

EMTP를 이용한 철도차량용 주변압기 고압권선의 공진특성 분석

Analysis of Resonant Characteristics in High Voltage Windings of Main Transformer for Railway Vehicle using EMTP

정기석 · 장동욱* · 정종덕

Ki-Seok Jeong · Dong-Uk Jang · Jong-Duk Chung

Abstract The primary windings of the main transformer for rolling stock have several natural frequencies that can occur internal resonance with transient voltages induced on a high voltage feeding line. Factory testing is limited in its ability to determine whether or not transient voltage with various shape and duration can be excitable. This study presents the design of a high voltage windings model and simulation and analysis of the internal resonant characteristics in terms of the initial voltage distribution and voltage-frequency relationship using the electromagnetic transients program (EMTP). Turn-based lumped-parameters are calculated using the geometry data of the transformer. And, sub-models, being grouped into the total number of layers, are composed using a ladder-network model and implemented by the library function of EMTP. Case studies are used to show the layer-based voltage-frequency relationship characteristics according to the frequency sweep and the voltage escalation and distribution aspects in time-domain simulation.

Keywords : Railway vehicle, Transformer winding, Internal resonance, Electromagnetic transients program(EMTP)

초 록 철도차량용 주변압기 고압권선은 고압인통선에 유기되는 이상전압과 내부공진을 발생 시킬 수 있는 다양한 주파수 대역의 고유주파수를 가진다. 공장시험은 다양한 파형과 지속시간을 지닌 이상전압의 여자기능성을 판단하는데 한계가 있다. 본 연구는 전자계과도해석프로그램(이하 EMTP)을 이용하여 고압권선 모델을 설계하고 초기 전압분포와 전압-주파수 관계 측면에서 내부공진특성을 모의분석한다. 턴 단위의 집중매개변수는 변압기 형상정보부터 계산되며, 각 레이어 단위로 합산된 서브모델은 네트워크 모델로 결합되어 EMTP의 라이브러리를 통해 구현한다. 사례연구는 주파수 변동에 따른 레이어 단위의 전압-주파수 관계 특성과 시계열 영역에서 전압 확대 및 분포 양상을 보여준다.

주요어 : 철도차량, 변압기 권선, 내부공진, 전자계과도해석프로그램

1. 서 론

최근 빠른 소호특성을 지닌 진공차단기의 투입 동작에 따른 다중 재발호 현상은 고압인통선 말단에서 과도급준과전압(VFTO: Very Fast Transient Over-voltage)를 발생시켜 주변압기 저차 고유주파수와와의 일치에 따른 권선 내부의 공진문제를 야기하고 있다. 이는 특정한 레이어간 전압 확대에 의한 절연파괴 가능성을 내포하며, 시스템 설계 시 서지 파고치에 대한 절연협조와 더불어 주파수 측면에서 주변압기의 주파수 응답특성 분석을 통한 전기적 공진 가능성을 제거할 필요가 있다.

변압기 권선의 설계 및 제작 시 모든 내부 고유주파수에서 여자 되지 않도록 하는 것이 이상적이나, 국제규격에서 명시한 시험항목만으로 제작단계에서 문제점을 찾는 데 한계가 있다[1]. 변압기 설계단계에서 다양한 계통 이벤트에 의해 유기되는 이상전압에 대한 영향을 분석하기 위해 전자계 과도해석프로그램을 이용한 모의분석 연구가 진행되어 왔다. 모든 변압기 제작자는 내부 과도전압 분포를 계산하고 모의 결과를 절연설계에 활용하기 위해 모의해석 프로그램을 활용하고 있으며, 계통 운영자 또한 변압기의 고장률이 기준을 상회할 경우 변압기 단자서 임피던스 특성함수를 측정하여 상세 계통모의 연구를 진행하고 있다[2].

변압기 모델은 우선 저항, 인덕터, 커패시터 성분의 파라미터 선정이 요구되며, 측정결과 또는 형상 정보를 토대로 해석적 또는 수치적 기법이 적용된다[3]. 본 연구에서는 변압기 내부권선의 전압분포 특성과 단자로 유입되는 과도이상전압에 의한 전기적 공진현상을 규명하기 위해 물리적 구조 기반의 상세내부모델링 기법을 적용한다.

*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5412, E-mail: dujang@krri.re.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.4.436>

이 기법은 분포 자기/상호 인덕턴스와 정전용량 기반의 결합모델로 구성하여 변압기 내부 절연 스트레스를 분석하고, 변압기와 전력계통 간 상호영향에 의한 과도해석에도 활용할 수 있다[3,4].

Saurav Pramanik 등[1]은 인터리브 권선의 적용효과를 검증하기 위해 8개의 구역으로 구성된 사다리형 회로망(ladder network)을 구현하였다. Dilip Debnath 등[5]은 변압기의 형상, 구조 및 설계 파라미터를 기반으로 모델 파라미터를 계산하였다. Yoshikazu Shibuya 등[6,7]은 권선의 형상과 물성치 그리고 그룹핑 설정값을 이용하여 RLC 소자값을 도출하고 이를 ATPDraw의 라이브러리 파일로 자동 생성하도록 하였으며, 사례연구로 EMTP와 고속푸리에변환(FFT: Fast Fourier Transform)를 이용한 모의 결과를 비교하여 VFTO가 단자에 유입될 경우 ETMP가 보다 실현성이 있음을 확인하였다. M. Heidarzadehs[8]는 임펄스-전압 분포(IVD: Impulse Voltage Distribution) 분석을 위해 사각 단면의 레이어 권선의 형상 정보로부터 정전용량을 계산하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 EMTP를 이용하여 철도차량용 주변압기의 R-L-C-M 기반의 상세모델을 구현한다. 주변압기 물리적 형상 정보로부터 개별 턴에 대한 자기인덕턴스, 상호인덕턴스 및 정전용량에 대한 파라미터를 추정하고 이들을 레이어 단위로 합산하여 n개의 단위구격을 갖는 사다리형 회로망 구조의 고압권선 모델을 구현한다. 사례연구로 표준 임펄스 전압에 따른 초기 전압 분포와 주파수 변동에 따른 레이어 단위의 전압-주파수 관계 특성과 시계열 영역에서 전압 확대 및 분포 양상을 분석한다.

2.1장에서는 임펄스 및 과도해석용 변압기 등가모델을 제시하고 2.2장에서는 변압기 형상과 절연재료 특성을 반영한 인덕턴스와 정전용량을 도출한다. 2.3장에는 모의해석 방법과 사례조건을 선정하고 모의결과를 분석한다.

2. 본 론

2.1 변압기 등가모델

2.1.1 임펄스-전압 분포

일반적으로 변압기 단자에 시험전원을 인가할 경우 권선의 인덕턴스는 초기 자장(magnetic field)을 제한하므로 인가된 전기 에너지가 자기에너지 형태로 전이되는데 일정 시간 이상이 필요하다. 따라서 권선의 초기 전압분포는 용량성 결합(capacitive coupling)에 의해 주로 결정되며, 초기 전압분포 권선모델은 Fig. 1의 (a)와 같이 단위 구역당 레이어간 직렬정전용량과 대지 간 정전용량이 결합된 연속모델로 표현된다[9]. 변압기 단자를 기준으로 권선 내 위치, x에 따른 전압분포는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$V(x) = V_0 \frac{\sinh\left[\alpha\left(1 - \frac{x}{L}\right)\right]}{\sinh\alpha} \quad (1)$$

여기서, V_0 : applied voltage at the line end of transformer (X), L : the winding axial length (=1), C_s : total series capacitances, C_g : total ground capacitances, α : distribution constant ($=\sqrt{C_g/C_s}$).

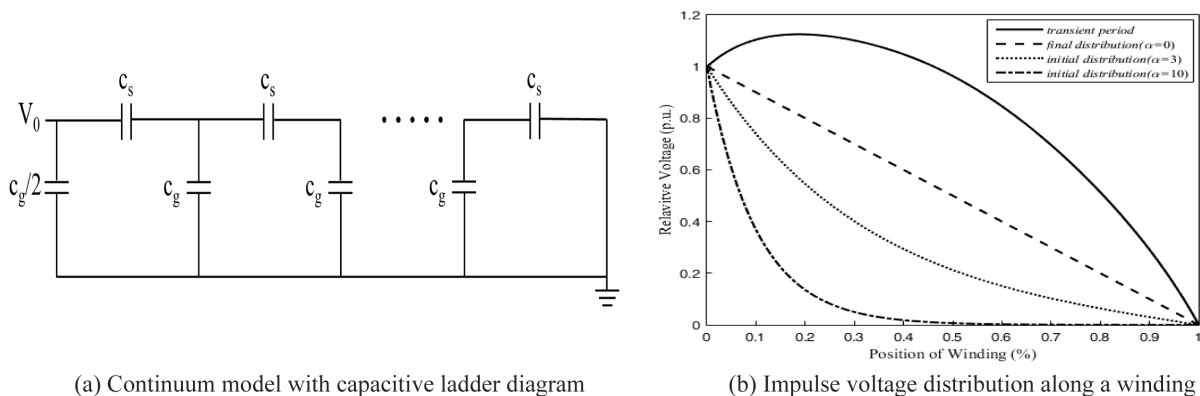


Fig. 1. Boundary and load conditions for structural analysis.

레이어간 정전용량과 대지 간 정전용량 성분의 전체 비율에 따라 초기 전압 분포 양상이 Fig. 1의 (b)와 같이 결정된다. 대지 간 정전용량의 비율이 상대적으로 높아지면 분포계수, α 가 커지게 되어 곡선의 기울기는 변압기 단자(X)에서 매우 가파르게 되며, 이는 초기 조건에서 최종 전압 분포 간 발생하는 권선 내부 공진의 변화율과 진폭이 커지게 됨을 의미한다.

2.1.2 과도전압 분포(Transient Voltage Distribution)

일반적으로 변압기 권선의 직렬 저항 성분은 인덕턴스에 비해 상당히 작기 때문에 초기 전압 인가 후 정전 용량과 자기 에너지 사이의 에너지 교환은 감쇄 성분을 지닌 진동형 과도현상으로 초기 및 최종 전압 분포 양상의 차이가 작을수록 서지에 대한 권선 내 절연 강도는 크다고 볼 수 있다.

변압기 권선의 과도 전압 분포 해석을 위한 모델은 주로 집중정수소자인 저항, 커패시터, 인덕터를 결합한 회로모델을 적용한다. 상호 인덕턴스는 동일 권선 및 타 권선 간 상호유도작용 뿐만 아니라 철심의 영향을 고려하지만 고주파 해석용 권선 모델의 경우 철심에 의한 영향이 적기 때문에 공심(air core) 형태의 변압기 권선 모델의 적용이 가능하다[6]. 변압기 권선 모델은 해석범위에 따라 단위구역의 크기가 결정된다. 작게는 턴 단위부터 레이어(또는 디스크) 단위의 모델이 구현되며, 모의결과의 유사도나 계산시간을 고려하여 그룹핑 기법을 적용할 수도 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 R-L-C-M 모델로 구현하며, 사다리형 회로망으로 조합한다. 개별 턴에 대한 자기인덕턴스, 상호인덕턴스 및 정전용량 계산 결과를 토대로 레이어 단위로 합산하여 n개의 단위구역을 갖는 고압권선 모델을 구현한다.

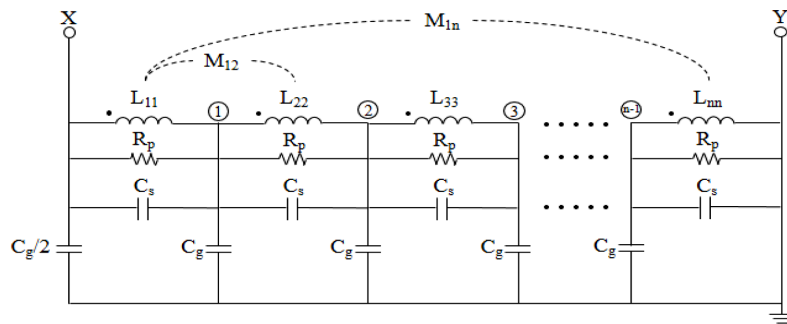


Fig. 2. N-sections ladder network model based on R-L-C-M components.

2.2 변압기 파라미터 추정

2.2.1 철도차량용 변압기 기하학적 특성

국내 고속철도의 전력계통은 AT(Auto-Transformer)급전방식의 교류급전시스템으로, 한전의 3상 전력을 수전 받아 스코트 변압기를 통해 M상, T상의 2상으로 변환하는 전원계통, 레일에서 유입되는 전류를 전차선과 급전선으로 분류시켜 주는 단권변압기, 전기철도차량에 전력을 공급해 주는 전차선로 등으로 구성된다[10]. 주변압기는 차량에 탑재되어 전차선로부터 분기되는 팬터그래프로부터 25kV의 AC 단상전원을 공급받아 견인, 제동, 차량제어, 보조전원 등의 차량부하의 정격전압에 맞게 강압하는 역할을 한다[11]. 고속철도차량에 적용되는 주변압기는 동력집중식과 동력분산식이 적용되고 있으며, 철심과 코일의 배치에 따라 내철형(Core-form)과 외철형(Shell-form)으로 구분된다. 또한 내철형은 권선 형태에 따라 디스크 코일 또는 레이어 코일로 나뉜다. 일반적으로 내철형의 코어와 권선은 원형의 횡단면과 사각형의 종단면을 가진다. 변압기 권선법에는 연속 권선법, 인터리브 권선법과 한 턴에 한 개 이상의 도체를 가지는 병렬도체 인터리브 권선법 등 여러 가지 방법이 존재한다. 일반적으로 인터리브 권선법은 제작 과정이 복잡하고, 상대적으로 비용이 비싸기 때문에 고압 이하에선 연속 권선법이 주로 적용되고 있다. 본 연구는 고속철도차량에 탑재된 동력 집중식의 주변압기를 대상으로, 상세사양은 Table 1과 같다[12].

철도차량에 적용되는 6.2MVA급 주변압기의 고압권선은 팬터그래프로부터 25kV의 AC 단상전원을 공급받는다. 철도차량으로 인입되는 다양한 서지에 의한 주변압기 1차측 및 하위 장치의 장치손손 및 손상을 보호하기 위해 철도차량에서는 피뢰기 설치 및 주변압기를 기준충격절연강도(BIL: Basic Impulse Insulation Level)를 적정하게 설계하도록 되어 있다[13]. IEC 60850 기준으로 공칭전압 25kV에 해당하므로 BIL 150kV 이상을 설정하고 있다. Fig. 3은 주 변압기 권선의 단면도로 중앙의 철심을 기준으로 보조권선(LV: Low Voltage), 고압권선(HV: High Voltage), 견인권선(MV: Medium Voltage)로 배치되며, 상하부 대칭 구조로 내측이 입력단, 외측이 접지로 구성되어 있다. Fig. 4는 변압기 1차 권선을 상세 구조 및 사양을 나타낸 것으로, 고압권선은 사각형 단면의 레이어 타입으로, 16개의 레이어와 레이어당 94개의 턴으로 구성된다.

Table 1. Geometric and other parameters for the HV winding.

Winding	HV
Inner radius, R_m (mm)	125
Radius of core, R_{core} (mm)	117
Distance between layers, T_{l-1} (mm)	4
Distance between turns, T_{t-1} (mm)	0.46
Conductor radial length, a (mm)	5.11
Conductor axial length, b (mm)	2.06
Number of layers, N	16
Electrical turns per layer, N_l	94
Total turns	1,504
Relative permittivity of insulation coating, ϵ_{ic}	2
Relative permittivity of oil, ϵ_{oil}	2.5

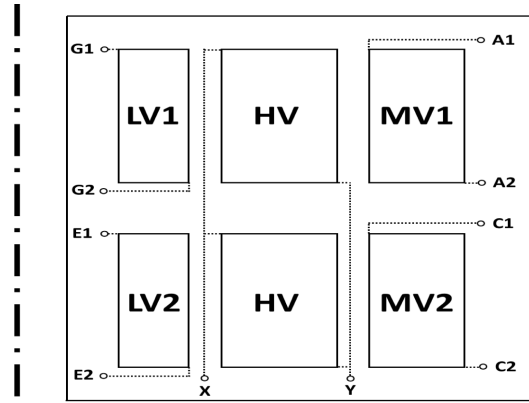


Fig. 3. Schematic diagram of winding structure.

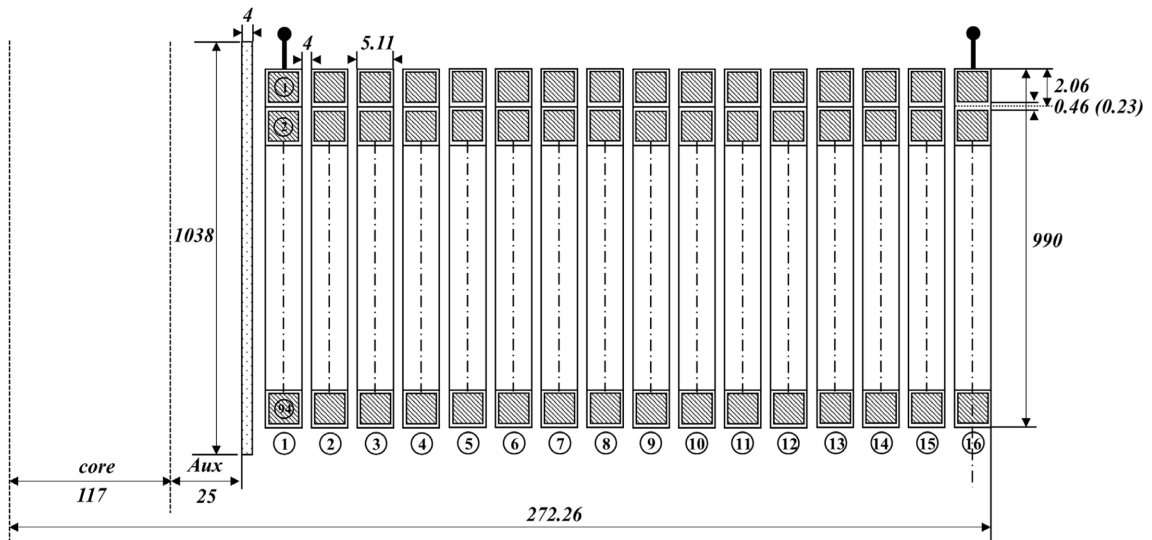


Fig. 4. Description of layers in layer-type transformer winding.

2.2.2 인덕턴스 계산

주변압기 고압권선은 1개 이상의 동심원의 코일로 구성된 레이어 형태로 가정하며, n 번째 레이어의 개별 턴의 기하학적 구조는 Fig. 5와 같다. 개별 턴의 단면은 사각형구조이며 방사방향 길이(a)와 축방향 길이(b)로부터 기하평균직경(GMD: Geometric Mean Diameter)을 도출한다[4]. GMD는 Table 1을 근거로 0.1603을 적용한다.

턴 단위의 자기 인덕턴스(L_{ii})는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

$$L_{ii} = \frac{\mu_0 l_n}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_n}{GMD} - 1 \right) \quad (2)$$

여기서, μ_0 (space permeability) = $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m], l_n (turn length) = $2\pi R_n$

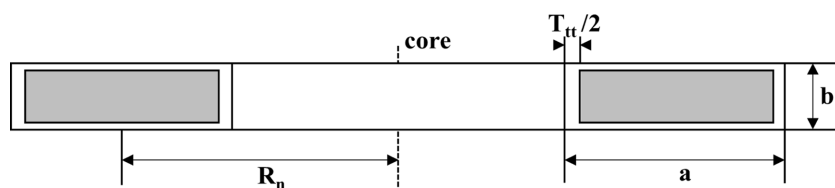


Fig. 5. Definition of one turn parameters: R_n indicates turn radius [7].

Table 2. Self and mutual inductances.

(unit : H)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.110516	0.000583	0.00046	0.000399	0.000355	0.000322	0.000296	0.000274	0.000257	0.000241	0.000228	0.000217	0.000206	0.000197	0.000189	0.000181
0	0.118180	0.000628	0.000502	0.000432	0.000385	0.000350	0.000322	0.000299	0.000280	0.000264	0.000249	0.000237	0.000226	0.000216	0.000207
0	0	0.125905	0.000674	0.000541	0.000466	0.000416	0.000378	0.000348	0.000324	0.000304	0.000286	0.000271	0.000258	0.000246	0.000235
0	0	0	0.133686	0.000721	0.000579	0.000501	0.000447	0.000407	0.000376	0.000350	0.000328	0.000309	0.000293	0.000279	0.000266
0	0	0	0	0.141522	0.000768	0.000619	0.000536	0.000479	0.000437	0.000403	0.000376	0.000353	0.000333	0.000316	0.000301
0	0	0	0	0	0.149409	0.000816	0.000659	0.000571	0.000512	0.000467	0.000432	0.000403	0.000378	0.000357	0.000339
0	0	0	0	0	0	0.157346	0.000864	0.000699	0.000607	0.000545	0.000498	0.000460	0.000430	0.000404	0.000382
0	0	0	0	0	0	0	0.165329	0.000913	0.000740	0.000644	0.000578	0.000529	0.000490	0.000457	0.000430
0	0	0	0	0	0	0	0	0.173358	0.000962	0.000782	0.000681	0.000612	0.000560	0.000519	0.000485
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.181430	0.001011	0.000824	0.000718	0.000646	0.000592	0.000549
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.189544	0.001061	0.000866	0.000756	0.000681	0.000624
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.197697	0.001112	0.000909	0.000794	0.000716
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.205890	0.001163	0.000952	0.000833
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.214120	0.001214	0.000995
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.222385	0.001265
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.230686

턴 간 상호 인덕턴스(L_{ij})는 서로 다른 개별 턴의 방사 방향의 길이(r_i, r_j)와 축 방향의 길이(z)로부터 계산되며, 식 (3)을 적용한다. k 는 고주파 대역에서 코어에 의한 자속의 영향을 무시하고 두 개의 동심원 사이의 영향만을 고려한다. 또한, $K(k)$ 와 $E(k)$ 는 각각 제1종과 제2종 타원적분(complete elliptic integrals)을 의미한다[14].

$$L_{ij} = \mu_0 \sqrt{r_i r_j} \left\{ \left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right\} \tag{3}$$

여기서,

$$k^2 = \frac{4r_i r_j}{(r_i + r_j)^2 + z^2}$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi$$

동일한 레이어에서 개별 턴의 자기 인덕턴스는 동일하다고 가정하며, 94개의 턴을 가지는 n 번째 레이어의 자기인덕턴스로 합산한다. 16개의 레이어를 가진 주 변압기 1차 권선의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 본 절의 계산식을 이용하여 Table 2와 같이 정리한다.

2.2.3 정전용량 계산

동심원 형태의 개별 턴은 무한길이의 직선으로 가정하며, Fig. 4와 5를 토대로 레이어별 직렬 정전용량과 병렬 정전용량을 계산하여 Table 3과 같이 요약한다. n 번째 레이어의 직렬 정전용량은 각 코일의 축 방향의 절연코팅에 대한 정전용량의 합을 레이어 당 턴 수로 나누어 도출한다[8].

$$C_{ic,n} = \epsilon_0 \epsilon_{ic} \frac{2\pi R_n a}{T_{it}/2} \tag{4}$$

여기서, ϵ_0 (permittivity of vacuum) = 8.85×10^{-12} [F/m].

$$C_{s,n} = \frac{C_{ic,n}}{2(N_t - 1)} \tag{5}$$

Table 3. Series and parallel capacitances per layer. (unit : pF)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C_s	2.039845	2.160864	2.281882	2.402901	2.523919	2.644938	2.765956	2.886974	3.007993	3.129011	3.250030	3.371048	3.492067	3.613085	3.734104	3.855122
C_p	121.3695	101.4368	88.45113	79.31966	72.54821	67.32656	63.17728	59.80079	56.99959	54.63819	52.62056	50.87671	49.35447	48.01412	46.82488	45.76258

n번째 레이어의 병렬 정전용량(또는 대지 정전용량)은 코일의 방사 방향의 절연코팅과 레이어 간 절연유에 대한 정전용량의 합을 레이어 당 턴 수로 곱하여 도출하며, Table 3과 같이 계산된다.

$$C_{ic,n} = \epsilon_0 \epsilon_{ic} \frac{2\pi R_n b}{T_t/2} \quad (6)$$

$$C_{oil,n} = \epsilon_0 \epsilon_{oil} \frac{2\pi R_n b}{R_n - R_{core} - (a + T_t)/2} \quad (7)$$

$$C_{g,n} = \frac{C_{ic,n} C_{oil,n}}{C_{ic,n} + C_{oil,n}} N_t \quad (8)$$

2.3 사례연구

2.3.1 분석 방법 및 모의조건 설정

2.2장의 인덕턴스와 정전용량은 MATLAB을 이용하여 자동 계산하고 그 결과를 ATPdraw의 라이브러리 파일 형식으로 저장한다. 라이브러리 파일은 저항, 정전용량, 인덕턴스 순으로 정의하며, 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스 성분은 16×16 상삼각 행렬로 표현한다. Fig. 6은 ATPdraw를 이용한 모의계통으로 서지전원과 AC전원 모델로 구성된 전원부와 라이브러리 형태의 고압권선 상세모델 그리고 각 레이어별 노드 전압과 레이어간 전압 측정을 위한 프로브로 구성된다.

사례연구는 임펄스 전압 분포, 주파수 응답특성 및 전압확대현상을 Table 4와 같이 선정하고 각 사례에 따른 모의방법, 모의 조건 및 인가전원에 대해 요약한다. ATP/EMTP 기반의 모의결과를 통합적으로 분석하기 위해 GTPLOT를 이용하여 p14 형식을 MAT 파일로 변환한다.

2.3.2 시뮬레이션 결과

(1) 표준임펄스전압 인가 시 초기전압분포

사례 1의 경우 변압기 인입 선로의 뇌서지에 의한 고압권선 내부의 초기 전압분포를 분석하기 위해 1.2×50μs 표준 임펄스 전

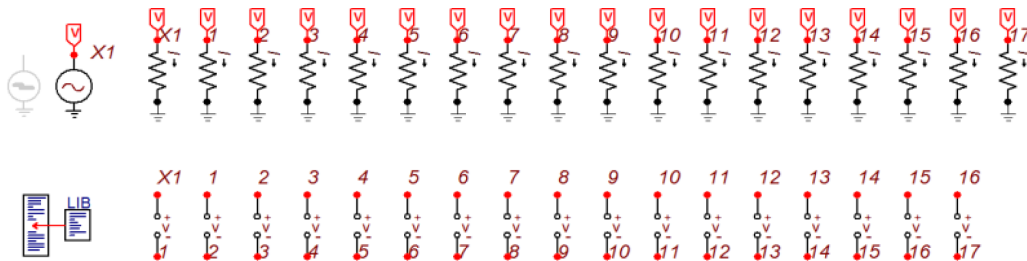


Fig. 6. Developed EMTP model for the primary winding, sources and voltage probes.

Table 4. Summary of case studies and simulation conditions.

Case	Simulation type	Simulation settings	Source
1	IVD	Time-domain T_{max} : 50μs, ΔT : 20ns	Standard (full) lightning impulse voltage, Amp:1V, Front: 1.2μs, Tail duration: 50μs
2	Frequency response	Frequency scan f_{min} : 60Hz, f_{max} : 1MHz, Δf : 500Hz	-
	Voltage amplification	Time-domain T_{max} : 50μs, T : 20ns	AC voltage, single-phase, grounded Amp: 1 V_{peak} L-G, f : 1 st natural frequency

압을 적용하며, 파형은 식 (9)와 같이 이중 지수형태로 표현된다[15].

$$V_s(t) = Amp(e^{At} - e^{Bt}) \quad (9)$$

여기서, Amp (applied voltage amplification factor) = 1.02 [p.u.], A (negative number specifying falling slope) = -0.0143E06 [1/s], B (negative number specifying rising slope) = -4.87E06 [1/s].

표준 임펄스 전압 인가 시 고압 권선의 구역별 초기 전압 분포를 Fig. 7과 같이 도식화 하며, Table 5에서 최대값을 요약한다. 10번째와 11번째 레이어간 최대 전압이 BIL을 2배 이상 초과하는 것을 확인하였다.

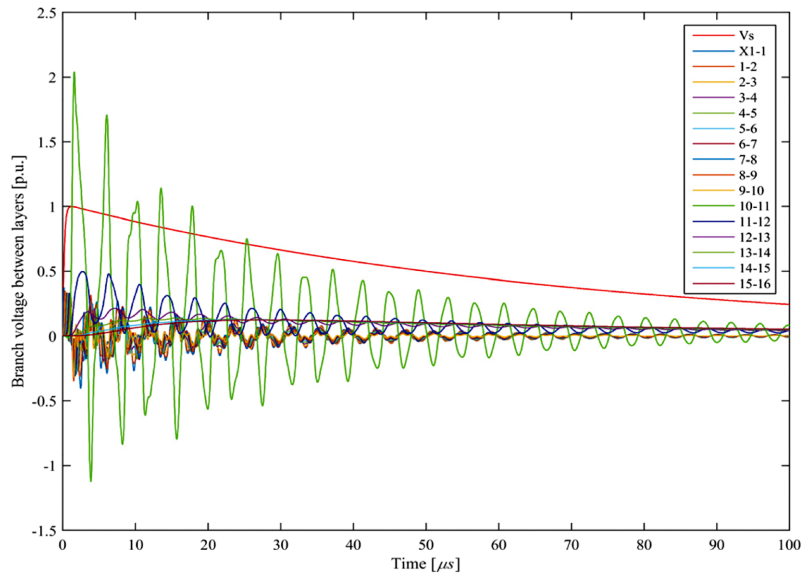


Fig. 7. Initial voltage distribution for standard impulse voltage.

Table 5. Summary of case studies and simulation conditions.

Layer-layer	Maximum voltage [p.u.]
X1-1	0.3736
1-2	0.3495
2-3	0.3398
3-4	0.3345
4-5	0.3315
5-6	0.3320
6-7	0.3319
7-8	0.3321
8-9	0.3174
9-10	0.2234
10-11	2.04
11-12	0.4967
12-13	0.2138
13-14	0.1374
14-15	0.1247
15-16	0.1232

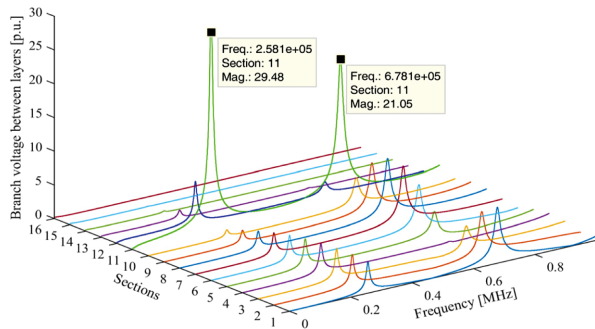


Fig. 8. Simulated voltage magnitude response per unit excitation.

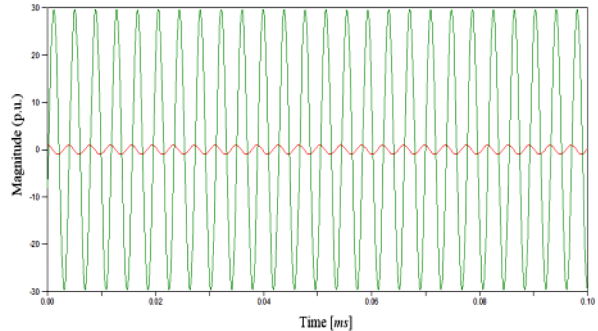


Fig. 9. Voltage response of 11th section under resonance.

(2) 전압-주파수 응답특성 및 전압확대현상

사례 2의 경우 인가전원은 AC 단상전압으로 500Hz 단위로 최대 1MHz까지 주파수를 변동시킨다. Fig. 8은 레이어간 전압 확대율을 인가된 전원의 주파수와 구역별로 도시한 것으로, 고압권선의 전압-주파수 응답 특성은 구역과 상관없이 동일한 양상을 보였다. 1차 고유주파수는 258kHz로 Fig. 9와 같이 11구역에서 최대 29.48배의 전압 확대 현상을 보였다.

3. 결 론

철도차량용 주변압기의 고압 권선의 전기적 공진 특성을 분석하기 위한 R-L-C-M 기반의 상세모델을 구현하고 초기 전압 분포와 전압-주파수 응답 특성과 초기 전압 분포 특성을 모의 분석하였다. 상세모델은 ATP-EMTP의 라이브러리 기능을 활용하여 레이어형의 고압 권선의 형상 정보 기반의 턴 단위의 파라미터 계산과 레이어 단위의 그룹핑을 통해 자동 생성된다. 사례연구로 표준임펄스 전압인가에 따른 초기전압분포와 주파수 변동에 따른 레이어 단위의 전압-주파수 응답 특성과 전압 확대현상을 분석하였다. 그 결과, 1 p.u.의 임펄스 전압 인가 시 10번과 11번 레이어 간 전압이 BIL을 2배 이상 초과함을 확인하였다. 또한, 500Hz단위로 최대 1MHz까지 주파수 스위핑을 통해 1, 2차 고유주파수 대역을 도출하고, 1차 고유주파수에 대한 전압 확대율을 확인하였다.

본 연구는 향후 내부권선 시험결과와의 비교연구를 통한 상세모델의 효용성 검증이 필요하며, 아울러 주차단기 개폐동작에 따른 고압인통선 말단의 과도이상전압과의 상호영향 분석 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] S. Pramanik, S. Anees, L. Satish (2013) Interleaved winding and suppression of natural frequencies, *IET Electric Power Applications*, 7(4), pp. 237-244.
- [2] R.C. Degenoff, M.R. Gutierrez, P.J. McKenny (1992) A method for constructing reduced order models for system studies from detailed lumped parameter models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(2), pp. 649-655.
- [3] A. Morched, L. Marti, J. Ottevangers (1993) A high frequency transformer model for the EMTP, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3), pp. 1615-1626.
- [4] E. Rahimpour, M. Bigdeli (2009) Simplified transient model of transformer based on geometrical dimensions used in power network analysis and fault detection studies, *International conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Lisbon, Portugal, pp. 375-380.
- [5] D. Debnath, A. De, A. Chakrabarti (2012) Lumped parameter electromagnetic modelling approach for transient analysis in EHV transformers, *World Journal of Modelling and Simulation*, 8(3), pp. 231-240.
- [6] Y. Shibuya, S. Fujita (2002) High frequency model and transient response of transformer windings, *IEEE/PES Transmission and Dis-*

- tribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, Yokohama, Japan, pp. 1839-1844.
- [7] Y. Shibuya, T. Matsumoto, T. Teranishi (2005) Modelling and analysis of transformer winding at high frequencies, *International Conference on Power Systems Transients*, Montreal, Canada, pp. 1-6.
- [8] M. Heidarzadeh, M.R. Besmi (2013) Influence of transformer layer winding parameters on the capacitive characteristic coefficient, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 5(2), pp. 22-28.
- [9] R.M. Del Vecchio, B. Poulin, P.T. Feghali, D.M. Shah *et al.* (2010) *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers, Second Edition*, CRC Press, pp.429-445.
- [10] Y.K. Yoon, Y.J. Choi, Y.H. Park, J.S. Han (2013) High frequency transfer characteristics of railway vehicles approach the main transformer, *Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Autumn Conference*, Daegu, Korea, pp. 485-490.
- [11] J.Y. Baek, H. Y. Lee, S.H. Lee (2014) Characteristics of temperature rise and magnetic shielding in main-transformer for high-speed railway vehicle by using electromagnetic-thermal fluidic coupled analysis technique, *Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Annual Summer Conference*, Pyeongchang, Korea, pp. 115-117.
- [12] S.H. Han, D.C. Yang (2013) Review of mold type technical specification for upgrading performance of main transformer on high speed train, *Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Autumn Conference*, Daegu, Korea, pp. 1027-1032.
- [13] H.S. Yim, S.J. Kim, S.M. Choi, G.J. Lee (2014) Electric train protection method from electrical hazards, *Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Spring Conference*, Changwon, Korea, pp. 197-203.
- [14] www.coe.ufrj.br/~acmq/tesla/maxwell.pdf (Accessed 10 November 2015).
- [15] www.elect.mrt.ac.lk/HV/Chap8.pdf (Accessed 10 November 2015).

(Received 5 November 2015; Revised 2 February 2016; Accepted 14 July 2016)

Ki-Seok Jeong : jks14@krri.re.kr

Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobakmulkwon-ro,
Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea

Dong-Uk Jang : dujang@krri.re.kr

Wireless Power Transfer System Research Team, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobakmulkwon-ro,
Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea

Jong-Duk Chung : jdchung@krri.re.kr

Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobakmulkwon-ro,
Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea