

동력 분산형 고속철도용 변압기의 출력 간섭현상을 저감시키기 위한 권선 배치 방법

Winding Disposition to Minimize the Output Interference of Transformers for the High-Speed EMU

박병건* 안성국** 현동석***
Park, Byoung-Gun Ahn, Sung-Kuk Hyun, Dong-Seok

ABSTRACT

In the high-speed EMU, the modularized traction converter produces the significant harmonic currents caused from the switching behavior of a power converter. These harmonic currents bring the interference among the traction equipment. One way to minimize the interference is to design the secondary windings of a power transformer decoupled magnetically as possible. This paper presents a magnetic field analysis on a winding disposition to clarify an impact on magnetic decoupling between secondary windings, under a limited height of a train. Two winding dispositions for a single-phase shell-type transformer are constructed and simulated by a three-dimensional finite elements method (FEM) model. Two different winding dispositions are constructed and simulated by three-dimensional FEM model using Maxwell3D.

1. 서 론

최근 고속전철 시스템의 기술은 차량과 항공 운송 수단에 비해 경제성과 편리성 그리고 에너지 환경적 차원에서 전기를 이용한 고속의 열차 시스템 개발에 많은 국가들이 참여하고 있다. 고속철도 차량 기술은 차량 구성에 따라 크게 동력 집중식과 분산식 고속 차량으로 구분할 수 있으며, 프랑스의 TGV를 기본으로 한 동력 집중식 계열의 차량이 스페인과 한국에 수출하여 상업화에 성공하였고 계속하여 발전할 것으로 예상되었으나, 독일 Siemens사의 ICE3를 기본으로 한 동력 분산식 차량이 스페인 2세대 고속열차 도입계약, 중국의 고속철도 차량 도입, 러시아의 고속철도 해외차량 도입 계약 등 지속적으로 성장하고 있다. 동력 분산식 차량은 차량 축중 하중의 감소와 더 많은 객차 시설 그리고 동특성 면에서 우수한 장점을 가지고 있다. 하지만, 동력 분산식 차량은 차량 하부에 기계적인 동력을 위한 견인 전동기를 구동하기 위한 변압기와 전력변환 시스템의 탑재가 이루어지기 때문에 차량 자체의 설계에 있어서 복잡한 특성을 갖는다[1-3]. 특히, 변압기의 경우 차량 하부에 위치하기 때문에 변압기 설계에 있어서 높이의 제한을 받기 때문에 변압기 설계가 어렵다. 그림 1에서 보여진 것처럼 동력 분산식 고속철도용 변압기는 다수의 출력을 가지며 동일한 코어 내에서 다중 권선이 연결되기 때문에 이러한 권선 상호간의 영향을 분석하고 설계조건에 맞게 배치하는 것이 중요하다.

* 한양대학교 전기공학과 박사과정, 정회원
E-mail : redalarm@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0341 FAX : (02)2220-0570
** 한양대학교 전기공학과 교수, 정회원

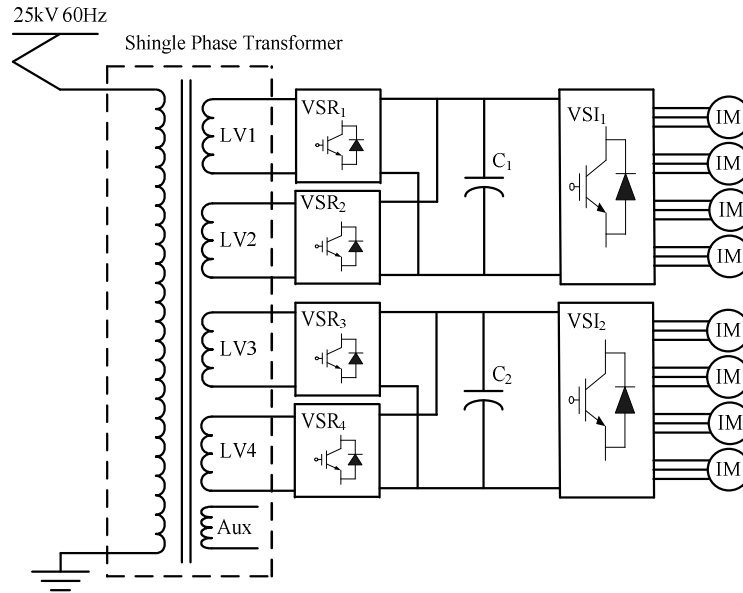


그림 1. 동력 분산식 고속철도 차량용 전력변환 시스템
 Fig. 1. Lay-out of the distributed traction system.

변압기 출력은 복수개의 출력이 동일함을 요구하나, 실제 운전조건에서는 출력간의 불평형 현상이 발생하고, 출력 단 임피던스의 간섭현상이 일어나서 병렬 컨버터의 특성이 제대로 나타나지 않는다. 본 논문에서는 단상 외철형 변압기[4]의 권선 배치에 대한 자계 분석을 하였다. 자계 분석은 3-D 자계 해석 시뮬레이션 툴인 Maxwell3D를 이용하여 변압기를 설계하고 분석하였다. 두 권선 배치에 따른 2차 측 권선의 자계 결합 계수를 이용하여 자기적인 비결합 정도를 측정하였으며, 두 권선 배치에 대한 실험을 통하여 분석의 타당성을 입증하였다.

2. 단상 외철형 변압기의 권선 배치

표 1에서 보여진 것처럼 두 변압기 권선 배치에 대한 분석을 위한 동일한 변압기 용량을 가지고 설계하였다.

표 1, 변압기 파라미터
 TABLE I. DESIGN PARAMETERS OF THE TRANSFORMER

Rating	Capacity	
	Voltage(HV/LV/Aux)	4 MVA
	Current(HV/LV/Aux)	25kV/1400V*4/380V
	Frequency	165/650*4/100A
Core	Phase	60Hz
	Type	Single-Phase
	Nominal Flux	Shell Type
	Density	1.8 T
	Effective cross-section	360 cm ²

그림 2는 두 권선 배치에 대한 단면을 보여준다. 코어와 권선 또한 동일한 계산 과정을 통하여 구성되었다. 그림 2(a)에서 보여진 것처럼 2차 측 권선 LV2와 LV3가 다른 권선들에 비해서 가까이 위치하게 된다. 이러한 권선 구조에서는 두 권선 간에 상호 간섭현상이 발생하여 자기적으로 독립적이지 못하게 된다.

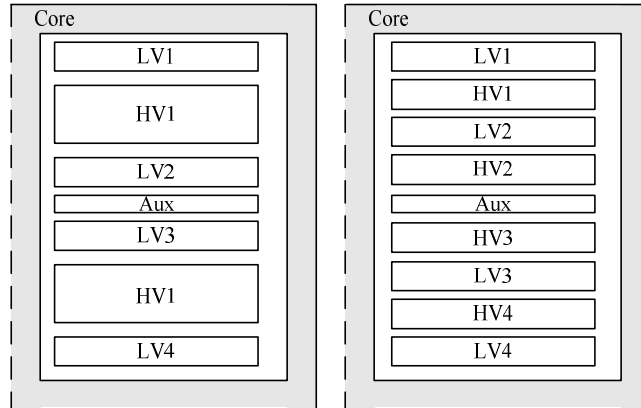


그림 2. 두 권선 배치에 대한 단면. (a) 일반적인 권선 배치 (b) 교차형태의 권선 배치

Fig. 2. Cross-section of transformer constructed by two winding dispositions. (a) Conventional windings (b) Interleaved windings

그림 2(b)에서는 권선들을 교차시킨 형태로 배치함으로써 LV2와 LV3 권선이 다른 권선들과 동일하게 대칭 구조로 설계되어 변압기의 자기적인 결합을 보다 독립적으로 가져갈 수 있다. 이러한 권선 교차방식은 주로 변압기의 누설 인덕턴스를 최소화하기 위해 사용되는 방식[5]으로 누설 인덕턴스를 크게 설계하기 위해 권선의 추가적인 설계가 필요하지만, 변압기의 권선에 의한 컨버터 특성의 저하를 최소화 시킬 수 있으며, 권선 간의 자기적인 결합 구조가 대칭적으로 이루어지기 때문에 2차측 권선들 사이의 간섭현상을 줄일 수 있다.

3. 유한 요소해석을 이용한 자계 분석 시뮬레이션

두 권선 배치에 대한 자계 해석을 위해 3차원 변압기 모델을 유한요소 해석을 위한 시뮬레이션 툴인 Maxwell3D를 이용하여 구성하였다. 이러한 3차원 자계 해석 모델은 2차원 모델에 비해 상대적으로 우수한 결과를 가져올 수 있다. 그림 3은 3차원 유한요소 해석을 위한 변압기 권선 모델을 보여준다.

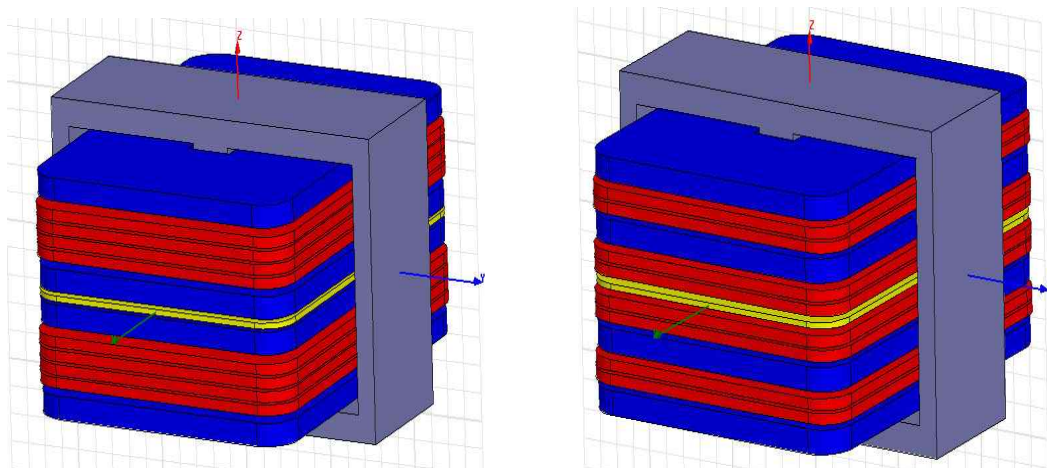


그림 3. 3차원 유한요소 해석을 위한 변압기 모델. (a) 일반적인 권선 배치 (b) 교차형태의 권선 배치

Fig. 3. Three-dimensional FEM model. (a) Conventional windings (b) Interleaved windings

그림 4는 두 권선 배치에 대한 자속밀도의 벡터를 나타낸다. 두 권선 중 교차 형태의 권선에서의 자속 밀도보다 일반적인 권선에서의 자속 밀도가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 자속 밀도의 최대 값은 초기 설계에서 조건한 2T를 만족하는 것을 볼 수 있다.

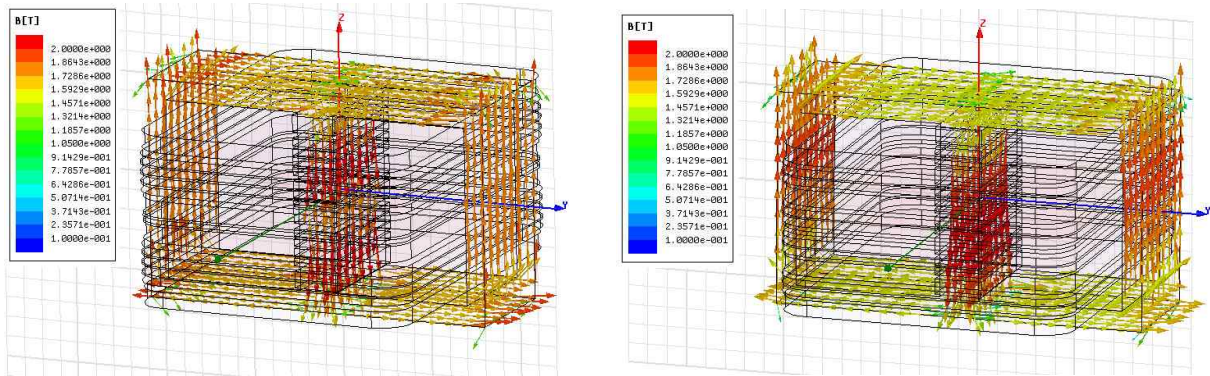


그림4. 두 권선 배치에 대한 자속 밀도. (a) 일반적인 권선 배치 (b) 교차형태의 권선 배치

Fig. 4. Magnetic flux density distribution. (a) Conventional windings (b) Interleaved windings

그림 5는 두 권선 배치에 대한 자계의 세기를 나타낸다. 교차 형태의 권선 배치가 일반적인 형태에 비해 균형적으로 자계 분포가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 그림 8에서 보여진 것처럼 LV3와 LV4의 자기적 결합 계수가 0.115에서 0.015로 줄어 든 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 교차 형태의 권선 배치가 간섭현상을 더 줄 일 수 있다.

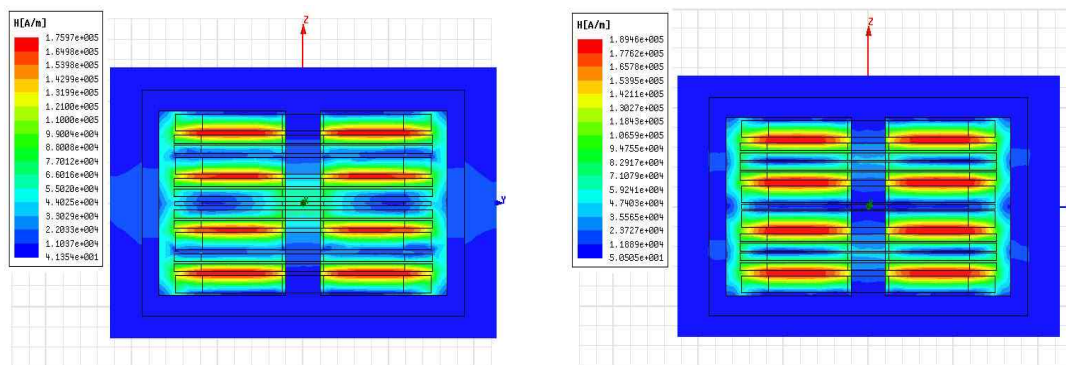


그림 5. 두 권선 배치에 대한 자계의 세기. (a) 일반적인 권선 배치 (b) 교차형태의 권선 배치

Fig. 5. Electromagnetic forces of conventional windings. (a) Conventional windings (b) Interleaved windings

	LV1	LV2	LV3	LV4
LV1	-	0.029	0.054	0.031
LV2	0.082	-	0.115	0.065
LV3	0.046	0.015	-	0.07
LV4	0.031	0.052	0.065	-

Conventional windings
 ↗
 ↖ Interleaved windings

그림 6. 두 권선 배치에 대한 2차측 권선들의 자기결합 비교

Fig. 6. Coupling coefficient between secondary windings according to winding dispositions

4. 결 론

본 논문에서는 동력 분산형 고속철도영 단상 외철형 변압기에 대한 권선 배치에 따른 자계 분석을 나타내었다. 두 권선 배치에 대한 자계 해석 모델을 3차원 유한요소 해석을 위한 시뮬레이션 툴인 Maxwell3D를 이용하여 설계하고 구성하였다. 두 권선 배치에 따른 2차측 권선들의 자기결합 특성을 분석하기 위해 자기결합계수를 이용하여 비교하였으며, 교차 형태의 권선 배치가 자기결합 계수가 낮게 나오는 것을 확인하였다. 교차 형태의 권선 배치가 누설 인덕턴스 값을 줄이기 때문에 철도 차량용 변압기로 사용하기 위해선 권선의 설계에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 예상되지만, 기본적인 권선 간의 간섭현상은 줄일 수 있는 것을 볼 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] G. Bifulco, S. Capozzi, S. Fortuna, T. Mormile, and A. Testa, "Distributing the train traction power over cars: effects on dependability analyzed based on daily duty-cycle" *International Journal for CEMEE*, Vol.23, No.1, pp.209-224, 2004.
- [2] A. Coccia, A. Del Pizzo, G. De Marco, and M. Porzio, "Secondary currents filtering by means of a properly sized winding in a multicoil traction transformer for high power applications to limit Psophometric Currents," *Proceeding of IEEE PES C2004*, pp.1874-1880, 20-25 June 2004.
- [3] A.M. Kashtiban, A. Vahedi, and A. Halvaei, "Investigation of winding type effect on leakage flux of single phase shell type transformer using FEM" *Proceeding of ICEMS 2005*, pp.1755-1758, Vol.3, 29-29 September 2005.
- [4] R. Doebbelin, R. Herms, C. Teichert, W. Schaetzing, and A. Lindemann, "Analysis methods and design of transformers with low leakage inductance for pulsed power applications," *Proceeding of EPE 2007*, pp.1-7, 2-5 September 2007.
- [5] X. Li, Q. Chen, J. Sun, and G. Long, "Numerical Analysis on Magnetic Field of HTS Transformer with Different Geometry," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.42, No. 4, April 2006.