단일전력단 고역률 TTFC(Two-Transistor Forward Converter)

배진용* . 김 용** . 김필수*** . 이은영*** . 권순도***
*특허청 . **동국대학교 . ***대림대학

Single-Stage High Power Factor TTFC(Two-Transistor Forward Converter)

Jin-Yong Bae* . Yong Kim** . Pill-Soo Kim*** . Eun-Young Lee*** . Soon-Do Kwon***
*Korean Intellectual Property Office . **Dongguk University. ***Daelim College

Abstract - This paper presents the single-stage High Power Factor TTFC(Two-Transistor 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 contests of AC line currents of power supplies. This research proposed the single-stage two switch forward circuit for low voltage and high current output.

1. 서 론

본 연구에서는 전자장치 및 통신용 장비에 주로 이용되는 출력 200W(DC 5V, 40A)의 부하를 대상으로 컨버터의 효율 개선 방안을 제시하고자 한다.[1-3]

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

2. 본 론

2.1 기존의 시스템

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

기존의 시스템은 역률개선을 위한 AC/DC Boost 컨버터와 DC/DC TTFC를 결합한 방식으로 안정적인 역률

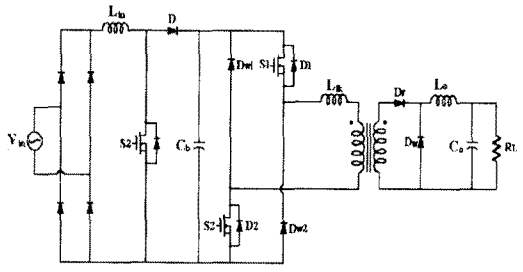


그림 1. 기존의 2단 전력 변환 시스템

2.2 제안된 시스템

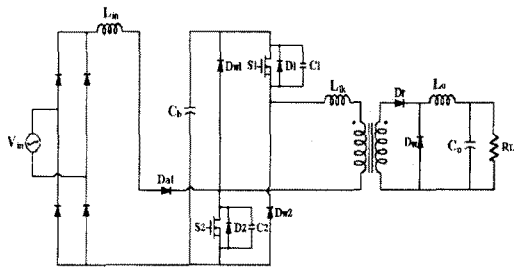


그림 2. 제안된 단일전력단 고역률 TTFC

개선이 가능한 장점을 지닌다.

그러나 전력시스템 및 제어기 구조가 복잡하며, 동시에 전력변환이 두 번 이루어지므로 전체 효율이 저감되는 문제점을 지닌다.[1-2]

그림 2는 제안된 단일전력단 고역률 TTFC 컨버터를 나타낸다. 제안된 컨버터는 AC/DC PFC Boost 컨버터와 TTFC 컨버터가 결합된 형태로서 Boost 컨버터의 주 스위치(S)와 TTFC의 하단 스위치(S_2)가 하나로 결합된 형태로 기존의 시스템에 비하여 매우 간결한 장점을 지닌다. 그림 3과 4는 제안된 TTFC 컨버터의 모드별 동작 파형과 등가 회로를 나타낸다.

1) 모드 Ⅰ : $t_0 \le t \le t_1$

스위치 S_1과 S_2는 턴온 되었으나 변압기가 자화되는 기간이므로 변압기 1차측에서 2차측으로 전력이 전달되지 못하며, 출력 인덕터 L_o에 저장된 에너지가 환류 다이오드 D_w를 통하여 전력을 부하에 공급한다. 동시에 승압 인덕터 L_{in}의 전류는 보조 다이오드 D_{a1}과 스위치 S_2를 통하여 상승하는 구간이다.

이 구간에서 스위치 S_1의 전류와 보조 다이오드 D_{a1}의 전류는 식(1),(2)로 나타낼 수 있으며, 스위치 S_2의 전류는 스위치 S_1과 보조 다이오드 D_{a1}의 전류 합으로 나타낼 수 있다.

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

$$I_{Da1} = \frac{|V_{in}|}{L_{in}} t \quad (2)$$

$$I_{S2} = I_{S1} + I_{Da1} \quad (3)$$

이 모드의 끝에서 스위치 S_1의 전류를 I_1으로 정의한다.

2) 모드 Ⅱ : $t_1 \le t \le t_2$

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

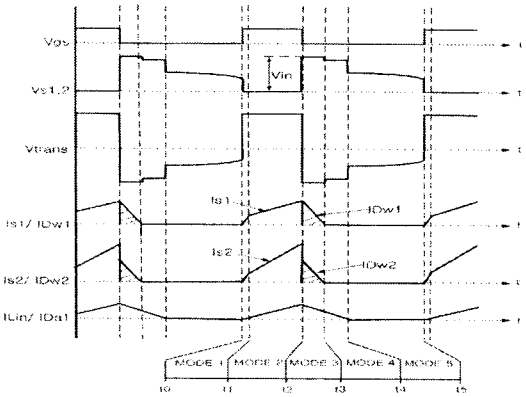
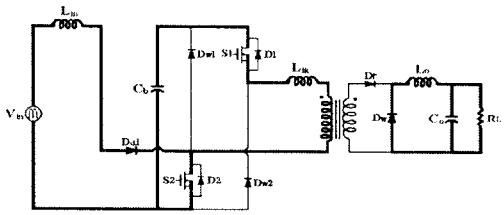
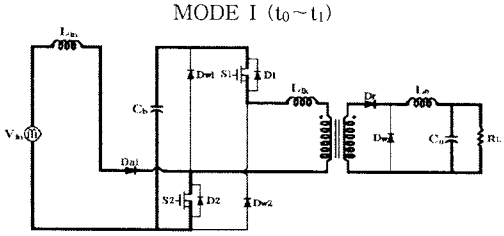


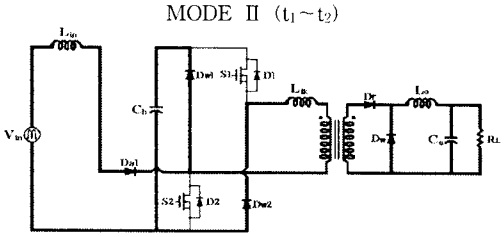
그림 3. 이론적인 회로 각부 파형



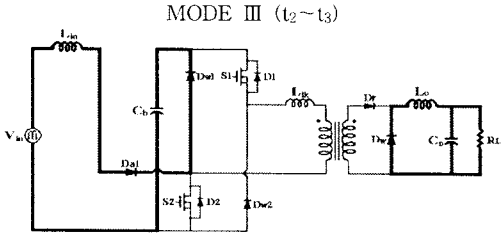
MODE I ($t_0 \sim t_1$)



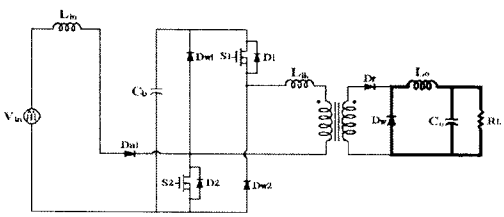
MODE II ($t_1 \sim t_2$)



MODE III ($t_2 \sim t_3$)



MODE IV ($t_3 \sim t_4$)



MODE V ($t_4 \sim t_5$)

그림 4. 제안된 회로의 모드별 동작

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

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

이 모드의 끝에서 스위치 S_1의 전류를 I_2로 정의하며, 또한 승압 인덕터 I_{Lin}의 최대 전류를 I_{pk}로 정의한다.

3) 모드 Ⅲ : $t_2 \le t \le t_3$

스위치 S_1과 S_2가 턴오프되면, 누설 인덕터 L_{lk}에 저장된 에너지가 환류 다이오드를 통하여 C_b로 리셋되는 모드이며, 승압 인덕터의 전류는 보조 다이오드 D_{a1}과 D_W를 통하여 C_b를 충전시킨다. 이 구간의 시간은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

4) 모드 Ⅳ : $t_3 \le t \le t_4$

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 : $t_4 \le t \le t_5$

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.

$$I_{in} = \frac{V_{in} T_{on}}{L_{in}} \tag{6}$$

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

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

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

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

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

$$P_{in} = P_{out}$$

$$\eta V_{in} I_{ave} = V_o I_o$$

$$\eta \frac{V_{in} V_{Cb} D^2 T}{L_{in}(V_{Cb} - V_{in})} = \frac{V_{Cb} D}{n} I_o \qquad (9)$$

여기서, n : 변압기 권선비 ($n = N_1/N_2$)

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

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

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} = 41.5μH로 설계하였다. 설계된 승압 인덕터로부터 C_b의 전압은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

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

2.4 실험결과 및 특성비교

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

그림 5는 주 스위치 S_2의 전압, 전류 파형과 승압 인덕터 L_{in}의 전류 파형을 나타내며, 승압 인덕터 L_{in}의 전류가 스위치에 의해 제어됨을 알 수 있다.

그림 6은 입력 전압, 전류 및 승압 인덕터 전류파형을 나타낸다. 승압 인덕터의 전류가 불연속으로 동작하여, 입력 역률이 단위역률로 개선됨을 알 수 있다.

그림 8,9는 기존의 2단 전력 변환 시스템과 제안된 단일전력단 AC/DC TTFC의 역률과 효율을 각각 비교한 결과로 측정은 Voltech사 전력 분석계 PM3000A로 입·출력 전압 및 전류를 실측하여 계산한 결과이며, 제안된 방식이 전 부하범위에 걸쳐서 역률과 효율이 우수함을 알 수 있다.

표1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{in})	AC 110 V
출력전압 (V_o)	5 V
최대출력 (P_o)	200 W
스위칭 주파수 (f)	100 ㎑
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 × 6

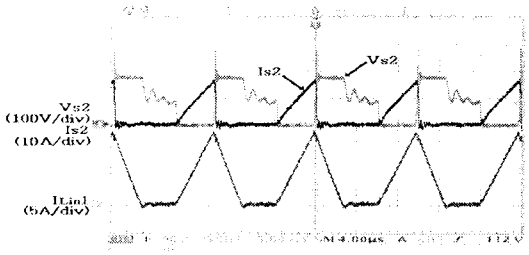


그림 5. 주 스위치 S2의 전압, 전류파형 및 승압 인덕터의 전류파형

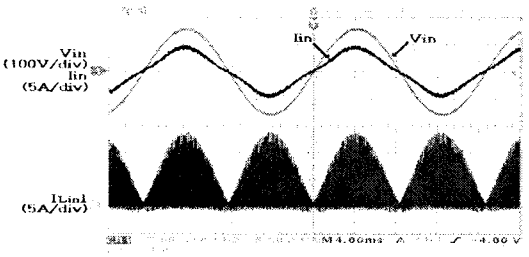


그림 6. 입력 전압, 전류파형 및 승압 인덕터 전류파형

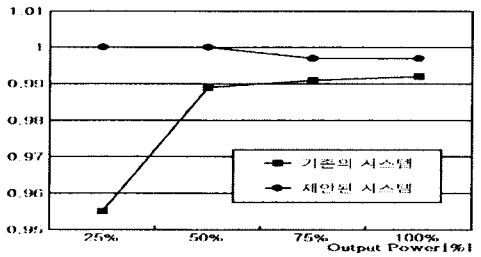


그림 7. 역률 비교

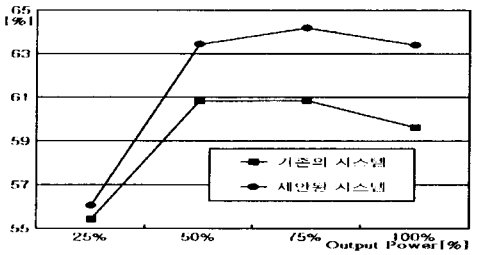


그림 8. 효율 비교

3. 결 론

본 논문에서는 단일전력단 AC/DC PFC TTFC를 제안하였다. 제안된 시스템은 기존의 시스템에 비하여 매우 간결한 장점을 지니며, 동시에 전 부하영역에서 향상된 역률 및 효율 특성을 보임을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[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] 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.

[3] 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.