

## Feedforward 제어에 의한 고효율 AC/DC 컨버터의 특성분석

김철진, 장준영, 유병규\*, 신승수, 김영태\*  
 한라대학교, 원주대학\*

### (A study on the characteristics of high power factor AC/DC converter with Feedforward control)

Cherl-Jin Kim, Jun-Young Jang, Byeong-Ku Yoo\*, Seung-Soo Sin, Young-Tae Kim\*  
 Halla University, Wonju National College\*

**Abstract** - Conventional Switched Mode Power Supplies(SMPS) with diode-capacitor rectifier have distorted input current waveform with high harmonic content. Typically, these SMPS have a power factor lower than 0.65. To improve with this problem, the power factor correction(PFC) circuit of power supplies has to be introduced. Specially, to reduce size and manufacture cost of power conversion device, the single-stage PFC converter is increased to demand as necessary of study. In this case single-stage PFC converter has been used DC-DC converter with boost converter.

However in this paper, it is studied flyback converter of high power factor, high efficiency by feedforward control. Also, the validity of designed and manufactured high power factor flyback converter is confirmed by simulation and experimental results.

#### 1. 서론

최근 IC의 고집적화에 따른 기술적 진보에 맞춰 각종 전자기기의 소형화 경향과 추세가 빠르게 진전되고 있다. 이에 수반하여 이러한 기기에 안정된 전압을 공급하기 위한 전원부는 대부분이 커패시터 입력방식을 채택하고 있어 입력전류 형태는 펄스성 전류이므로 입력전압의 왜곡과 입력전류의 고조파 성분으로 인해 주변기기에 영향을 미치게 되고 낮은 역률을 갖게 된다.

이러한 문제들을 해결하기 위해 스위칭 전원의 DC-DC 컨버터에 역률 개선회로를 보상하는 방법에 대한 연구가 제안되고 있다. 특히, 전력변환장치의 부피와 제작비용 등을 줄이기 위해 입력측과 출력측을 전기적으로 절연하여 DC-DC 변환 기능을 동시에 수행하는 단일 전력단(single-stage) 역률개선용 컨버터에 대한 연구가 요구되고 있다.[5]

일반적으로 스위칭 전원장치에서 전원의 역률을 개선하기 위한 방법은 DC-DC 컨버터에 승압형 컨버터를 삽입하여 불연속전류모드(DCM : discontinuous current mode)로 동작시켜 입력전류를 정현파와 합으로써 역률을 개선하는 방법이 주로 사용되어 왔으나, 이 경우 PFC단은 DCM으로, DC-DC 단은 전류연속모드(CCM : continuous current mode)로 동작할 경우 전력 불평형이 존재하여  $V_B$ 의 입력전압이 2배 이상의 높은 전압 스트레스(stress)를 가하게 되는 단점이 존재하게 된다. 또한 단일 전력단 역률개선용 컨버터는 일반 DC-DC 컨버터에 비해 고주파 변압기의 누설 인덕턴스 영향으로 인해 스위칭동안 높은 전압의 스트레스와 많은 손실을 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하기 위해 feedforward제어에 의해서 고효율과 안정된 출력전압을 얻을 수 있는 단일 전력단 방식의 플라이백 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 입력전류를 연속으로 제어하

여 평균화시킴으로써 고정주파수에서 역률개선을 이룰 수 있으며 스위치의 전류 스트레스를 저감하여 소자가 받는 높은 전압 스트레스와 손실을 저감하도록 하였다.

#### 2. 단일 전력단 역률개선회로

##### 2.1 기존의 단일 전력단 역률개선회로

그림 1은 간략화된 부스트 입력방식을 갖는 단일 전력단 역률개선회로를 나타내고 있다.

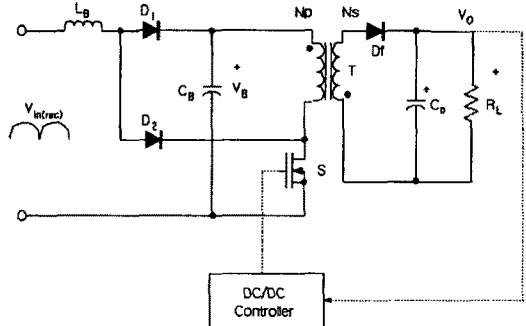


그림 1. 기존의 간략화된 단일 전력단 역률개선회로

2단 전력단(two-stage) 방식의 경우 높은 역률과 안정된 DC전원을 얻을 수 있지만 전력변환이 두 번 이루어지므로 비효율적이고 또한 2 개의 전원부와 제어부를 사용하므로 구조가 복잡하여 비경제적일 뿐만 아니라 부피 또한 커지게 되므로 이와 같은 전력변환방식은 100[W]급 이하의 소용량 전원장치의 경우에는 적합하지 않다.

단일 전력단 방식은 하나의 주 스위치와 제어기를 갖으며, 제어기는 출력전압을 빠르게 안정화시킴으로써, 컨버터가 정상상태에서 동작할 때 스위치의 듀티비는 입력전원 주기동안에 일정하다. 이단 전력단 방식과 비교하면, 폭넓은 입력전압(90~265Vac)의 응용분야에서 에너지 축적 커패시터 전압  $V_B$ 는 더 이상 안정화되지 않는다. 그러나, 이러한 문제점에도 불구하고 저전력의 경우에는 이단 전력단 방식에 비해 단일 전력단 방식이 부품의 수를 줄일 수가 있어 비용이 저렴하다는 장점을 갖는다. 또한 고조파의 경우, 이단 전력단 방식보다는 좋지 않지만 부하에 따라 규제치가 다르기 때문에 저전력의 분야에서는 IEC등 국제규격의 조건에는 충분히 만족한다.

##### 2.2 제안된 단일 전력단 역률개선회로

이러한 단점을 개선하기 위해 본 연구에서는 그림 2와 같은 Feedforward 제어에 의한 AC/DC 컨버터방식을 적용한다.

회로구성은 단일 또는 다 출력에 적합하며, 비교적 중·소용량에 적합한 플라이백 컨버터를 대상으로 하였으며, 제어부는 출력전압을 안정화하기 위한 전압오차증폭기, 입력전류를 검출하여 평균화시키는 전류오차증폭기, Multiplier, 비교기 그리고 스위치 구동회로로 이루어져 있다.

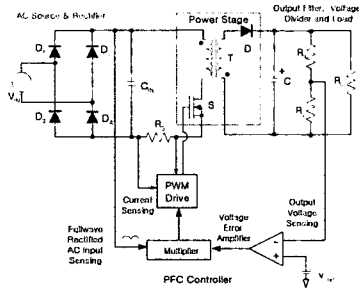


그림 2. 제안된 회로의 등가 회로

DC-DC 컨버터에 있어서 출력전압의 제어는 기존의 전압제어형 PWM 컨버터와 비교했을 때 전압제한 이외에 내부 전류제한을 설정함으로써 일정 주파수의 클럭으로 스위치를 도통시키고 스위칭 전류 또는 인덕터 전류가 설정 값에 도달한 순간에 스위치를 차단시키는 전류 제어방식으로 역률을 개선과 출력전압 안정화를 병행하게 된다.

### 2.2.1 제안된 회로의 동작원리

역률 개선의 수행은 전압 제한과 내부전류 제한을 포함하여 전압오차증폭기의 출력  $i_c$ 를 제어변수로 택하면 기존의 PWM 제어방식의 컨버터와 유사한 방법으로 해석을 수행 할 수 있다. 내부 전류제한은 변압기 1차 측의 인덕터 전류  $i_L$ 을 검출하여 이용한다.

1) 전압오차증폭기 : 출력전압을 검출하여 전압오차증폭기의 반전단자에 입력, 기준전압과 비교하여 증폭된 오차를 제어변수인  $i_c$ 로 출력하고 멀티플라이어에 입력한다.

2) 멀티플라이어 : 입력전압을 검출하여 IC내부의 승산기에서 승산되어서 제어변수  $i_c$ 인 참고값을 형성 전류오차증폭기의 비 반전단자에 입력

3) 전류오차증폭기 : 변압기 1차 측의 인덕터 전류  $i_L$ 을 검출하여 전류 루프에 전류오차증폭기를 삽입하여 인덕터 전류의 평균치를 반전단자에 입력하고 제어변수  $i_c$ 인 참고값과 비교하여 발생한 오차를 증폭하여 비교기의 반전단자에 입력한다.

4) 비교기, R-S Latch 구동회로 : NOR 게이트로 구성된 R-S Latch 회로는 클럭신호에 의해 세트되어 스위치 S가 턴 온 되고 동시에 발생한 삼각파와 전류오차증폭기의 출력이 비교되어 스위치를 턴-오프 하게 된다.

### 3. 설계 및 해석

인덕터의 입력전류  $i_{1pk}$ 은 0에서부터 선형적으로 증가하고, 입력전류의 피크치는 주 스위치  $S_1$ 가 턴-오프 되는 시점이며, 다음과 같이 표현된다.

$$i_{1pk} = \frac{v_e(t)}{L} DT_s = \frac{V_e |\sin \omega t|}{L} DT_s \quad (1)$$

여기서,

$v_e$ 는 정류된 입력전압

$D = (t_1 - t_0)/T_s$ ,  $T_s$ : 스위칭 주기

정류된 선간전압이  $v_e(t) = V_e |\sin \omega t|$ 일 경우 입력 전류의 평균값은 식 (2)와 같다.

$$i_{1ave}(t) = \frac{1}{2} i_{1pk}(t)D = \frac{D^2 V_e}{2f_s L} |\sin \omega t| \quad (2)$$

정상상태에서 시비율과 스위칭 주파수가 일정하게 유지

된다고 가정하면, 이때의 평균 입력전류는 입력전압과 주기가 같고 크기가 비례하는 형태이므로, 결국 인덕터 전류의 평균치는 전압과 동위상이 된다. 따라서 컨버터는 높은 역률로 개선될 수 있으며, 고조파 성분도 저감된다.

그림 3은 플라이백 컨버터를 스위치 S의 ON, OFF시에 MODE1, MOED2의 각 상태를 나타내는 등가회로이다.

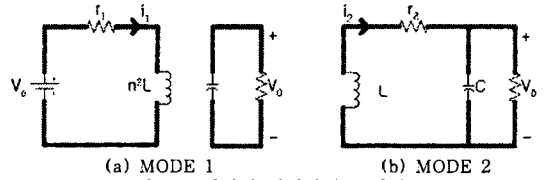


그림 3 플라이백 컨버터의 등가회로

그림 2에서 1차측 인덕턴스를  $L_1$ , 2차측 인덕턴스를  $L_2$ 라 할 때, 권수비가  $n:1$ 이라하면 1, 2차 인덕턴스는 다음 식(3)의 관계를 갖는다.

$$L_1:L_2 = n^2:1 \quad (3)$$

그림 3의 등가회로로부터 MODE 1에서의 방정식은 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{d^2 i_2}{dt} = \frac{V_i}{n^2 L} - \frac{r_1 i_2}{n^2 L} \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{V_i}{nL} - \frac{r_1 i_2}{n^2 L} \\ \frac{dv_c}{dt} &= -\frac{v_o}{CR} \end{aligned} \quad (4)$$

또한 그림 3의 등가회로로부터 MODE 2에서의 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_2}{dt} &= -\frac{i_2 r_2}{L} - \frac{v_c}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{i_2}{C} - \frac{v_o}{CR} \end{aligned} \quad (5)$$

또한 전류모드제어방식에서는  $D > 0.5$  인 경우 스위칭이 반복됨에 따라 컨버터 동작이 불안정하게 되므로 그림 4에서와 같이 기울기가  $m$  인 rmap 파형을 설정전류(제어전류)  $i_c$ 에 중첩시켜 불안정 현상을 제거하여 컨버터가 안정하게 동작되도록 제어하고 있으며, 이 때 1차단 평균전류  $i_{1ave}$ 는 다음 식으로 구해진다.

$$i_{1ave} = \frac{i_{2ave}}{n} = i_c - (m + \frac{m_1}{2})dT_s$$

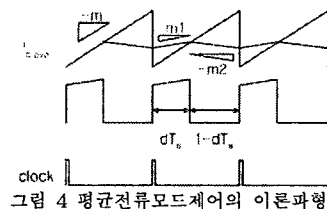


그림 4 평균전류모드제어의 이론파형

또, 정상상태시 2차단의 평균전류는 다음 식(6)과 같다.

$$I_2 = nI_c - n(m + \frac{m_1}{2})DT_s \quad (6)$$

입력전압, 인덕터전류 및 출력전압을 검출하여 입력으로 받는 비교기는 다음 식(7)과 같은 특성을 나타낸다.

$$r_1 i_{1av} + S_{eTon} = \frac{V_{rec}}{K_e V_{EA}} \quad (7)$$

이때  $V_{EA}$ 는 출력전압을 안정시키기 위한 기준전압과의 편차전압이며,  $S_e$ 는 일정한 스위칭 주파수에서 동작시키기 위해 제어가 내부에서 발생시키는 삼각파의 최대 전압이다. 온 시간이 전체 값에 비해 작다고 하면 다음 식으로 근사 시킬 수가 있다.

$$i_{1pk} = \frac{V_{EA}}{k_e r_1} V_{e1} \sin \omega t \quad (8)$$

위의 식으로부터 오차증폭기의 출력전압  $V_{EA}$ 가 정상 상태에서 일정하다고 하면 인덕터전류의 최대값은 입력 전압과 동위상이며, 정현파형태의 값을 갖게된다.

또한, 전고조파왜곡을 THD(Total Harmonic Distortion)라 할 때 역률과 고조파의 상관관계는 다음의 식(9), (10)으로 표현 할 수 있으며, 고조파 왜곡을 최소화함으로써 고역률이 가능함을 알 수 있다.

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (9)$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (10)$$

(단,  $I_n$ 은 입력전류의  $n$ 차 고조파 성분의 실효값)

#### 4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 실험을 위하여 그림 2에 제시한 플라이백 컨버터를 기본으로 100[W]의 단일출력으로 설정하여 회로를 설계 및 제작하였으며, 제작한 컨버터의 기본 설계 사양을 다음의 표 1에 제시하였다.

[표 1] 설계 사양 및 구성 소자

입력전압(Vi)	110[V]
출력전압(Vo)	200[V]
입력 전원 주파수(f)	60[Hz]
스위칭 주파수(fs)	25[KHz]
입력 커패시터(Cin)	2.2[uF/250V]
출력 커패시터(CO)	330[uF/400V]
부하(L)	0.5A
스위치소자(S)	V <sub>CES</sub> = 500V, I <sub>C</sub> = 20A
환류다이오드(Df)	V <sub>R</sub> = 600, I <sub>F(AV)</sub> = 8A

그림 5는 표 1의 파라미터를 참고로 하여, 그림 2에 제시한 플라이백 컨버터의 등가회로를 구현하여 시뮬레이션을 수행한 입력전압 및 입력전류의 파형을 나타내고 있다

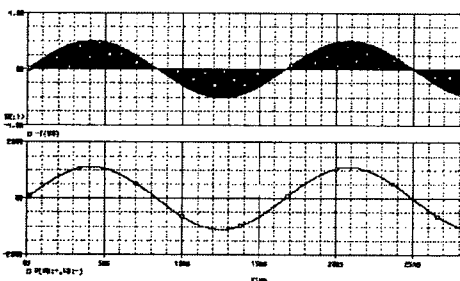


그림 5 입력전압 및 입력전류의 시뮬레이션 파형

다음의 그림 6은 본 연구에서 설계 및 제작한 Feedforward제어에 의한 AC/DC컨버터의 입력전압 및 입력전류 파형을 측정한 결과이다. 입력전압과 전류가 동위상으로 제어되고 있음을 알 수 있고, 입력전압의 크기 변화에 맞춰 전류가 연속으로 추종하여 역률이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

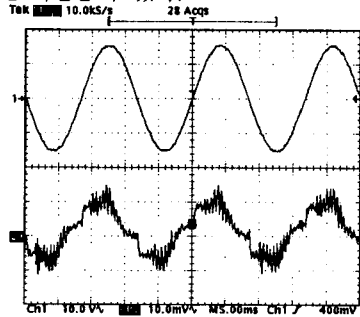


그림 6 입력전압(50V/div) 및 입력전류(1A/div) 파형

#### 5. 결 론

본 연구에서는 feedforward제어에 의한 고역률 플라이백 컨버터를 제안하였으며, 제안된 컨버터는 단일 전력단에서 출력전압 안정화와 전류모드제어 중 연속모드로 동작하는 평균전류제어방식을 채택하여 입력전압의 변화에 따라 입력전류를 추종하도록 제어하여 고역률 제어가 가능하게 하였다.

또한 분석의 타당성을 확인하기 위하여 PSPICE를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 설계 및 제작한 컨버터를 실험한 결과, 역률은 약 0.95이상을 나타내며, 전류의 왜곡현상은 현저히 개선되어 입력전류의 고조파 성분은 국제규격에 적합하다.

향후, 전류의 왜곡현상을 최소화시킬 수 있는 하드웨어 설계방안과 소용량에 적합한 feedforward 제어에 의한 고역률 플라이백 컨버터의 설계방안을 제시함으로써 중·소용량의 전원장치의 역률개선에 유용하게 응용될 것으로 기대된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] R. redl, L. Balogh and N.O. Solcal, "A newfamily of single stage isolated power-factor corrector with fast regulation of the output voltage", in proc. IEEE PESC'92 Rec, pp.1137-144, 1992.
- [2] Jinrong Qian; Qun Zhao; Lee, F.C. "Single-Stage Single-Switch Power-Factor-Correction AC/DC Converter with DC-Bus-Voltage Feedback for Universal Line Application", IEEE Transactions on power Electronics, vol. 13, (no. 6), IEEE, Nov. 1998, pp. 1079-1088.
- [3] M. Madigan, R. Erickson, and E. Ismail, "Integrated high quality rectifier regulators", in IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 1043~1051, 1992.
- [4] L. Rossetto, G. Spiazzi, P. Tenti, "Control techniques for power factor correction converters", Department of Electronics and Informatics, University of Padova, Via Gradenigo 6/a, 35131 Padova-ITALY.
- [5] 김철진 외, "능동 클램프 모드로 동작하는 단일 전력단 AC/DC 컨버터에 의한 역률개선", 대한전기학회 논문지, 50B-8-4, pp. 392~401, 2000.