論 文 15-6-6

2010 전력전자학술대회 우수추천논문 / 외부장학금 수혜논문

전기자동차용 배터리 충전기

尹修永*, 蔡亨準**, 金元溶*, 文炯台****, 鄭裕錫***, 李埈榮†

Battery Charger for EV

Su-Young Yun, Hyung-Jun Chae, Won-Yong Kim, Hyung-Tae Moon,
Yu-Seok Jeong, and Jun-Young Lee

요 약

최근 화석 연료의 고갈과 이산화탄소 배출 제한으로 인하여 내연기관 자동차에서 전기 자동차로의 대한 관심이 높아지고 있다. 전기 자동차 에너지 저장 요소인 배터리 충전에 필요한 AC-DC 컨버터가 필요하며 컨버터의 필요 조건 으로 넓은 출력 전압 범위, 고효율, 높은 역률 등을 들수 있다. 넓은 전압 범위와 절연을 위해 2단 구성 하였다. 앞단은 LLC 컨버터를 후단은 역률을 고려 하여 BOOST 컨버터를 이용한 PFC 회로를 구현하여 실험적으로 확인 하였다.

ABSTRACT

The interest is coming to be high, recently with depletion of the fossil fuel and with carbon dioxide exhaust limit about emittion, from a car of Internal combustion engine to Electric vehicle. AC-DC converter is necessary to battery charging which is an electric vehicle energy storage. Necessary conditions of the converter are necessary for wide output voltage range, high efficiency, high power factor etc.It is composed two stages for wide output voltage range and insulation. Preliminary stage uses LLC resonant converter and the after stage uses BOOST converter PFC circuit for being considered a power factor and confirmed experimentally.

Key Words : AC-DC converter, PFC, Charger, LLC resonant converter, EV(Electric vehicle), Boost

1. 서 론

최근 화두는 친환경적인 제품과 에너지 자원의 고갈에 따른 대체 에너지의 관한 연구이다. 친 환경적이고 효율적인 에너지원인 자동차를 원하고 있다. 이에 발맞춰 내연 기관 자동차에서 전기 자동차 시대로 변화 되어 가고 있다. 구성 요소 또한 대체 되어 가고 있다. 그 대체품으로는 내연 기관을 대체하는 전동기, 연료 탱크는 배터리로 대체 되었으며, 또 다른 요소로 주유기는 충전기로 대체 되었다. 이 배터리 저장 장치는 전압 변동이 큰 것이 단점이다. 이때 계통과의 효율적인 측면과 고조파 문제를 해결 하기 위하여 역률 개선 회로와 출력전압 레귤레이션이 용이한 회로를 선택 하여야 한다.

역률 개선 회로로는 기본적인 비절연형 컨버터로는 벅, 부스트, 벅-부스트 회로가 있으며, 이중 데드존이 없어 역률에 우수한 부스트 회로를 선택 하였다. 또 다른 부분은 계통과 배터리와의 고장 시 절연을 위하여 LLC 공진형 컨버터를 선택하였다. 기존에는 LLC 공진 컨버터의 주파수 가변을 통하여 회로를 제어 함

†교신저자 : 정회원, 명지대 전기공학과 부교수
E-mail : pdpljy@mju.ac.kr
*학생회원, 명지대 전기공학과 석사과정
**정회원, 명지대 전기공학과 박사과정
***정회원, 명지대 전기공학과 조교수
****정회원, (주) 만도 중앙연구소 책임연구원
접수일자 : 2010. 8. 16 1차 심사 : 2010. 9. 12
심사완료 : 2010. 10. 3

으로써 제어기가 복잡한 면이 있었다. 하지만 이 논문에서 제안한 공진형 컨버터는 1차측의 스위치를 풀 브리지 모드와 하프 브리지 모드를 동작 함으로써 링크 전압을 일정하게 유지하여 주기 때문에 부스트에서 담당하는 제어기가 간단해 진다. 또한 PFC 회로가 앞단에 있고 공진형 컨버터가 뒷단에 있는 것이 일반적인 것이지만 이 또한 링크 전압 제어를 위하여 링크 캐패시터를 큰 용량을 달아야 하는 문제점이 있다. 자동차에서는 전해 캐패시터을 못 쓰도록 되어 있어서 필름 캐패시터를 사용 하여야 되지만 이렇게 되면 사이즈가 또한 커진다는 단점이 있다. 충전기는 충전 속도에 따라 완속 충전기와 급속 충전기가 있으며, 충전기의 위치 탑재형과 별치형으로, 충전 방식에 따라 온 라인과 오프 라인으로 종류가 분류된다.

본 논문에서는 기존의 방식 가지는 단점을 보완하는 방식중 하나로써 링크 캐패시터의 용량을 줄일 수 있으며 전기적인 절연과 동시에 효율적인 에너지 전달을 위한 LLC 공진형 컨버터와 부스트 PFC회로를 이용한 탑재형, 고효율, 완속식 단방향 AC-DC충전기를 제안한다. 제안한 컨버터는 공진을 이용하여 소프트 스위칭 동작을 하므로 효율이 높으며 권선비와 부스트 회로만을 갖고 제어를 하기 때문에 제어기가 간단하다. 제안한 회로를 실험적으로 검증한다.

2. 본 론

2.1 2단 구성 방식의 AC-DC 배터리 충전기

본 논문에서 제안된 AC-DC컨버터는 그림 1에서 보는 것과 같이 LLC 공진형 컨버터와 부스트 컨버터의 2단 구성과 제어기, 보조전원(SMPS)로 구성 되어있다. 출력단에 PFC 회로가 위치 하기 때문에 배터리가 출력 캐패시터 역할까지 함으로써 컨버터의 캐패시의 전체 파워 LLC 공진형 컨버터는 고정 시비율 동작하며 1차측의 모드 변환을 통하여 링크 전압을 항상 일정하게 유지하여 준다. 이때 링크 전압은 부스트 컨버터의 입력이 되기 때문에 배터리(부스트 출력전압) 최저 전압 보다 낮게 되어야 된다. LLC 1차 라인과 입력단의 AC-DC 정류기 사이에 과전류를 검출하여 회로를 보호하는 회로를 구성 하였다. LLC 회로에서 소프트 스위칭 동작을 가능하게 함으로써 스위칭 손실을 줄여 효율을 향상 시킬 수 있다. 입력 파워는 LLC 1차 측의 모드 변환을 통하여 일정 전압이 트랜스 포머 1차측에 걸리게 하여 권선비에 의하여 2차측의 링크 전압을 만들어 주는 역할과 1차측의 계통과 2차측 배터리와의 절연 기능을 가지고 있다. 상용 전원의 입력은

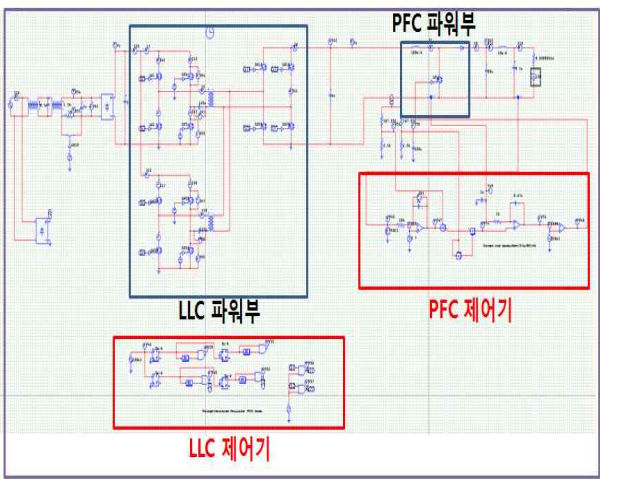

그림 1 제안한 AC-DC 컨버터
Fig. 1 Proposed AC-DC Converter

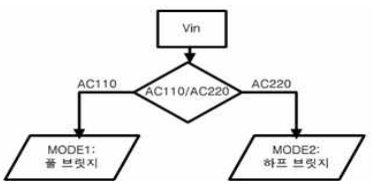

그림 2 LLC 1차측 모드 변경 블럭도
Fig. 2 Mode changing block in LLC primary side

110Vac와 220Vac이므로 그림 2와 같이 LLC 공진형 컨버터가 110Vac 입력 일 경우 1차측을 풀 브리지 모드와 220Vac 입력 일 경우 하프 브리지 모드로 동작함으로써 트랜스 1차측에 걸리는 전압이 일정하게 유지하여 트랜스 포머 권선비에 의하여 DC 링크 전압을 일정한 수준의 전압 120V를 얻을 수 있도록 설계하였다. 링크전압을 일정하게 하기 위한 특별한 제어를 하지 않기 때문에 권선비에 의한 전압 강하만으로 전압을 제어 하며 트랜스 포머의 권선비는 1(1차측): 0.7(2차측)로 설정 하였다.[2]

DC 링크 전압은 부스트 컨버터의 입력이 되며 이것을 이용하여 이 컨버터는 출력 전압, 전류 제어와 역률 개선을 담당한다. [1]

2.2 시스템 구성

컨버터의 전체 시스템 구성은 고정 시비율로 동작하는 LLC 컨버터와 출력단의 전압, 전류를 제어하는 부스트 컨버터가 위치 하는 2단 형태의 파워 회로와 이를 제어하는 DSP(TMS320F28335)보드 보조전원(SMPS)으로 구성 되어 있다. 시스템의 출력 단에 있

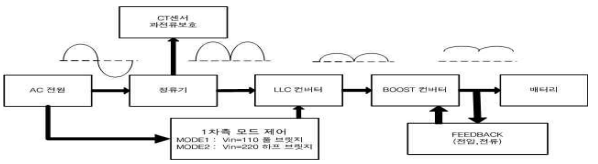

그림 3 전체 시스템 블록도와 전압 파형
Fig. 3 Whole system block with voltage waveforms

는 배터리 특성상 출력 전압이 가변 될 수 있으며, BOOST 컨버터의 입력 전압은 출력 전압의 최저 전압보다 낮게 설계 되어야 한다.

LLC 컨버터를 거쳐 나온 DC 링크 전압을 가지고 부스트 컨버터는 출력을 제어 하게 된다. 출력의 전압과 전류 제어는 부스트 컨버터의 DUTY를 조절하여 제어 하게 되고, 과전류가 흘러 회로가 파괴되는 것을 방지하기 위하여 CT센서를 LLC컨버터 앞단에 연계 하였다. 회로를 2단 방식으로 설계한 이유는 제어 설계의 복잡성을 줄이고 회로가 갖는 스트레스를 분담하여 보다 높은 효율을 가지기 위해서 이다.

이때 링크 전압은 낮고 전류는 높게 됨으로 다이오드 정류기를 사용하지 않고 효율과 발열면에서 이와 같은 토폴로지에 유리한 스위칭 정류기(SR)을 사용한다.부스트 컨버터에서 이뤄 지는 인덕터의 전류 제어 방식은 평균 전류 제어를 이용한 CCM 모드로 구현한다. 과전류가 흘러 회로가 파괴되는 것을 방지하기 위한 시스템 구성은 CT 센서를 LLC 컨버터 앞단에 연계 하여 일정 전류 이상이 흐르게 되면 제어기에서 게이트를 OFF하여 회로를 보호 한다. 이때 회로의 입력에서 부터 출력 까지의 파워부와 제어를 담당하는 제어 부로 구성 되어있다. 다음은 그림 3이 전체 시스템의 블록도와 전압 파형을 보여 준다.

2.2.1 LLC 컨버터

그림 4는 LLC 컨버터를 도시 하였다. 회로는 공진을 이용한 풀 브리지 모드와 하프 브리지 모드 두 가지로 구성 하였다. 이 토폴로지의 장점은 다른 절연형 컨버터가 변압기의 누설 인덕턴스로 인해 효율이 저감되는 것에 반해 LLC 공진 컨버터는 누설 인덕턴스를 이용하여 에너지를 전달 함으로 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 설계된 회로에서 공진 효율을 높이기 위해 상단과 하단의 스위칭 소자의 게이트 펄스간의 데드 타임을 최소한으로 줄여 듀티를 생성 하였다. 풀 브리지 모드일 경우는 데드타임이 300nS이며, 하프 브리지일때는 430nS로 하였다. 하프브리지의 경우 풀브리지와 같은 데드 타임을 주면 암쇼트 현상이 발생하

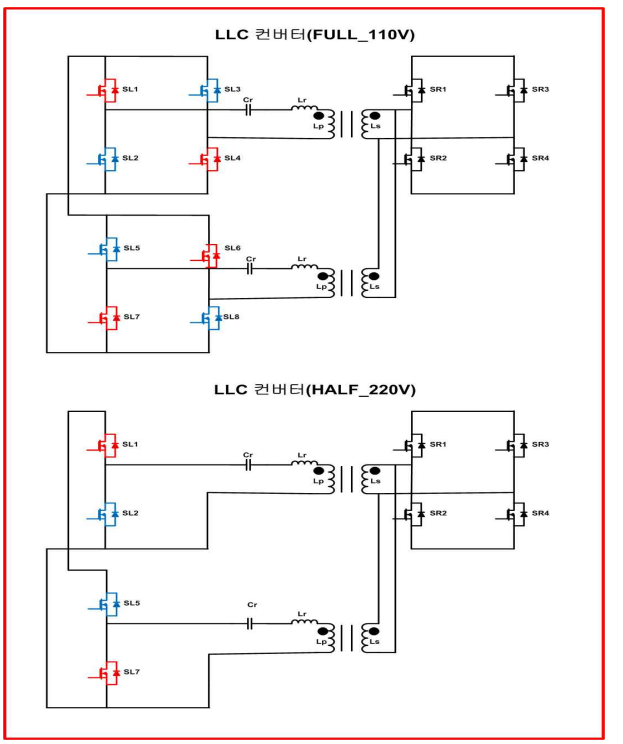

그림 4 LLC 컨버터 회로
Fig. 4 LLC converter circuit

여 안정성을 확보 하기 위하여 위와 같은 데드타임 변동을 주었다. 풀 브리지 모드일 경우 상보 스위칭을 하지만 하프 브리지 모드일 경우에는 같은 회로에서 하프 모드를 구성 하여야 되기 때문에 스위칭을 다음과 같이 한다. 다른 스위치는 게이팅을 풀 모드와 같이 하고 SL3, SL6은 항시OFF, SL4, SL8은 항시ON으로 동작 한다. 이렇게 되면 하프모드가 완성되며 1차측 트랜스에 걸리는 전압은 항상 일정하다. 병렬 트랜스의 1차측 같은 위치에 있는 스위치의 상보 신호를 사용 함으로써 모든 주기 동안 파워 전달이 가능하며 두 트랜스 포머의 1차측 공진 전류가 상보적으로 동작하게 되어 입력 전류 리플이 줄 일수 있었다. 변압기는 PQ4040으로 선정하여 10T:7T의 권선비로 제작 하였다. 위의 코어를 이용하여 공진에 참여하는 누설 인덕턴스 값을 적절하게 맞출 수 있었다. 공진 주파수는 다음의 식(1)으로 구할수 있으며, 계산 결과 약 93KHz의 값을 얻었고, 실험결과 91.8KHz에서 정현파 모양의 공진 전류 파형을 얻을수 있었다.

$$fs = fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{CrLr}} \quad (1)$$

스위칭 주파수를 공진주파수와 동기 시키면 식(2) LLC 공진컨버터의 Gain은 1이 되어 변압기 2차측 전압은 변압기 권선비에 의해서만 강압하게 된다. 이 LLC 공진을 통해 스위치의 스위칭 동작시 ZVS 동작을 하게 되어 스위칭 손실을 저감하게 된다.

$$G_{DC}=\frac{V_o}{V_i}=\frac{1}{n\sqrt{[1+\frac{1}{K}[1-(\frac{fr}{fs})^2]^2+(\frac{fs}{fr}-\frac{fr}{fs})^2Q^2}} \quad (2)$$

$$(fr=\frac{1}{2\pi\sqrt{LrCr}},\ R_{ac}=\frac{8n^2}{\pi}R_0,\ Q=\frac{1}{R_{ac}}\sqrt{\frac{Lr}{Cr}},\ K=\frac{Lm}{Lr})$$

2.2.2 BOOST 컨버터

그림 <5>는 제안된 BOOST 컨버터를 이용한 역률 개선 회로의 제어 블럭을 도시하였다. 회로는 기본적인 형태의 단방향 부스트 토폴로지로 구성 되었다. 전압제어는 일반적인 제어를 사용하며 전류 제어는 평균 전류 제어 방식을 사용한 CCM모드 제어를 사용하였다. 제어기는 두 가지의 루프를 가진다. 외부 루프는 전압을 내부 루프는 전류를 제어 하게 되며, 이 두가지 루프를 가지고 최종적으로 부스트의 듀티를 만든다. 입력 전류 파형과 인덕터 파형을 비교 하였을 때 파형의 모양이 일치 하면 역률이 높게 나오게 된다. 역률 보정을 위하여 입력의 전류 파형과 일치하는 전압 파형을 센싱 하여 레퍼런스를 만들고 인덕터의 전류가 이 레퍼런스를 추종 하게 제어기를 구성 함으로써 역률 보정 회로가 완성되며 이때 추종 전류 파형을 만들기 위해 COMP값의 변화를 줌으로써 듀티를 가변하여 CCM 모드로 동작하여 인덕터 파형이 입력 전류 파형을 추종 하게 되면 PFC 회로는 완성된다. 부스트의 인덕터 크기는 CCM 모드를 사용하기 때문에 큰 값의 인덕턴스를 요구 한다. 이에 맞게 계산된 값은 100uH이며 이 값을 만족 시키되 사이즈가 작게 설계 되어야 되므로 히스테리 곡선이 커 포화에 유리한 트로이달 코어를 사용하여 설계 하였다.[3]

2.3 모의실험

제안한 회로의 검증을 위하여 PSIM을 이용하여 모의실험을 진행 하였다. 입력 전력은 우리 가정에서 흔히 사용하고 있는 상용전원(220Vac)를 기준으로 3.3KW에서 진행 하였으며, 다음과 같은 인덕터의 파형이 입력 전압과 전류의 왜곡이 없이 잘 따라가고 있으므로 역률 개선 회로의 역할을 잘하고 있음을 알 수 있다. 이 회로에서의 스위칭 주파수는 LLC컨버터 100KHz이며 부스트는 동기화를 위하여 50KHz로 구성하였다. PSIM으로 구성한 회로는 이와 같은 조건을 가지고 그림 6과 같은 파형의 값을 얻었고, 이를 토대로 검증하겠다.

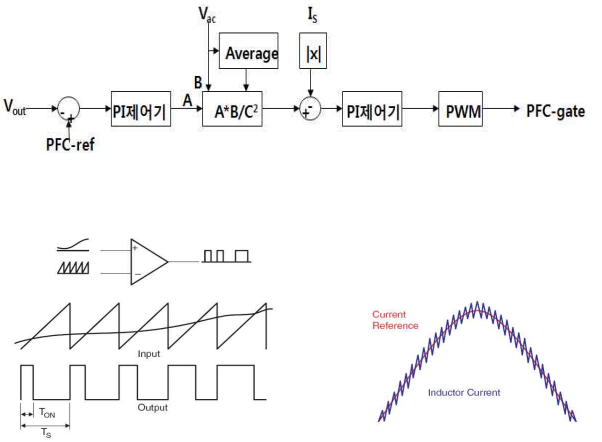

그림 5 PFC 제어 블록도 & 듀티
Fig. 5 Block of PFC controlled & Duty

<모의 실험 스펙>

입력전압	230V	입력캐패시터	1uF	누설인덕턴스	20uH
링크전압	110V	링크캐패시터	4uF	공진캐패시터	125nF
출력전압	120V	출력캐패시터	20uF		

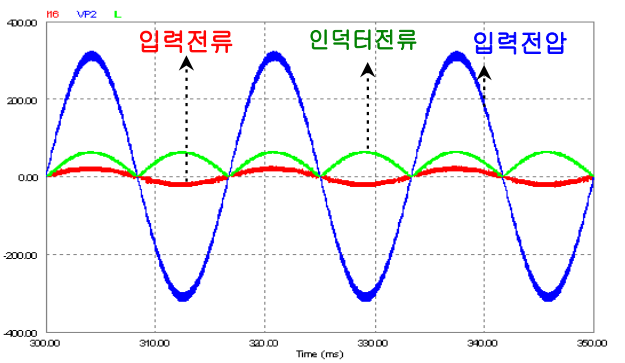

그림 6 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveform

2.4 실험 결과 및 검토

앞에서 구성한 내용을 바탕으로 상용 전원용 배터리 충전기를 제작하고 실험을 통하여 회로의 유용성과 신뢰성을 입증하였다. 위에 모의 실험과 달라진 점은 주파수와 자화 소자의 값이다. 공진형 컨버터를 사용하기 위하여 공진점을 맞추기 위하여 LLC주파수가 약

표 1 기본 파워부 스펙

입력 전압(vin)	110Vac(FULL_MODE1)	220Vac(HALF_MODE2)
최대 입력 전류(Iin.max)	15A	15A
최대 입력 전력(Pin.max)	1.6KW(MODE1)	3.3KW(MODE2)
LLC 스위칭 주파수	93KHz	93KHz
BOOST 스위칭 주파수	46.5KHz	46.5KHz

표 2 자화 소자 스펙 인덕터

인덕터 사양			
Ae	1.344cm^2	L Value	400uH
Aw	2.93cm^2	CORE	CH358060(2EA)
le	8.15Cm	TURN	58턴
		WIRE	1.5mm

표 3 자화 소자 스펙 트랜스포머

트랜스포머 사양			
TURN RATIO	1:0.7(10:7)	Pin	1600W
CORE	PQ4040	Kf	0.165
Lp(Lk_p)	110(15)uH	Del B	0.23T
Ls(Lk_s)	30(4)uH		

간 틀어졌고 이와 동기화 시키기 위해 부스트의 주파수 또한 정수배인 0.5배의 값으로 실험 하였다.

실험 사양 및 자화소자사양은 다음의 표 1,2,3와 같다.

아래 그림 7는 앞에서 설계한 내용을 토대로 실제 제작된 배터리 충전기용 AC-DC 컨버터 사진이다. 실제 크기는 230mm*200mm로 최초 실험을 위해 제작된 PCB이다. 이 하드웨어를 기반으로 그림 8와 그림 9의 파형을 얻었다. 그림 8은 부스트 컨버터의 인덕터의 전류 파형과 입력의 전류 파형과의 비교 통하여 역률의 개선과 제어의 성능을 확인 할 수 있다. 또한 그림 9은 LLC 컨버터가 하프 모드로 동작 할 때의 파형으로 공진 전류가 상보적으로 동작 하여 모든 주기 동안 파워가 전달이 됨을 알 수 있다.

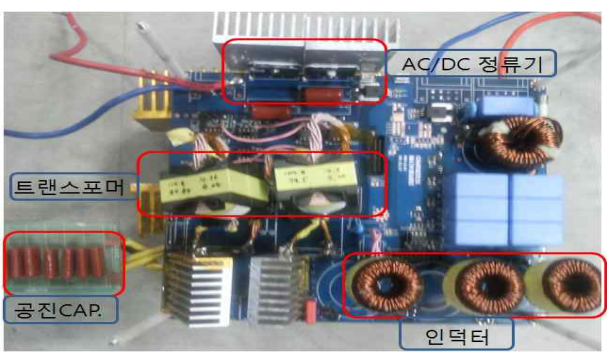

그림 7 AC-DC 배터리 충전기
Fig. 7 AC-DC Battery Charger

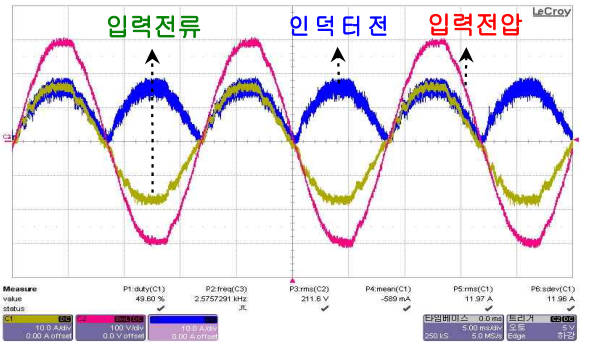

그림 8 하드웨어 측정 파형
Fig. 8 Hardware measurement waveform

그림 9 공진전류 파형
Fig. 9 Resonance curreunt waveform

3. 결 론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터와 BOOST 컨버터를 이용한 2단 구성의 전기 자동차용 배터리 충전기를 설계 및 제작하였다. 여기서 가장 중점적으로 해결한 문제는 전해 캐패시터를 사용하지 않고 필름 캐패시터로만 전체적인 토폴로지를 구성 하였다. LLC 공진형 컨버터를 이용하여 스위칭 손실을 최소화 시켜 2.7KW에서의 95%이상의 효율과, 부스트를 이용한 PFC회로에서도 99%이상의 높은 역률 임을 확인 하였다. 하지만 트랜스포머의 와이어에서 발열이 심하게 발생 하였다. 이를 개선하여 풀 부하까지 실험을 진행할 것이다. 낮은 입력 전력에서의 효율 개선 작업과 목표 전력인 입력 3.3KW까지 실험을 진행할 계획이다. 또한 다른 토폴로지와의 비교도 진행 할 것이다.

이 논문은 (주)만도 중앙 연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] 양 오, “DSP를 이용한 단상 PFC의 설계”, *전자공학회 논문지*, 제44권, pp. 57-65, 2007.

[2] Bo Yang and Fred C. Lee, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion", *APEC 2002*, Vol.2, pp. 1108-1112, 2002.

[3] V. Rao, A. jain, K.Reddy, A. Behal “Experimental Comparison of Digital Implementations of Single-Phase PFC Controllers”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 1, pp. 67-78, 2008, Jan.

저 자 소 개

윤수영(尹修永)

1983년 1월 16일생. 2009년 단국대 전자공학과 졸업. 2009년 명지대 대학원 전기공학과 입학.

채형준(蔡亨準)

1977년 7월 11일생. 2003년 단국대 전자공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2009년 명지대 대학원 전기공학과 입학.

김원용(金元溶)

1985년 5월 19일생. 2009년 평생교육원 전기공학과 졸업. 2009년 명지대 대학원 전기공학과 입학.

문형태(文炯台)

1967년 10월 14일생. 1990년 고려대 전기공학과 졸업. 1993년 KAIST전기및전자공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 졸업(공박). 1993년～현재 (주)만도 중앙연구소 책임연구원.

정유석(鄭裕錫)

1971년 5월 13일생. 1993년 서울대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001～2002년 위스콘신대(Special Student). 2005년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(공박). 1995년～1999년 기아자동차 주임연구원. 1999년～2001년 서울대 터보동력기계연구센터 전임 연구원. 2005년～2006년 현대자동차 선임연구원. 2006년～현재 명지대 전기공학과 조교수.

이준영(李埈榮)

1970년 10월 3일생. 1993년 고려대 전기공학과 졸업. 1996년 KAIST 전기및전자공학과졸업(석사). 2001년 동 대학원 졸업(공박). 2001년～2005년삼성 SDI PDP사업부 과장 2005년～2008년 단국대 전자공학과 조교수. 2008년～현재 명지대 전기공학과 부교수.