Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 19, No.6, pp. 16~21 September 2005 논문 19-6-3

2차측 보조 소프트 스위칭 고주파 절연형 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 새로운 무정전전원장치

(New Uninterruptible Power Supply Using the Converter which is Secondary Auxiliary Soft Switching High Frequency Insulating PWM AC/DC)

서기영* · 문상필 · 김주용 · 이현우
(Ki-Young Suh · Sang-Pil Mun · Ju-Yong Kim · Hyun-Woo Lee)

요 약

본 논문에서는 고주파 트랜스의 여자 전류를 이용하지 않고, 인덕턴스를 이용한 새로운 부분공진 영전압 스위칭 PWM 제어 고주파 절연형 풀-브리지 DC/DC 컨버터의 회로를 제안하여 그 동작 원리를 기존 방식과 특성을 비교하였다. 또한 고주파 절연 트랜스 2차측에 동기 정류용 전력용 MOSFET에 새로운 기능을 부가한 온-오프 제어 방식을 이용하여 넓은 부하 범위에 걸쳐 안정된 영전압 스위칭(ZVS)동작을 실현하였다.

또한 제안한 DC-DC 컨버터의 실험장치에 의해서 실측 효율을 97[%]이상 달성하였고 직류 무정전전원의 PWM 정류기의 출력단에 이용되는 새로운 방식이 스위칭 전원으로서 유효성을 증명하였다.

Abstract

In paper, propose new partial resonance ZCS PWM controlled High frequency insulating Full-bridge DC/DC converter not using exciting current of high frequency transformer. It is compared with the existing principles in characteristics. It also realizes a widely stabilized ZVS operating using new ON-OFF control method at synchronized power rectification MOSFET of high frequency insulating transformer secondary.

Besides, it is brought over 97[%] measurement efficiency by proposed DC-DC converter. It is proved effectiveness of new methods using DC UPS PWM rectifier as switching power supply.

Key Words : Synchronous Rectifiers, ZVS-PWM DC/DC converter, High Frequency Transformer, UPS

1. 서 론

전력용 MOSFET, IGBT등 MOS 게이트 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 펄스 변조 스위칭 모드 고주파 절연형 DC/DC 컨버터의 소형 · 경량화, 고성능화 · 저소음화하기 위한 스위칭 주파수의 고주파화 기술이 도입되어지고 있다.

* 주저자 : 경남대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 055-249-2630, Fax : 055-249-2839
E-mail : skiyoung@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2005년 2월 28일
1차심사 : 2005년 3월 7일, 2차심사 : 2005년 6월 22일
심사완료 : 2005년 7월 7일

그러나 기존의 하드 스위칭 고주파 PWM 방식 절연형DC/DC 컨버터는 펄스 변조 캐리어 주파수의 고주파화를 수반하고, 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭 손실의 증대나 스위칭 과도현상이 수반된 전압 서지나 전류 서지에 의한 EMI의 노이즈의 발생 등의 문제점이 있다.

또한 스위칭 주파수의 고주파화에도 한계가 나타나고 있다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 스위칭 모드 PWM DC/ DC 컨버터내의 전력용 반도체 스위칭 소자와 고주파 트랜스를 포함한 L-C 공진회로, 스너버 회로등을 이용하여 영전압 스위칭(ZVS) 또는 영전류 스위칭(ZCS)의 상태 천이로 온시키는 소프트 스위칭 PWM 방식 고주파 절연형 DC/DC 컨버터의 회로 기술에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다[1],[2].

일반적으로 공진전류 모드를 도입한 펄스 변조 소프트 스위칭 DC/DC 컨버터는 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭에서 L-C공진 현상을 한 주기 내에 부분적 또는 전체적으로 이용하여 영 전류모드 또는 영 전압모드에 의한 소프트 스위칭 펄스 전류 방식을 이용한다.

연속 공진 전류 전환방식은 고주파 트랜스의 기생 회로 파라미터를 이용하여 공진 동작하기 때문에 회로는 간단하나 파형이 정현파 공진 상태이기 때문에 전력용 반도체 스위칭 소자, 고주파 트랜스, 직렬 보상 공진 콘덴서에 관련된 전압 또는 전류의 피크값이 커져 정주파(定周波) PWM 방식을 이용한 출력 제어법은 잘 사용하지 않는다. 하지만 일부 산업체에서 실용화되고 사용하므로 문제점의 개선에 관한 연구가 필요하다. 이에 반해 부분 공진 전압 방식은 스위칭의 모드 천이 전후에서 공진 회로를 부분적으로 동작시키므로 스위칭 천이 영역 전후 이외에서 전력용 반도체 스위치의 단자 전압 파형이 구형파, 즉 에지 공진 파형이 가능하기 때문에 고주파 PWM 방식으로 출력 전압을 제어할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 전원 방식의 고성능, 고효율, 저노이즈 등에 많이 적용되어 연구되고 있다[3],[4],[5].

그러므로 본 연구에서는 고주파 트랜스의 여자 전류를 이용하지 않고, 인덕턴스를 이용한 새로운 부분 공진 영전압 스위칭 PWM 제어를 이용하여 고주파 절연형 풀-브리지 DC/DC 컨버터의 회로를 제안하여 그 동작 원리를 기존 방식과 특성을 비교하고자 한다. 또한 고주파 절연 트랜스 2차측에 동기 정류용 전력용 MOSFET에 새로운 기능을 부가한 온-오프 제어 방식을 이용하여 넓은 부하 범위에 걸쳐 안정된 영전압 스위칭(ZVS)동작을 실현하고자 한다.

끝으로 제안한 DC-DC 컨버터의 실험장치에 의해서 실측 효율을 97[%]이상 달성하고자 하며, 직류 무정전원의 PWM 정류기의 출력단에 이용되는 새로운 방식을 스위칭 전원으로서 유효성이 있음을 증명하고자 한다.

2. 제안한 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터

그림 1은 기존의 무손실 스너버 콘덴서에 의한 고주파 트랜스 1차측 부분 전압 공진ZVS-PWM방식 DC/DC 컨버터의 주 회로를 나타낸 것이며, 그림 2는 제안한 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터의 주 회로 구성을 나타낸 것이다. 제안한 회로는 기존의 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터 회로의 고주파 절연 트랜스 2차측에 전력용 MOSFET Q_{01}, Q_{02}을 이용하여 동기 정류시켰으며, 이러한 2차측의 전력용 MOSFET를 1차측의 전력용 MOSFET의 소프트 스위칭 동작을 실현하기 위해 새로운 온-오프 제어방식을 사용하였다.

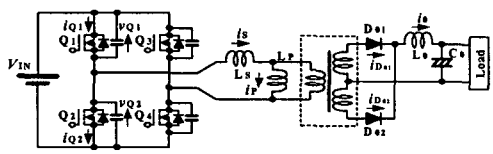


그림 1. 기존의 부분 공진형 ZVS-PWM DC/DC 컨버터
Fig. 1. Conventional partial resonant type ZVS-PWM converter

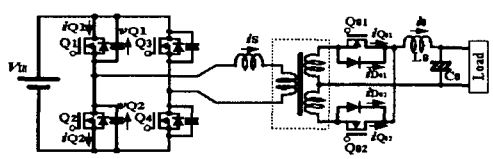
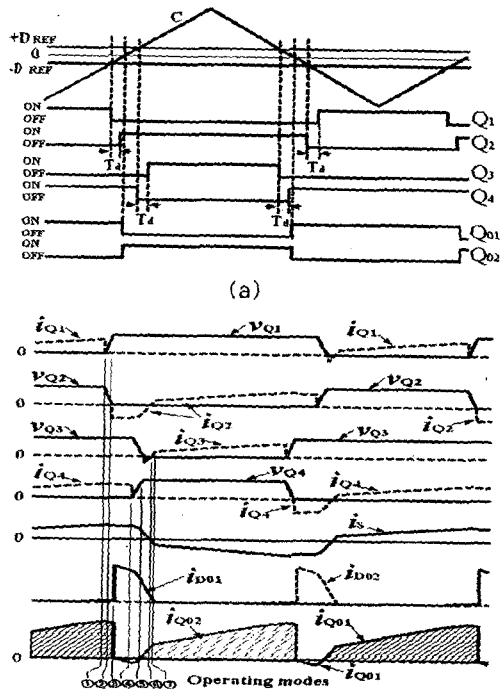


그림 2. 제안한 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터
Fig. 2. Proposed high frequency transformer soft switching PWM DC/DC converter

또한 고주파 트랜스에 병렬로 접속된 등가 여자 인덕턴스 L_p를 기존 인덕턴스보다 7.5배 더 큰 150[μH]를 사용하여 무효전류를 적게 하고, 동시에 출력 필터 인덕터 L_0의 값을 그림 1과 비교하여 5분의 1 정도로 줄었다.

기존의 동기 정류 방식은 다이오드 D_{01}, D_{02}에 전류가 흐르고 있는 기간에 D_{01}, D_{02}에 대응한 전력용 MOSFET를 도통시키는 방식인데 반해 제안한 동기 정류 방식은 전력용 MOSFET와 이것에 병렬로 접속된 다이오드의 양쪽에 전류를 흐르게 함으로써 기존의 고속 다이오드 정류 방식으로는 얻을 수 없는 낮은 전압 강하를 얻을 수 있으며, 정류기부의 변환 손실을 저감시킬 수 있다.



(a)

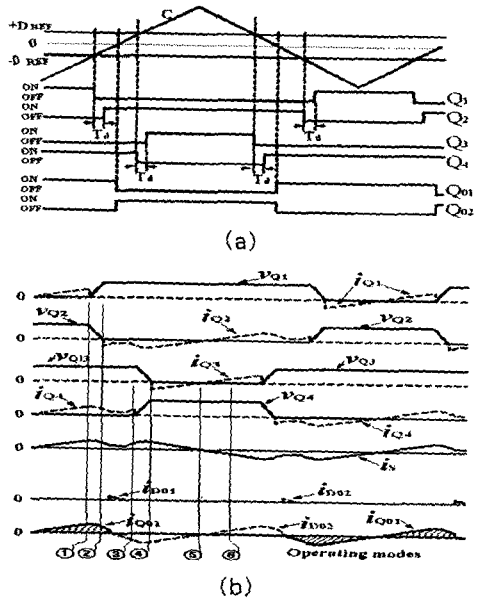
(b)

그림 3. 제안한 DC-DC 컨버터의 동작 전압과 전류 파형
(a) 게이트 펄스 신호 생성 파형
(b) 동작 파형

Fig. 3. Operating voltage and current waveforms of the proposed DC/DC converter
(a) Gate pulse signal processing waveforms
(b) Operating waveforms

또한 제안한 회로는 2차측의 동기 정류용 전력용 MOSFET를 50[%]의 듀티율(d)로 능동적으로 온-오프 시키는 것으로 1차측의 전력용 MOSFET의 소프트 스위칭을 도와줌으로써 무부하를 포함한 넓은 부하 변화 범위에서 영전압 소프트 스위칭 동작을 실현할 수 있다.

그림 3은 제안한 회로의 제어 방식에 있어서 온-오프 신호의 생성 및 동작 파형을 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서 주 스위치 Q1에서 Q4의 온-오프 신호는 그림 2와 동일하지만 고주파 절연 트랜스 2차측의 전력용 MOSFET Q_{01}, Q_{02}에 듀티율 50[%]의 새로운 온-오프 신호를 공급하고 있다. 그림 3(b)에서 출력 전류 파형이 해칭된 부분은 전력용 MOSFET(Q_{01} 또는 Q_{02})와 이것에 병렬로 접속된 다이오드의 양쪽에 전류가 흐르고 있는 기간을 나타낸 것이다.



(a)

(b)

그림 4. 제안한 DC-DC 컨버터의 동작 전압과 전류 파형(경부하시)
(a) 게이트 펄스 신호 생성 파형
(b) 동작 파형

Fig. 4. Operating voltage and current waveforms of the proposedDC/DC converter(In case of light-load)
(a) Gate pulse signal processing waveforms
(b) Operating waveforms

그림 4는 경부하에 있어서 제안한 DC/DC 컨버터 회로의 일정 동작 파형을 나타낸 것이다. 그림 5는 제안 회로의 무부하에 있어서 동작 모드 천이와 등가 회로를 나타낸 것이며, 동작원리를 설명하면 다음과 같다.

모드 1은 직류 전원전압(V_{IN})을 스위치 Q1과 Q4를 통하여 부하측으로 전력을 공급하는 모드이다. 이때 L_0의 전류는 증가하고, L_S에 전류가 축적된다.

모드 2는 스위치 Q1을 턴-오프 하는 모드이다. 이때 L_S의 에너지가 스위치 Q1에 병렬로 접속된 콘덴서를 충전하며, 스위치 Q1의 단자 전압은 0로부터 서서히 상승하며, 동시에 스위치 Q2의 단자 전압이 감소한다.

모드 3은 스위치 Q2의 단자 전압이 0이 되는 모드이다. 이때 L_S의 전류는 스위치 Q4와 Q2로 환류(還流)한다. 이 기간에 스위치 Q2는 영전압 턴-온한다. 스위치 Q1과 Q4가 도통하고, L_S을 포함한 고주파 트랜스의 입력 단자 전압이 0가 되기 때문에 L_0의 전류가 감소한다.

모드 4는 스위치 Q_{01}가 영전압 턴-오프하고, 스위치 Q_{02}는 영전류 턴-온되는 모드이다. 이때 L_0의 전류와 $i_{D_{01}}$가 감소하며, 스위치 Q_{02}에 전류가 흐르게 된다. 그리고 L_S의 단자 전압이 0이 되며, 스위치 Q4의 전류는 상승한다

모드 5는 $i_{D_{01}}$가 0이 되어 다이오드 D_{01}이 역회복되는 모드이다. 이때 L_0의 전류는 감소하고, $i_{Q_{02}}$는 부(-)로 증가한다. 그리고 L_S의 전류, 즉 스위치 Q4의 전류는 상승한다.

모드 6은 스위치 Q4를 턴-오프 하는 모드이다. 이때 L_S의 에너지가 스위치 Q4에 병렬로 접속된 콘덴서를 충전하고, 스위치 Q4의 단자 전압은 0로부터 서서히 상승한다. 그리고 동시에 스위치 Q3의 단자 전압이 감소한다.

모드 7은 스위치 Q3의 단자 전압이 제로가 되는 모드이다. 이때 L_S의 전류는 스위치 Q3에 병렬로 접속된 다이오드에 흐른다. 이 기간에 스위치 Q3은 영전압 턴-온 한다. 그리고 $i_{Q_{02}}$의 극성이 반전되고, 스위치 Q_{02}와 D_{02}에 병렬로 전류가 흐르다.

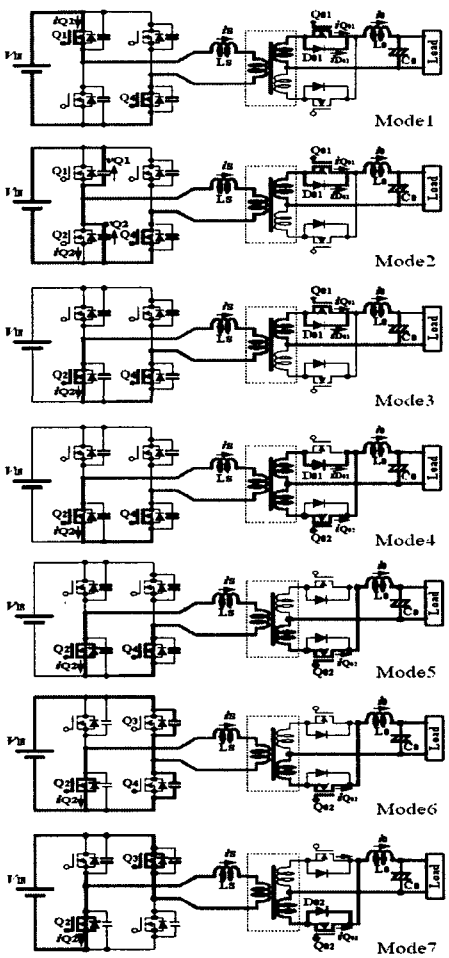


그림 5. 제안한 PWM DC-DC 컨버터의 동작천이와 등가회로(무부하시)

Fig. 5. Mode transitions and equivalent circuits of the proposed PWM DC-DC converter (In case of no load)

앞에서 서술한 것처럼 제안한 고주파 절연형 영전압 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터 회로는 온-오프 기능부 동기 정류용 능동 스위치 Q_{01}과 Q_{02}의 스위칭 작용에 의하고, 한계 설계된 출력 필터 인덕터 L_0에 전류 리플이 생기며, 이 전류에 의해서 스위치 전류 i_{Q_1}~i_{Q_4}는 상승한다. 따라서, 기존의 소프트 스위칭 회로에서 전류의 상승에 필요했었던 L_P을 생략한 고주파 트랜스를 사용할 수 있기 때문에 고주파 트랜스, 전력용 반도체 스위칭 소자의 전류 증대도 대폭적으로 저감할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 6은 본 논문에서 제안한 DC/DC 컨버터 회로와 제어계를 포함한 실험장치를 나타낸 것이며, 표 1은 그에 따른 회로 정수를 나타낸 것이다. 그림 6에서 스위칭 소자의 온-오프 신호를 생성하기 위해서 먼저, 출력 전압값 v_0을 검출하여 기준 입력 신호 V_{REF}의 차이를 비례 적분한 것으로 펄스 폭 변조기의 입력 기준 D_{REF}를 생성한다. 그리고 펄스 폭 변조기의 입력 기준 D_{REF}와 삼각파 캐리어 신호 C을 비교하여 각 전력용 반도체 스위칭 소자의 온-오프 신호를 생성하며, DC/DC 컨버터 회로의 제어 시스템은 원칩 마이크로컴퓨터로 구성하였다.

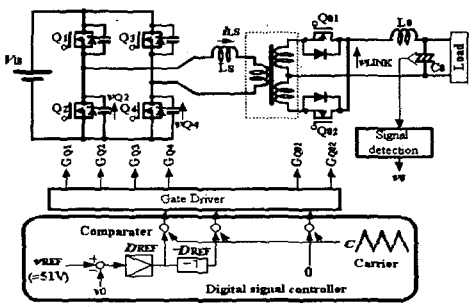


그림 6. 제안한 DC-DC 컨버터의 실험장치
Fig. 6. Experimental devices of proposed DC-DC converter

표 1. 실험에 사용된 회로 정수
Table 1. Circuit parameters used in experiment

입력 직류전압(V_{IN})		350[VDC]
출력 직류전압(V_0)		51[V]
스위칭 주파수(f_s)		35[㎑]
스위치	MOSFET (Q_1~Q_4)	2SK1522×3Parallel
	MOSFET (Q_{01}, Q_{02})	2SK3158×6Parallel
무손실 스너버 콘덴서 (C_1~C_4)		4.7[nF]×2Parallel
여자 인덕턴스(L_P)		150[μH]
공진 리액터(L_S)		20[μH]
평활 리액터(L_0)		6[μH]
평활 콘덴서(C_0)		1000[μF]×6Parallel
고주파 트랜스 코어		PQ 50/50 Ferrite core PC44
다이오드		MOSFET body-diode

그림 7과 그림 8은 50[A]부하시와 무부하에 있어서 실험 파형을 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 스위치 단자 전압 v_{Q_2}의 dv/dt가 억제되며, 전압 소프트 스위칭이 달성된다.

그림 7. 실험결과 파형(50[A]부하)
Fig. 7. Experimental result waveforms (50[A]load)

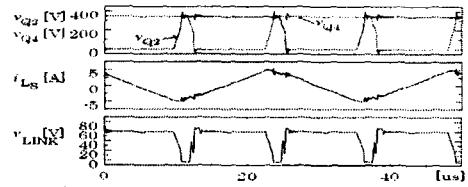


그림 8. 실험결과 파형(무부하)
Fig. 8. Experimental result waveforms(no-load)

그림 9는 부하 전류를 50[A]에서 0으로 급변시킬 경우 각 부의 실험 파형을 나타낸 것이며, 그림 10은 부하전류를 0에서 50[A]으로 급변 시켰을 때의 각 부 실험 파형을 나타낸 것이다. 그림 9와 그림 10에서 부하 변동시에서도 입력 전류(i_R)는 정현파의 형태로 제어되며 과도시에 있어도 트랜스가 포화되지 않아도 동작할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 부하 전류에 대한 실측 변환 효율과 변환 손실의 부하 특성을 나타낸 것이다. 그림 11에서 알 수 있듯이 제안한 전력변환의 전 손실은 출력 전력에 대하여 증가되며, DC/DC컨버터의 최대효율은 97.5[%]를 달성하고 있다.

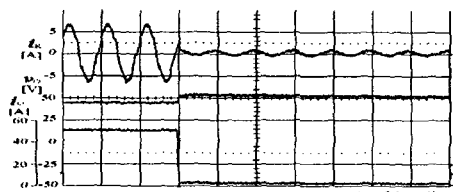


그림 9. 부하변동시의 응답 파형(부하전류 50[A]⇒0[A])
Fig. 9. Transient waveforms of charge load (load current 50[A] to 0[A])

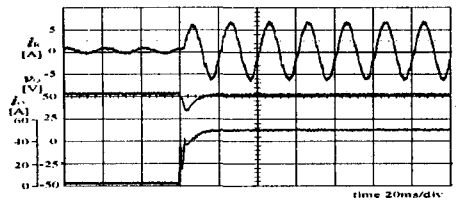


그림 10. 부하변동시의 응답 파형(부하전류 0[A]⇒50[A])
Fig. 10. Transient waveforms of charge load (load current 0[A] to 50[A])

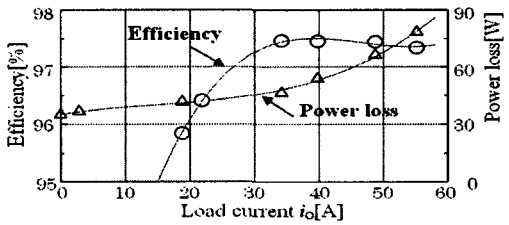


그림 11. 부하 전류에 따른 효율과 손실
Fig. 11. Efficiency and power loss characteristics with load current

4. 결 론

제안한 회로는 새로운 직류 무정전전원장치으로서 기존의 동기 정류 방식을 이용한 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터에 고주파 절연 트랜스의 2차측에 동기 정류용 전력용 액티브 스위치를 부가한 회로이다. 이 부가된 스위치의 온-오프 작용에 의해서 주 스위치의 턴-오프 전류가 상승하며, 무손실 콘덴서의 충·방전 동작을 완전하게 시킬 수 있다. 그리고 제안한 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터 회로의 동작 원리와 특징을 기존의 방식 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터와 비교한 결과 제안한 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터 회로는 무부하로부터 정격 부하에 걸치는 넓은 부하 범위에서 영전압 소프트 스위칭(ZVS)을 실현할 수 있다. 또 기존의 연속 공진전류 전류(轉流)방식의 영전류 소프트 스위칭 PWM 제어 DC/DC 컨버터 방식에 비해 전력용 반도체 스위칭 소자나 고주파 트랜스 코일의 피크 전류가 적기 때문에 전체적인 도통 손실의 저감 및 온-오프 기능부 동기 정류 효과나 필터 인덕터의 인덕턴스의 저감 효과가 더해진다. 그리고 97.5[%]의 극히 높은 전력 변환 효율을 얻을 수 있다.

이러한 결과에 의해서 제안한 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터 회로는 통신 정보 에너지 플랜트뿐만 아니라 자동차용 42[V] 전원화 시스템이나 항공 우주 시스템의 전력 인터페이스 전원 등에 유용하게 적용할 수 있는 것으로 사료된다.

이 논문(보고서)는 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

References

[1] 麻生 眞司, 古越 隆一, "電流共振型(SMZ方式)電源", サンケン技報, Vol.26, No.1,pp.11-22, 1993.
[2] 横山 伸明, "通信機用共振型スイッチング電源", サンケン技報, Vol.27, No.1,pp.64-69, 1994.
[3] 佐藤 伸二, "高効率DC/DCコンバータの開發",サンケン技報, Vol.32, No.1,pp.32-35, 1998.
[4] 佐藤 伸二, "高効率部分共振形DC/DCコンバータ",日本能率協會主催第11次スイッチング電源テクニカルフォーラム, セッション2, pp.1-10, 1999.
[5] B.H Choo, D.Y Lee, S.B Yoo, D.S Hyun, "A Novel Full-Bridge ZVZCS PWM DC /DC Converter with a Secondary Clamping Circuit," Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference(PESC), Vol.2, pp.936-941, 1998.

◇ 저자소개 ◇

서기영 (徐基永)
1942년 4월 18일생. 1965년 한양대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현 경남대 전자전기공학부 교수.

문상필 (文相弼)
1975년 2월 9일생. 1997년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현 (주)나노코리아 부설기술연구소 소장.

김주용 (金周容)
1977년 12월 1일생. 2002년 경남대 전기공학과 졸업. 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현 경남대 대학원 전기공학과 박사과정.

이현우 (李鉉雨)
1953년 4월 28일생. 1979년 동아대 전기공학과 졸업. 1984년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현 경남대 전자전기공학부 교수.