

인덕터의 권선손실 저감을 통한 PFC 승압 컨버터의 효율개선

서은성, 최승빈, 양동, 신휘범
경상대학교

Efficiency improvement of PFC boost converter by reduction of inductor winding loss

Eun Sung Seo, Seung Bin Choi, Dong Liang, Hwi Beom Shin
Gyeongsang National University

ABSTRACT

본 논문에서는 CCM에서 동작하는 PFC 인덕터의 AC 권선 손실에 대하여 분석하고, PFC 승압 컨버터의 효율을 개선하기 위해 인덕터의 AC 권선손실을 저감하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 기존의 단일선 대신 Litz선을 사용하고, 권선의 DC 저항 및 인덕터의 창면적을 고려하여 권선을 설계한다. 제안한 방법을 적용한 인덕터와 기존의 인덕터를 PFC 승압 컨버터에 적용하여 실험적으로 손실을 비교함으로써 PFC 승압 컨버터의 효율이 개선되었음을 보인다.

1. 서론

PFC 인덕터 손실의 주요소 중 하나인 권선손실은 DC 권선손실과 AC 권선손실로 구분할 수 있다. 특히 AC 권선손실의 경우 전원공급 장치의 슬립화 및 소형화를 선호함에 따라 자성체의 크기 제한이 가중되어 불가피하게 권선의 층 수가 증가하여 AC 권선손실의 비중이 더 커지고 있는 상태다. 이는 고효율 및 고밀도를 만족하는데 주요한 걸림돌이 되므로 AC 권선손실을 개선하기 위한 연구가 필요하다.^[1]

본 논문에서는 CCM에서 동작하는 PFC 인덕터의 AC 권선 손실에 대하여 분석하고, PFC 승압 컨버터의 효율을 개선하기 위해 인덕터의 AC 권선손실을 저감하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 Litz선을 사용하고, 권선의 DC저항 및 인덕터의 창면적을 고려하여 권선을 설계한다. 제안한 방법을 적용한 인덕터와 기존의 인덕터를 PFC 승압 컨버터에 적용하여 실험적으로 손실을 비교함으로써 효율이 개선되었음을 보인다.

2. PFC용 토로이달 인덕터의 AC 권선손실

그림 1는 PFC 승압 컨버터를 나타낸다. 본 논문에서는 CCM 영역에서 동작하는 PFC 승압 컨버터를 대상으로 인덕터에서 발생하는 AC 권선손실에 대하여 분석한다.

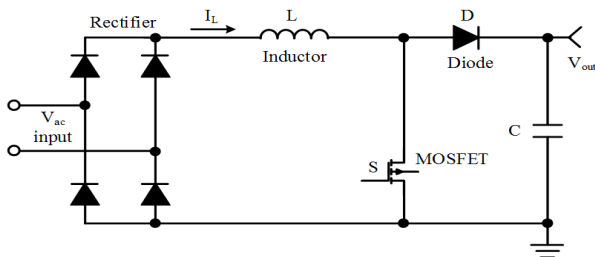


그림 1 PFC 승압 컨버터 회로도.
Fig. 1 PFC boost converter circuit.

2.1 AC 권선손실 분석

AC 권선손실은 고주파수를 갖는 인덕터 전류의 맥동 성분의 실효값 ΔI_{rms} 와 권선의 AC 저항 $R_{ac}(=F_r \cdot R_{dc})$ 로부터 구할 수 있다. AC 권선 손실은 다음과 같다.

$$P_{cu_ac} = \Delta I_{rms}^2 \cdot F_r \cdot R_{dc} \quad (1)$$

그림 2에서 보이는 바와 같이 토로이달 코어의 형상 특성상 위치에 따라 권선의 층 수가 다르게 나타난다. 따라서 Dowell식^[2]을 이용하여 층 수에 따라 F_r 를 구하고 해당 비율로 평균해야 보다 정확한 AC 권선손실을 계산할 수 있다. 토로이달 코어의 안쪽 권선을 예를 들어 F_r 를 구하게 되면 다음과 같다.

$$F_{r_in,avg} = \sum_{i=1}^{m-1} F_r(i\sqrt{k}) \left(\frac{n_{b_in,i} - n_{b_in,i+1}}{n_{b_in,1}} \right) \quad (2)$$

여기서 m 및 k 는 토로이달 코어의 내부 권선 층 수 및 Litz선의 가닥 수를 나타내며, $n_{b_in,1}$, $n_{b_in,i}$ 및 $n_{b_in,i+1}$ 은 각각 1번 째, i 번 째, $i+1$ 번 째 층의 bundle 수를 말한다. 외부 권선도 이와 동일한 방법을 적용하여 F_r 를 계산한 후 토로이달 인덕터의 전체 F_r 를 구하면 다음과 같다.

$$F_{r,avg} = \frac{F_{r_in,avg} + F_{r_out,avg}}{2} \quad (3)$$

여기서 $F_{r_out,avg}$ 은 외부 권선의 F_r 평균값을 나타낸다. 그림 3(a)는 앞서 다룬 PFC 인덕터의 권선손실 분석방법을 토대로 표 1의 기존 PFC 인덕터의 권선손실을 분석한 그래프이다. AC 권선손실은 부하에 관계없이 거의 일정한 값을 가지며, 저부하 영역에서 손실의 비중이 큰 것을 알 수 있다.

2.2 Litz선을 이용한 AC 권선손실 저감

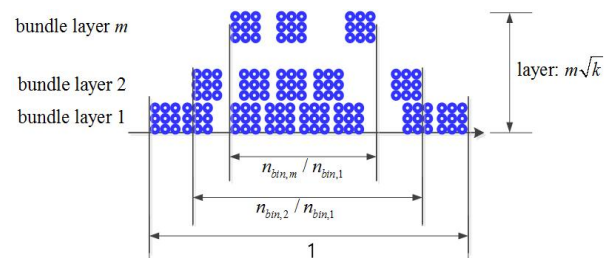


그림 2 토로이달 인덕터의 권선 구조.
Fig. 2 Winding structure of inductor with toroidal core.

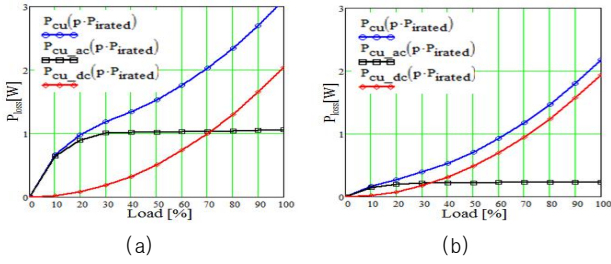


그림 3 PFC 인덕터의 부하에 따른 권선손실 비교. (a) 단일선을 사용한 인덕터 (b) Litz선을 사용한 인덕터
Fig. 3 Comparing the winding loss of the PFC inductor according to load. (a) Inductor using single wire (b) Inductor using Litz wire

PFC 승압 컨버터의 효율을 개선하기 위해 기존의 단일선 대신 Litz선을 사용한다. Litz선을 이용한 권선 설계 시 가닥 수 및 구리 단면적은 코어의 창면적 및 권선의 DC 저항을 고려하여 선택해야 한다. 방법은 아래와 같다.

토로이달 창에 넣을 수 있는 bundle의 수는 내부 원의 면적에 의해 결정된다. 따라서 내부 m번 째 층에서 권선 가능한 턴 수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$N_{b_in,k} = \frac{\pi \{ID - (2m - 1)w_{bll}\}}{w_{bll}} \quad (4)$$

여기서 ID 및 w_{bll} 는 각각 토로이달 코어의 내부 직경 및 권선의 폭을 나타낸다. 식 (4)의 값이 음이 되면 m 1이 bundle의 최대 층 수가 된다. 따라서 토로이달 코어 단면적에 넣을 수 있는 최대 bundle 수는 다음과 같다.

$$N_{bll} = \sum_{i=1}^{m-1} N_{b_in,i} \quad (5)$$

그림 3(b)는 표 1의 제안한 방법을 적용한 인덕터의 사양을 이용하여 권선손실을 분석한 그래프이다. 기존 PFC 인덕터의 AC 권선손실과 대비, AC 권선손실이 감소한 것을 알 수 있다.

3. 실험 결과

기존의 인덕터와 제안한 방법을 적용한 인덕터를 PFC 승압 컨버터에 적용하여 전력손실 및 효율을 비교하였다. 인덕터 사양 및 PFC 승압 컨버터 사양은 각각 표 1 및 표 2와 같다.

그림 5는 부하에 따른 두 인덕터의 전류 파형을 나타낸 것이다. 인덕터 손실 이외의 스위칭 손실 및 다이오드 도통 손실과 같은 전기적 손실은 유사함을 간접적으로 알 수 있다. 그림 6은 두 인덕터를 적용한 PFC 승압 컨버터의 부하에 따른 전력손실 및 효율을 나타낸다. 6(a)에서와 같이 기존의 단일선 인덕터를 적용한 경우와 Litz선 인덕터를 적용한 경우의 PFC 승압 컨버터 손실 차이가 거의 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 인덕터의 AC 권선손실의 차이이다. 그림 3(a) 및 (b)를 통해 분석한 바와 같이 부하에 관계없이 일정한 크기를 갖는 AC 권선손실을 감소시킨 결과이다. 6(b)는 부하에 따른 효율을 비교한 것이다. AC 권선손실이 상대적으로 큰 비중을 갖는 저부하 영역에서 효율이 크게 개선된 것을 알 수 있다.

4. 결론

CCM에서 동작하는 PFC 인덕터의 AC 권선손실을 분석하고 토로이달 코어의 창면적 및 DC 저항을 고려한 권선 설계방법

표 1 PFC 인덕터의 사양

Table 1 Specifications of PFC inductor

	기존(단일선) 인덕터	Litz선 인덕터
권선지름x가닥 수	0.85 [mm]×1	0.1 [mm]×80
구리 단면적	0.567 [mm ²]	0.628 [mm ²]
턴 수	82	82
코어 물질	High Flux (43μ)	High Flux (43μ)
인덕턴스	613 [μH]	613.5 [μH]
DC 저항	0.153 [Ω]	0.142 [Ω]

표 2 PFC 승압 컨버터 사양

Table 2 Specifications of PFC boost converter

출력전력 P_o	817[W]	입력 주파수 f_{line}	60[Hz]
출력전압 V_{out}	380[V]	스위칭 주파수 f_s	65[kHz]
입력전압 V_{in}	230[Vac]		



그림 4 인덕터 형상 (a) 단일선 타입 (b) Litz선 타입.

Fig. 4 Inductor shape (a) Single wire type (b) Litz wire type.

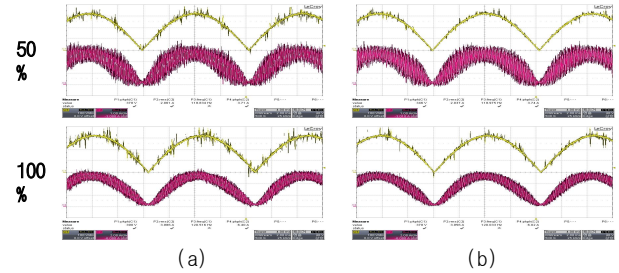


그림 5 인덕터의 전류 파형 (a) 단일선 타입 (b) litz선 타입

Fig. 5 Current waveform in the inductor (a) Single wire type (b) Litz wire type

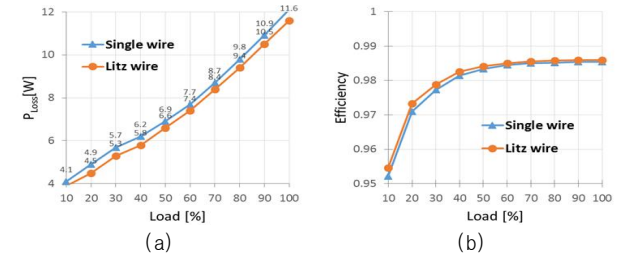


그림 6 부하에 따른 PFC 승압 컨버터의 (a)전력손실 및 (b)효율 비교
Fig. 6 Comparing (a)the power loss and (b)efficiency of the PFC boost converter according to the load

을 제시했다. 또한 AC 권선손실을 저감하기 위해 Litz선을 이용한 인덕터를 제안하였고, 이를 PFC 승압 컨버터에 적용하여 전력손실 및 효율을 개선되었음을 보였다. 제안한 방법의 단점은 토로이달 코어에 Litz선을 적용할 경우 권선에 어려움이 있다는 것이다. 그러므로 Litz선 사용에 적합한 인덕터 및 그에 따른 권선 및 손실 최적화를 위한 연구가 더 필요하다.

참고 문헌

- [1] Q. Li and M.A.E. Andersen, O.C. Thmsen, "Research on Power Factor Correction Boost Inductor Design Oprimization Efficiency vs. Power Density" 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, pp. 728 735, May 2011.
- [2] P.L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings" Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 113, pp. 1387 1394, Aug. 1966.