

단일전력단 Two-Switch Forward 컨버터에 관한 연구

(A Study on the Single-Stage Two-Switch Forward Converter)

배진용* · 김 용**

(Jin-Yong Bae · Yong Kim)

요 약

본 연구에서는 단일전력단 Two-Switch Forward 컨버터에 관하여 논하였다. 최근 국제적으로 제정된 ICE 61000-3-2와 IEEE 519같은 규정에서 입력 전류에 대한 고조파 규제가 강화되면서 전원 공급 장치의 역률개선 회로가 필수적으로 되었다. 따라서 본 연구에서는 저전압·대전류 출력에 적합한 방안으로 단일전력단 Two-Switch Forward 컨버터 회로를 제안하고, 모드별 동작, 특성 및 설계에 관하여 논하였으며, MOSFET를 사용하여 200[W](5[V], 40[A])급 시작품을 제작, 100[kHz]에서 실험하였다.

Abstract

This paper presents the single-stage TSFC(Two-Switch Forward Converter). Recently, due to growing concern about the harmonic pollution of power distribution systems and the adoption of standards such as ICE 61000-3-2 and IEEE 519, There is a need to reduce the harmonic contents of AC line currents of power supplies. This research proposed the single-stage two switch forward circuit for low voltage and high current output. The principle of operation, feature and design considerations is illustrated and verified through the experiment with a 200[W](5[V], 40[A]) 100[kHz] MOSFET based experimental circuit.

Key Words : Single-stage, TSFC(Two-Switch Forward Converter)

1. 서 론

본 연구에서는 단일전력단 AC/DC PFC TSFC (Two-Switch Forward Converter)를 제안하고자 한다. 최근 국제적으로 제정된 ICE 61000-3-2와 IEEE

519같은 규정에서 입력 전류에 대한 고조파 규제가 강화되면서 전원 공급 장치의 역률개선 회로가 필수적으로 되었으며, 컴퓨터, 통신용 시스템, 의료장비 및 음향·영상 시스템의 동작 전원이 고품질의 저전압 DC전원을 요구하고 있으며, 동시에 부하량의 증가로 인하여 대전류의 출력이 필요되는 추세이다[1-7].

따라서 본 연구에서는 전자장치 및 통신용 장비에 주로 이용되는 출력 200[W](DC 5[V], 40[A])의 부하를 대상으로 컨버터의 효율 개선 방안을 제시하고자 한다. 일반적으로 분산형 전원공급 장치에서는 입력단

* 주저자 : 특허청 전기사무관

** 교신저자 : 동국대학교 전기공학과 교수

Tel : 02-2260-3720, Fax : 02-2260-3720

E-mail : dubjy@dongguk.edu

접수일자 : 2005년 6월 22일

1차심사 : 2005년 6월 28일

심사완료 : 2005년 7월 26일

역률개선 컨버터, 중간단 컨버터 및 부하단 컨버터로 구성되나 본 논문에서는 DC 5[V] 40[A]의 부하에 가장 적합한 방안으로 입력단 역률개선 컨버터, 중간단 컨버터 및 부하단 컨버터를 하나로 구성한 AC/DC PFC TSFC를 제안하였다[1-2]. 제안된 전력변환 시스템은 역률개선을 위한 AC/DC Boost 컨버터와 DC/DC TSFC 컨버터를 하나로 결합 단일 전력변환 방식을 채택함으로써 경제적이며 동시에 제어회로의 구성이 보다 간결해진 장점을 지니게 되고, 고역율 고효율을 이룰 수 있다. 이에 대해 MOSFET를 사용한 입력 AC 110[V], 출력 DC 5[V]/40[A], 100[kHz], 200[W]급 시제품을 제작하여 실험으로 확인하였다.

2. 본 론

2.1 기존의 시스템

그림 1은 교류 입력으로부터 직류 출력을 얻기 위한 기존 시스템을 나타낸다.

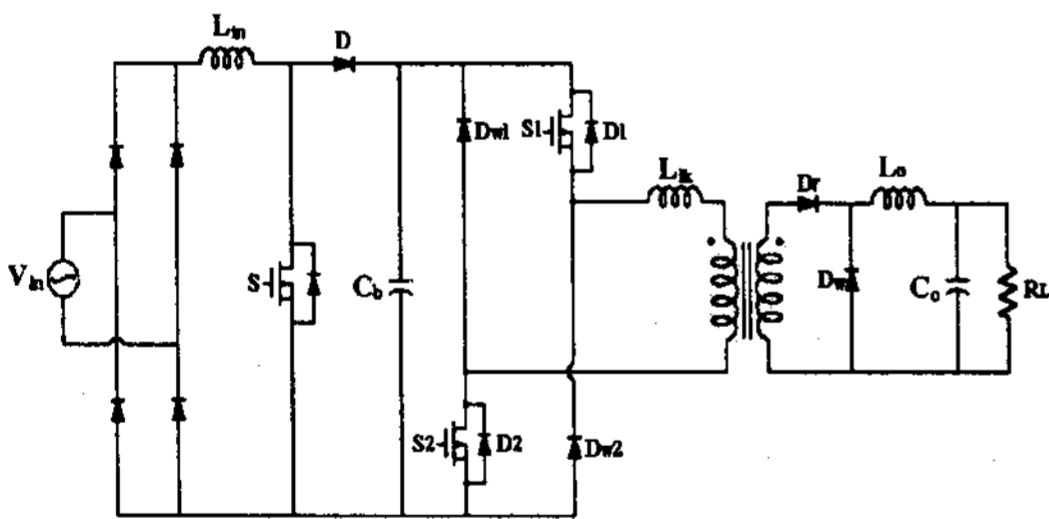


그림 1. 기존의 2단 전력 변환 시스템
Fig. 1. Conventional two stage power conversion system

기존의 시스템은 역률개선을 위한 AC/DC Boost 컨버터와 DC/DC TSFC를 결합한 방식으로 안정적인 역률 개선이 가능한 장점을 지닌다. 그러나 전력 시스템 및 제어기 구조가 복잡하며, 동시에 전력변환이 두 번 이루어지므로 전체 효율이 저감되는 문제점을 지닌다[8].

2.2 제안된 시스템

그림 2는 제안된 단일전력단 AC/DC PFC TSFC

를 나타낸다. 제안된 컨버터는 AC/DC Boost 컨버터와 DC/DC TSFC가 결합된 형태로서 Boost 컨버터의 주 스위치(S)와 TSFC의 하단 스위치(S₂)를 하나로 결합하여 기존의 시스템에 비하여 매우 간결한 장점을 지닌다[1].

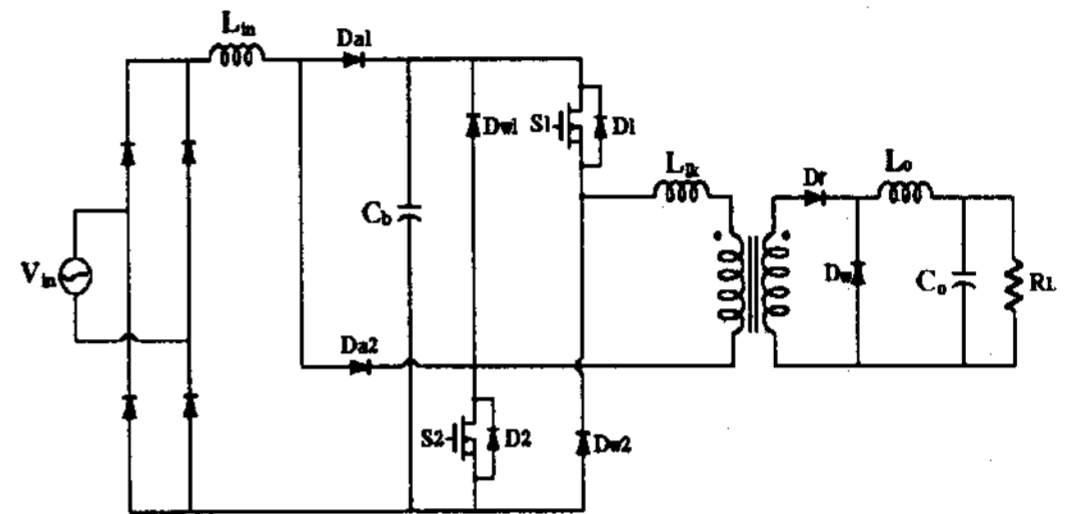


그림 2. 제안된 단일전력단 AC/DC PFC TSFC
Fig. 2. Proposed Single-Stage AC/DC TSFC

그림 3과 4는 제안된 TSFC 컨버터의 모드별 동작 파형과 등가 회로를 나타낸다. 모드별 정상상태 해석을 위하여 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.

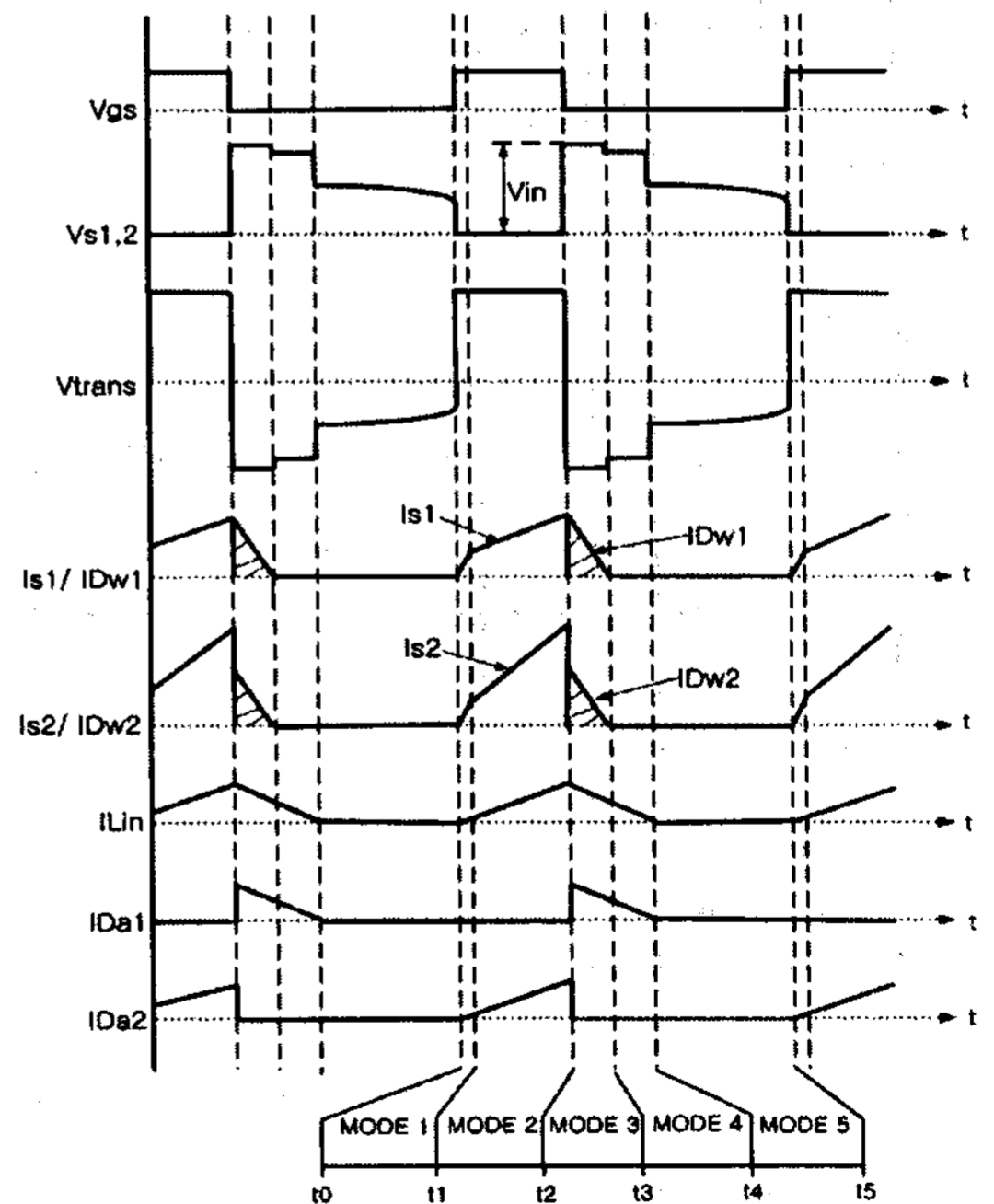


그림 3. 제안된 회로의 이론적인 각부 파형
Fig. 3. Theoretical waveforms of the proposed circuit

- 2) 스위치 양단의 전압 리플은 무시한다.
- 3) 변압기 2차측의 누설 인덕터는 무시한다.
- 4) 출력 인덕터(L_o)는 변압기 1차측 누설 인덕터(L_{lk})보다 충분히 큰 값이고, L_o 에 흐르는 전류는 항상 일정하다.
- 5) 출력 커패시터(C_o)는 충분히 커서 스위칭 기간 동안 출력 전압은 일정하다.

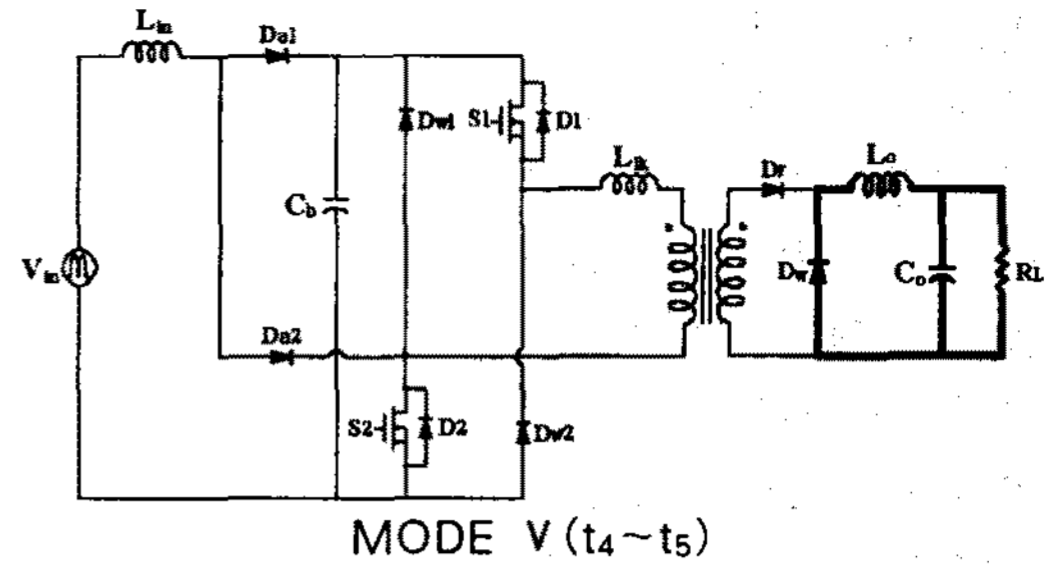
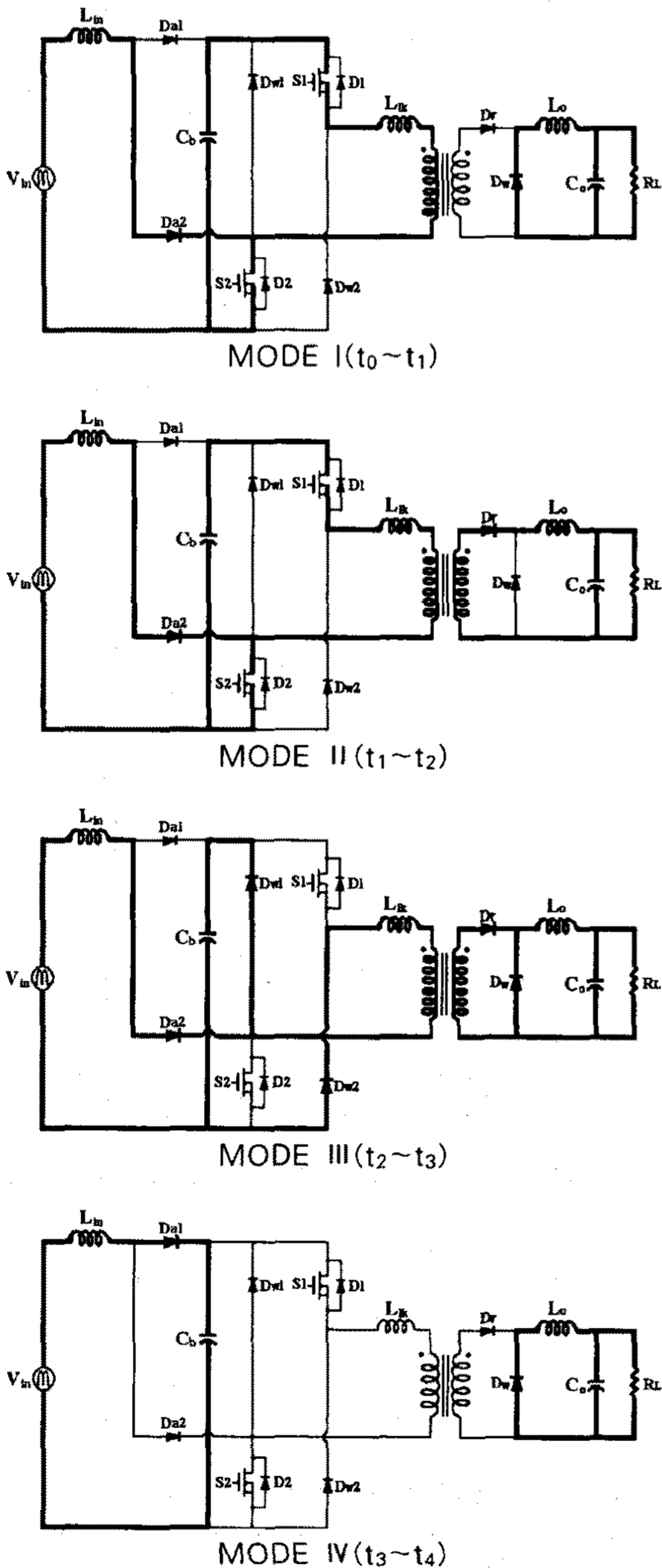


그림 4. 제안된 회로의 모드별 동작
Fig. 4. Operation mode of the proposed circuit

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

스위치 S_1 과 S_2 는 턴온 되었으나 변압기가 자화되는 기간이므로 변압기 1차측에서 2차측으로 전력이 전달되지 못하며, 출력 인덕터 L_o 에 저장된 에너지가 환류 다이오드 D_w 를 통하여 전력을 부하에 공급한다. 동시에 승압 인덕터 L_{in} 의 전류는 보조 다이오드 D_{a2} 와 스위치 S_2 를 통하여 상승하는 구간이다.

이 구간에서 스위치 S_1 의 전류와 보조 다이오드 D_{a2} 의 전류는 식 (1), (2)로 나타낼 수 있으며, 스위치 S_2 의 전류는 스위치 S_1 과 보조 다이오드 D_{a2} 의 전류 합으로 나타낼 수 있다.

$$I_{S1} = \frac{V_{Cb}}{L_{lk}} t \quad (1)$$

$$I_{Da2} = \frac{|V_{in}|}{L_{in}} t \quad (2)$$

$$I_{S2} = I_{S1} + I_{Da2} \quad (3)$$

이 모드의 끝에서 스위치 S_1 의 전류를 I_1 으로 정의한다.

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

변압기 2차측에 전압이 유기되며 정류 다이오드 D_r 을 통하여 출력으로 전력이 전달되는 구간이며, 승압 인덕터 전류는 지속적으로 상승하는 구간이다.

이 구간에서 스위치 전류의 기울기는 누설 인덕터 L_{lk} 와 출력 인덕터 L_o 에 의해 제한되며, 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$I_{S1} = I_1 + \frac{V_{Cb}}{L_{lk} + L_o} t \quad (4)$$

이 모드의 끝에서 스위치 S₁의 전류를 I₂으로 정의하며, 또한 승압 인덕터 L_{in}의 최대 전류를 I_{pk}로 정의한다.

3) 모드 III : t₂ ≤ t ≤ t₃

스위치 S₁과 S₂가 턴오프되면, 누설 인덕터 L_{lk}에 저장된 에너지가 환류 다이오드를 통하여 C_b로 리셋되는 모드이며, 승압 인덕터의 전류는 보조 다이오드 D_{al}을 통하여 C_b를 충전시킨다. 이 구간의 시간은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_3 - t_2 = \frac{I_{pk} L_{in}}{V_{Cb} - |V_{in}|} = \frac{|V_{in}|(t_2 - t_0)}{V_{Cb} - |V_{in}|} \quad (5)$$

4) 모드 IV : t₃ ≤ t ≤ t₄

변압기 누설 인덕터의 에너지가 환류 다이오드를 통하여 C_b로 리셋되면, 출력 인덕터 L_o에 저장된 에너지가 환류 다이오드 D_w를 통하여 출력측으로 전력을 전달하는 구간이다.

5) 모드 V : t₄ ≤ t ≤ t₅

출력 인덕터 L_o에 저장된 에너지가 계속적으로 출력측으로 전달되는 구간이다.

2.3 승압 인덕터의 설계

본 연구에서 승압 인덕터의 크기는 매우 중요한 요소이다. 승압 인덕터의 크기가 크면, 승압 인덕터에 흐르는 전류가 연속모드로 되고, 역률이 나빠짐과 함께 C_b의 전압이 상승하는 문제점을 지니고, 승압 인덕터의 크기가 작으면 포화가 발생하는 문제점을 지닌다.

따라서 본 절에서는 승압 인덕터의 적절한 설계방향을 제시하고자 한다.

스위칭 주기 동안 입력 전압의 순시치가 일정하다고 가정하면, 입력 전류 I_{in}은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{in} = \frac{V_{in} T_{on}}{L_{in}} \quad (6)$$

정상상태에서 C_b의 전압이 일정하다고 가정하면 승압 인덕터에 축적된 에너지의 방출되는 시간 T_{off}는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$T_{off} = \frac{I_{in} L_{in}}{V_{Cb} - V_{in}} = \frac{V_{in} T_{on}}{V_{Cb} - V_{in}} \quad (7)$$

스위치 주기 T동안 입력 전류의 평균치 I_{ave}는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{ave} &= \frac{1}{T} \left(\frac{V_{in} T_{on}}{L_{in}} T_{on} + \frac{V_{in} T_{on}}{L_{in}} T_{off} \right) \\ &= \frac{\left(T_{on} + \frac{V_{in} T_{on}}{V_{Cb} - V_{in}} \right)}{L_{in} T} V_{in} T_{on} \\ &= \frac{V_{in} V_{Cb} D^2 T}{L_{in} (V_{Cb} - V_{in})} \quad (8) \end{aligned}$$

불연속 전류모드(T_{on} + T_{off} ≤ T)로 동작하는 승압 인덕터의 설계를 위하여 주기 T동안 입력 전력과 출력 전력은 같다면, 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{out} \\ \eta V_{in} I_{ave} &= V_o I_o \\ \eta \frac{V_{in} V_{Cb} D^2 T}{L_{in} (V_{Cb} - V_{in})} &= \frac{V_{Cb} D}{n} I_o \quad (9) \end{aligned}$$

여기서 n : 변압기 권선비(n = N₁/N₂)

식 (9)로부터 승압 인덕터가 모든 부하에서 불연속 전류모드로 동작하려면 식 (10)의 조건을 만족해야 한다.

$$L_{in} \leq \frac{n V_{in \min}^2 D_{\max} T}{\eta I_{o \max} (V_{Cb \max} - V_{in \min})} \quad (10)$$

여기서

V_{in min} : 최소 입력 전압 [V]

D_{max} : 최대 듀티

I_{o max} : 최대 출력 전류 [A]

V_{Cb max} : 최대 C_b 전압 [V]

본 연구에서는

최소 입력 전압 : 85[V], 최대 듀티 : 0.45,

최대 출력 전류 : 40[A], 최대 C_b 전압 : 450[V]으로 선정하고 승압 인덕터 $L_{in} = 41.5[\mu H]$ 로 설계하였다.

설계된 승압 인덕터로부터 C_b 의 전압은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{Cb} = V_{in} \left(1 + \eta \frac{n V_{in}^2 D T}{I_o L_{in}} \right) \quad (11)$$

2.4 실험결과 및 특성비교

제안된 단일전력단 AC/DC PFC TSFC의 특성 파악을 위하여 입력 AC 110[V], 출력 DC 5[V]/40[A], 스위칭 주파수 100[kHz], 출력 200[W]급의 시제품을 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

그림 5는 주 스위치 S_2 의 전압 및 전류 파형을 나타내며, 주 스위치 전류가 불연속적으로 동작함을 알 수 있다.

표 1. 실험에 사용된 소자와 회로 파라미터
Table 1. Specifications and Parameters used in Experiment

입력전압(V_{in})	AC 110[V]
출력전압(V_o)	5[V]
최대출력(P_o)	200[W]
스위칭 주파수(f)	100[kHz]
승압 인덕터(L_{in})	41.5[μH]
브리지 정류 다이오드	D25XB60. Shindengen
보조 다이오드(D_{a1})	DSEI 30. IXYS
보조 다이오드(D_{a2})	DSEI 30. IXYS
주 변압기	PQ4040. TDK $N_1 : N_2 = 40 : 3.$
정류 커패시터(C_b)	330[μF]
주 스위치(S_1, S_2)	IXFR26N60Q. IXYS
정류 다이오드(D_r)	72CPQ030. IR
1차측 환류 다이오드(D_1, D_2)	SF10L60U. Shindengen
출력 인덕터(L_o)	110.93[μH]
출력 커패시터(C_o)	2200[μF] \times 6

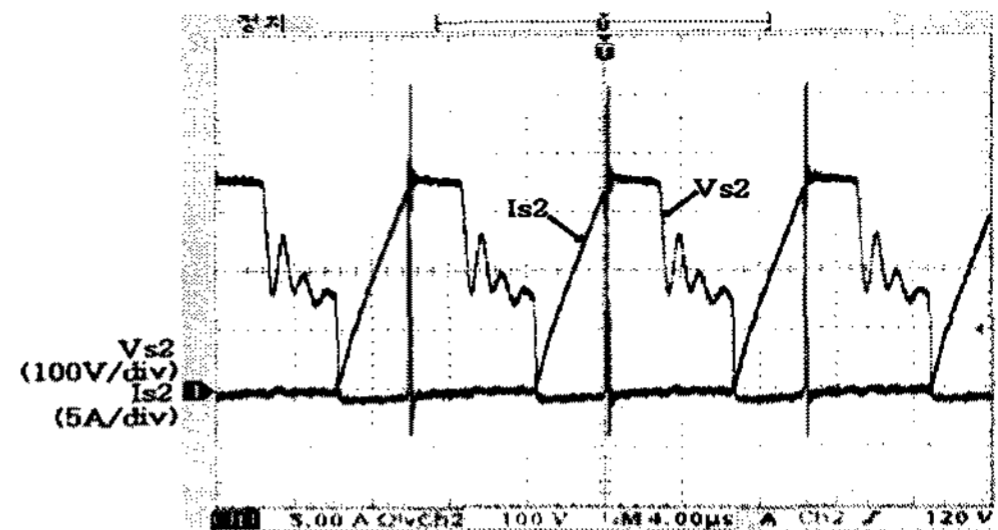


그림 5. 주 스위치 S_2 의 전압 및 전류파형
Fig. 5. Voltage · Current waveforms of Main Switch S_2

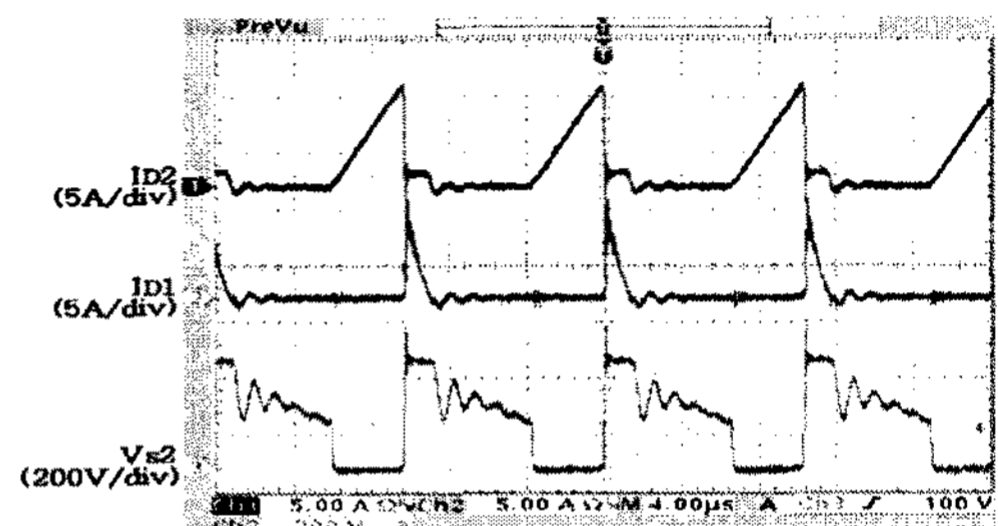


그림 6. 보조 다이오드 D_{a1}, D_{a2} 의 전류 및 주 스위치 S_2 의 전압파형
Fig. 6. Voltage · Current waveforms of auxiliary Diode D_{a1}, D_{a2} , and Main Switch S_2

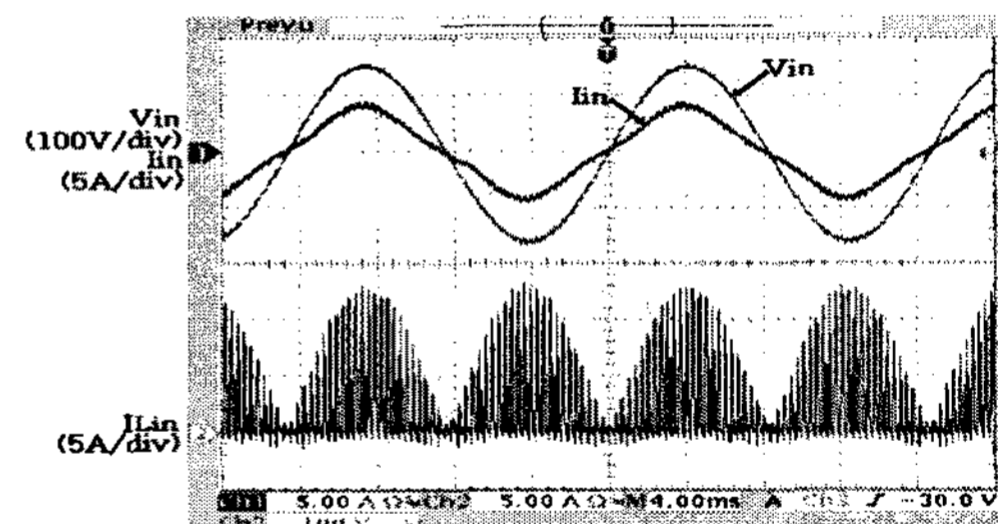


그림 7. 입력 전압, 전류파형 및 승압 인덕터 전류파형
Fig. 7. Input Voltage · Current waveforms and Boost in auxiliary Current

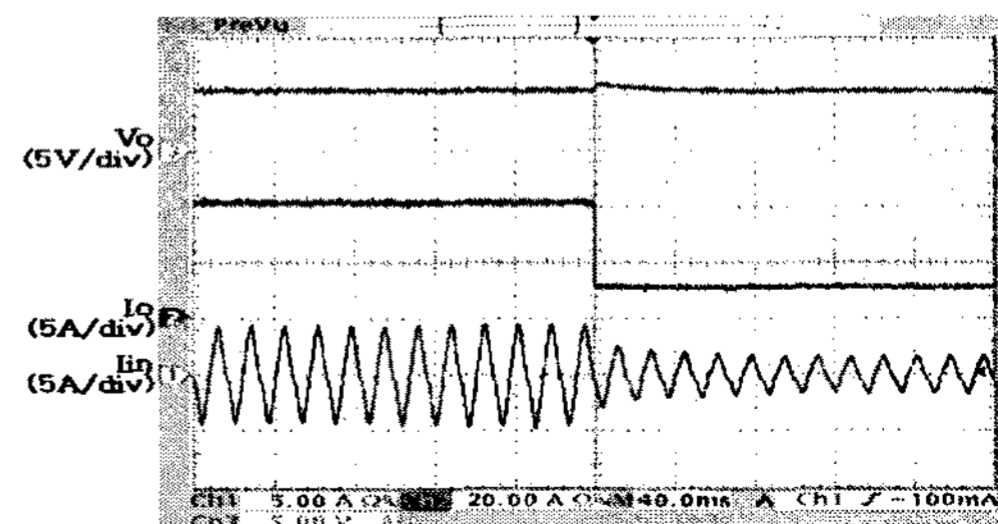


그림 8. 부하 변동시 출력 전압, 전류파형 및 입력 전류파형(100[%]→25[%] 부하변동)
Fig. 8. Output Voltage · Current waveforms and Input Current of load step change (100[%]→25[%] load step change)

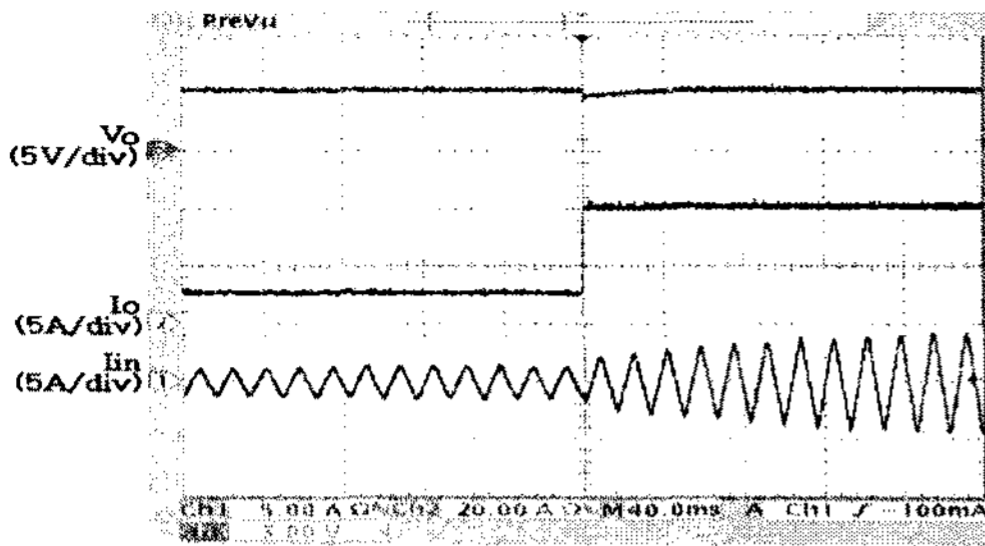


그림 9. 부하 변동시 출력 전압, 전류파형 및 입력 전류파형(25[%]→100[%] 부하변동)
 Fig. 9. Output Voltage · Current waveforms and Input Current of load step change (25[%]→100[%] load step change)

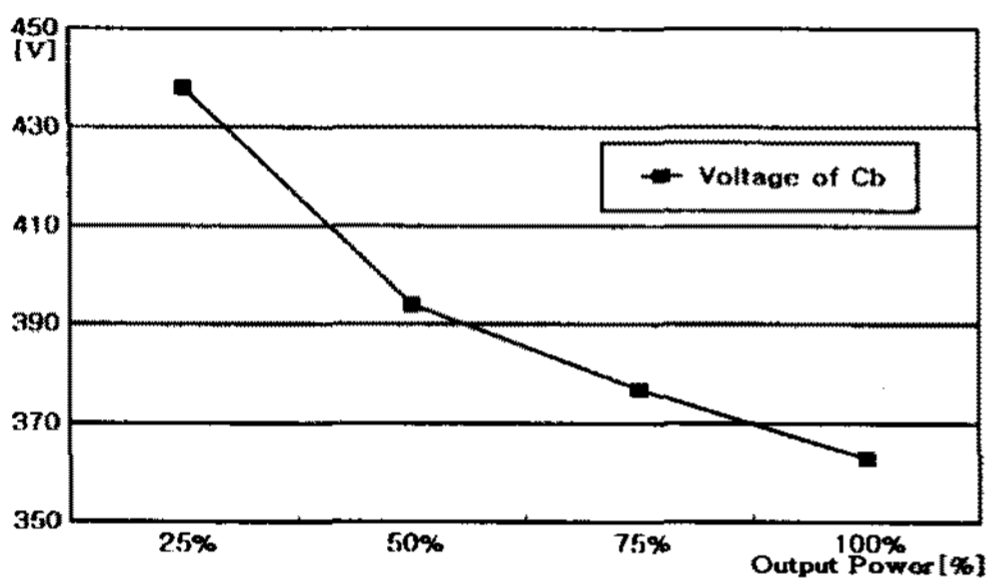


그림 10. 출력에 따른 C_b 전압의 변화
 Fig. 10. V_{Cb} -variation according to output power

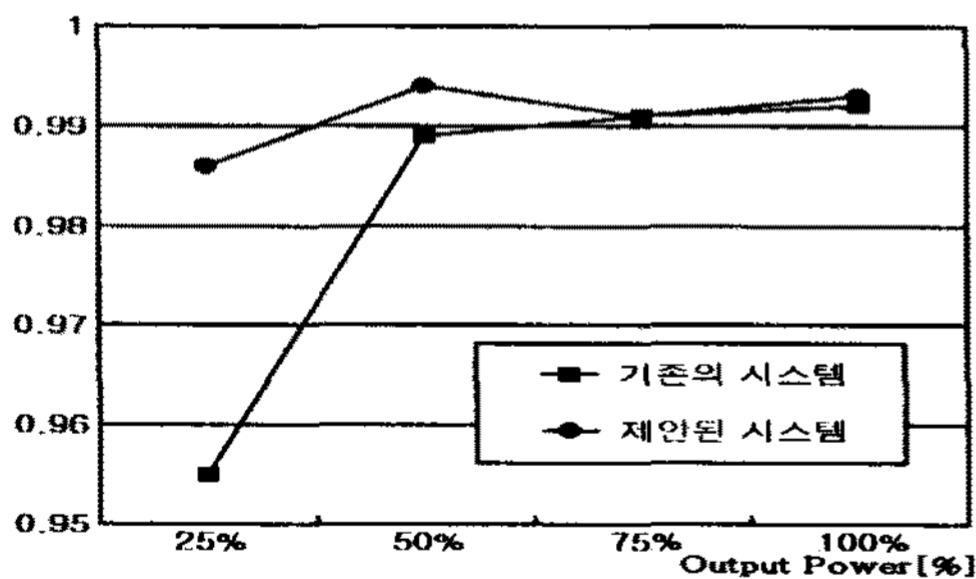


그림 11. 각각의 방식에 대한 역률 비교
 Fig. 11. Compared Power Factor for each topology

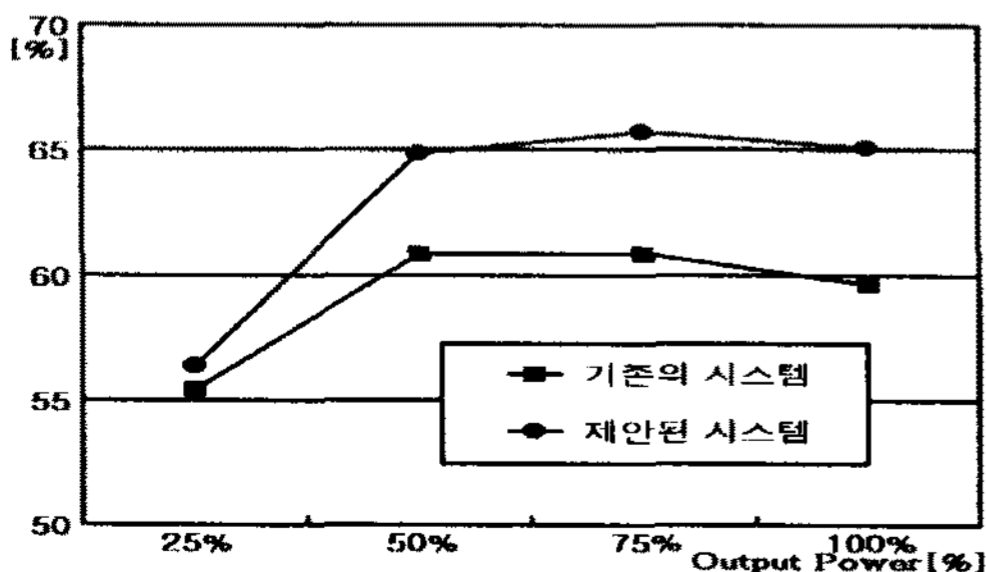


그림 12. 각각의 방식에 대한 효율 비교
 Fig. 12. Compared Efficiency for each topology

그림 6은 보조 다이오드 D_{a2} , D_{a1} 의 전류파형과 주 스위치 S_2 의 전압파형을 나타내며, 보조 다이오드 D_{a2} 가 오프됨과 동시에 D_{a1} 을 통하여 커패시터 C_b 가 충전됨을 알 수 있다.

그림 7은 입력 전압, 전류 및 승압 인덕터 전류파형을 나타낸다. 승압 인덕터의 전류가 불연속으로 동작하여, 입력 역률이 단위역률로 개선됨을 알 수 있다.

그림 8, 9는 25[%]에서 100[%]로 부하 변동시 출력 전압, 전류 및 입력 전류 파형을 나타내며, 단위역률로 제어됨과 동시에 출력 전압이 부하 변화에 잘 추종됨을 알 수 있다.

그림 10은 출력에 따른 C_b 전압의 변동을 나타낸다. 경부하에서 C_b 의 전압이 상승함을 알 수 있으며, 이는 승압 인덕터를 통해 입력되는 전력에 비하여 부하에서 소비하는 전력이 작기 때문이다.

그림 11, 12는 기존의 2단 전력 변환 시스템과 제안된 단일전력단 AC/DC TSFC의 역률과 효율을 각각 비교한 결과로 측정은 Voltech사 전력 분석계 PM3000A로 입·출력 전압 및 전류를 실측하여 계산한 결과이다. 제안된 방식은 기존의 방식에 비하여 스위치 숫자가 저감과 동시에 직접으로 전력을 변환하므로 전 부하범위에 걸쳐서 단위 역률로 제어되며 보다 향상된 효율 특성이 나타남을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 단일전력단 AC/DC PFC Two-Switch Forward 컨버터(TSFC)를 제안하였다. 제안된 시스템은 역률개선을 위한 AC/DC Boost 컨버터와 저전압 출력을 위한 DC/DC TSFC를 하나로 결합한 형태로서 기존의 시스템에 비하여 간결한 장점을 지닌다. 본 연구에서는 제안된 방식의 동작과정, 특성 및 승압 인덕터 설계에 관하여 논하였으며, 200[W]급 시제품 시스템에서 단위 역률로 제어됨과 함께 최대 5.48[%]의 효율 개선을 확인하였다.

제안된 컨버터는 저전압, 대전류 출력을 요구하는 시스템에 적용이 가능하리라 판단된다.

References

- [1] M. Daniele, P.K. Jain, and G. Joos, "A single stage power factor corrected ac/dc converter," The proceedings of INTELEC '96, pp. 256-262, 1996.
- [2] C. Qiao, K.M. Smedley, and K.M. Maddaleno, "A single-stage power factor corrected converter with continuous condition mode operation and regenerative clamping," The proceedings of INTELEC '00, pp. 332-336, 2000.
- [3] R. Redl, L. Balogh, and N.O. Sokai, "A new family of single-stage isolated power-factor correction with fast regulation of the output voltage," The proceedings of PESC '94, pp. 1137-1141, 1994.
- [4] R. Redl, and L. Balogh, "Design considerations for single-stage isolated power-factor-corrected power supplies with fast regulation of the output voltage," The proceedings of APEC '95, pp. 454-458, 1995.
- [5] L. Huber, M.M. Jovanovic, "Single-Stage, single-switch, Isolated power supply technique with input-current shaping and fast output-voltage regulation for universal input-voltage range applications," The proceedings of APEC '97, pp.272-280, 1997.
- [6] M.M. Jovanovic, D.M. Tsang and F.C. Lee, "Reduction of voltage stress in Integrated high quality rectifier-regulators by variable frequency control," The proceedings of APEC '97, pp.281~287, 1997.
- [7] Jinrong Qian, Qun Zhao and Fred C. Lee "Single-Stage Single-Switch Power Factor Correction AC/DC Converters with DC-Bus Voltage Feedback for Universal Line Applications," IEEE Transaction on, Vol 13, pp.1079-1088, Nov. 1998.
- [8] 배진용, 김용, 백수현, "PFC와 무손실 스너버를 이용한 Two-Transistor Forward Converter의 특성해석," The proceedings of KIEE '05, pp.176~179, 2005.

◇ 저자소개 ◇

배진용 (裵辰容)

1975년 8월 17일생. 1998년 2월 동국대 전기공학과 졸업. 2002년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2005년 8월~현재 특허청 전기사무관.

김 용 (金 龍)

1957년 3월 20일생. 1981년 2월 동국대 전기공학과 졸업. 1994년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 동국대 전기공학과 교수.