철도차량용 주변압기 고주파 전달특성 접근 방법

High frequency transfer characteristics of Railway Vehicles approach the Main Transformer

윤여근*†, 최열준*, 박영호*, 한정수*

Yeo kun Yoon*†, Yeol Jun Choi*, Yeong Ho Park*, Jeong Soo Han*

Abstract The effective suppression of the overvoltage due to the surge phenomenon is so important as the abnormal electric/electronic equipment damages cause the catastrophic accident in the railway.
In this paper, the rail vehicles main transformer high frequency transfer characteristic caused by overvoltage that using the single-phase transformer (1kVA) had surge short circuit test. Measurements and modeling to predict the result of this phenomenon is caused by the estimation method and the model car that you have the main transformer for validity when applied to investigate.

Keywords **:** Surge Voltage, High Frequency, Main Transformer, Common mode test

초 록 전기 철도 차량은 외부에서 인가되는 서지 이상전압에 노출되어 차량시스템을 이루는 장치의 부품 등에 손상이 가해지면 철도차량의 안전운행을 위한 정상적인 동작이 이루어지지 않게 되어 큰 인적/물적 사고로 이어질 수 있게 되므로 외부로부터 인가되는 서지 이상전압의 효과적인 억제는 매우 중요한 문제가 된다.
본 논문에서는 이상전압에서의 철도차량용 주 변압기에 나타나는 고주파 전달특성 현상을 단상 1kVA 용량의 전력용 일반 변압기를 이용해 서지 단락 모의시험을 통하여 측정 및 모델링을 예측하고 이러한 현상에 의해 발생하는 결과와 모델링 추정방법이 차량용 주 변압기 적용 시 타당성 여부에 대해 알아보고자 한다.

주요어 : 서지 이상전압, 고주파, 주 변압기, 단락 시험

1. 서 론

전기철도 차량 시스템은 가선을 통해 AC(교류)전원을 받아 차량이 동작을 한다. 이때 전원은 차량용 주 변압기를 통해 철도 차량의 구동 역할을 수행하는 견인전동기 전원과 보조전원장치 등으로 변압이 되어 차량의 정상적인 운행을 수행 할 수 있도록 한다. 또한 외부의 낙뢰나 서지 이상전압 등으로 인한 피해를 사전에 방지하고 차단하는 역할을 담당하기도 한다. 하지만 변압기 제작에 있어 효율 측면에서 중점을 두고 있기 때문에 실제 고주파 노이즈에 대비해 1차 권선과 2,3 차 권선간의 Stray Capacitance 에 맞는 적절한 변압기 제작이 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 논문은 'KS C IEC 61000-4-5 – 서지 내성

† 교신저자: 현대로템 전장품개발팀(ykyoon@hyundai-rotem.co.kr)
* 현대로템

시험 규격에 해당하는 서지를 실제 차량용 주변압기 적용 하기 전에 타당성을 확보하기 규격에 해당하는 서지를 실제 차량용 주변압기 적용 하기 전에 타당성을 확보하기 위해 용량 1kVA 전력용 변압기에 선행 시험을 하였다.

2. 본 론

2.1 시험환경

2.1.1 이상적인 변압기 회로정수 도출을 위한 시험

Table 1과 Table 2는 2차측을 개방하고 1차측 전압, 전류 및 전력을 측정하고 다시 1차측을 단락하고 2차측의 전압, 전류, 전력을 구한 값과 변압기 내부 파라미터 값이다.

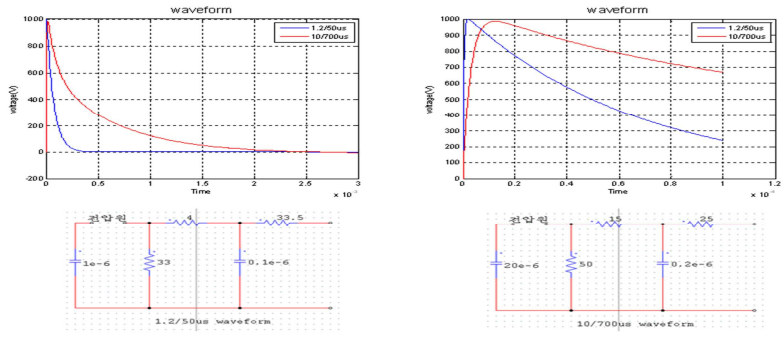
Table 1 short circuit, open circuit test

	Short circuit test		Open circuit test	
Voltage	V_L	220.9 V	V_H	33.84 V
Current	I_L	440 mA	I_H	15.648A
Power	P_L	14.7 W	P_H	327.2 W

Table 2 Ideal parameter of steady state

Resistance of primary winding	Leakage inductance -primary	Loss resistance	Inductive inductance	Resistance of secondary winding	Leakage inductance -secondary
1.3363Ω	4.5102 mH	3319.5Ω	1.3472 H	1.3363Ω	4.5102 mH

2.1.2 고주파 서지 입력 시험



(a)(1.2×50)μs (b) (10×700)μs

Fig. 1 Surge Waveform

고주파 전달 특성을 위해 사용된 서지 전압은 'KS C IEC 61000-4-5 – 서지 내성 시험' 규격에 해당하는 서지 입력형태인 (1.2×50)μs 파형을 변압기 시험에 인가 하였다. 이 인가 파형의 형태는 1.2μsec 동안에 최대값으로 상승하며 50 μsec동안 최대값의 절반 값으로 하강하는 형태이다.

2.2 일반 1kVA 용량 철도 서지 보호용 변압기를 이용한 모의 단락 시험

2.2.1 서지 입력시의 변압기 단락 시험

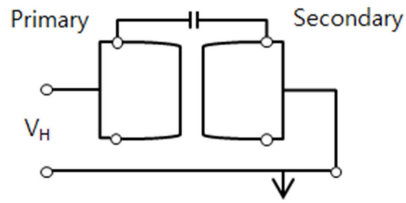


Fig. 2 Common mode test

변압기의 각 1차 권선과 2차 권선을 단락 하여 Fig. 2와 같은 형태의 회로로 표현할 수 있으며, 1차 권선과 2차 권선 간을 서로 공통으로 하여 순수하게 과도 상태에서의 권선 사이의 전도성 노이즈로부터 발생하는 파라미터인 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 성분에 관여 하는 전류와 전압의 형태를 Common-mode test(평형시험) 를 통해서 권선간의 성분에 대한 전압, 전류를 파악 할 수 있다.

2.2.2 전압과 전류의 형태

고주파에서의 저항, 인덕턴스, 커패시턴스의 성분으로 이루어진 직렬회로에서 저항은 출력 전류의 Damping 크기에 영향을 미치며, 인덕턴스와 커패시턴스는 에너지 저장의 특성을 가짐으로써 Damping의 속도를 결정 짓는다.

고주파 과도 상태에서의 회로 모델링과 정상상태 회로 모델링을 Hybrid-model로써 접근하여 기존 논문에서 제시한 커패시턴스만을 사용한 모델보다는 저항, 인덕턴스를 추가하여 정밀도를 높이는 측면으로 모델링을 제시 하였다.

2.2.3 선형 미분 방정식을 이용한 회로 해석과 고주파 전달 특성에서의 파라미터 추출 방법론 제시

-선형 미분방정식 회로 해석

$$\mathrm{RI(t)} + L\frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int I(t)dt = V(t) \tag{1}$$

$$\mathrm{I(t)} = \frac{1}{R}\left(V(t) - L\frac{dI(t)}{dt} - \frac{1}{C}\int I(t)dt\right) \tag{2}$$

정상상태에서는 1차측과 2차측이 동일한 주파수의 파형이 나온다고 할 수 있으나, 고주파 서지 파형은 그렇지 않다. 즉 시간에 대한 미분 항이 복잡해지고 그에 따른 도전율, 유전율, 투자율이 존재하기 때문이다. 위상 측면이라면, 당연히 인덕턴스 성분만 나오겠지만 서지 파형은 그렇지 못한다. 예를 들어 변압기의 내부 권선은 도전율에 의한 성분이 존재하고 고주파적인 과도 상태에서는 회로적으로 보았을 때 인덕턴스와 커패시턴스가 존재한다. 인덕턴스는 투자율에 대한 기하학적인 항이고, 커패시턴스는 절연을 위한 절연물에 대한

유전율에 대한 기하학적 항이다.

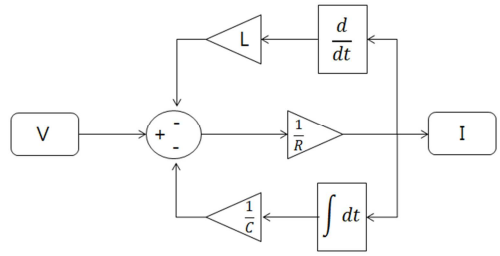


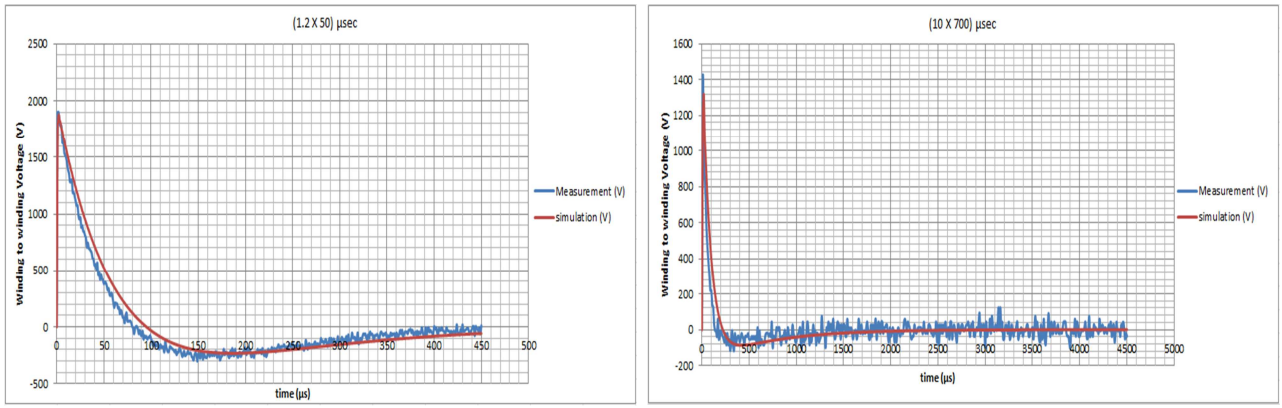
Fig. 3 Block Diagram

위 block diagram은 식 (2)에 대해 변형을 시킨 형태이다. 이는 파라미터 추출에 있어서 제어 이론을 이용한 방법이다. 제시된 변압기의 회로 모델링에서 각 성분들의 값은 앞서 제시한 방법론은 1계 선형 미분 방정식을 이용한 회로 해석과 block diagram을 이용해 Table 3에 파라미터 성분을 추출한 최종 값을 나타내었다.

Table 3 Winding to winding parameter of Surge Input

Winding to winding Parameter		
Resistance(Ω)	Inductance(mH)	Capacitance(μF)
54.788	1.4952	19.23

2.3 측정값과 시뮬레이션 값의 비교



(a)Winding to winding voltage (1.2 X 50) μs

(b) Winding to winding voltage (10 X 700) μs

Fig. 4 Measurement, Simulation data

Fig.4 에서 두 가지 모드의 고주파 서지 전압에 대한 권선간 걸리는 전압을 각각 측정된 값과 시뮬레이션 값을 비교하여 나타내었다. 측정된 1차 권선과 2차 권선간의 전압과 제어이론을 바탕으로 도출된 파라미터가 적용된 회로 시뮬레이션과의 결과 값은 신뢰도 있는 결과를 보여주고 있다.

2.4 전기철도 차량용 주 변압기 적용

2.4.1 주 변압기의 적용 방안

철도 차량에서 쓰이는 주 변압기는 가선전압(25kV)으로부터 전력을 받아 1차 권선을 통해 열차의 견인 역할을 수행하는 주변환장치를 통하여 견인 전동기를 구동하는 2차 권선과 보조전원장치(SIV)를 통하여 보조 회로기기에 전력을 공급하는 3차 권선으로 구성되어 있다.

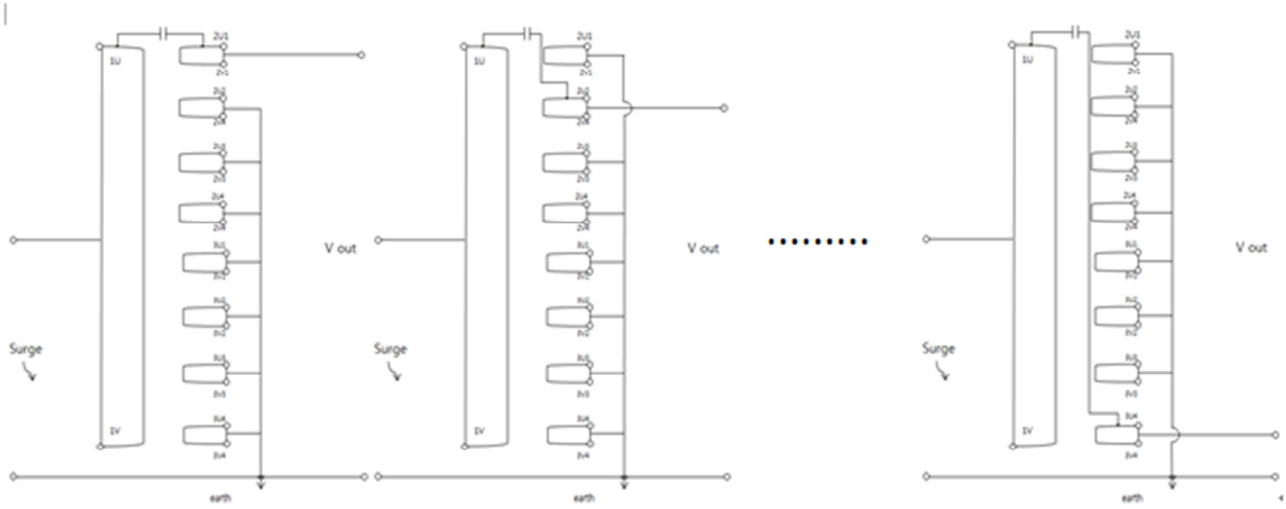
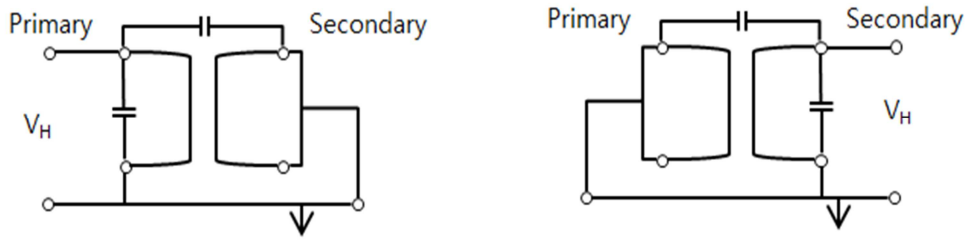


Fig. 5 Common mode test of Main transformer

일반 전력용 변압기에서 수행되었던 단락 시험을 통해 Fig. 5 의 철도 차량 주 변압기 적용 방안을 제시 하였다. 주 변압기는 3차 권선까지 있기 때문에 1차 권선과 각 권선은 독립적으로 전달 특성을 정의해 주어야 한다. 시험 방법에 있어서 특고압을 사용하는 주 변압기의 성능특성 기준에 맞는 시험이 이루어 져야 할 것이고 시험 파형의 주파수 특성에 대한 정의가 선행적으로 이루어 져야 할 것이다.

2.4.2 적용 방법 및 해석 방법 추가



(a) Primary U-V (b) Secondary u-v

Fig. 6 Common mode test of Main transformer

권선과 권선간의 파라미터는 앞 절에서 서술한 바와 같이 적용을 하며 1차 권선의 U-V간의 존재하는 파라미터의 추출을 Fig. 6 과 같은 단락 시험을 통하여 구한다. Fig.6 은 1차 권

선과 2차권선만으로 간략하게 나타내었고 상세하게 3차 권선과 4차 권선이 존재하는 주 변압기의 경우 위와 동일한 방법이다.

3. 결 론

고주파적인 외부 노이즈가 1차 권선으로 입력되면 2차 권선 및 3, 4차 권선으로 Stray Capacitance 의해 1차 권선과 타 권선간으로 노이즈가 전도되는 현상이 생긴다. 전기 철도 차량용 주변압기는 이러한 단락 모의 시험이 수행 된다면 과도 현상에 대해 각 권선간의 생기는 전도성 노이즈의 성분들의 도출이 가능하며 차후 주 변압기 필터제작과 변압기 용량에 따른 물리적인 크기를 선정해 줄 수 있는 기준이 될 것이다. 서지 이상 전압 인가시의 1차 권선 2, 3차 권선간의 전달 특성 분석을 하여 과도 상태에서의 변압기 내부의 회로를 모델링 하여 파라미터인 저항, 인덕턴스, 커패시턴스를 제시하였으며, 이에 따른 정확도 측면에서 주변압기의 회로 내부 해석이 의미 있는 방법을 제시할 수 있다는 결과를 도출 하였다. 또한 추가로 제시한 단락 시험의 방법을 주변압기의 실제 용량을 고려하여 수행 된다면 각 권선의 Stray Capacitance 를 추정할 수 있으며 주변압기 해석에 있어서 신뢰성 높은 결과를 가져올 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

[1] Paresh C. Sen (1998) *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, WILEY, pp.41-89

[2] Norman S. Nise (1992) *Control Systems Engineering*, The Benjamin/Cummings Publishing Company, pp 149-176

[3] Taku Noda(2002) Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies, *IEEE Transactions on Power delivery*

[4] Mehdi Bigdeli (2010) Estimation of Simpilfied Transient Model Parameters Using Genetic Algorihm, *IEEE Transactions on Power delivery*

[5] KOSED, “NOISE ISOLATION TRANSFORMER” 한국방송공학지 제 3권 1998.12.page56-71.

[6] 윤여근, 한인수, 나완수,” 철도용 절연 변압기 고주파 전달특성에서의 파라미터 추출에 관한 연구” 한국철도학회2013년도 춘계학술대회 논문집.