

LLC 공진형 컨버터를 이용한 무정전전원장치 Battery Discharger 설계

유광민¹, 김승주¹, 김경동¹, 박승희¹, 변용섭², 임승범², 이준영[†]

LLC Resonant Converter design for Uninterruptible Power Supply Battery Discharger

Kwang-Min Yoo¹, Seung-Joo Kim¹, Kyoung-Dong Kim¹, Seung-Hee Park¹, Yong-Seop Byeon², Seung-Beom Lim², and Jun-Young Lee[†]

Abstract - An Uninterruptible Power Supply(UPS) is a system designed to deliver energy during accidents that the AC mains is out of its acceptable limits, without interruption of power flow through the load. Battery Discharger is the device to supply high quality power to the Inverter, when accidents occur, such as Power Failure. The Battery Discharger should have a fast response characteristics. The LLC resonant converter for UPS battery discharger is proposed. The proposed Battery Discharger offers substantial improvements in efficiency, size and cost. The proposed Battery Discharger of UPS approach is a good solution for high power applications above KW. To verify the validity of proposed Battery Discharger, simulations and experiments are carried out.

Keywords: uninterruptible power supply (UPS), LLC, battery discharger

1. 서 론

최근 상용전원의 정전 및 전압 변동에 민감한 산업용 첨단 장비, 의료기기, 컴퓨터, 금융, 사무용 기기 등 고도의 디지털 정보 처리기기의 사용이 증가하면서 UPS의 수요가 증가하고 있다. UPS의 가장 큰 목적은 정전과 같은 사고 발생 시 충전된 배터리를 이용하여 일정시간 동안 부하에 필요한 양질의 전압을 공급하는데 목적이 있다^[1].

UPS는 입력전압과 출력전압의 종속성에 의해서 크게 Passive-Standby, Line-Interactive, Double-Conversion 방식으로 구분된다^{[2][3]}. Passive-Standby은 평상시 상용전원을 출력에 공급하고 있다가 정전시에만 인버터를 동작시켜 부하에 전원을 공급하는 방식이다. 이 방식은 비

교적 효율이 높으며 가격이 저렴하다는 장점이 있으나 정전시 응답속도가 느리며 입력전압에 따라 출력전압이 크게 변동되는 단점이 있다. 주로 중용량 급에 사용된다. Line-Interactive 방식은 입력전압에 따라 출력전압이 크게 변동되는 것을 방지하기 위하여 입력측에 전압보상기를 추가한 방식이며 이에 따라 입력전압의 변동시 일정전압으로 유지시킴으로 인하여 출력전압을 안정적으로 공급하는 방식이며 소용량 UPS에서 주로 사용된다. Double-Conversion 방식은 상시 인버터 방식이라 하며 상용전원을 직류전원으로 변환하여 축전지를 충전하고 인버터 부를 통해 직류전원을 다시 안정된 교류전원으로 변환해 출력으로 보내는 방식이다. 비교적 안정된 전압을 공급할 수 있으나 전력변환기의 수가 증가함에 따라 효율측면에서 불리한 면이 있다. 위 방식은 대형 전산실, 공장자동화 장비 등의 전원 공급용으로 소형부터 대형 UPS에 사용되어지고 있다.

위의 3가지 방식 모두 에너지를 축적하는 배터리가 필요로 하고 있다. 그리고 배터리에 충전된 에너지를 통해서 비상시 인버터에 안정된 전압을 공급시켜주는 역할을 수행한다. 따라서 배터리와 인버터 사이에 Battery Discharger가 필요하게 된다.

Paper number: TKPE-2013-18-3-6 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: pdpljy@mju.ac.kr,
Dept. of Electrical Engineering, Myongji University
Tel: +82-31-330-6357 Fax: +82-31-330-6977

¹ Dept. of Electrical Engineering, Myongji University

² Eon Co., Ltd

Manuscript received Oct. 5, 2012; accepted Feb. 20, 2013

— 본 논문은 2012년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

배터리의 전압은 비교적 낮은 전압($55V_{dc} \sim 85V_{dc}$)이며 인버터의 입력전압은 비교적 높은 전압($760V_{dc}$)이므로 승압형 컨버터가 필요하게 된다. 따라서 전압비가 상당히 높으므로 트랜스포머가 필요하게 된다. 입력전류가 크므로 사용할 수 있는 토폴로지는 크게 Push-Pull타입, phase-shift full bridge컨버터가 기본적이라 하겠지만 push-pull 타입은 자기소자가 추가적으로 들어가 사이즈에 대한 측면에서 부족하며, 이에 따른 효율측면에서도 어려운 점이 있다. phase-shift full bridge컨버터는 스위칭 손실과 출력 인덕터 전류 리플이 적어대용량에 적합하지만 스위치의 환류전류로 인한 도통손실과 영전압 스위칭 동작 범위의 한계가 있으며, 변압기의 누설인덕턴스와 정류다이오드의 접합 캐패시턴스에 의한 Spike voltage로 인해 내압이 큰 다이오드가 사용되어야 하고, 고 전압 출력에서는 스너버 회로가 추가되어 사이즈와 효율 측면에서 부족한 면이 있다.

본 논문에서는 UPS Battery Discharger용 전력변환기로 LLC resonant 컨버터를 제안한다. 기존에 LLC resonant 컨버터는 비교적 입력전압보다 낮은 전압으로 강압하는 토폴로지에 대부분이 적용되었으나 UPS Battery Discharger처럼 입력전압보다 출력전압이 높은 어플리케이션에 적용하여 실험 검증하였다.

또한 최근 전력변환장치에서 디지털제어에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있어 무정전전원장치에서도 디지털 제어를 이용하여 실험을 진행하였다. 디지털 제어의 장점은 1-board화된 제어기로 여러 가지의 장치들을 동시에 제어할 수 있다.^[4] LLC resonant 컨버터의 제어는 두 개의 PWM신호와 하나의 출력전압을 센싱하기 위한 ADC(analog-digital converter)신호 하나만 필요하고 간단한 전압루프만으로 비교적 제어가 간단하다는 장점이 있다. 디지털 제어를 이용하여 3kW급 UPS Battery Discharger용 LLC 공진형 컨버터를 제작하고 이에 대한 타당성을 실험 및 검증하였다.

2. 제안한 UPS Battery Discharger

단상 UPS는 크게 PFC(Power Factor Correction), 인버터, 배터리 충전기와 방전기로 구성된다. 이에 관한 회로 구성도는 그림 1에 나타내었다. 시스템의 정상 동작시 PFC와 인버터가 동작을 하여 부하에 에너지를 공급하며 여분의 에너지는 Battery 충전기를 통하여 Battery에 에너지를 저장한다. 다음으로 정전 혹은 사고 발생 시 Battery의 충전된 에너지를 Battery Discharger를 통하여 인버터에 공급하게 되어 부하에 양질의 에너지를 공급하게 된다. 이때 Battery Discharger는 빠른 응답 특성을 지녀야 하며 특히 정전 등의 사고 시 빠르게 반응하여 부하에 안정된 에너지를 공급하여야 한다.

그림 2는 각 제안된 시스템의 동작 시퀀스를 나타낸 그림이다. Operation mode는 시스템의 전체 구성도를

나타낸 흐름도이다. 정상동작인 Normal Mode에서는 일반적인 동작모드로 AC 상용전원으로부터 역률개선을 통하여 인버터에 공급되어 부하에 안정적으로 에너지를 공급한다. Battery Mode에서는 AC 상용전원의 정전 혹은 사고 시에 Battery의 에너지를 Battery Discharger를 이용하여 인버터에 에너지를 공급한다. 이때 빠른 절체 시간이 필요하게 되며 빠른 응답특성은 Battery Discharger의 가장 중요한 역할 중에 하나가 된다.

본 논문에서는 3kW급 UPS Battery Discharger용 컨버터로 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. LLC 공진형 컨버터는 빠른 응답특성을 가지며 효율면에서 유리한 장점이 있다. 그리고 출력에 인덕터가 필요 없으며 스위치와 출력 정류기의 Turn-off전압이 입력과 출력 캐패시터에 의해 Clamping이 되므로 EMI에 유리하다. LLC 방식이 효율향상에 유리하지만 가변전압 범위가 좁아 별도의 제어방식이 고안되어야 한다. LLC 컨버터를 디

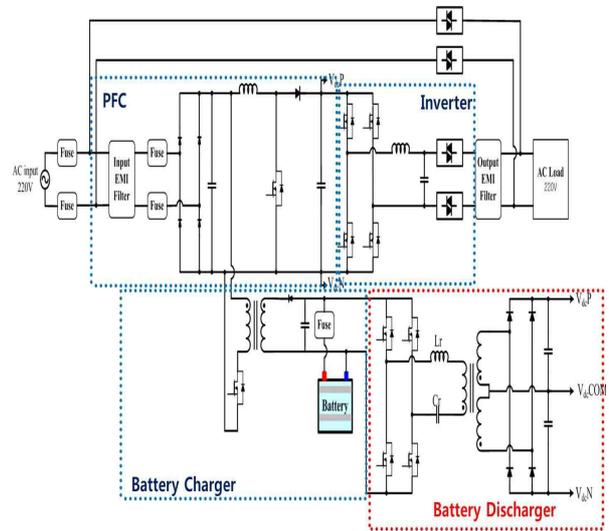


Fig. 1 Proposed UPS Circuit

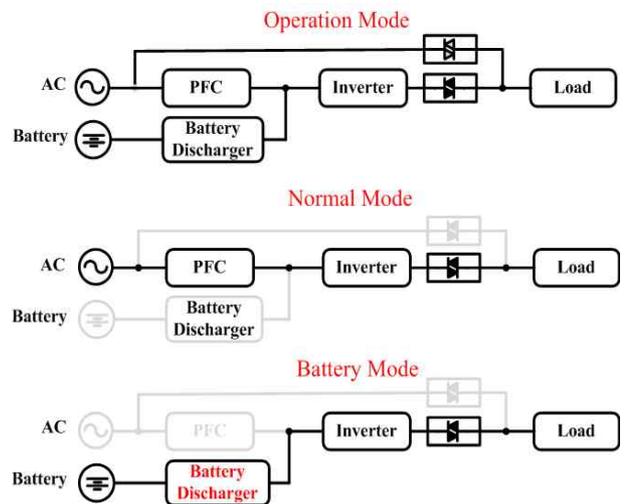


Fig. 2 Operation sequence of Proposed UPS

지터로 제어하고 중간부하 이하에서의 효율을 극대화하기 위해서는 부하에 따른 스위칭 주파수의 변위를 작게 설계하여야 한다. 그림 3은 LLC 트랜스포머의 양단 AC 모델링을 나타낸다. 모델링으로부터 구하여진 식 (1)은 변압기 2차 측 전류의 1차 환원 값이며 식(2)는 1차 harmonic만을 고려하였을 경우 트랜스포머의 1차에 걸리는 전압이다. 그리고 식(3)은 2차측 전압의 1차 환원 값이 된다. 식(1),식(3)에 의해 R_{ac} 값을 구하고 이 값은 출력 부하의 1차로 환원한 값이 된다. 식(5)는 등가회로의 임피던스를 이용하여 입력력 이득을 구한 값이 되며 식(6)은 입력력 크기만을 고려하고 이에 턴비(n)를 적용하여 최종 정리한 입, 출력 이득(G_{DC})이 된다. 여기서 트랜스포머의 턴비는 1:10이다. 부하에 따른 LLC 컨버터의 공진주파수 범위는 변압기의 자화 인덕턴스 L_M ($L_M=5\mu H$)과 누설인덕턴스 L_R ($L_R=2\mu H$)의 비인 $K(K=2.5)$ 값과 부하와 공진회로의 임피던스 비와 관계있는 Q(Quality factor)에 의해 좌우된다. n은 트랜스포머의 턴비, R_{ac} 는 부하저항의 AC모델, R_0 는 부하저항, F_R 은 LLC 공진형 컨버터의 공진주파수이다. 하드웨어의 시정수인 n, F_R , L_M , L_R 의 시정수 값은 전원장치 제작시 초기설정 고유의 값으로 정해진다. 그리고 부하 R_0 는 부하특성에 따라 변화하는 값이며 이에 따른 G_{DC} 가 변화하게 된다. 따라서 입, 출력 계인을 조정하기 위한 변수는 스위칭 주파수(F_s)이다. 원하는 출력전압을 제어하기 위해서는 LLC 공진형 컨버터의 스위칭주파수를 가변시켜야 한다. 스위칭 주파수(F_s) 제어 범위는 50kHz ~ 300kHz이며 공진주파수(F_R)는 70kHz이다. 실질적으로 제어를 위한 스위칭 주파수 (F_s)는 60kHz ~ 110kHz이다. 하지만 무부하시, 혹은 소프트 스타트를 위하여 제

어주파수 범위를 50kHz ~ 300kHz로 제한을 두었다. 이에 관한 부하변동에 따른 입력력 계인 그래프는 그림4에 나타내었으며 계인은 트랜스포머의 턴비(1:10)을 감안하여 0.76~1.18범위의 계인특성을 나타낸다. 영전압 스위칭 영역인 Region1과 영전류 스위칭 영역인 Region2를 사용하며 스위칭 주파수 가변범위는 상당히 적다. 일정 트랜스포머의 턴비로 송압된 전압을 간단한 주파수 제어 방식으로 Battery의 출력전압이 변동될 때 빠른 응답특성으로 인버터의 공급되는 입력전압 $760V_{dc}$ 를 유지할 수 있다.

$$I_{o1,ac} = \frac{\pi}{2} I_o \sin \omega t / n \tag{1}$$

$$V_{s,ac} = \frac{4}{\pi} V_i \sin \omega t \tag{2}$$

$$V_{o1,ac} = \frac{4}{\pi} V_o \sin \omega t \times n \tag{3}$$

$$R_{ac} = \frac{V_{o1,ac}}{I_{o1,ac}} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o \tag{4}$$

$$G_{ac} = \frac{V_{O,ac}}{V_{S,ac}} = \frac{R_{ac} // j2\pi F_s L_M}{j2\pi F_s L_R + \frac{1}{j2\pi F_s C_R} + R_{ac} // j2\pi F_s L_M} \tag{5}$$

$$G_{DC} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{n \sqrt{\left\{ 1 + \frac{1}{K} \left[1 - \left(\frac{F_R}{F_s} \right)^2 \right]^2 \right\}^2 + \left\{ \left(\frac{F_s}{F_R} - \frac{F_R}{F_s} \right) Q \right\}^2}} \tag{6}$$

$$F_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_R C_R}} \tag{7}$$

$$Q = \frac{1}{R_{ac}} \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}, \quad K = \frac{L_M}{L_R} \tag{8}$$

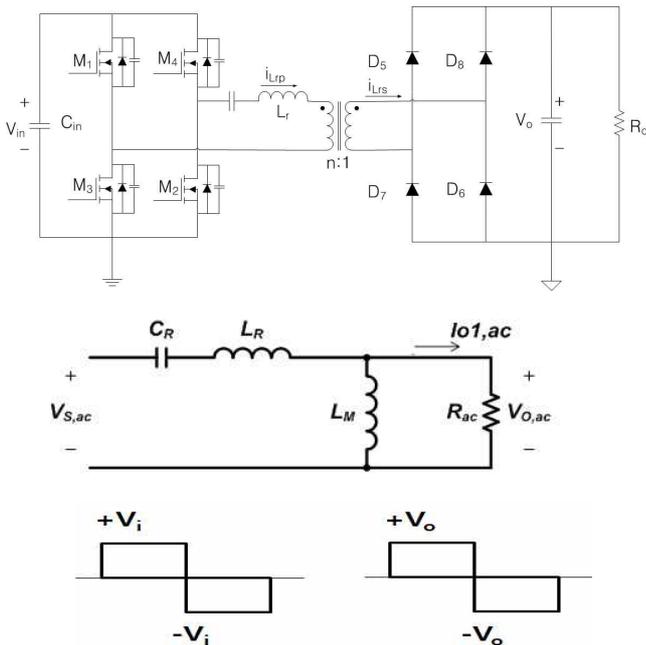


Fig. 3 LLC AC modeling

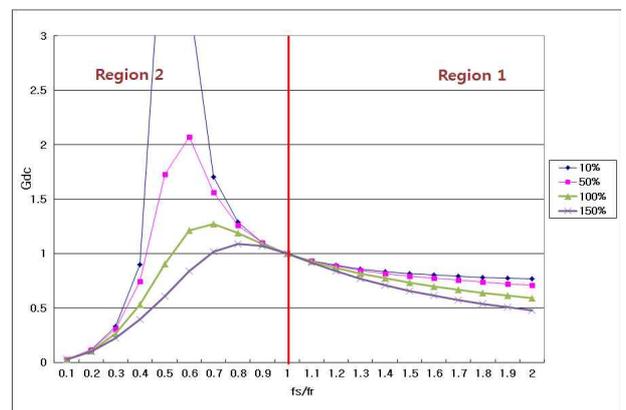


Fig. 4 Input/output characteristics of LLC Converter

그림 5는 제안한 Battery Discharger인 LLC 컨버터의 제어기 블록도이다. 제어 방식은 간단하며 실질적인 제어는 출력 정전압 제어이다. 지령값인 V_o^* 와 실제전압 V_o 와 비교하여 비례적분기 제어기를 이용하여 제어한다. 여기서 LLC resonant 컨버터의 출력전압 제어는 스위칭 주파수를 변화시켜 출력전압 레퍼런스를 추종하게 된다. 이때 제어기의 일정범위를 정하여 순간적으로 큰 에러가 발행하여도 Anti-Windup 제한기를 통하여 사고를 미리 방지한다. 여기서의 Anti-Windup 제한의 주파수 범위는 50kHz~300kHz로 설정하여 이상동작을 방지하였다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 LLC컨버터의 동작특성을 알아보기 위해 시뮬레이션 프로그램인 Psim을 이용하여 모의 실험을 실시하였다. 입력전원인 Battery전압은 부하에 따라 가변이 된다. 따라서 Battery의 전압이 변동될 시 출력전압은 항상 일정하게 유지되어야 한다. 그림 6은 Battery 전압가변에 따른 출력 정전압제어 시뮬레이션 회로도 및 파형이다. 시뮬레이션 조건은 넓은 입력범위의 $55V_{dc} \sim 85V_{dc}$, 출력 $760V_{dc}$ 제어설정을 하였다. 이때 부하는 3kW이다. V_o 는 Battery Discharger의 출력전압, I_o 는 출력전류, I_r 는 공진전류이다. 입력전압 가변에 따른 출력전압은 $760V_{dc}$ 로 정전압 제어를 하고 있음을 알 수 있으며 출력전류 또한 일정한 부하를 담당하는 것을 확인 할 수 있다.

4. 실험 결과

표1은 UPS battery discharger의 실험사항, 조건 및 중요한 소자를 나타낸 표이다. 입력 배터리 전압은 $55V_{dc} \sim 85V_{dc}$ 이며 UPS의 정상 운전시 배터리의 전압은 Battery Charger에 의해서 완전충전상태로 유지한다. 비상시에 battery discharger가 동작을 하여 부하에 공급하게 되는데 이때 55V이하로 배터리 전압이 내려가면 배터리 전압을 차단하여 배터리를 보호한다. UPS는 기본적으로 부하에 공급하는 전압이 차단이 되지 않도록 하는 장비이며 정전 시 빠르게 부하에 전력을 공급하는 시간이 4ms이하이면 UPS 제작 업체 측에서는 통상적으로 무순단 절체라고 한다.

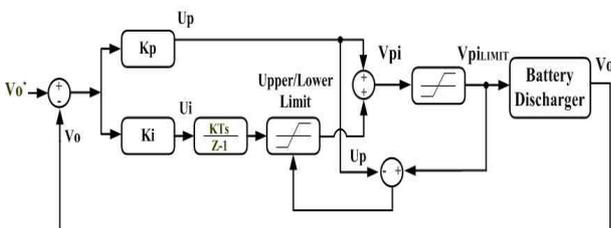
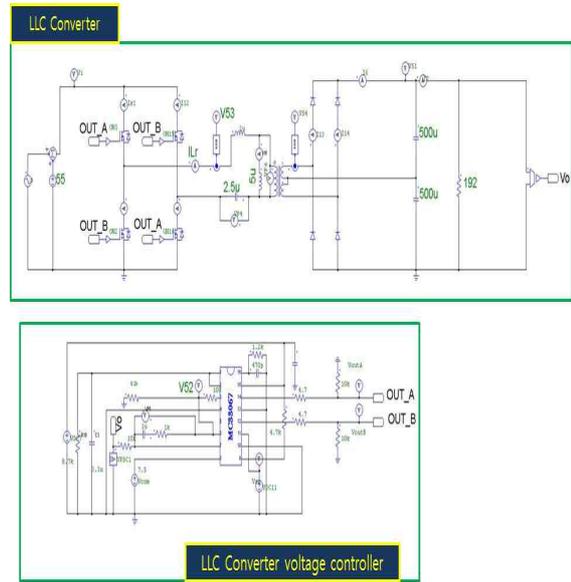


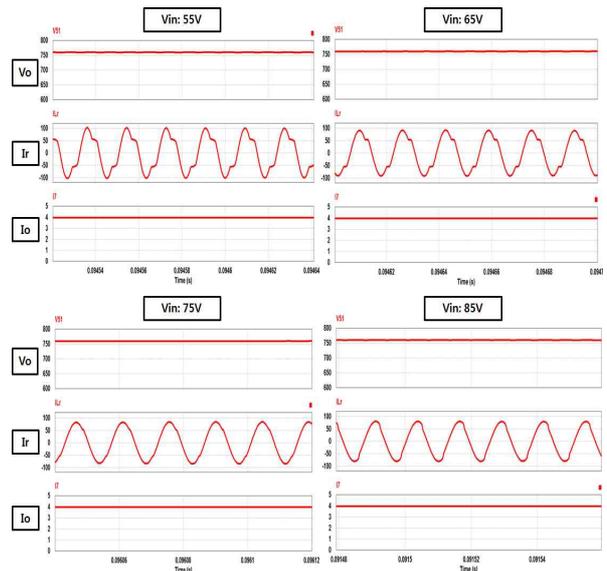
Fig. 5 The control block diagram of Battery Discharger

Table 1 Specifications of UPS Battery Discharger

UPS Battery Discharger	
V_{in}	$55 \sim 85V_{dc}$
P_o	$760V_{dc}/3.94A$ (3kW)
LLC switching frequency	50kHz~300kHz
LLC resonant frequency	70kHz
MCU(dspIC)	TMS320F28335
L_M	5uH (PQ5050)
L_R	2uH (PQ4040)
K factor	2.5
Dynamic test for black-out	less than 4ms
Over load test	150% load (10 second)



(a) Circuit diagram for simulation



(b) Simulation result of LLC converter (V_{in} : 55Vdc, 65Vdc, 75Vdc, 85Vdc, V_o : 760Vdc @ 3kW)

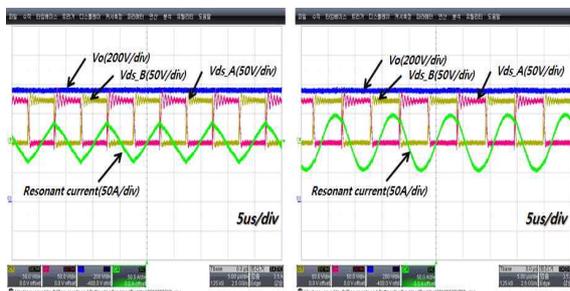
Fig. 6 Simulation for proposed UPS Battery Discharger

따라서 본 논문에서는 이를 충족시키기 위해 400us의 절체시간을 확보했다. 하드웨어의 구성은 트랜스포머는 PQ5050을 사용하였으며 1차측 누설인덕턴스가 적어 외부에 보조 인덕터(PQ4040)를 추가하여 이를 공진에 필요한 누설 인덕턴스를 대신하게 하였다. 공진주파수는 70kHz로 설정하였으며 760V_{dc} 정전압 제어를 수행한다. 제어기로는 TI社의 TMS320F28335를 사용하였다.

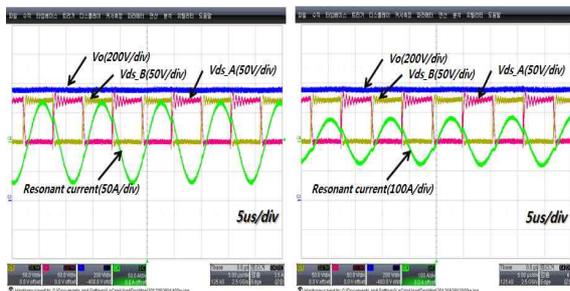
그림7은 본 논문을 위해 제작된 실험장치의 사진이다. 구성은 PFC(Power factor correction), LLC resonant



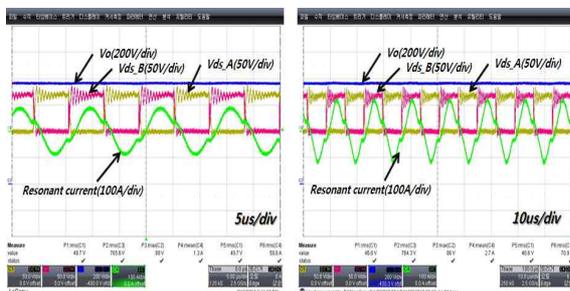
Fig. 7 Experimental Equipment



(a) 0W, 700W @ 760Vdc



(b) 1.4KW, 3KW @ 760Vdc



(c) 3.3kW, 4kW @ Vo=760Vdc

Fig. 8 Waveform of UPS Battery Discharger

converter(Battery Discharger), Inverter로 구성되어진다. 그림 8은 LLC 컨버터의 부하별 측결과형이다. 110%, 150% 과부하 내량테스트도 진행하였으며 모든 영역에서 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다. 그림 9는 정전시 LLC 컨버터가 동작을 하게 되는데 컨버터 기동시 큰 돌입전류가 발생 할 수 있으므로 소프트 스타트를 적용하여 서서히 전류가 증가 하도록 하는 제어실험을 진행한 파형을 나타낸 그림이다. 또한 부하 급변 시 제어기의 빠른 응답 특성을 통해서 안정적으로 출력전압을 유지하는 것을 확인 할 수 있다.

마지막으로 그림 10은 정전테스트를 실험한 파형이다. V_{ac}는 입력 상용전원이며 Vo는 인버터 측에 공급되는 전압, Vds_A는 스위치 양단 전압, Inverter Vo는 부하에 공급되는 인버터의 출력전압이다. 그림10(a)를 살펴보면 정전 시 상용전원이 차단되면 Battery Discharger가 동작하여 인버터 측에 공급되는 전원 760V_{dc}가 일정하게 유지되어 부하에 안정적인 에너지를 공급하는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 10(b)를 살펴보면 입력 상용전원이 차단되어도 Battery Discharger로 인해 Battery에 충전된 에너지가 인버터에 공급되어 입력상용전원과 동상인 AC전원이 부하에 공급되는 것을 확인 할 수 있으며 그림 10(c)를 보면 정전 시 약 400us 이내에 Battery Discharger가 동작하여 무순단 동작을 하는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 UPS Battery Discharger용 3kW급 LLC 공진형 컨버터를 설계하고 실험 검증하였다. 무순단을 목표로 하여 400us이하의 절체시간을 확보했다. 그림 11은 입력전압 72V_{dc}, 출력 760V_{dc}시 효율 그래프를 나타내었다. 효율은 전부하의 약 10%이상 부하영역에서 95%이상으로 고효율을 달성하였으며 최대효율은 50%부하에서 96.5%이다. 정전시의 빠른 응답특성으로 안정적인 에너지를 공급함을 확인함으로 UPS Battery Discharger로써의 유용성을 확인 하였다.

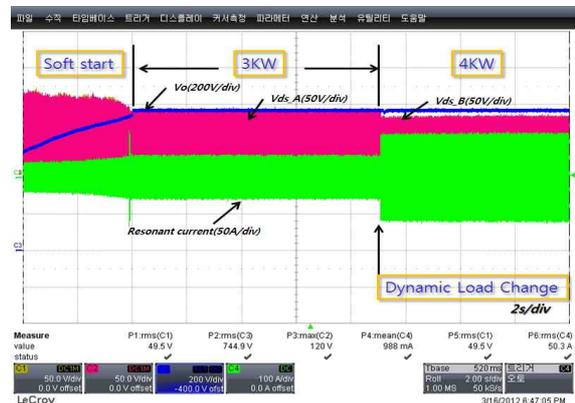
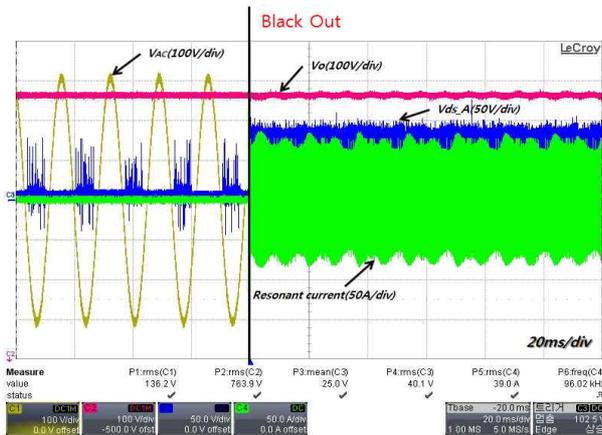
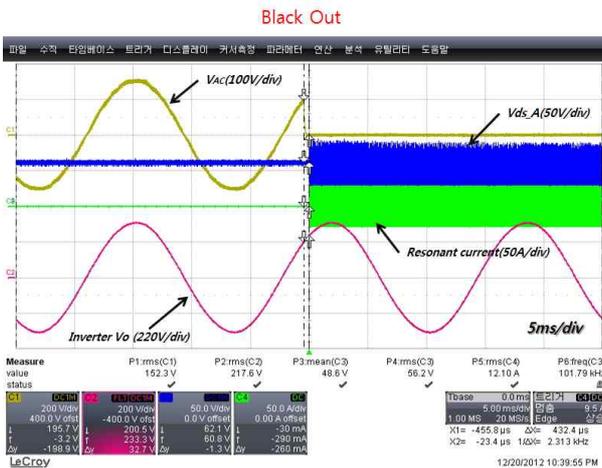


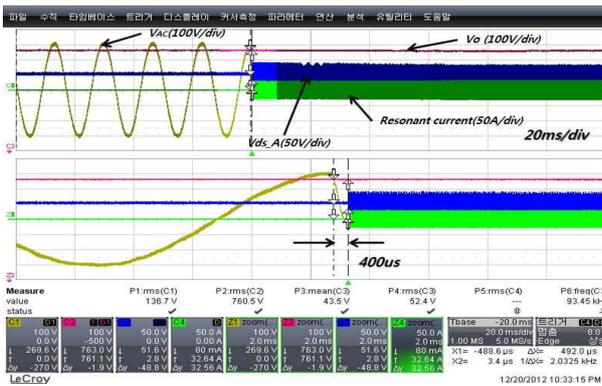
Fig. 9 Dynamic load change waveform of UPS Battery Discharger



(a) Experimental results of Battery Discharger



(b) Experimental results of Inverter and Battery Discharger



(c) Transient response during black-out

Fig. 10 Experimental results of Black-Out test

이 논문은 (주)이온의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구임

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20114010203030)

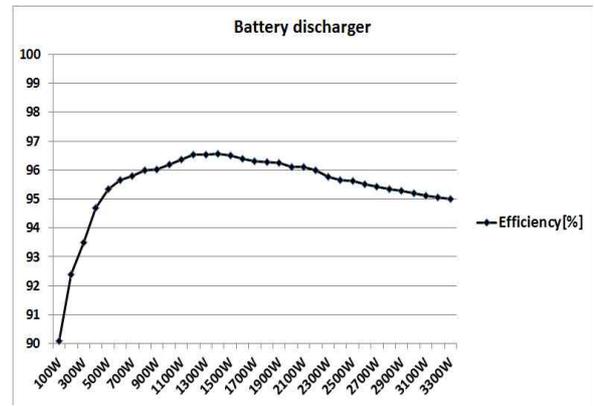


Fig. 11 Efficiency of Battery Discharger ($V_{in}=72Vdc$, $V_o=760Vdc$)

References

- [1] Seung-Beom Lim, Yun-Ha Lee, Jun-Keun Ji, Soon-Chan Hong. "Development of Single Phase UPS for Low Cost and High Performance," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 199-200, Nov. 2011.
- [2] Dipl.-Ing. Wilhelm Solter, "A New International UPS Classification by IEC 62040-3," *Proc. of Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 541-545, 2002.
- [3] S. Karve, "Three of a Kind[UPS Topologies, IEC Standard]," *IEEE Review*, Vol. 46, No. 2, pp. 27-31, Mar. 2000.
- [4] D. U. Kim, H. J. Shin, S. P. Ryu, B. G. Min., "Development of UPSs Using DSP," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 292-295, Jul. 2001.



유광민(俞光敏)

1978년 5월 26일생. 2004년 단국대 전자공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2009년~현재 명지대 대학원 전기공학과 박사과정.



김승주(金昇柱)

1988년 1월 20일생. 2012년 명지대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김경동(金逕東)

1986년 12월 20일생. 2010년 대덕대 전기공학과 졸업. 2011년 평생교육진흥원 졸업. 2013년 명지대 전기공학과 졸업(석사).



박승희(朴昇熙)

1985년 12월 6일생. 2011년 명지대 전기공학
학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과
졸업(석사).



변용섭(邊勇燮)

1979년 12월 23일생. 2008년 아주대 전자공
학부 졸업. 2013년~현재 명지대 대학원 전
기공학과 석사과정.



임승범(林承範)

1979년 2월 11일생. 2004년 단국대 공대 전
기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학
과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전
자전기공학과 박사과정. 2007년~현재 이온
연구소 과장.



이준영(李竣榮)

1970년 10월 3일생. 1993년 고려대 전 기
공학과 졸업. 1996년 KAIST 전기 및 전자공
학과졸업(석사). 2001년 동 대학원 졸업(공
박). 2001년~2005년 삼성 SDI PDP사업부
과장. 2005년~2008년 단국대 전자공학과
조교수. 2008년~현재 명지대 전기공학과 부교수. 당 학회 편
집위원.