

Ansys Twin Builder를 활용한 AC-DC Converter 하모닉 저감용 PFC 패시브 리액터 설계에 관한 연구

정민욱, 김태규[†]
국립창원대학교

A Study on PFC Passive Reactor Design for Harmonic Reduction in AC-DC Converter Using Ansys Twin Builder

Min-Uk Jeong, Tae-Kue Kim[†]
Changwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 Ansys Twin Builder를 활용하여 AC-DC 컨버터의 하모닉 저감을 위한 PFC 패시브 리액터 설계에 관한 연구를 수행하였다. 설계 과정에서 EE 코어와 EI 코어를 비교하여 두 코어 유형의 특성을 분석하였으며, 각 코어 공극의 변화를 고려하여 인덕턴스의 변화를 확인하였다. 특히 코어 부피, 공극, 그리고 턴 수의 변화를 통해 발생하는 인덕턴스의 특성을 평가하고, 이러한 설계 변수들이 컨버터의 전류 고조파에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였다. 본 연구는 다양한 설계 변수에 따른 PFC 패시브 리액터의 성능을 비교함으로써 AC-DC 컨버터의 효율 향상과 하모닉 저감에 대한 설계 개선 방향을 제시하는 데 목적이 있다.

그림 1은 EE 코어와 EI 코어로 구성된 인덕터의 공극으로 발생하는 프링지 효과의 차이를 보여준다. EE 코어의 경우 평행 공극으로 공극이 길어 자속이 더 넣은 영역으로 퍼지기 때문에 누설 자속이 더 크고, 전류 밀도가 불균일해지는 문제가 발생하며 EI의 수직 공극 방식은 공극이 짧아 자속이 퍼지는 프링지 필드가 작아져서 필드 상쇄 효과가 발생하여 자속의 균일한 분포를 유도하게 된다.^[1] 따라서 평행 공극은 수직 공극보다 누설 자속이 더욱 많이 발생한다. 이는 인덕턴스 측면에서 인덕터의 자속밀도를 감소시키고 더 나아가 인덕턴스의 감소로 이어진다.

1. 서론

교류-직류 변환을 위한 정류기는 일반적으로 비선형 특성을 가지며, 이로 인해 전류의 왜곡과 역률 저하가 발생한다. 특히, 전력 반도체 소자를 사용하는 단상 및 삼상 다이오드 정류기는 입력 전압이 이상적이라도 전류의 왜곡을 피할 수 없으며, 이로 인해 고조파와 같은 문제가 발생하게 된다. PFC(Power Factor Correction, 역률 보정)는 이러한 문제를 해결하는 데 중요한 기술로, 전류 고조파를 줄이고 역률을 개선하여 시스템의 전력 효율을 높일 수 있다. 본 연구는 AC-DC 컨버터 시스템의 하모닉 저감을 목표로 Ansys Twin Builder를 활용하여 EE 코어와 EI 코어를 비교 분석하여 각 코어의 특성과 설계 변수들이 인덕턴스 및 고조파에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 본론

2.1 EE 코어와 EI 코어의 프링지 효과 및 그 영향

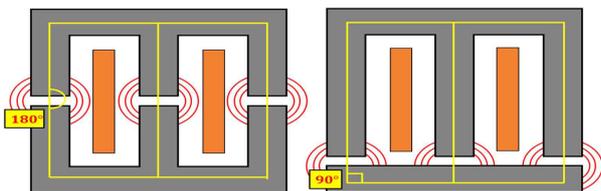


그림 1 EI 코어와 EE 코어 구조에 따른 프링지효과
Fig. 1 Fringing Effects in EI and EE Core Structures

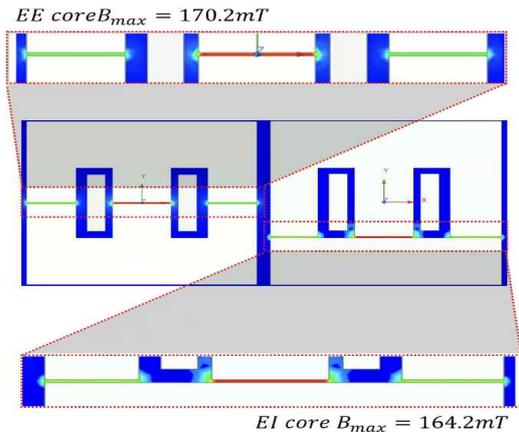


그림 2 EI 코어와 EE 코어 구조에서의 자속밀도
Fig. 2 Magnetic Flux Density Distribution in EI and EE Core Structures

그림 2는 Ansys Maxwell 2D로 해석한 공극으로 코어와 EE 코어 인덕터의 공극 부위 자속밀도 분포를 나타낸다. 프링지 효과로 EE 코어의 공극에서 더 많은 누설 자속이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 누설 자속은 손실로 이어진다. 식 (1)에서 보듯이, 자속밀도는 인덕턴스에 비례하므로 자속 밀도가 감소하면 인덕턴스도 감소하게 된다.

$$L = \frac{N A_c B_{pk}}{I_{Lmax}} \quad (1)$$

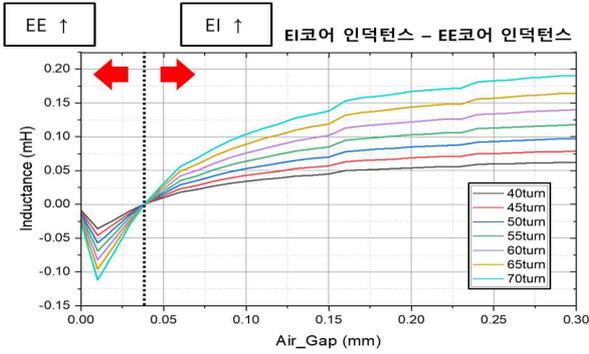


그림 3 EI와 EE 코어의 공극에 따른 인덕턴스 크기 차
Fig. 3 The Difference in Inductance Due to the Air Gap in EI and EE Cores

그림 3은 EI 코어와 EE 코어의 공극에 따른 인덕턴스의 차이를 나타낸 그래프로 동일 부피, 권선 수, 전류의 조건에서 공극의 크기가 커질수록 EI 코어의 인덕턴스가 EE 코어보다 더 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있으며 공극이 발생하는 인덕터 형상에서는 프링지 효과에 의하여 EI 코어의 채택이 더 높은 인덕턴스 확보에 효과적임을 알 수 있다.

2.2 Ansys Simplorer를 통한 Passive PFC 시뮬레이션

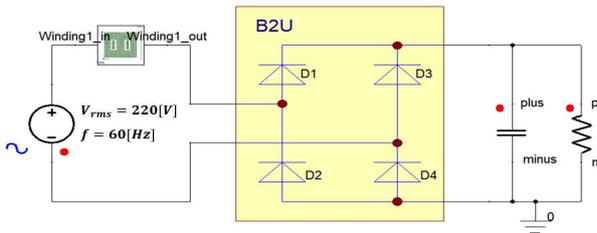


그림 4 Simplorer 환경에서의 시뮬레이션 구성
Fig. 4 Simulation Setup in the Simplorer Environment

그림 4는 Ansys Simplorer 환경에서 Passive 리액터의 PFC 성능을 비교하기 위해 구성된 시뮬레이션 구성이다. Maxwell 2D를 통해 구현한 FEM 리액터 모델을 Ansys Simplorer에서 회로 소자로 사용하였으며 연계 해석을 통해 리액터 공극 변화에 따른 PFC 성능과 전류 파형을 분석하였다. 상용전원 220[V_RMS], 60[Hz]의 입력에서 부하 저항 20[ohm]일 경우 공극에 따른 고조파 왜형률의 감소를 비교하였으며 이에 따른 전류 파형을 분석하였다.

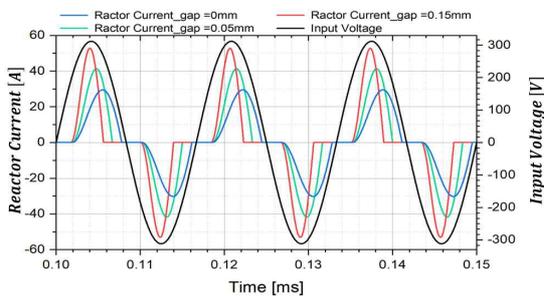


그림 5 공극에 따른 리액터 전류
Fig. 5 Reactor Current Based on Air Gap

표 1 공극에 따른 인덕턴스와 고조파 왜형률
Table 1 Inductance and THD according to Air Gap

Airgap	L	THD	PF
0 mm	9.58 mH	41.40 %	0.76
0.05 mm	4.42 mH	60.03 %	0.71
0.15 mm	2.2 mH	78.02 %	0.62

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \times \cos\theta \quad (2)$$

표 1은 공극이 증가할수록 리액터의 자기저항이 커지며, 이에 따라 인덕턴스가 감소함을 알 수 있다. 또한, 브릿지 다이오드 때문에 발생하는 전류의 고조파 성분은 인덕턴스가 클수록 감소하는데, 이는 고조파 왜형률(THD) 수치에서 확인된다. PFC(Power Factor Correction) 회로에서 고조파 왜형률은 시스템의 전력 품질에 큰 영향을 미치며, 역률에도 직접적인 영향을 준다. 고조파가 포함된 경우의 역률(PF)은 식(2)으로 정의된다.^[2] $\cos\theta$ 는 전류와 전압의 위상 차이를 의미한다. 인덕턴스가 클수록 역률은 1에 가까운 값을 가지지만 높은 인덕턴스로 인하여 전류의 지연이 심하게 발생하면 낮은 값을 가지기 때문에 THD와 $\cos\theta$ 사이에서의 가장 큰 값을 찾을 필요가 있다.

3. 결론

본 논문에서는 EI코어와 EE코어 인덕터의 형상 차이에 따른 프링지 효과를 분석하였으며, 그 결과 EI코어 인덕터가 EE코어 인덕터에 비해 더 높은 인덕턴스를 가지는 것을 확인하였다. 이를 기반으로 Ansys Twinbuilder를 사용하여 공극 변화에 따른 인덕턴스 변화를 상세히 분석하였으며, 이러한 변화를 PFC(Power Factor Correction) 성능과 연계하여 비교하였다. 분석 결과, 인덕턴스가 커질수록 THD(Total Harmonic Distortion)가 낮아지고 역률이 개선되어 전력 효율이 증가함을 알 수 있었다. 이로 인해 PFC 회로 설계 시 적절한 인덕턴스 값의 선택이 전력 품질을 향상시키는 중요한 요소라는 점을 확인할 수 있었다. 최적의 인덕턴스 설계를 위해서는 최대와 최소 THD 값을 종합적으로 고려하는 것이 필수적이며, 이는 높은 역률(PF)을 달성하는 데 핵심적인 역할을 한다.

본 연구는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력 기반 지역혁신 사업(2021 RIS-003) 및 LG전자 연구 용역 수행의 결과입니다.

참고 문헌

- [1] S. Mukherjee, Y. Gao, and D. Maksimović, "Reduction of AC Winding Losses Due to Fringing-Field Effects in High-Frequency Inductors With Orthogonal Air Gaps," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 1, pp. 815-828, Jan. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3002507.
- [2] El-Kholy, E. E., "Review of Passive and Active Circuits for Power Factor Correction in Single Phase, Low Power AC," 2010.