스가 커지기 때문에 기존의 하드 스위칭 방식이 아닌 공진형이나 소프트 스위칭방식이 요구된다. 이 중에서 공진형 콘버터는 전압, 전류의 피크치가 크고 주파수 제어방식으로 제어와 필터설계가 어렵고 대용량에 적합하지 않다.

반면에 소프트 스위칭방식인 FB-ZVS(Full Bridge Zero Voltage Switching) 콘버터는 대용량·고주파가 가능하고 일정주파수 제어방식으로 전기자동차의 충전기와 같은 고효율, 급속충전이 요구되는 분야에 적당한 방식이나 변압기 이차측의 링효과 발생으로 인해 소자 스트레스가 커지게 되는 단점이 있다. 그러므로 이 스트레스를 손실없이 줄이기 위해서는 능동 클램프회로가 필요하다. 본 논문에서는 FB-ZVS 콘버터의 해석과 능동클램프회로의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검토하고 실험을 통하여 제안한 시스템의 특성이 우수함을 보였다.

2. FB-ZVS 콘버터

2.1. 동작원리 및 모드별 해석

(1) 동작원리

FB-ZVS가 영전압스위칭으로 동작하기 위해서는 스위치가 턴온되기 전에 커패시터에 충전되어 있는 에너지가 방전되면서 전압극성이 영이 되는 순간 역별열 다이오드가 도통되어야 한다. 식(1)과 같이 누설 인덕턴스에 축적되어 있는 에너지가 커패시터에 충전되어 있는 에너지보다 커야만 영전압스위칭이 이루어진다.

$$E = \frac{1}{2} L_{ik} I_2^2 \geq C_{MOS} V_i^2 + \frac{1}{2} C_{TR} V_i^2 \quad (1)$$

단, L_{ik} : 변압기 누설인덕턴스

I_2 : 그림 1에서 t_2 또는 t_6 인 순간 변압기 일차전류

V_i : 입력전압 C_{MOS} : 스위치 출력 커패시턴스

C_{TR} : 변압기 퀸션 커패시턴스

영전압스위칭이 되기 위한 변압기 일차측 임계치 전류는 식(1)로부터 식(2)로 표현된다.

$$I_{crit} = \sqrt{\frac{2}{L_{ik}} (C_{MOS} V_i^2 + \frac{1}{2} C_{TR} V_i^2)} \quad (2)$$

FB-ZVS 콘버터의 케이트 전압, 변압기 전압·전류파형은 그림 1과 같다.

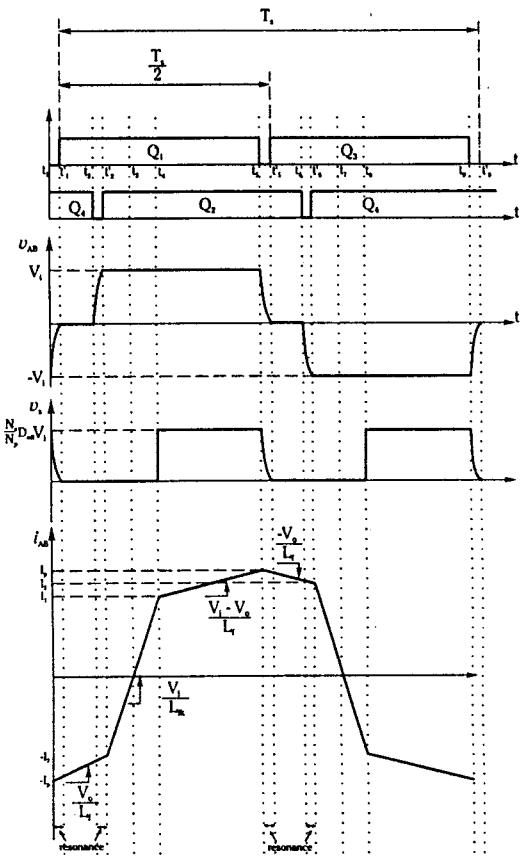


그림 1. FB-ZVS 콘버터의 케이트 전압, 변압기 일차전압·이차전압, 변압기 일차전류.

식(3)은 영전압스위칭을 이루기 위한 부하전류이다.

$$I_{load} > \frac{N_p}{N_s} I_{crit} - \frac{dI}{2} + \frac{V_{out}}{L_f} (1-D) \frac{T}{2} \quad (3)$$

단, I_{load} : 출력 필터 전류의 평균치 L_f : 필터 인덕턴스
 V_{out} : 출력 전압 D : 일차측 시비율 T : 스위칭 주기
 ΔI : 출력필터 전류의 백동 N_p, N_s : 변압기 일·이차측 턴수

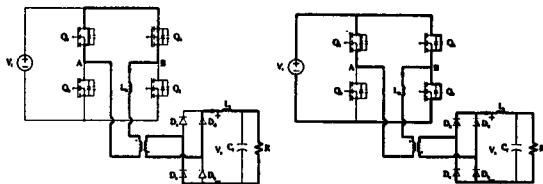
(2) 모드별 해석

FB-ZVS 컨버터의 반주기 동작주기는 6개의 모드로 나눌 수 있고 각 모드별 해석은 그림 2와 같다.

① $t_1 - t_2$
 D₁, Q₄ 도통구간

② $t_2 - t_2$ (공진구간)

D₁ 도통, Q₄ 충전, Q₂ 방전 구간

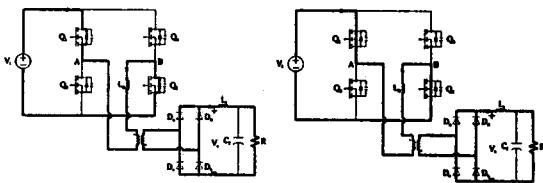


③ $t_2 - t_3$
 D₁, D₂ 도통구간

④ $t_3 - t_4$
 Q₁, Q₂ 도통구간

이차측 정류다이오드는 전류 중복각에 의해 4개 모두 도통

이차측 정류다이오드는 전류 중복각에 의해 4개 모두 도통



⑤ $t_4 - t_5$
 Q₁, Q₂ 도통구간
 이차측으로 에너지 전달

⑥ $t_5 - t_6$ (공진구간)
 Q₂ 도통, Q₁: 충전, Q₃: 방전 구간

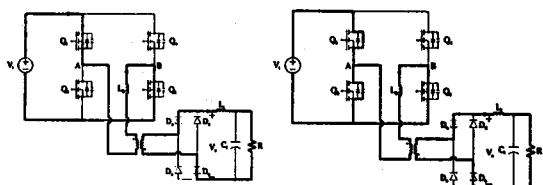


그림 2. FB-ZVS 컨버터의 반주기 동작모드.

2.2. 능동 클램프회로의 동작원리 및 해석

(1) 동작원리

변압기 이차측에서는 변압기 컨설팩시터, 정류다이오드의 기생커패시터 그리고 변압기 누설인덕턴스에 의해 공진이 발생하는데 이 현상을 링효과라 한다.

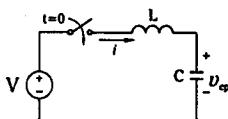


그림 3. 변압기 이차측 링효과 등가회로.

변압기 2차측 링효과는 그림 3의 등가회로로 나타낼 수 있는데 이로 부터 2차전압을 구하면 식(4)와 같다.

$$v_{cp} = V - V \cos \omega_0 t \quad (4)$$

식(4)로부터 변압기 2차전압은 입력전압의 2배까지 가능하여 출력단 다이오드 정류기의 전압 스트레스가 커지고 따라서 정격치가 큰 소자를 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다. 이러한 링효과를 억제하기 위해서 클램프회로가 필요하다. RCD 클램프회로는 구현은 쉽지만 손실이 크고 완전히 링효과를 제거할 수 없기 때문에 대용량에 적합한 능동 클램프회로가 필요하다. 그림 4는 능동 클램프회로 부가시 케이트 전압, 변압기 일차·이차전압, 클램프전류파형이다.

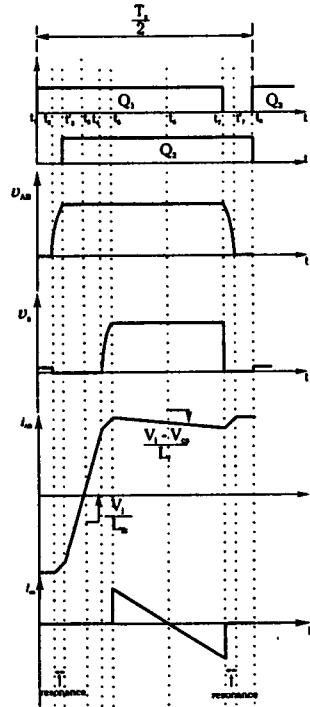


그림 4. 능동 클램프를 사용한 FB-ZVS 컨버터 케이트 전압, 변압기 일차전압·이차전압, 변압기 일차전류, 능동클램프 전류.

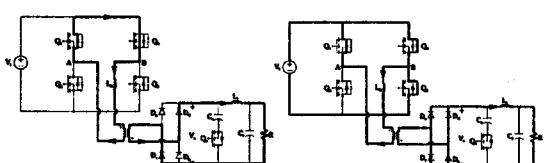
(2) 모드별 해석(반주기 해석 : 9 모드)

① $t_1 - t_2$
 D₁, Q₄ 도통구간

② $t_2 - t_2$ (공진구간)

D₁ 도통, Q₄ 충전, Q₂ 방전 구간

이차측에 미소전압이 나타남



③ $t_2 - t_3$

D₁, D₂ 도통구간

이차측 정류다이오드는 전류

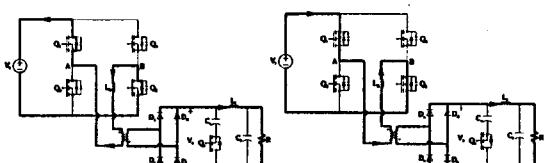
중복각에 의해 4개 모두 도통

④ $t_3 - t_4$

Q₁, Q₂ 도통구간

이차측 정류다이오드는 전류

중복각에 의해 4개 모두 도통



⑤ $t_4 - t_5$

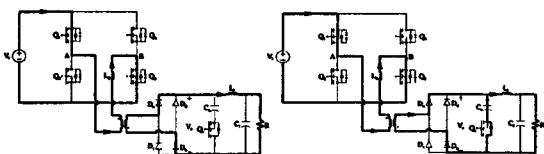
Q₁, Q₂ 도통구간

이차전압 증가구간

⑥ $t_5 - t_6$

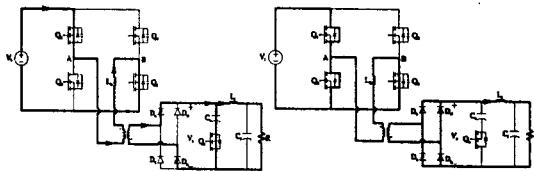
Q₁, Q₂ 도통구간

Q_S 역방향다이오드 도통구간



⑦ $t_6 - t_7$
 Q_1, Q_2 도통구간
 Q_S 도통구간

⑧ $t_7 - t_8$
 Q_2 도통, Q_1 : 충전, Q_3 : 방전 구간
이차측 전압감소시 일차측 전류는 필터전류보다 작음(이차정류 다이오드 4개 모두 도통)



⑨ $t_8 - t_9$
 D_3, Q_2 도통구간
이차측 정류다이오드 4개 모두 도통

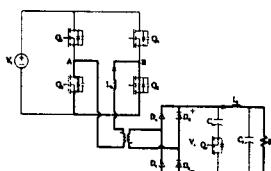


그림 5. 능동클램프를 사용한 FB-ZVS 콘버터의 반주기 동작모드.

3. 충전 알고리즘

축전지 충전방법에는 정전류 충전 기법, 정전압 충전 기법, 단계 충전 기법, 펄스 충전기법 등이 있다. 본 논문에서는 축전지의 과충전을 방지하고 충전시간이 비교적 짧은 정전류-정전압-정전류 충전방법을 사용한다. 그럼 6은 정전압, 정전류로 충전하기 위한 충전모드에 따른 제어블럭도이다. 축전지의 충전상태에 따라 스위치 S가 정전류 모드 또는 정전압 모드로 동작하게 되고 이러한 모드 변환은 소프트웨어에서 처리하게 된다. 충전 초기에는 정격전류의 2~2.6 배의 전류로 정전류 모드로 충전을 하고 축전지의 전압이 가스 발생 전압에 도달하면 축전지의 정격 전압을 인가하여 정전압 모드 충전으로 변환한다. 이 모드에서는 축전지가 만충전에 가깝게 되어 충전 전류는 감소하게 된다. 이 충전 전류가 정격 전류의 20 %에 도달하면 다시 정전류 모드로 만충전까지 충전한다. 이러한 충전 방법은 축전지의 상태에 따라 충전 모드가 변해야 하므로 모드별로 제어기를 구성하여야 하며 항상 축전지의 전압과 전류를 추정하여 축전지의 상태에 따라 모드를 번갈시켜야 한다.

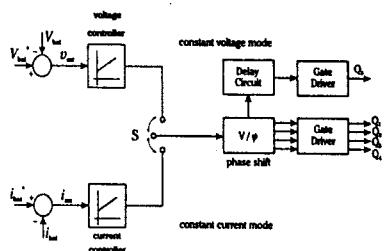


그림 6. 충전모드에 따른 제어블럭도.

4. 시뮬레이션

제시한 FB-ZVS 콘버터의 타당성을 고찰하기 위해 실험에 앞서 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션 조건은 스위칭 주파수가 20kHz, 변압기 누설인덕턴스를 $60\ \mu H$, 변압기 턴수비를 2:1로 하였고 저항부하로 출력은 1.5kW로 선정하였다.

(1) 1.5kW RCD 클램프시 FB-ZVS 콘버터

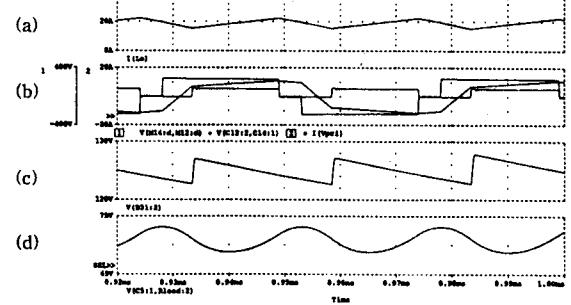


그림 7. RCD 클램프시 FB-ZVS 콘버터.

- (a) 부하필터 인더티전류
- (b) 변압기 일차전압·전류, 변압기 이차전압
- (c) RCD 클램프전압
- (d) 출력전압

변압기 일차측 시비율과 변압기 이차측 시비율간에 시비율손실이 나타나고 일차측 전압과 전류를 보면 영전압스위칭이 됨을 알 수 있다.

(2) 1.5kW 능동 클램프시 FB-ZVS 콘버터

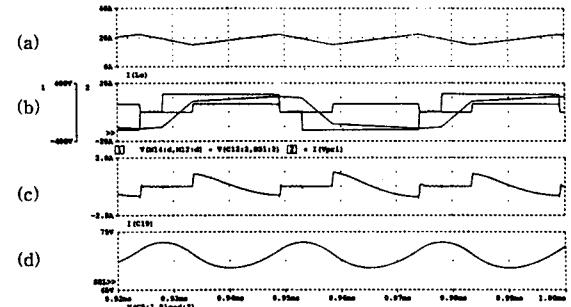


그림 8. 능동 클램프시 FB-ZVS 콘버터.

- (a) 부하필터 인더티전류
- (b) 변압기 일차전압·전류, 변압기 이차전압
- (c) 능동클램프전류
- (d) 출력전압

변압기 2차측 링효과가 제거되었으며 영전압 스위칭이 됨을 알 수 있다.

5. 실험 결과

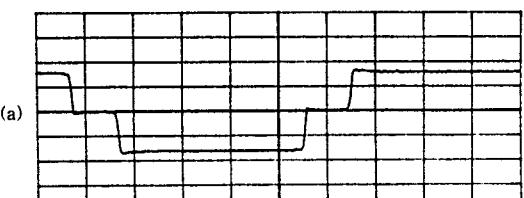
실험에 사용된 소자는 주 스위치로 MOSFET인 세미클론 SK-M254F, 정류 다이오드는 SKND50E03, RCD 클램프에 사용된 다이오드는 IR사 C25P40FR, 코아는 TDK사의 PC30EIC120을 사용하였다.

$$V_i = 190\text{ V}, f = 20.66\text{ kHz}, n = N_p/N_s = 2, L_B = 60\ \mu H$$

$$L_f = 100\ \mu H, C_f = 47\ \mu F, C_C = 10\ \mu F, R = 4\ \Omega$$

$$D_{max} = 0.8, D_{eff} = 0.6$$

(1) RCD 클램프시 FB-ZVS 콘버터



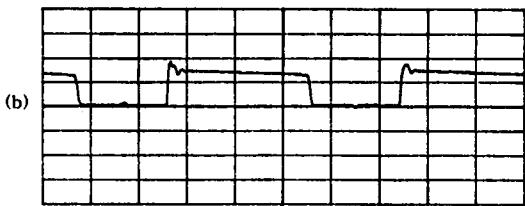


그림 9. RCD 클램프시 FB-ZVS 컨버터.
(a) 변압기 일차전압 (b) 변압기 이차전압
(5 μ s/Div, (a) 100V/Div, (b) 50V/Div)

(2) 능동 클램프시 FB-ZVS 컨버터

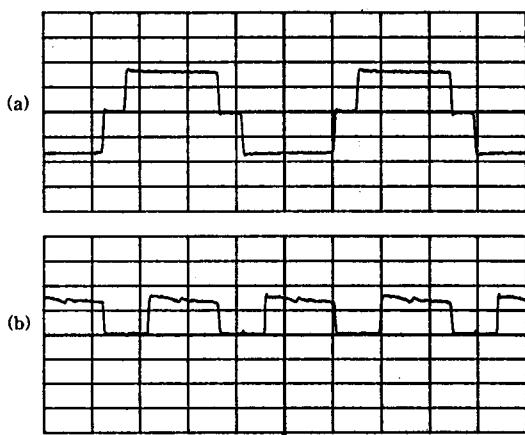


그림 10. 능동 클램프시 FB-ZVS 컨버터.
(a) 변압기 일차전압 (b) 변압기 이차전압
(10 μ s/Div, (a) 100V/Div, (b) 50V/Div)

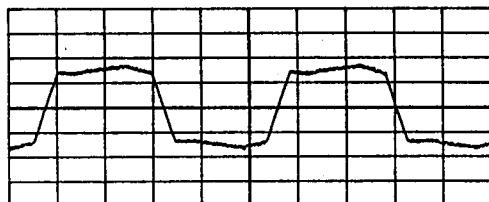
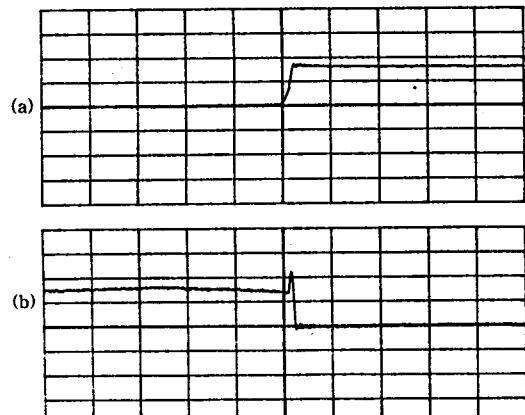
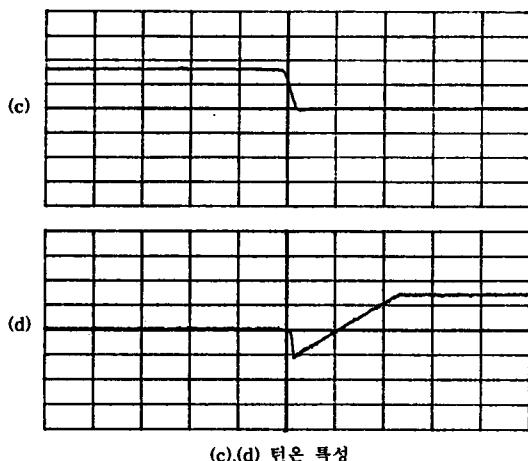


그림 11. 능동 클램프시 변압기 일차전류.
(10 μ s/Div, 5A/Div)



(a),(b) 턴오프 특성



(c),(d) 턴온 특성

그림 12. 능동 클램프시 주 스위치의 스위칭 특성.
(2 μ s/Div, (a) 100V/Div, (b) 5A/Div, (c) 100V/Div, (d) 5A/Div)

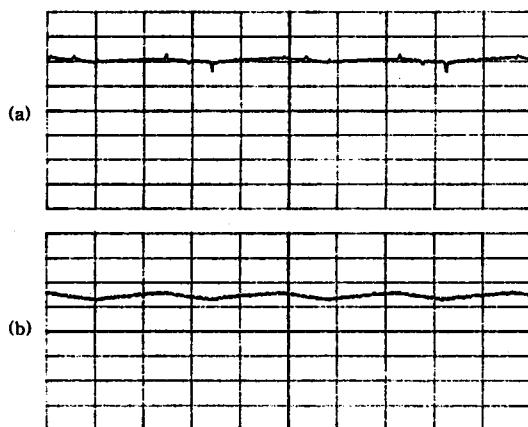


그림 13. 능동클램프시 출력전압, 필터 인덕터전류.
(10 μ s/Div, (a) 30V/Div, (b) 10A/Div)

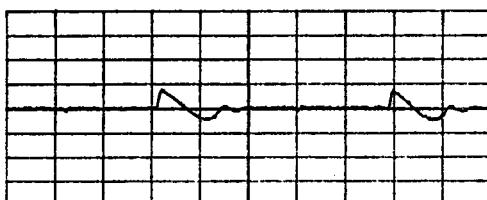


그림 14. 능동클램프전류.
(5 μ s/Div, 1A/Div)

RCD 클램프를 사용한 그림 9는 영전압스위칭은 달성되지만 이차전압에 렇효과를 완전히 없앨수는 없으며 능동클램프를 사용한 그림10 (b)에서는 이차전압이 완전히 클램프됨을 알 수 있다.

그림 11은 변압기 일차측 전류파형으로 그림 7의 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있다. 그림 12는 스위치 턴온·오프시 전압·전류 파형으로 영전압 스위칭이 이루어지고 있음을 보여준다. 그림 13(a)는 출력전압은 맥동이 거의 없는 DC전압을 나타내고 그림 13(b)는 일정한 맥동을 가지는 필터 인덕터전류를 나타내고 있다. 그림 14는 능동클램프 전류로 역별다이오드가 동작되고 전류가 영이 된 후 스위치가 턴온됨을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 대용량·고주파 충전회로의 제작을 위한 FB-ZVS 콘버터의 전력회로를 해석하였으며, 능동 클램프회로를 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검토하고 실험실 규모의 프로토타입을 제작하여 특성을 실험하였다.

실험결과 DC/DC 콘버터에서 ZVS가 이루어졌으며 이차측에 능동 클램프회로를 부가함으로써 링효과를 제거할 수 있었다. 따라서 대용량·고주파로 동작하여도 스위칭손실을 줄일 수 있어 콘버터의 효율을 높일 수 있었다.

7. 참고문헌

- [1] J. A. Sabaté, V. Vlatkovic, R. B. Ridley, F. C. Lee and B. H. Cho, "Design Considerations for High-Voltage High-Power Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converter", APEC 1990 REC., pp. 275 ~ 284
- [2] V. Vlatkovic, J. A. Sabaté, R. B. Ridley, F. C. Lee and B. H. Cho, "Small-Signal Analysis of Zero-Voltage-Switched, Full-Bridge PWM Converter", HFPC 1990 REC., pp 262 ~ 272
- [3] J. A. Sabaté, V. Vlatkovic, R. B. Ridley, F. C. Lee, "High-Voltage, High-Power, ZVS, Full-Bridge PWM Converter Employing an Active Snubber", APEC 1991 REC., pp. 158 ~ 163
- [4] Robert L. Steigerwald, Rik W. De Doncker, Mustansir H. Kheraluwala "A Comparision of High Power DC-to-DC Soft-Switched Converter Topologies", IEEE IAS conf. REC. 1994, pp. 1090 ~ 1096
- [5] Loveday H. Hweeene, Chris A. Wright, Martin F. Schlecht "A 1kW, 500kHz Front-End Converter for a Distributed Power Supply System", APEC 1989 REC., pp. 423 ~ 432
- [6] Unitrode Switching Regulated Power Supply Design Seminar Manual, 1991