

금속분말 코어의 특성변화가 PFC 회로에 미치는 영향

주정규*, 안태영*, 장평우**, 정인범***, 최광보***

*청주대학교 전자공학과, **청주대학교 물리학과, ***(주)창성 중앙연구소

Influence on the PFC circuit with characteristics variation of MPP core

J.K. Ju*, T.Y. Ahn*, P.W. Jang**, I.B. Jeong***, and G.B. Choi***

*Dept. of Electronics Eng., Chongju Univ., **Dept. of Physics, Chongju Univ.

***Chang Sung Co.

ABSTRACT

This paper present an investigation of the influence on the PFC(power factor correction) circuit with characteristics variation of MPP (Molybdenum permalloy powder) core. The experiment results of the 1.5kW class Boost converter for PFC rectifier with the average current mode control are evaluated to verify the influence on the PFC converter with inductance variation of the MPP core. As a results, it is shown that the ripple of the inductor using a MPP core increase with output power of the converter.

1. 서론

전 세계적으로 한정된 전력을 효율적으로 관리하기 위해서 무효전력을 억제하고 있으며, 시스템의 기능 향상을 위해서 불가피하게 발생되었던 고조파를 억제하기 위해서 IEC 61000-3-2와 같은 관련 국제규격이 상세하게 규제되어 있고, 현재 점차 강화되고 있는 실정이다. 고조파와 무효전력과 고조파를 억제하기 위해서는 Power factor correction (PFC)용 능동필터를 전원장치의 입력단에 사용하는 것이 일반화 되어 있다. 특히 출력 용량이 1kW 이상으로 큰 전력을 사용하는 경우에는 별도의 역률개선 회로를 이용하는 것이 효율적인 방법이라고 알려져 있다.

본 논문에서는 현재 활발히 연구되고 있는 역률개선회로들 중에서 중·대용량 역률 개선회로에 적합하고 가장 우수한 역률 개선효과가 있는 것으로 알려진 평균 전류 제어 방식을 사용하고 있는 회로에서, 인덕터의 특성 변화가 회로에 미치는 영향을

실험과 해석을 통하여 비교하고, 그 결과를 보고한 것이다.

본 논문에서는 페라이트 재질에 비해서 대전류 특성이 우수하기 때문에 최근 역률개선용 인덕터로 주목받고 있는 Ni-Fe-Mo 조성으로 혼합된 금속분말 코어를 역률개선 회로의 인덕터로 사용하였다. 또한 고조파 규제가 비교적 중대 용량에서 제한되고 있기 때문에 실제 실험회로는 1.5kW급으로 제작하여 특성을 관찰하였다.

2. PFC용 Boost 컨버터

일반적으로 충분한 고조파를 저감하기 위해서는 입력전류를 정밀하게 제어해야하며, 이러한 전류를 효율적으로 제어하기 위해서 다양한 제어방식이 알려져 있다. 그 중, 대표적인 제어방식의 하나인 평균 전류제어방식은 최대치 전류제어방식 제어기 내부의 비교기 입력 단에 오차증폭기를 설치, 주파수 보상이 가능하게 함으로서 전류의 추종을 정밀하게 할 수 있다. 일반적으로 TI사의 UC3854와 같은 범용 제어소자는 컨버터 입력전압, 인덕터 전류, 출력 전압 등 3개의 제어부분 입력과 시비율 조절을 위한 1개의 출력으로 구성되어 있다.^[1]

그림 1에는 단상 입력에서 대용량의 역률개선 회로로 가장 많이 사용되고 있는 Boost 컨버터의 기본 회로가 나타나 있다. 그림에서 입력전압 V_s 는 교류전압이며, 부하 R_L 의 전압 V_o 가 출력전압이다. 금속분말 코어를 사용한 인덕터는 L 이며, 스위치 SW는 일정한 주파수 f_s 에서 제어회로의 지령에 의한 시비율 D 로 제어된다. 이때, 회로에서 r_L , r_D , r_s 는 각 내부 손실 저항을 나타내고 있다. 그림 2에는 Boost 회로가 정상상태에서 동작하는 경우, 인덕터의 전압 $v_L(t)$ 와 전류 $i_L(t)$ 의 파형을 나타내고

있다. 이때 입력전압은 교류 입력이지만, 스위칭 주파수에 비해서 입력전압의 주파수가 현저히 작기 때문에 순시 상태에서 직류전압으로 표현하였다.^[2]

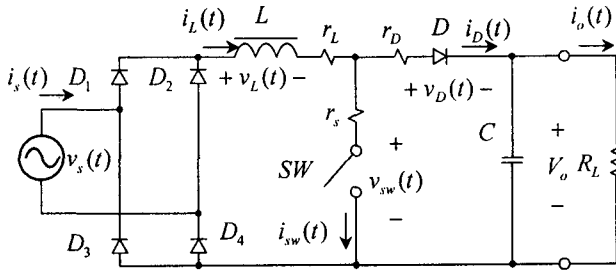


그림 1 PFC용 Boost 컨버터
Fig. 1 Boost converter for the PFC

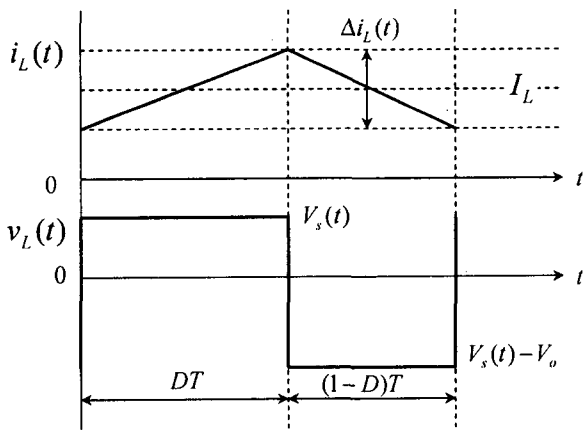


그림 2 인덕터 전압 및 전류 파형
Fig. 2 Voltage and current waveforms of inductor

그림에서 인덕터의 전류에 대한 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta i_L(t) = \left(\frac{DT}{L}\right) V_s = \frac{DV_s}{Lf_s} [A] \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 인덕터 전류의 변화량이 클수록 컨버터의 입력단에 위치한 전류 필터의 부담이 커지기 때문에 입력 필터의 크기가 비례하여 커질 수 있다. 따라서 인덕터의 전류 리플을 억제하기 위해서는 인덕턴스를 크게 하는 방법이 있지만, 제조 가격과 크기의 제한을 받기 때문에 회로의 설계 단계에서 치밀한 계산이 필요하다. 일반적으로 회로의 인덕터를 구성할 수 있는 코어의 재질은 페라이트와 금속분말, 아몰퍼스 등이 있으며, 특히 금속분말 재질 중에서 Ni-Fe-Mo의 조성으로 형성된 코어는 MPP(Molybdeum permalloy powder), Ni-Fe는 High Flux, Fe-Si-Al은 Sendust라고 한다.

그림 1의 컨버터에 대한 정상상태 출력전압은 다음과 같이 계산할 수 있다. 이때 Z_o 는 내부 손실 임피던스이다.

$$V_o = \left(\frac{V_s(t)}{1-D}\right) \left(\frac{1}{1+Z_o/R}\right) \quad (2)$$

단, $r = Dr_s + (1-D)r_D + r_L$, $Z_o = \frac{r}{(1-D)^2}$ 이다.

3. 시험용 Boost 컨버터의 특성

본 논문에서는 금속분말 재질의 코어를 이용한 인덕터의 특성 변화를 관찰하기 위해서 표 1과 같은 최대출력이 1.5kW급 역률 개선 회로를 제작하여 실험하였다. 회로의 제어 회로는 일반적으로 널리 사용되고 있는 평균 전류 제어 전용소자인 TI사의 UC2854를 이용하였으며, 설계된 회로의 스위칭 주파수는 50kHz, 입력전압은 220V로 설계되었다. 그림 3은 본 논문에서 실험회로로 사용된 인덕터의 사진을 나타내고 있다. 사용된 인덕터의 재질은 MPP, High Flux, Sendust 이었으며, 코어의 외경은 60mm와 74mm급이었다.

그림 4에는 출력이 최대부하 1.5kW에서 측정된 실험회로의 입력전압과 입력전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 5는 입력전류의 고조파를 측정된 것이다. 그림으로부터 실험회로는 입력전압과 전류가 동상이 되고 있으며, 전류의 고조파가 저감되어 대부분 입력 주파수의 기본파 항만 존재하게 되고, 따라서, 정상적인 회로기능을 수행하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 출력에 따라서 측정된 역률을 나타내었다. 그림으로부터 실험회로는 출력이 300W 이상에서 95%이상의 역률을 나타내고 있으며, 500W 이상에서는 98% 이상의 높은 역률을 보여주고 있다. 그림 9는 실험회로에 대한 전력변환 효율을 나타낸 것이다. 그림으로부터 회로는 1kW 이상에서 90%의 효율과 1.5kW에서는 93%의 효율을 나타내고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 실험결과로부터 본 논문에서 설계 제작된 1.5kW급 실험회로는 낮은 출력에서 최대 출력까지 정상적인 역률 개선 기능을 수행하고 있음을 알 수 있었다. 특히 역률은 정상범위 내에서 99% 이상을 나타내었고, 출력전압은 5% 이내의 안정도를 보였으며, 전력변환효율은 최대 93% 내외로 높은 효율을 나타내었다.

표 1 PFC 컨버터의 사양

Table 1 Specifications of PFC converter

Parameters	Value	Unit
Input voltage	220	V _{rms}
Output voltage	400	V
Maximum load current	3.7	A
Maximum power	1.5	kW
Switching frequency	50	kHz

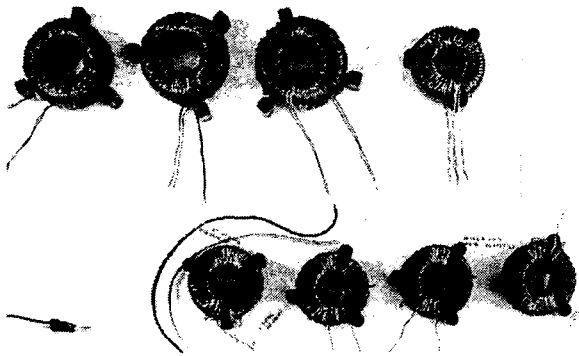


그림 3 PFC 컨버터에서 사용된 인덕터

Fig. 3 Inductors using in the PFC converter

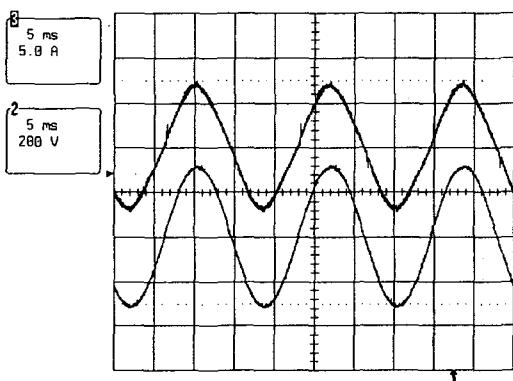


그림 4 입력 전압 및 전류파형

Fig. 4 Input voltage and current waveforms



그림 5 컨버터 입력 전류의 고조파

Fig. 5 Harmonics of input current for the converter

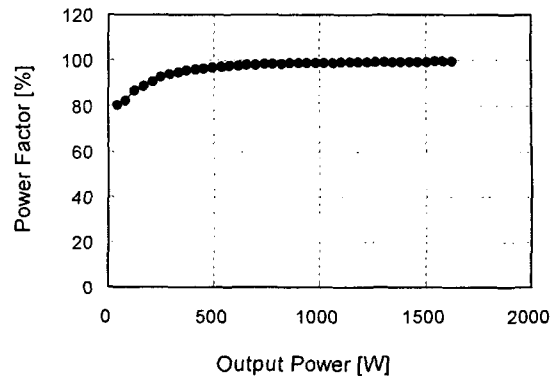


그림 6 컨버터의 역률

Fig. 6 Power factor of the converter

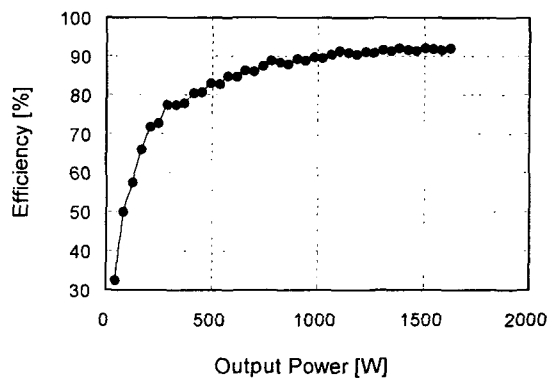


그림 7 컨버터의 전력변환 효율

Fig. 7 Power conversion efficiency of the converter

4. MPP 코어의 특성변화

그림 8에서는 3종류의 금속분말 코어를 사용한 인덕터의 인덕턴스를 DC 전류에 따라서 측정한 결과를 백분율 표로 나타낸 것이다. 이때 사용된 코어는 (주) 창성의 74mm급 금속분말 코어를 사용하였다. 본 논문에서 사용된 인덕터의 금속분말 재질은 일반적으로 널리 알려진 페라이트 재질에 비해서 DC 전류의 중첩특성이 우수하다고 알려져 있지만, 전류에 의한 포화 특성에 의해서 그림 8과 같이 인덕터의 인덕턴스가 전류에 의해서 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 8과 같이 전류에 의한 인덕턴스 변화는 냉방기기용 인버터와 같은 대용량의 PFC 회로를 구성하는 경우 입력단의 필터와 고조파 특성에 영향을 줄 수 있다.

본 논문에서는 이러한 인덕터의 특성 변화에 의한 인덕터 전류의 리플을 예측하기 위해서 그림 8에 의한 결과를 커브 피팅(Curve fitting)을 통해서 함수화 하였다. 그림 9에는 커브 피팅을 통해서 얻

어진 함수를 그래프로 표현하였다. 식 (3)은 KH740050의 재질로 구성된 인덕터의 인덕턴스 변화를 함수로 나타낸 것이다.

$$L_V = 100 - 6.2 \times 10^{-3} I_i^2 - 0.6 I_i [\%] \quad (3)$$

일반적으로 Boost 컨버터에서 내부손실 임피던스 Z_o 를 포함한 출력전류의 크기는 식 (2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_o = \left(\frac{V_o}{Z_o} \right) \left(\frac{V_s}{V_o(1-D)} - 1 \right) [A] \quad (4)$$

또한 출력전류를 입력전류로 환산하면, 인덕터에 흐르는 평균전류를 구할 수 있으며, 평균 전류에 의한 백분을 인덕턴스는 식(3)에 의해서 구할 수 있다. 그림 10은 Boost 컨버터의 출력용량에 따른 인덕터의 인덕턴스 변화를 나타낸 것이다. 이때 초기 인덕턴스는 600 μ H이었으며, 최대 부하 용량인 1.5kW에서 580 μ H까지 감소함을 알 수 있다.

그림 11은 컨버터의 부하용량 변화에 따라 인덕터의 전압과 전류의 실험과형을 나타낸 것이다. 그림에서 부하 용량이 증가 할수록 인덕터의 전류 리플이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 12는 인덕터의 전류 리플의 크기를 실험값과 이론값을 비교하여 나타내었으며, 이때 인덕터 L의 인덕턴스 특성 변화에 의한 전류 변화량 $i_L(t)$ 는 다음 식과 같이 구하였다.

$$\Delta i_L(t) = \frac{D V_s}{\left(\frac{L}{L_V} \times 100 \right) f_s} [A] \quad (5)$$

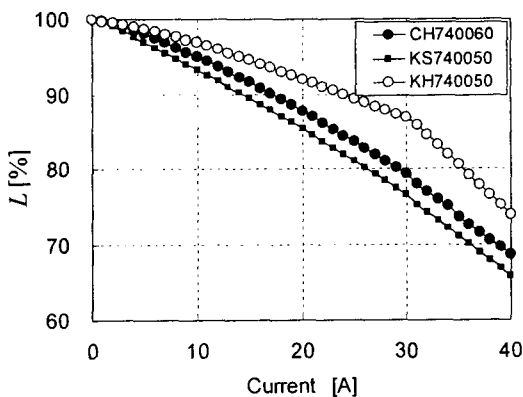


그림 8 전류와 인덕턴스의 백분을 변화 (측정값)
Fig. 8 Percentage variation of inductance and current (Measured value)

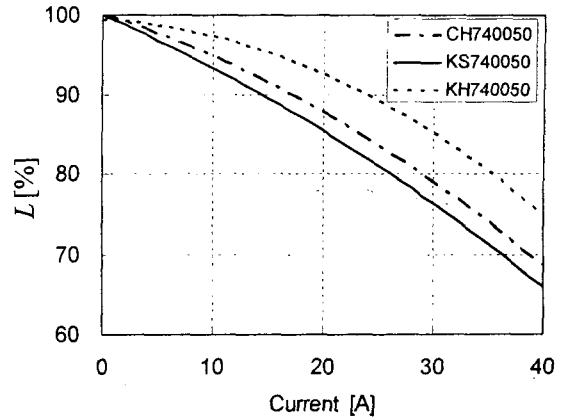


그림 9 전류와 인덕턴스의 백분을 변화 (이론값)
Fig. 9 Percentage variation of inductance and current (Theoretical value)

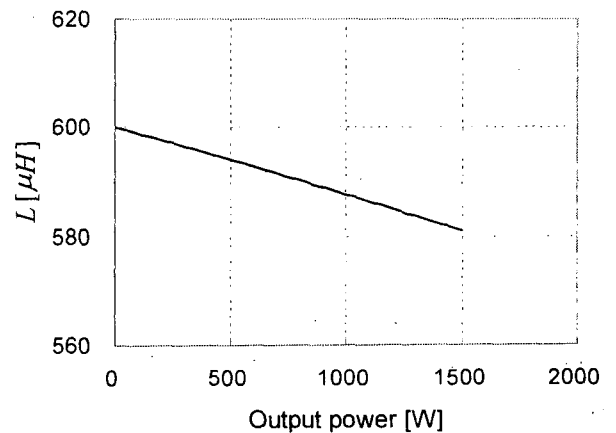


그림 10 인덕터의 인덕턴스 변화
Fig. 10 Inductance variation of the inductor

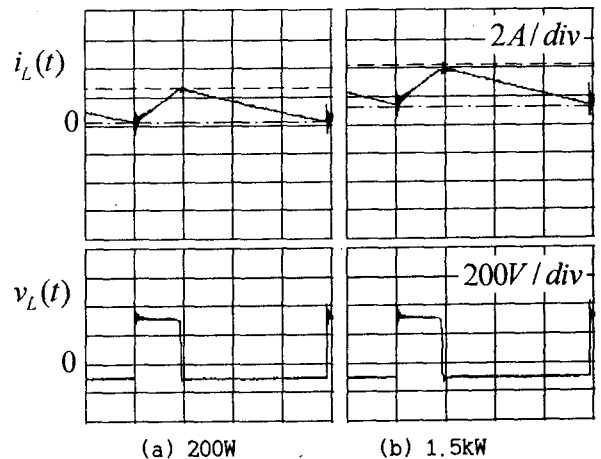


그림 11 측정된 인덕터의 전류와 전압
Fig. 11 Current and voltage of measured inductor

[2] Keith billings "Switchmode Power Supply handbook"
McGraw Hill, pp. 43-63, 1999.

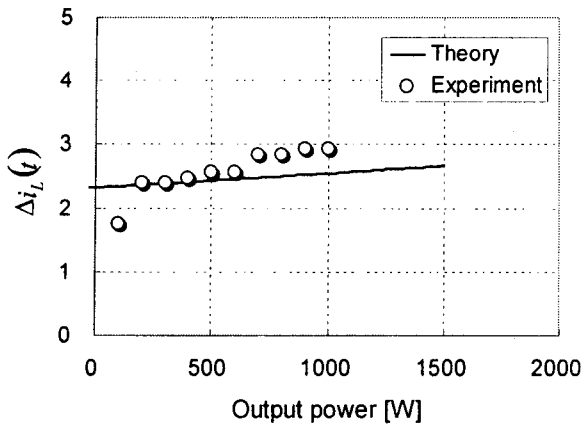


그림 12 인덕터의 전류 변화량
Fig. 12 Variable of current for the inductor

그림 12로부터 Boost 컨버터에서 사용된 인덕터의 인덕턴스는 부하의 크기에 따라서 감소하며, 이러한 인덕터의 특성 변화가 인덕터의 전류 리플을 증가시키는 요인으로 작용하고 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 페라이트 재질에 비해서 대전류 특성이 우수하기 때문에 최근 역률개선용 인덕터로 주목받고 있는 금속분말 코어를 역률개선 회로의 인덕터로 사용하는 경우, 인덕터의 인덕턴스 변화가 회로에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 비교하고, 그 결과를 보고하였다.

우선, 인덕터의 특성 변화를 관찰하기 위해서 최대출력이 1.5kW급 역률 개선 회로를 제작하였고, 코어 제조 회사에서 제공된 코어의 DC 중첩특성으로부터 DC 전류에 의한 인덕턴스 변화를 커브 피팅을 통하여 함수화 하였고 해석에 적용하였다. 그 결과 Boost 컨버터에서 사용된 인덕터의 인덕턴스는 부하의 크기에 따라서 감소하며, 이러한 인덕터의 특성 변화가 인덕터의 전류 리플을 증가시키는 요인으로 작용하고 있다는 것을 실험과 해석 결과로부터 알 수 있었다.

본 논문은 에너지 관리공단 에너지절약기술개발 사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Robert W. Erickson "Fundamentals of Power Electronics" Kluwer Academic publishers, pp. 627-656, 1999.