

# 단상 역률개선형 Single-Stage AC/DC Forward Converter

김태진, 김은수, 조정구, 변영복, 조기연  
한국전기연구소

## Single phase Single-Stage AC/DC Forward PFC Converter with PFC

T.J.Kim, E.S.Kim, J.G.Cho, Y.B.Byun, K.Y.Joe  
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

### ABSTRACT

기존의 역률보상회로가 별도의 전력변화단을 가지고 있어 소자수가 많아지고 복잡한 하드웨어 구성을 가지고 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 별도의 전력변환단을 가지지 않고 PFC기능을 가지는 단일 전력단(Single-Stage) 단상 AC/DC Forward Converter에 대하여 실험하여 검증하였다.

### 1. 서론

역률 보상 회로가 독립적인 전력 변환단을 가지는 2단(two-stage) 전력 변환 방식을 채용하고 있는데, 이러한 2단 전력 변환 방식은 역률 보상과 출력 전압 제어가 각각 독립적이라는 장점을 가지고 있다. 그러나, 소자 수가 많아 부피가 커져 전체 시스템이 복잡하고, 효율이 낮아지는 단점을 지니고 있다. 최근에 이러한 단점을 보완하기 위해 1단(single-stage) 전력 변환 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 방식에서는 교류 입력 전압에 대해 출력 전압은 일정해야 하므로 이 전압의 차이를 다루기 위해 내부에 벌크성 에너지 저장 커패시터를 사용한다.

본 item에서는 별도의 전류제어기 없이, 삽입 인덕터에 의한 입력역률을 개선하는 방식의 Single-stage AC/DC 포워드 컨버터로 연속모드구간에서 삽입인덕터가 입력전압의 순시 크기에 비례하여 유효 듀티비를 가변하여 입력전류를 분할함으로써 연속모드에서 역률이 개선되는 방식이다.

### 2. 단상 Single-stage AC/DC 포워드 컨버터

2-1. 역률개선형 단상 Single-stage 방식의 AC/DC 포워드 컨버터

그림 2-1은 별도의 전류제어기 없이, 삽입 인덕터에 의한 입력역률을 개선하는 방식의 Single-stage AC/DC 포워드 컨버터이다. 이 컨버터는 삽입인덕터가 입력전압의 순시 크기에 비례하여 유효 듀티비를 가변하여 입력전류를 분할함으로써 연속모드에서 역률이 개선된다. 이 회로 방식은 입력전류의 전류 분할 절연, 출력전압 Regulation 등을 한번의 전력변환으로 가능하다는 점에서 장점을 가지고 있다.

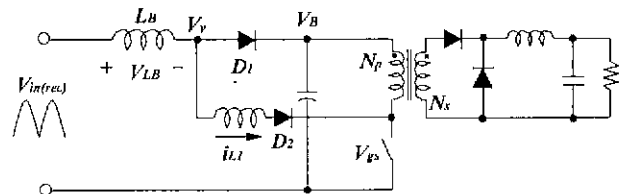
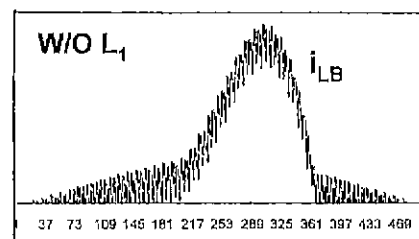
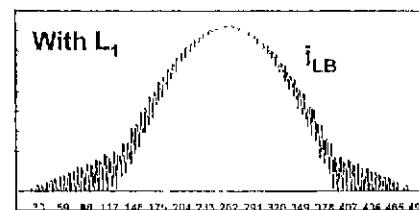


그림 2.1 역률개선형 단상 Single-stage방식의 AC/DC 포워드 컨버터



a) 인덕터 L1이 없는 경우



b) 인덕터 L1이 있는 경우

그림 2.2 인덕터 유무에 따른 입력전류의 파형변화

## 2-2. 동작원리

그림 2.2는 보조 인덕터  $L_1$ 의 있는 경우와 없는 경우에 입력전류 파형변화를 보여준다. 그림 2.3는 컨버터의 동작모드이다.  $V_y$ 점에서 입력역율개선(Power Factor correction : PFC) 조건을 만족시키기 위하여 정류된 입력 전압  $V_m$ 을 변조해야 한다. 이는 고주파 인덕터  $L_1$ 에 의해 변조되며, 그림 3.3(a)에서 보는바와 같이  $t_0$ 에서 스위치 S는 off 상태이다. 인덕터  $L_1$ 에 흐르는 전류는 0이다.  $L_B$ 는 Bulk Capacitor  $V_B$ 에 의해 리셋팅된다.

$t_0$ 에서 스위치가 턴온되면 노드  $V_y$ 는  $V_B$ 의 전압과 동일해진다. 이 때, 인덕터  $L_1$ 이 없다면 Diode  $D_2$ 는 곧바로 턴오프 될 것이며 노드  $V_y$ 이 순간적으로 0이 될 것이다. 이 경우, 온 기간동안  $V_y$ 점에서의 전압은 일정전압으로 일정하며 그 값은  $V_B \cdot D$ 로써 입력전압의 순시 크기에 관계없다. 그래서 인덕터  $L_1$ 이 없는 경우 이 컨버터는 입력역율파형이 생기면서 PFC 조건이 될 수 없다.

하지만, 방전 Loop에 보조 인덕터  $L_1$ 이 있으므로 해서, 스위치 S가 턴 온 할 때  $D_2$ 는 순간적으로 턴 오프 되지 못하면서 인덕터 전류  $i_{L1}$ 이  $i_{LB}$ 에 이르는 시간  $t_2$ 가 될 때까지 계속 도통한다. 또  $t_0$ 에서  $t_1$ 까지의 모드 1구간동안  $V_y$ 는  $V_B$ 와 같아진다.  $L_B$ 와  $L_1$ 은  $V_B$ 에 의해 에너지가 충전된다. 이 때  $V_y$ 는  $V_B$ 와 같다.  $t_2$ 이후에는 다이오드  $D_2$ 는 턴 오프 되고  $L_B$ 와  $L_1$ 은 정류된 입력전압  $V_{in(rec)}$ 에 의해 에너지가 저장된다.

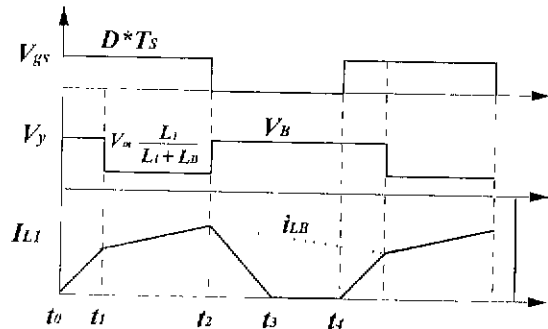
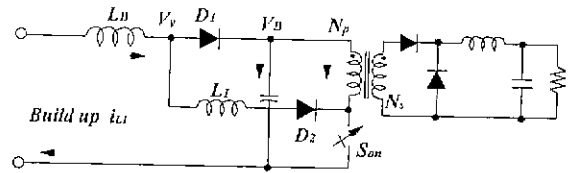
이 때, 노드전압  $V_x$ 는  $\frac{L_1}{L_1 + L_B} \times V_{in(rec)}$ 와

같다. 모드 1( $t_0 \sim t_1$ ) 기간은 순시입력전압  $V_{in(rec)}$ 의 크기가 증가하면 같이 증가한다. 또

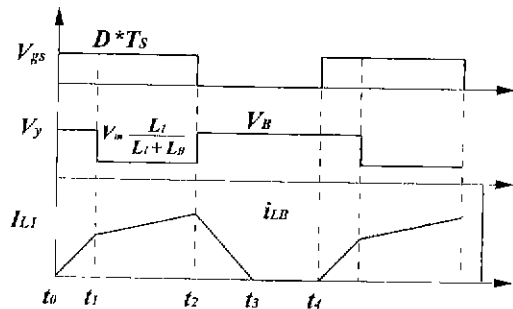
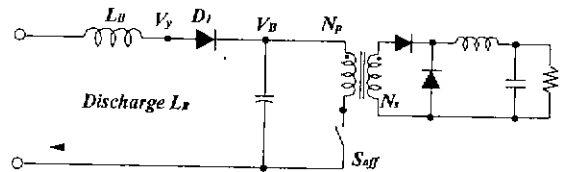
$\frac{L_1}{L_1 + L_B} \times V_{in(rec)}$ 로 입력전압  $V_{in}$ 에 의해서

증가하면, 유효듀티비인  $D_{eff}$ 의 크기는 감소한다. 결과적으로  $L_1$ 의 크기가 유효변조비를 결정한다. 그리고 입력전압이 증가하면  $V_x$ 의 평균치로 증가한다.

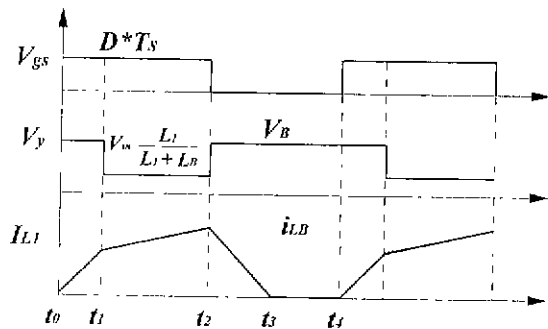
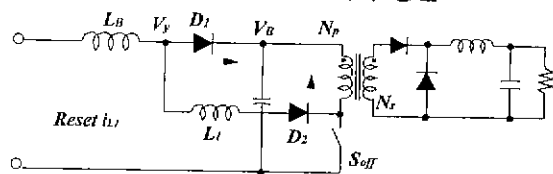
또, 이 회로의 최소의 PFC 유효듀티비의 관점에서 보면, 그림 2.4(a)와 (b)를 비교해 보면, 유효 듀티비  $D_{eff}$  구간(= $t_2-t_1$ )은 모드2의 구간이다. 입력전압이 A포인트에서 → B포인트로 증가하였다고 하면 부스터 인덕터의 유효듀티비  $D_{eff}$ 는 감소하고, 2 Stage의 PFC의 부스터 컨버터의 PFC 듀티비와 비슷해진다. 이러한 동작원리(전류를 분할하므로) 인덕터  $L_1$ 은 단일전력단 PFC 컨버터로써 동작한다. 그림 2.2는 보조 인덕터  $L_1$ 의 있는 경우와 없는 경우에 입력전류 파형변화를 보여준다.



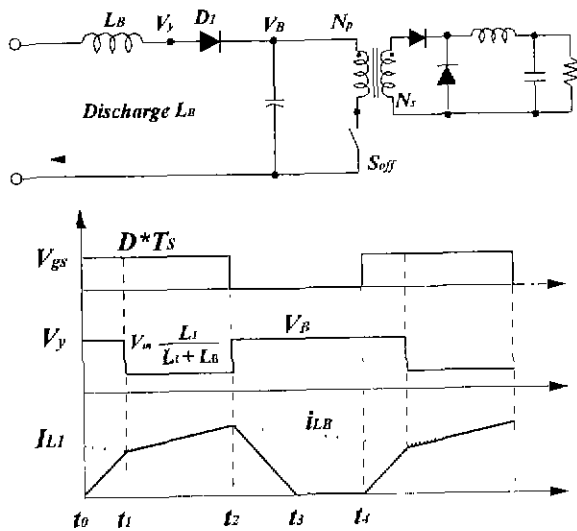
a) 모드 1. ( $t_0 \sim t_1$ ) :  $L_B$ 에서  $L_1$  전류의 전류 Commutation



b) 모드 2. ( $t_1 \sim t_2$ ) :  $V_{in}$ 에 의해  $L_B$ 과  $L_1$ 에 에너지 충전

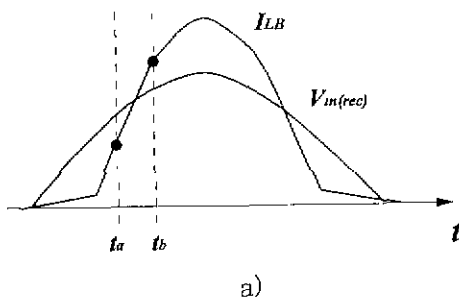


c) 모드 3. ( $t_2 \sim t_3$ ) :  $L_B$ 과  $L_1$ 의 충전된 에너지 방전

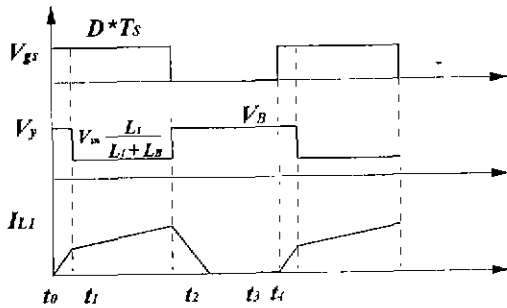


d) 모드 4. ( $t_3 \sim t_4$ )  $L_B$ 과  $L_1$ 의 충전된 에너지 방전

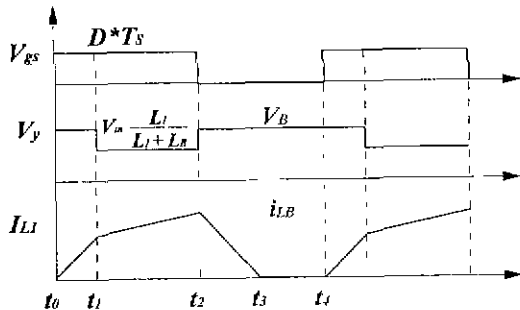
그림 2.2 역을개선형 Single-stage AC/DC 컨버터 동작모드



a)



b)  $t = t_a$



c)  $t = t_b$

그림 2.3 순시입력전압에 따른 파형변화

### 3. 실험 결과 및 고찰

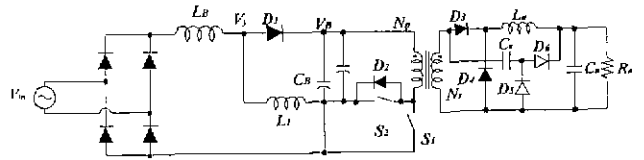


그림 3.1 실험에 적용한 역을개선형 Single-stage AC/DC 컨버터

그림 3.1에서는 실험에 적용한 역을개선형 Single-stage AC/DC 컨버터의 회로도이다. 실제 실험에서는 그림 3.1의 회로에서 효율개선을 위한 2가지회로를 더 추가하였다.  $S_2$ ,  $D_2$ ,  $C_r$ 으로 구성되어 있는 액티브 클램프회로는 변압기 여자전류의 리셋전압을 높여서 빠른 소호시간을 얻음으로써 포워드 컨버터의 듀티비를 최고0.7까지 증가하여 역을 및 효율을 개선하고 또,  $C_s$ ,  $D_5$ ,  $D_6$ 으로 구성되어 있는 2차측 무손실 스너버는 2차측 출력다이오드의 소프트 스위칭방식으로 스위칭손실을 방지하기 위한 회로다. 그림 4.2는 입력전압  $V_{in}$  및 입력전류  $i_{in}$ 의 전압파형으로 역을은 0.9, 입력전류의 %THD는 26.86이다. 그림 3.3은 스위치  $S$ 의 gate 신호, 노드  $V_y$ 에서의 전압과 보조 인덕터  $L_1$ 의 전류를 나타내고 있다. 파형에서 알 수 있듯이 보조 인덕터에 의해 노드  $V_y$ 에서의 전압이 곧바로 영이 되지 않고  $L_1$ 의 전류가  $L_B$ 의 전류까지 상승하는 시간 약 4 $\mu$ s정도 지연됨을 볼 수 있다. 그림 3.3의 a), b)는 출력  $P_{out}$ 에 대한 효율, 입력전류의 %THD를 나타내었다.

본 회로는 입력전류의 크기가 적은 경부하에서도 부하가 증가할수록 역을 및 효율도 증가한다. 또한, 경부하에서는 벌크 커패시터 전압의 증가 리셋전선에 전압이 높게 걸리므로 결과적으로 2차측에 높은 역전압 다이오드를 요구하게 되는 단점을 가진다. 이러한 벌크 커패시터 전압의 상승을 적절히 방지하기 위한 방법으로 변압기 권선에 주회로에 감는 방법이 있다. 실험에 사용된 회로 정수는 표1과 같다.

표1 회로 정수

교류입력전압 $V_{in}$	110[V]	Bulk 커패시터 $V_B$	3500[ $\mu$ F]
출력 전압 $V_o$	50[V]	보조 커패시터 $C_{s1}, C_{s2}$	700[pF]
인덕터 $L_B$	400[ $\mu$ H]	필터 인덕턴스 $L_o$	400[ $\mu$ H]
보조인덕터 $L_1$	16[ $\mu$ H]	평활용 커패시터 $C_o$	4700[ $\mu$ F]
일차측 인덕턴스 $L_p$	600[ $\mu$ H]	변압기 누설 인덕턴스	8[ $\mu$ H]
이차측 인덕턴스 $L_s$	100[ $\mu$ H]	시비율 $D_{max}$	0.7

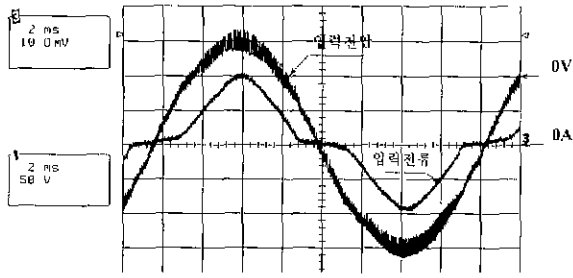
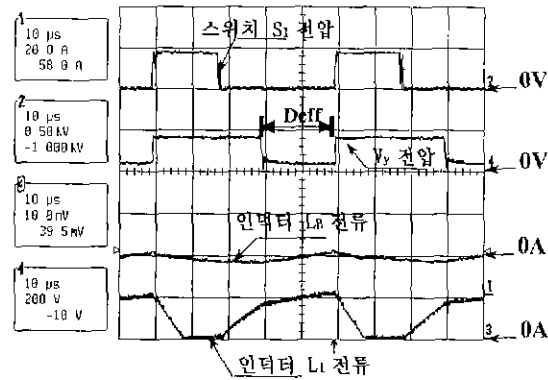
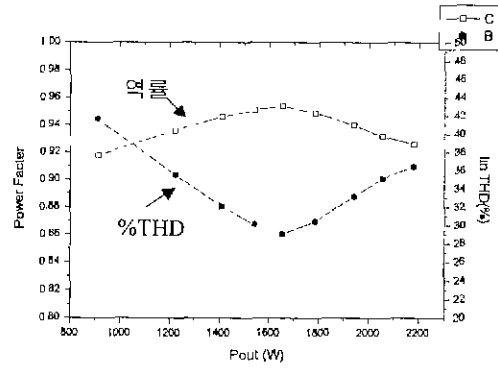
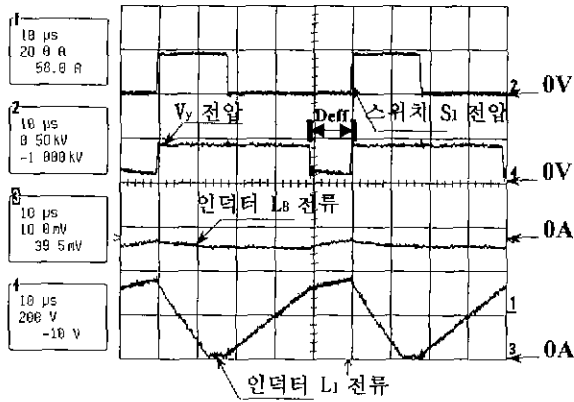


그림 3.2 입력전압 $V_{in}$  및 입력전류 $I_{in}$  및 고조파 분석  
(50V/div, 50A/div, 5ms/div)



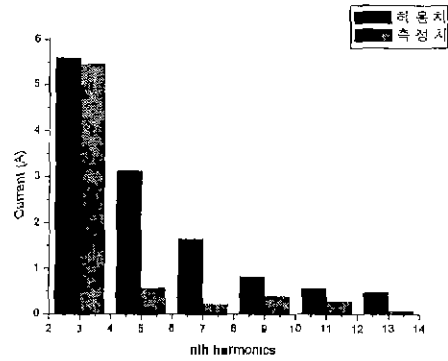
a) 순시입력전압 $V_{in}$ 이 높은 경우 ( $t = t_a$ )



b) 순시입력전압 $V_{in}$ 이 높은 경우 ( $t = t_b$ )

그림3.3 회로 각 부분의 전압 및 전류  
(40V/div, 200V/div, 20A.div, 5ms/div)

a) 효율 및 고조파율



b) 고조파 분석 및 IEC규격 비교

그림 3.4 출력에 대한 각각의 비교

#### 4. 결론

본 item에서는 별도의 제어기를 설치하지 않고, 보조 인덕터에 의한 전류 lagging을 이용하여 유효 듀티비를 입력전압의 매 순시 크기에 비례하는 Single stage 방식의 포워드 컨버터에 대하여 역율보상 회로를 소개하고 이를 실험을 통하여 회로 동작을 검증하였다.