

싱글 코어 푸시풀 포워드 컨버터 동작특성

金 昌 宣[†]

Single Core Push Pull Forward Converter Operational Characteristics

Chang-Sun Kim

요 약

푸시 풀 포워드 컨버터는 넓은 입력범위에서 저전압 대전류 특성이 좋고 싱글 EI-EE 코어에 출력 인덕터와 변압기 그리고 입력 필터 등 모든 자성소자들을 포함시킴으로써 집적화할 수 있다. 회로의 여러 변수들에 대한 효율 비교를 통해서 집적화된 싱글 코어 푸시 풀 포워드 컨버터에 대해 고찰하였다. 푸시 풀 포워드 컨버터의 변압기는 Nicera사의 5M FEE 18/8/10C와 NC-2H FEI32/8/10C 코어를 이용하였다. 컨버터의 정격은 입력 전압 36~72V이며 출력은 3.3V, 30A이다. NC-2H FEI32/8/10C코어를 사용하였을 경우 스위칭 주파수가 200kHz이고 부하가 11A일 때 83.5%의 최고 효율이 측정되었다. 전부하(full load)시의 효율은 76.4%, 반부하(half load)일 경우에는 82.95%의 효율이 각각 측정됐다.

ABSTRACT

The push pull forward converter is suitable in a low output voltage, a high output current applications with wide input voltage ranges. All magnetic components including output inductor, transformer and input filter can be integrated into single EI/EE core. The integrated push pull forward converter is considered through the comparison of efficiency according to the circuit parameters. The Nicera company's 5M FEE18/8/10C and NC-2H FEI32/8/20 cores are used for the transformer. The integrated push pull forward converter ratings are of 36~72V input and 3.3V/30A output. In case that NC-2H FEI32/8/20 core used in the converter, the efficiency is measured up to 83.5% at the switching frequency 200 kHz and the 11A load. The efficiencies of 76.4% at a full load and 82.95% at a half load are measured.

Key Words : integrated push pull forward converter, integrated single magnetic components

1. 서 론

스위칭 전원공급 장치는 고주파수로 동작하면서 손실을 최소화할 수 있는 소프트 스위칭 방식의 컨버터 최적 설계기술을 바탕으로, 최소의 공간에서 적절하게 분산 배치시킬 수 있는 실장기술을 적용한 고전력밀도 스위칭 전원 기술로 발전해 가고 있다. 회로 설계에

있어서 공진형 컨버터의 경우 고주파 스위칭을 통한 고효율, 고전력밀도의 특성을 갖출 수 있으나 제어 방식의 문제점과 부품 소자의 한계 등으로 인한 설계에 어려움이 있다. 따라서 PWM 방식의 안정된 설계 방식을 확보하고 어느 정도 고전력밀도를 고려할 수 있는 소프트 스위칭 방식의 컨버터가 각광을 받고 있으나 고밀도 전원공급 장치의 소형화를 이룩하는데 있어 자성소자의 크기를 줄이는 데는 한계가 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점들 중에서 소형 경량화시킬 수 있는 방법의 하나로 회로 내의 모든 자성 소자를 하나의 자성 소자에 포함시킴으로써 구조적으로

[†]교신저자 : 정회원, 목포대 전기공학과 부교수

E-mail : cskim@mokpo.ac.kr

접수일자 : 2005. 8. 25

2차 심사 : 2005. 10. 18

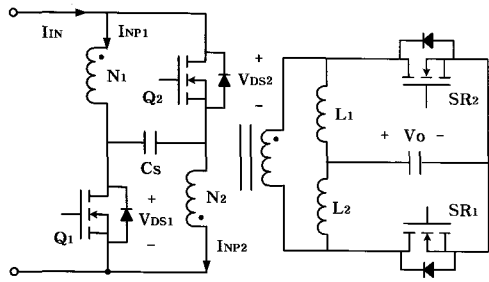
1차 심사 : 2005. 9. 13

심사완료 : 2005. 10. 20

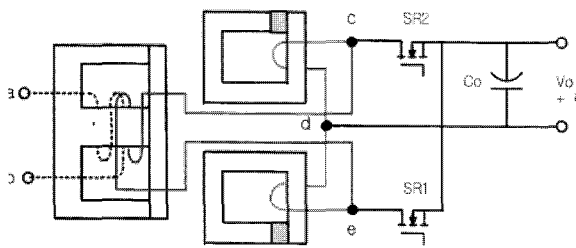
고밀도화 할 수 있도록 싱글코어에 입력필터를 통합한 푸시 풀 포워드 컨버터에 대해 특성을 비교 분석하였으며, 이 컨버터의 효율을 높이기 위해서는 멀티 변압기의 1차 측 권선들의 누설 인덕턴스와 클램프 커패시터 값을 최적화시키고 입력필터가 입력전류를 필터링시키고 최적의 출력 인덕터 값과 1, 2차 권선들 간의 결합률을 높이면 효율을 증가시킬 수 있다^{[1]-[5]}.

2. 일반적인 푸시 풀 포워드 컨버터

일반적인 푸시풀 포워드 컨버터를 그림 1에 나타내었다. 이 컨버터는 과도 응답과 효율에 매우 좋은 특성을 가지며 기존의 푸시 풀 컨버터에 클램프 커패시터로 구성되어 있다. 이 구조는 변압기 2차 측 부분의 권선이 간단하게 구성되며 또한 인덕터 전류와 변압기 2차 전류가 2배 낮은 배전류기(current doubler) 형태를 사용하여 손실을 줄일 수 있다.



(a) 푸시 풀 포워드 컨버터 회로
(a) Push-pull forward converter circuit



(b) 구분된 자성 회로
(b) Discrete magnetic circuit

그림 1 푸시 풀 포워드 컨버터
Fig. 1 Push-pull forward converter

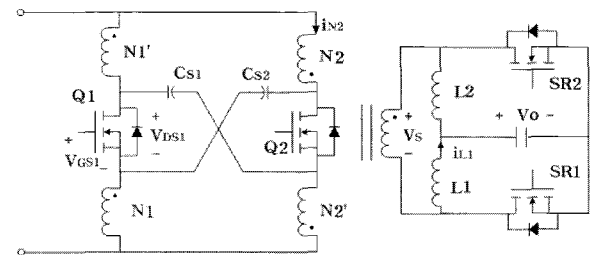
그림 1(b)에 푸시 풀 포워드 컨버터의 코어 구조를 나타내었다. 배전류기에서 변압기와 출력 인덕터를 따로 분리한 코어형태이다. 이 코어들은 3개의 전류 권선(a~b, c~e, c~d~e)과 5개의 전류 상호연결(a~b,

c~e, c~d, d~e, c~d~e)이 필요하다.

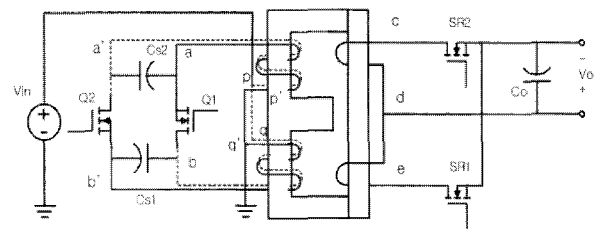
3. 싱글 코어에 필터를 통합시킨 푸시 풀 포워드 컨버터

3.1 기본적인 회로 특성

통합된 자성 요소들은 효율 향상과 자성 소자의 수를 줄이기 위해서 Multiphase VRM (Voltage Regulator Module) 형태로 사용된다. 모든 통합된 자성 소자들은 양쪽에 공극이 위치하고 중간에 권선을 감는 방법으로 하나의 코어에 통합시킬 수 있다. 그러나 코어 구조는 정밀함을 요구하고 양쪽에 공극이 존재하기 때문에 구조적으로 안정하게 할 수 없으며, EMI 발생의 원인이 된다. 통합된 자성구조에서 큰 누설 인덕턴스는 심한 기생 발진과 효율 감소의 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 배전류 정류에서 통합된 자성구조로 되어 있고 싱글코어에 C_{s1}과 C_{s2}로 구성된 입력필터를 통합한 푸시 풀 포워드(Push-Pull Forward) 컨버터를 그림 2에 나타내었다.



(a) 푸시 풀 포워드 컨버터 회로
(a) Push-pull forward converter circuit



(b) 구분된 자성 회로
(b) Discrete magnetic circuit

그림 2 입력 필터를 갖는 푸시풀 컨버터
Fig. 2 Push pull forward converter with the input filter

변압기 2차 측의 L₁, L₂는 출력 필터 인덕터의 역할을 하게 되고 변압기 1차 측의 누설 인덕턴스와 클램프 커패시터(C_{s1}, C_{s2})는 입력 필터역할을 하게 된다.

이 구조는 양쪽에 권선이 감겨 있으며 중간에 공극이 있다. 코어 구조는 물리적 안정성이 높고 크기도 줄일 수 있으며 가격도 낮고 제조하기도 쉬운 장점을 가지고 있다. 그리고 변압기의 2차 측 양쪽의 권선은 누설 인덕턴스를 최소화시킬 수 있으며 코어 손실과 권선 손실은 중간에서 리플 자속을 소거시키기 때문에 감소시킬 수 있다. 입력 필터는 변압기 1차 측 권선들 사이의 누설인덕턴스로 형성된다. 따라서 통합된 자성 구조에서는 단지 하나의 코어만을 사용하는 것이 가능하다.

3.2 동작 해석

그림 3에 입력 필터를 갖는 푸시풀 컨버터의 이론적인 파형을 나타내었고 그림 4에 각 모드 별 등가회로를 나타내었다.

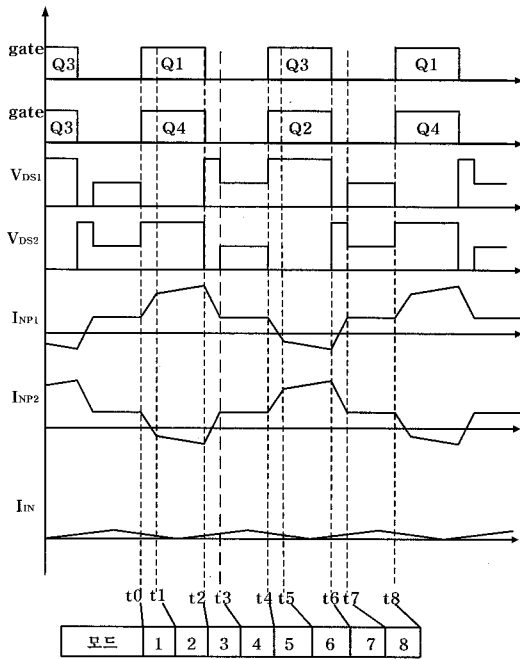
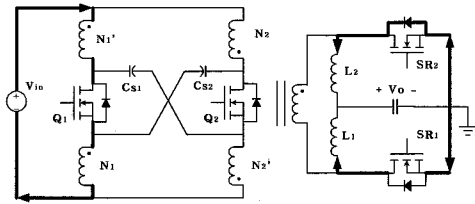


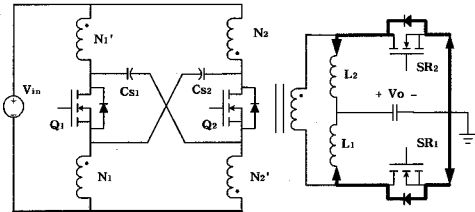
그림 3 이론적인 파형
Fig. 3 Theoretical waveforms

3.2.1 모드 1, 모드 2

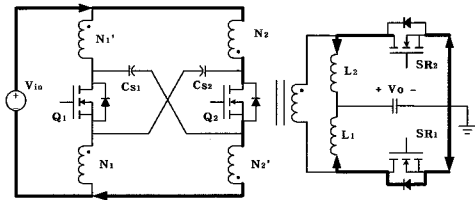
Q_1 은 도통, Q_2 는 차단 상태로 에너지는 변압기를 통하여 출력 측으로 전달된다. 이때 S_{R1} 은 도통 상태를 유지하며 S_{R2} 는 차단 상태로 있다. N_1' 의 누설 인덕턴스와 C_{s1} 커패시터와 함께 입력 필터를 형성하고 N_1 의 누설 인덕턴스가 C_{s2} 와 함께 필터를 형성하게 된다. 2차 측의 S_{R1} 은 채널을 통해 전류가 흐르지만 S_{R2} 는 바디 다이오드를 통해서 흐르게 된다.



(a) 모드 1, 모드 2
(a) Mode 1, Mode 2



(b) 모드 3, 모드 4, 모드 7, 모드 8
(b) Mode 3, Mode 4, Mode 7, Mode 8



(c) 모드 5, 모드 6
(c) Mode 5, Mode 6

그림 4 등가 회로
Fig. 4 Equivalent circuit

3.2.2 모드 3, 모드 4, 모드 7, 모드 8

Q_1, Q_2 는 차단상태이고 2차측 전류는 S_{R1} 과 S_{R2} 의 바디 다이오드를 통해서 흐르게 된다.

3.2.3 모드 5, 모드 6

Q_2 가 도통 상태로 바뀌면서 S_{R1} 은 차단상태가 되며 전류는 변압기를 통하여 출력 측으로 전달된다. 이 때 S_{R2} 는 도통 상태로 2차 측 전류는 S_{R2} 의 채널과 S_{R1} 의 바디다이오드를 통해서 흐르게 된다. 그리고 N_2 의 누설인덕턴스와 C_{s2} 가 필터를 형성하게 되고 N_2' 의 누설인덕턴스와 C_{s1} 이 필터를 형성한다.

3.3 정류 방식

푸시 풀 포워드 컨버터의 2차 측 정류 방식은 다이오드 대신에 전력용 MOSFET를 사용하는 동기 정류 방식을 적용하였다. 그림 5는 자가 운전 동기정류 방식(Self-driven synchronous rectification)을 나타낸다.

동기 정류기의 구동은 데드타임 동안에 출력 전류가 동기 정류기의 기생 다이오드를 통하여 출력 인덕터 L로 흐르게 된다. 2차 측 동기 정류 방식은 다이오드의 전압강하로 인한 손실을 전력용 MOSFET의 온 저항 ($R_{DS(on)}$) 손실로 대체하여 낮출 수 있다. 통합된 자성 구조에서 배 전류 정류 방식은 출력 인덕터 전류와 변압기 2차 측 전류의 실효값을 줄임으로써 전체의 전도 손실 또한 줄일 수 있다. 그리고 두 개의 출력 인덕터 ac전류 성분이 상쇄됨으로써 출력 전압 리플이 감소해 출력 필터의 크기도 줄일 수 있다.

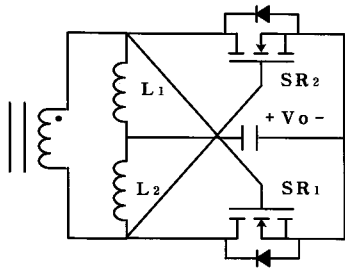


그림 5 동기 정류 방식
Fig. 5 Self driven synchronous rectification

3.4 실험적 고찰

특성을 비교하기 위해 구분하여 5 세트로 제작하였으며 각각의 설계 사항을 표 1에 나타내었고 각각의 세트에 대해서 특성을 비교 설명하였다. 그리고 컨버터의 부하에 따른 실험 파형을 측정하였으며 주스위치의 양단간 전압, 변압기 2차 측 전압 그리고 출력 인덕터의 전류 파형을 측정하였다.

Set①은 1, 2차 권선간 결합률을 좀 더 높이기 위해서 권선은 플레너 변압기용으로 제작된 PCB 권선을 각각 1, 2차 측에 사용하였으며 1차 측에는 6턴을 병렬로 2세트를 제작하였고, 2차 측은 2턴을 병렬로 연결하여 사용 하였다. 코어는 FEE 18/8/10C를 사용하였으면 에어 갭은 0.3~0.4mm이다. 에어 갭의 크기를 조절함으로써 변압기의 1차 측의 누설 인덕턴스 값과 2차 측의 출력 인덕터 값을 조절하였다.

Set②회로의 전체적인 부분은 Set①과 동일하며 공극은 0.7~1.0mm이다. 위의 두 세트에서는 Nicera사의 5M FEE 18/8/10C를 사용하였는데 부하를 20A 이상 걸면 출력 인덕터가 포화되는 현상이 발생한다. 5M FEE 18/8/10C 코어를 사용하는 것은 30A 이상의 부하를 걸 수 있는 실험 조건에 적합하지 않음을 알 수 있다. 그림 6에서 Set①이 Set②보다 효율 면에서 좋은 특성을 나타내고 있다. 이 결과로 부터 멀티 변압기를

표 1 컨버터의 설계 사양
Table 1 Converter Specifications

구분 및 효율	스위칭 주파수	인덕터 Lr[uH]	공극 [mm]	코어	권선 비
set 1 80.1%	fs=200kHz	2.55	0.3-0.4	Nicera 5M FEE18/8/10C	6:2
set 2 78.7%	fs=200kHz	2.55	0.7-1	Nicera 5M FEE18/8/10C	6:2
set 3 83.5%	fs=200kHz	2.45	0.14-0.18	Nicera NC-2H FEE32/9/20	4:1
set 4 81.9%	fs=100kHz	3.95	0.12-0.15	Nicera NC-2H FEE32/9/20	4:1
set 5 81.9%	fs=200kHz	2.15	0.59-0.62	Nicera NC-2H FEE32/9/20	4:1

제작 할 때 1차, 2차권선 간의 결합률을 강화하는 것이 효율을 높이고 특성을 좋게 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 크기가 큰 FEI22와 FEI32를 사용했을 경우에 플레너용 PCB 권선을 변압기의 1, 2차 측에 적용한 set①, set②의 경우보다 효율이 떨어졌다.

Set③, set④의 경우는 set①, set②의 실험에서 코어 크기의 변화에도 효율이 증가하지 않아 변압기의 권수 비를 4:1로 변경하였다. Set③ 회로는 다른 세트들과 동일하게 설계하였으나 멀티 변압기의 제작에 있어서 Nicera사의 NC-2H FEI32/8/10C(4:1 200kHz, Ltr: 2.45 μH) 코어를 사용해서 바깥쪽에 1차 권선을 감고 역시 out leg에 변압기의 2차 권선과 출력 인덕터의 역할을 함께 하는 권선을 감았다. 실험 결과, set③에서는 입력 전압이 48V에서 최고 효율이 83.5%로 측정됐다.

코어의 크기와 주파수 변화에 따른 특성을 비교하기 위해서 set④의 전체적인 부분은 동일하게 설계하였으며 멀티변압기의 제작에 있어서 Nicera사의 NC-2H FEI32/8/10C (4:1 100kHz) 코어의 바깥쪽에 1차 권선을 감고 역시 바깥쪽에 변압기의 2차권선과 출력 인덕터의 역할을 함께 하는 권선을 감았다. 변압기의 권수 비는 동일하지만 스위칭 주파수를 100kHz로 하였다. 실험결과, 입력전압이 48V에서 효율이 81.95%로 측정되었고 스위칭 주파수가 200kHz인 set③의 경우보다 효율이 낮게 측정되었다.

따라서 Set③, Set④의 실험을 통해서 변압기의 권선비가 4:1이며 I_{out} 가 30A일 때 스위칭 주파수는 100kHz 보다는 200kHz에서 효율이 좀 더 높게 측정됨을 알 수 있다. 두 개의 실험 세트에서 공통적으로 보인 심한 기생 링킹 현상의 문제를 해결하기 위해서는 멀티 변압기를 제작할 때 1, 2차 측 권선의 결합률을 최대한 강화시키고 변압기 1차 측의 적절한 누설 인덕턴스 값과 2차 측의 출력 인덕터가 최적의 값이 되도록 변압기를 설계하는 것이 입력 필터를 가진 푸시 풀 파워드 컨버터의 효율을 극대화시킬 수 있다.

Set⑤는 공극을 크게 함으로써 변압기의 1차 측 누설인덕턴스의 값과 2차 측의 출력 인덕터와 2차 측의 누설인덕턴스 값을 조절함에 따른 효율의 증가 여부를 측정하였다. 그리고 set③, Set④의 실험에서 스위칭 주파수가 200kHz 일 때 효율이 가장 좋게 측정되었기 때문에 스위칭 주파수는 동일하게 적용하였다. 회로의 전체적인 부분은 다른 세트들과 동일하게 설계하였으며 멀티변압기의 제작에서 Nicera사의 NC-2H FEI32/8/10C (4:1 100kHz) 코어의 바깥쪽에 1차 권선을 감고 또한 변압기의 2차권선과 출력 인덕터의 역할을 함께 하는 권선을 감았다. 실험결과, 입력전압이 48V에서 부하가 14A일 때 81.9%의 효율로 측정되었고 공극을 크게 해서 1차 측 누설 인덕턴스는 늘리고 2차 측 출력 인덕터를 작게 해서 효율의 변화를 측정했는데 효율이 증가하지 않았다. 에어 갭이 커짐으로써 멀티 변압기의 1차 측 권선들의 누설인덕턴스가 커져 링킹 현상이 더욱 심해져 효율이 증가하지 않고 파형과 컨버터의 특성 또한 좋지 않게 나타났다. 효율이 가장 높게 나타난 set③의 경우 파형을 측정하였으며 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

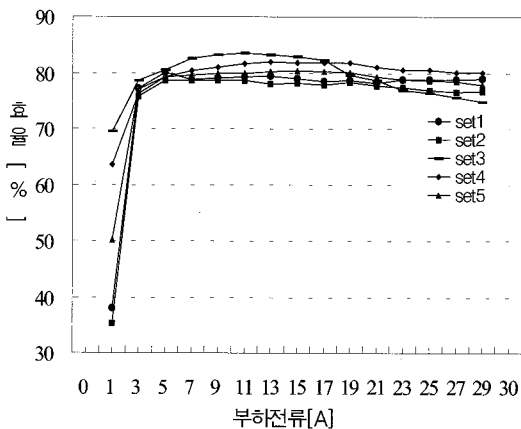


그림 6 각 set의 효율
Fig. 6 Efficiency of sets

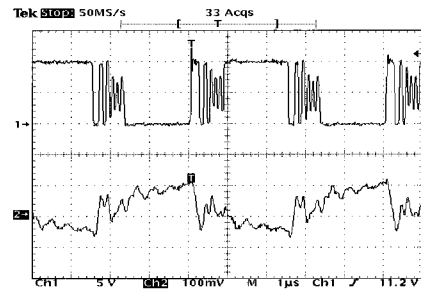


그림 7 V_{DS1} (50V/div)과 i_{N2} (3A/div)
Fig. 7 V_{DS1} (50V/div) and i_{N2} (3A/div) ($V_{in}=48$, $I_o=30A$)

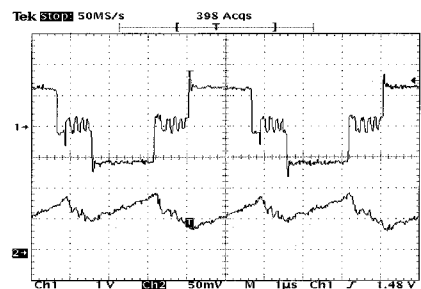


그림 8 V_{S2} (10V/div)와 i_{L1} (10A/div)
Fig. 8 V_{S2} (10V/div) and i_{L1} (10A/div) ($V_{in}=48$, $I_o=15A$)

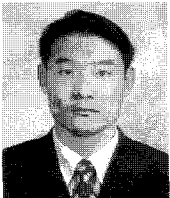
4. 결 론

통합된 자성 요소들은 효율 향상과 자성소자의 수를 줄이기 위해서 멀티 전압 레귤레이터 모듈의 형태로 사용한다. 이 형태는 코어에서 바깥쪽에 두 개의 공극이 존재하기 때문에 물리적으로 안정성을 높이기 힘들고 또한 EMI의 원인이 된다. 그리고 큰 누설 인덕턴스는 심한 기생 링킹과 효율 감소의 원인이 된다. 이런 문제를 해결하기 위한 배전류 정류 방식의 싱글 코어에 입력필터를 통합한 향상된 푸시 풀 파워드 컨버터의 동작특성에 대해 고찰하였다. 코어구조 형태는 중간에 공극이 존재하며 바깥쪽에 두 개의 권선이 감겨 있는 형태이다. 이 구조는 물리적 안정성이 높고 코어의 크기도 줄일 수 있으며 공극이 중간에만 존재하므로 바깥쪽에 공극이 존재하는 것보다 상대적으로 제조하기 쉬울 뿐만 아니라 가격도 낮다는 장점이 있고, 기존 방식에 비해 기생 발진의 감소로 인한 효율 상승을 기대할 수 있다. 실험 결과, 입력 전압 36~72 [VDC], 출력 전압 3.3[VDC], 출력 전류 30[A] 스위칭 주파수 200kHz에서 부하 전류가 11A일 때 83.5%의 효율이 측정되었고 전부하 시 76.4%, 반부하 시 82.95%가 측정되었다.

참 고 문 헌

- [1] Peng Xu, Fred C. Lee, "Design of High-Input Voltage Regulator Modules With A Novel Integrated Magnetics", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC'01), 2001.
- [2] Peng Xu, Mao Ye, Pit-Leong Wong, Fred C. Lee, "Design of 48V Voltage Regulator Modules With a Novel Integrated Magnetics", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC'02), 2002.
- [3] J.A. cobos, O. Garcia, J. Uceda, F. Aldana, "Optimized Synchronous Rectification stage for Low Output Voltage (3.3V) DC/DC Converter", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC'94), 1994.
- [4] 전준석, 김창선, 김태식, 임범선, 우승훈, "푸시 풀 포워드 컨버터의 주파수 변화, 변압기의 권선비와 1차측 권선 변화에 따른 효율 특성", 전력전자학회 하계학술대회 논문집(1), pp.36-39, 2003.7.
- [5] 전준석, 김창선, 김태식, 임범선, 우승훈, "푸시 풀 포워드 컨버터의 효율 특성 고찰", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp.1232-1234, 2003.7.

저 자 소 개

**김창선(金昌宣)**

1990년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 목포대 전기공학과 부교수.