

회로 시뮬레이션 기반 전기기관차 보조전원장치용 변압기의 사이즈 저감 설계

유준열, 박상만, 설현수
한국자동차연구원

Circuit Simulation-Based Design for Size Reduction of Transformer in Auxiliary Power Supply of Electric Locomotive Mobility

Jun-Yeol Ryu, Sang-Man Park, Hyun-Soo Seol
Korea Automotive Technology Institute(KATECH)

Abstract - 본 논문에서는 회로 시뮬레이션 기반 변압기의 사이즈 저감 설계를 진행하였다. 전기기관차 보조전원장치용으로 설계된 기존 변압기 모델의 전기적 성능 및 실험 온도 분석을 통해 설계 방향을 결정하였다. 회로 시뮬레이션을 이용해 전류 왜곡이 일어나지 않는 최소 파라미터를 해석하여 설계 사양을 변경하였다. 변경된 설계 사양을 만족하는 변압기 사이즈 저감 설계를 진행하였고, 설계된 모델에 대한 전자계 및 열해석을 수행하여 사양 만족 및 온도 만족을 확인하였다. 제작 모델에 대한 실험 검증은 향후 진행할 예정이다.

1. 서 론

최근 환경 규제에 의한 전동화 추세로 전기기관차에 대한 수요가 늘어나고 있다. 아울러 전기기관차용 보조전원장치에 사용되는 변압기와 같은 자성소자 설계 시에도 고효율, 고성능, 소형화와 같은 특성이 필수적으로 요구된다. 전통적인 변압기 설계 시에는 코어 및 코일과 같은 액티브 파트의 설계 변수를 변경하여 사이즈를 저감했지만 이미 차량의 설계 사양에 맞추어 최적 설계된 제품에 대해서는 추가적인 사이즈 저감이 쉽지 않다. 따라서, 변압기와 같은 개별 부품의 단순한 설계가 아닌 회로 시뮬레이션과 같은 시스템 단위에서의 설계가 요구된다.

본 논문에서는 회로 시뮬레이션을 기반으로 전류 파형에 왜곡을 일으키지 않는 변압기 파라미터 범위를 해석하고, 설계 사양을 재설정하였다. 다음으로 변경된 설계 사양을 만족하는 변압기 모델을 전자계 유한요소해석을 통해 설계 및 성능을 계산하였다. 계산된 손실을 열원으로 입력하여 열해석을 진행하여 차량 운행 시 허용 온도 이내에서 동작하는지를 확인하였다.

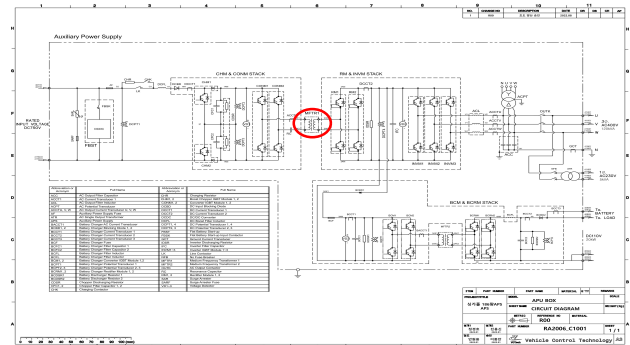
2. 변압기 설계 방향 결정

2.1 대상 변압기 형상 및 사양

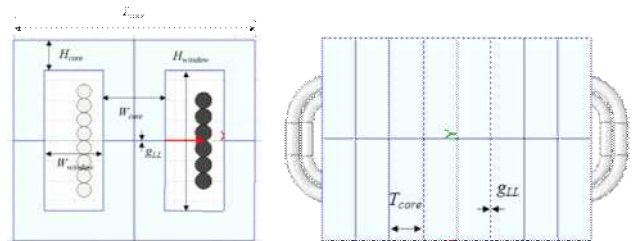
대상 모델은 그림 1과 같이 보조전원장치에 장착되는 MFTR(Medium frequency transformer)으로 액티브 형상은 그림 2에서 보여주는 것처럼 8개의 ‘C’자형 코어를 적층한 구조이다. 코어 내부 공간에 1, 2차측 권선은 Litz wire 타입으로 각각 8턴, 6턴이다. 동작 주파수는 8kHz이다. 대상 모델의 무부하 성능 및 부하 시험을 통해 측정된 손실 및 손실은 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 대상 변압기 성능

변압기 타입	MFTR(Medium frequency transformer)	
1/2차측 권선 턴 수	8 / 6	
인덕턴스	1차측 상인덕턴스	6.5 (mH)
	누설 인덕턴스	2.8 (μH)
	2차측 상인덕턴스	3.7 (mH)
동손 / 철손	94.3 / 6.6 (W)	
동작 주파수	8 (kHz)	
시험 온도	103 (℃)	



〈그림 1〉 보조전원장치 회로 내 MFTR 장착 위치



〈그림 2〉 대상 MFTR 모델 형상

2.2 사이즈 저감 설계 방향 결정

변압기 설계 사양은 표 2와 같다. 대상 모델의 성능과 비교해 보면 1, 2차측 상인덕턴스는 사양을 만족하고 있으며, 온도 여유 또한 부족한 상황이다.

〈표 2〉 설계 사양

인덕턴스	1차측 상인덕턴스	6.5±25% (mH)
	누설 인덕턴스	<20 (μH)
	2차측 상인덕턴스	3.5±25% (mH)
허용 온도		115 (℃)

기존의 변압기 설계는 목표 파라미터를 만족하기 위해 코어 사이즈와 권선 턴 수를 변경하는 방식으로 진행되었다. 인덕턴스는 자기저항에 반비례하고, 턴 수의 제곱에 비례하는데, 코어의 사이즈가 저감되면 자속 단면적의 감소로 자기저항이 증가하게 되고 인덕턴스는 감소한다. 하지만, 이러한 인덕턴스 감소를 막기 위해 코일 턴 수를 증가시킨다면 전류 밀도 상승으로 온도에 악영향을 미친다. 즉, 대상 모델에 대하여 단순히 코어와 설계 변수만을 변경하여 사이즈를 저감하는 것은 불가능하다.

본 논문에서 제안하는 설계 방향은 시스템 단위에서 문제가 없는 조건을 예측하여 설계 사양 자체를 바꾸는 데 있다. 회로 내에서 변압기의 역할은 전력 전달, 전압 전류의 변경이다. 그리고, 시스템에서 전달되는 전류의 질은 회로 파라미터에 의해 결정된다. 따라서, 회로 시뮬레이션을 이용하여 전류 파형의 왜곡

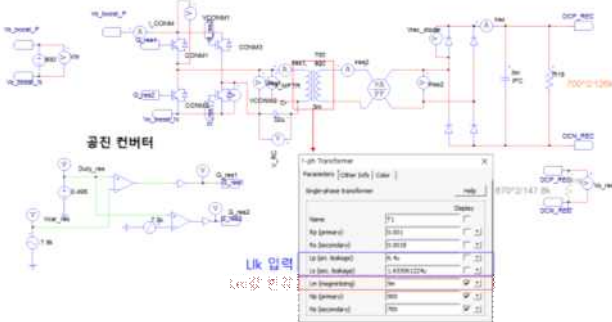
이 없는 파라미터 범위를 역으로 탐색함으로써 설계 사양 자체를 변경하면 추가적인 사이즈 저감이 가능할 것으로 예상된다.

3. 회로 시뮬레이션 기반 사이즈 저감 설계

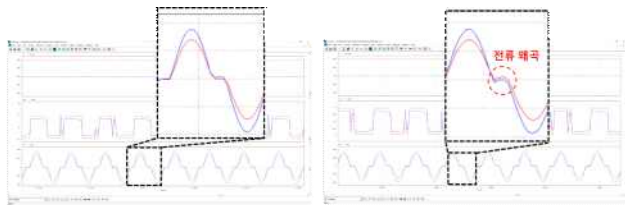
3.1 회로 시뮬레이션을 통한 설계 사양 변경

보조전원장치 시스템을 그림 3과 같이 PSIM 프로그램을 이용하여 모델링하였다. 회로 내 변압기의 인덕턴스를 파라미터로 반영하여 1차측 권선의 자화 인덕턴스(L_m) 값을 변경시키며 회로 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 4는 회로 시뮬레이션 내 자화 인덕턴스 값을 변경시키며 해석한 전류 파형 결과이다. 이를 통해 인덕턴스가 3 mH일 때는 전류 파형이 왜곡되지 않지만 인덕턴스가 2 mH를 입력하면 전류 파형이 왜곡되기 시작한다. 따라서, 전류 파형이 왜곡되지 않는 자화 인덕턴스 값인 2.5 mH를 새로운 설계 범위의 하한선으로 결정하였다.



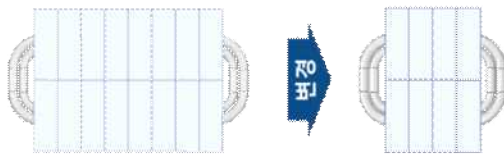
〈그림 3〉 보조전원장치 회로 시뮬레이션



〈그림 4〉 회로 시뮬레이션을 통한 전류 파형 해석 결과(좌측: $L_m = 3\text{mH}$, 우측: 2mH)

3.2 변압기 코어 블록 저감을 통한 사이즈 저감 설계

변경된 사양에 대한 사이즈 저감 방법은 그림 5에 나타난다. 목표 인덕턴스 사양이 절반으로 감소하였기 때문에 적층된 코어 개수를 줄여 사이즈를 50% 저감시킬 수 있었다. 추가적으로, 동일한 상용 코어를 사용하였으므로 추가적인 공정이 필요 없다는 장점이 있다.



〈그림 5〉 변압기 코어 적층 개수 저감

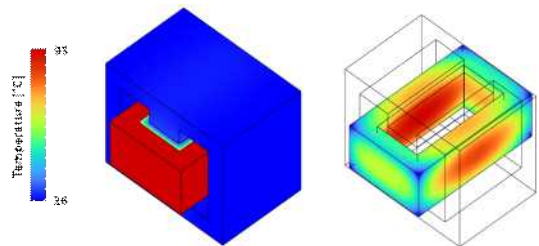
4. 설계 모델 전자계 및 열해석 결과

표 3은 기존 참고 모델과 설계 모델 간의 성능 비교를 나타낸다. 인덕턴스 및 손실은 전자계 유한요소해석을 통해 정적 부하 조건에서 계산하였다. 이를 통해 설계 모델이 목표 인덕턴스 사양을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 제작 시에 투자율이 높은 재료로 변경함으로써 인덕턴스를 기존 모델 수준으로 달성할 수 있었다. 또한, 코어 적층 개수가 줄어들면서 코일 길이도 감소하였기 때문에 동손 또한 감소하였다. 설계 모델을 기

반으로 열해석 모델링을 완료하였고, 계산된 손실을 열원으로 반영하여 최대 온도를 예측한 결과는 표 3과 그림 6에 나타난다. 설계 모델의 최대 온도는 92.7℃로, 허용 온도 이내에서 동작함을 확인하였다.

〈표 3〉 기존 모델과 설계 모델 간 성능 비교

	기존 모델(설계 전)	개선 모델(설계 후)
적층 방향 코어 개수	8	4
코어 재질	PM7 (투자율 = 2400)	PM12 (투자율 = 3200)
인덕턴스	L_1	6.5 (mH)
	L_m	5.1 (mH)
	L_2	3.7 (mH)
동손 / 철손	94.3 / 6.6 (W)	63.2 / 4.2 (W)
Core 부피	10,073,600 (mm ³)	5,036,800 (mm ³) : 50% 저감
해석 온도	101.4 (℃)	92.7 (℃)



〈그림 6〉 설계 모델의 온도 예측 결과

5. 결 론

본 논문에서는 회로 시뮬레이션을 기반으로 전기기관차 보조전원장치용 변압기의 사이즈 저감 설계를 진행하였다. 기존 제작된 모델의 성능 마진에 여유가 없기 때문에 전통적인 코어 설계 변수 변경에 의한 사이즈 저감이 불가능하였다. 따라서, 회로 시뮬레이션을 통해 전류 파형에 영향을 주지 않는 자화 인덕턴스 값을 탐색하였다. 결과적으로 목표 자화 인덕턴스의 하한선이 2.5 mH로 변경되었다. 변경된 목표 인덕턴스 범위 내에서 최소 사이즈를 만족하기 위해 적층 코어 개수를 8개에서 4개로 저감하였다. 설계된 모델에 대해 유한요소해석을 진행한 결과 자화 인덕턴스는 4.1 mH로 설계 사양을 만족하는 것으로 확인되었다. 또한, 해석한 동손 및 철손을 열원으로 입력하여 열해석을 진행한 결과 최대 온도는 92.7℃로 설계 모델이 허용 온도 내에서 동작함을 확인하였다. 결과적으로, 제안한 설계 방법을 이용하여 설계 사양을 만족하면서 코어 부피를 50%까지 저감할 수 있었다. 제안한 설계 기법은 다양한 시스템 내 자성소자 설계에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgment

본 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호 RS-2023-00253960)

[참 고 문 헌]

- [1] 유준열, 조수연, 신양진, 이동재, 설현수, “전기적 및 열 특성을 고려한 전기기관차 보조전원장치용 자성소자 설계”, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp.1631-1632, 2024.
- [2] 최희수, 박준영, 최성진, “PSIM 모델을 이용한 변압기 회로상수 추출 방법”, 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 44-45, 2015.