

노이즈 차폐 변압기의 주파수 특성 분석

김명석*, 오준식, 조현길, 한규환, 박종화

LS산전(주)

A analysis of frequency characteristics for the noise cut transformer

Myoung-seok Kim, Joon-sik Oh, Hyun-kil Cho, Gyu-hwan Han, Jong-hwa Park
LS Industrial Systems Co., Ltd.

Abstract - A noise reduction equipment in power systems was device combined in a passive element such as the form of L, R and C. A analysis of frequency characteristics for the transformer models shall be considered the additional capacitance between the windings(C_{ps}), terminals(C_s), and winding-ground(C_g). A noise in transformer is modeled by take account into the different frequency. In case of the high frequency, transformer windings with stray capacitance have lower impedance. Therefore a noise is transferred from primary winding to secondary winding. Noise Cut Transformer(NCT) was the noise reduction device and was normally single phase two-winding type transformer. We analyzed frequency characteristics using the nodal network analysis with the equivalent circuit and the simulation of the MATLAB.

1. 서 론

전력계통에 사용되는 변압기는 대표적인 전력에너지 변환기기로 계통에 함유된 각종 노이즈의 영향을 직접적으로 받고 또한 전달하는 역할도 한다. 노이즈 차폐 방법으로 EMI 필터, 라인필터, 바이패스 콘덴서(패스콘), 맴핑저항, 쵸크코일(choke), 페라이트비드(ferrite bead) 피뢰기(방전캡, 서지흡수기) 등을 사용하여 특정 주파수 대역을 차폐하고 있다. 노이즈 차폐 변압기는 변압기의 역할과 노이즈 차단 역할을 동시에 함으로서 통신분야 및 전자산업 분야 적용이 확대되고 있다. 따라서 노이즈 차폐 변압기에 대한 성능향상을 위한 분석이 필요하며, 본 논문에서는 노이즈 주파수 성분을 분석하고자 한다.

1.1 변압기 구분

사용부하 기기의 노이즈 영향을 고려하여 차폐 관점에서 의 목적이 따라 절연변압기, 차폐변압기 및 노이즈 차폐 변압기로 구분할 수 있으며,

표 1. 변압기 차폐구조

구분	변압기 차폐구조	용도
절연 변압기		전기적 절연용 상용주파수범위
차폐 변압기		제기용 변성기용 상용주파수~저주파수 범위
노이즈 차폐 변압기		고주파수 Noise by pass. 주파수 대역 넓음

일반적인 특징과 구조는 표 1과 같이 1, 2차 권선의 차폐방식에 차이가 있다. 노이즈 주파수 성분에 따라 적절한 구조의 변압기를 선정하며, 계측제어장치, 통신장비, 전력전자 변환장치와 같이 인접사용 계통의 경우는 노이즈의 전달경로를 고려하여 차폐 성능을 충분히 고려하여야 한다.

1.2 전력계통 내의 노이즈 구분

노이즈는 상승시간과 유지시간 및 주파수로 파형을 정의하며, 전력계통에 있어 대표적인 노이즈 파형에 대하여 표 2의 수학적 모델식을 이용하여 계통에 전달되는 에너지량을 계산하게 된다. 전력품질을 고려한 노이즈 구분을 표 3에 나타내었다. 이와 같이 노이즈의 경우 매우 높은 주파수($f=1/T$)를 가지고 있으며 상용주파수보다 수십 kHz~수 백 kHz에 달하여 커퍼시턴스 성분($X_C = 1/2\pi fC$)에 의해 임피던스가 매우 적어, 계통회로 개폐 스위칭시 발생하는 과도전압에 의한 감쇄진동파(Damped oscillatory wave; Ring-wave)가 변압기 2차 측(부하측)에도 영향을 미치는 결과가 나타난다.

표 2. 노이즈 파형의 수학적 모델식

구 분	수학적 모델식	특성 인자
서지 (Surge)	$v(t) = 1.037 v_p \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)$ where. $\tau_1 = 0.4074 \mu s$, $\tau_2 = 68.22 \mu s$	v_p : Max. of peak open-circuit voltage-time
버스트 (EFT/ Burst)	$v(t) = 1.270 v_p \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)$ where. $\tau_1 = 35 \text{ ns}$, $\tau_2 = 55.6 \text{ ns}$	-
감쇄진동파 (Damped oscillatory wave/Ring wave)	1) 100 kHz ring wave: $v(t) = 1.590 v_p \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ where. $\tau_1 = 0.533 \mu s$, $\tau_2 = 9.788 \mu s$ 2) 5 kHz ring wave: $v(t) = 1.027 v_p \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ where. $\tau_1 = 0.7356 \mu s$, $\tau_2 = 290.4 \mu s$	-

계통내 노이즈는 전력품질에 영향을 미치며, 전자화 제품의 신뢰성을 저하시키는 요인이 되고 있어, 노이즈를 효과적으로 차폐할 수 있는 대책 기기의 필요성이 대두되고 있다.

표 3. 노이즈 유형

노이즈 분류	기간별 유형	스펙트럼 유형	전압크기 유형
과도 특성 (Transient)	임펄스 (Impulsive)	5ns rise 1 μ s rise 0.1ms rise	< 50ns 50ns-1ms > 1ms
	진동 (Oscillatory)	< 5kHz	0.3-50ms 0.4 pu
		5-500kHz	20 μ s 0.8 pu
		0.5-5MHz	5 μ s 0.4 pu
단주기 변동	순시변동	Sag Swell	0.1-0.9 pu 1.1-1.8 pu
	순간변동	Interruption Sag Swell	<0.1 pu 0.1-0.9 pu 1.1-1.4 pu
		Interruption	3s-1min <0.1 pu
	잠시(일시)변동	Sag Swell	3s-1min 0.1-0.9 pu 3s-1min 1.1-1.8 pu
장주기 변동 (Long-duration Variations)	인터럽션	-	> 1min 0.0 pu
	저전압	-	> 1min 0.8-0.9 pu
	과전압	-	> 1min 1.1-1.2 pu
	전압불평형(Voltage Imbalance)	-	Steady state 0.5-2%

본 논문에서는 산업용으로 사용되고 있는 노이즈 차폐 변압기(500VA, 220/220V, 50/60Hz)의 주파수 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 변압기 구조 및 인자

변압기의 구조는 그림 2와 같이 코어와 권선으로 구성되어 있으며, 전기적 특성을 결정하는 저항(Resistance; R), 리액턴스(Reactance; L), 커패시턴스(Capacitance; C) 인자가 있다. 상용주파수(50 Hz 또는 60 Hz)에서는 권선 간에 존재하는 커패시턴스(C) 성분은 매우 작으므로 무시한다.

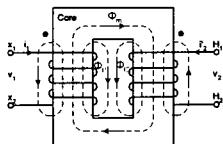


그림 2. 변압기의 구조

노이즈의 전파경로는 1, 2차 권선 및 외합간의 정전결합과 자기결합에 의해 전달되며, 그림 3과 같이 간략히 도시할 수 있다.

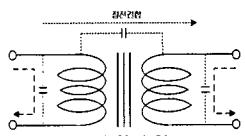


그림 3. 노이즈의 전달경로

2.2 노이즈 차폐 변압기 구조 및 등가회로

노이즈 차폐 변압기는 그림 4와 같이 EI 코어의 철심구조와 1, 2차 권선은 1:1의 권선비를 갖고 철심 내에 교호 배치 방식의 외철형을 일반적으로 사용한다. 권선 구조는 Winding 후 함침과 절연지로 보호하고 Al foil로 1차 차폐를 실시하고, 권선 외곽을 Cu tape으로 인출 케이블의 Shield wire와 철심(Core)에 연결하는 구조를 사용한다. Cu tape는 부하측(2차권선)에 실시한다.



그림 4. 노이즈 차폐 변압기 구조

변압기 해석에 있어 기초가 되는 이상변압기(Ideal transformer)는 권선 저항은 없고, 모든 자속은 누설자속이 없이 모두 쇄교하며 투자율이 매우 큰 것으로 가정하여 해석을 한다. 이와 달리 노이즈를 해석하기 위해서는 상용주파수 및 주파수 의존성에 대한 실제 변압기에서 주파수 특성을 해석할 필요가 있어, 이상변압기에서 가정한 모든 것을 고려하여야 한다. 실제 변압기에서는 부하손실인 철손(히스테리시스손, 와류손) 유전체손이과 부하손실인 저항손, 권선 와류손 및 표유손이 존재한다. 그림 5와 같이 변압기정수 시험을 통한 측정데이터와 실측 데이터를 바탕으로 노이즈 차폐 변압기의 등가회로를 나타내었다. 등가회로는 1차측 단자간의 자기 커패시턴스(C_1), 2차측 단자간의 자기 커패시턴스(C_2), 1차, 2차 권선 간의 상호 커패시턴스(C_{12}), 1차, 2차 권선의 누설 인덕턴스(L_{w1}, L_{w2}), 대지간의 정전용량(C_{gw1}, C_{gw2}), 자화 인덕턴스(L_m), 철손저항(R_m) 및 권선의 저항(R_{w1}, R_{w2})로 구성하였다.

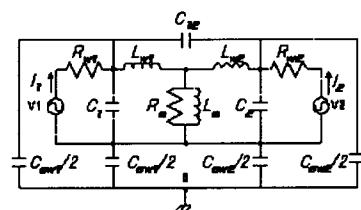


그림 5. 노이즈 차폐 변압기 등가회로

2.3 등가회로망 해석 및 변압기 정수

그림 5를 절점해석(nodal analysis)을 위한 절점을 ①~④로 정하고 어드미터스 행렬로 표현할 수 있다.

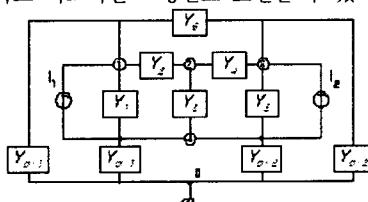


그림 6. 절점해석(Nodal analysis)을 위한 절점설정

$$[Y] \cdot [V] = [I] \quad (1)$$

$$Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 = I_1 \quad (2)$$

$$Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 = 0$$

$$Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 = 0$$

$$Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 = I_2$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서,

$$Y_{11} = Y_1 + Y_2 + Y_6 + Y_{gw11},$$

$$Y_{22} = Y_2 + Y_3 + Y_4$$

$$Y_{33} = Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_{gw21},$$

$$Y_{44} = Y_1 + Y_3 + Y_5 + Y_{gw12} + Y_{gw22}$$

$$\begin{aligned} Y_{12} &= Y_{21} = -Y_2, \quad Y_{13} = Y_{31} = -Y_6, \quad (4) \\ Y_{14} &= Y_{41} = -Y_1 \\ Y_{23} &= Y_{32} = -Y_4, \quad Y_{24} = Y_{42} = -Y_3, \\ Y_{34} &= Y_{43} = -Y_5 \end{aligned}$$

노이즈 차폐 변압기의 파라미터를 4단자 LCR meter와 전력분석기(PM3000A)를 이용하여 권선의 개방, 폐회로 시험과 전압강하법으로 측정하였고 데이터를 표 4에 나타내었다.

표 4. 변압기정수 측정 데이터

시험	측정 데이터		
2차 권선 개방 $I_2 = 0$	$I_h = 80.5 \text{ mA}$ $V_1 = 220 \text{ V}$ $P_1 = 12.2 \text{ W}$	$R_{en} = 1900 \Omega$ $X_{en} = 2065 \Omega$ $L_m = 236 \text{ H}$	
2차 권선 폐로 $V_2 = 0$	$I_h = 2.4 \text{ A}$ $V_1 = 20.4 \text{ V}$ $P_1 = 12.9 \text{ W}$	$R_{eq1} = 2.24 \Omega$ $X_{eq1} = 8.2 \Omega$	
1차 권선 개방 $I_1 = 0$	$I_h = 70.9 \text{ mA}$ $V_2 = 220 \text{ V}$ $P_1 = 11.6 \text{ W}$		
1차 권선 폐로 $V_1 = 0$	$I_h = 2.3 \text{ A}$ $V_2 = 20.4 \text{ V}$ $P_2 = 12.1 \text{ W}$	$R_{eq2} = 2.29 \Omega$ $X_{eq2} = 8.6 \Omega$	
변압기 측정단자	측정 데이터		
1차, 2차 권선수 1차 권선 저항 2차 권선 저항 1차 권선 누설 인덕턴스 2차 권선 누설 인덕턴스 1차 권선간 커패시턴스 2차 권선간 커패시턴스 1,2차 권선간 누설 커패시턴스 1차 권선과 대지간 커패시턴스 2차 권선과 대지간 커패시턴스	$N_1, N_2 = 670$ $R_1 = 1.1 \Omega$ $R_2 = 1.1 \Omega$ $L_1 = 5.5 \text{ mH}$ $L_2 = 5.9 \text{ mH}$ $C_1 = 1270 \mu\text{F}$ $C_2 = 1180 \mu\text{F}$ $C_{12} = 70 \mu\text{F}$ $C_{gw1} = 0.025 \mu\text{F}$ $C_{gw2} = 0.013 \mu\text{F}$ 측정주파수: 60Hz		

2.4 주파수에 따른 Y와 Z 특성모의

등가회로에서 도출된 어드미티스 행렬을 이용하여 주파수에 따른 어드미티스와 임피던스의 변화를 Matlab 프로그램으로 모의하여 그림 7과 같이 나타내었다.

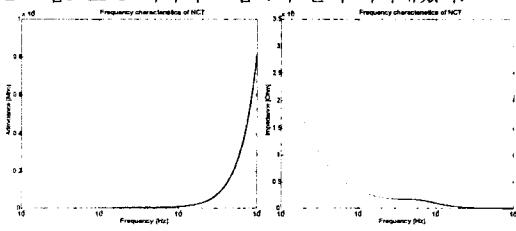


그림 7. Matlab을 이용한 Y와 Z 계산

2.5 삽입손실 분석



그림 8. 노이즈 차폐성능 평가를 위한 삽입손실 시험

1차, 2차측 권선에 유도되는 노이즈 감쇄되는 성능을 표시하는 방법으로 MIL-STD-220의 규정에 의한 삽입 손실(Insertion loss)을 데시벨(dB)로 나타낸다. 삽입손실량을 측정하기 위해서 식 5를 사용하여 성능을 평가할 수 있다. E_1 은 1차측 단자, E_2 는 2차측 단자에서 측정한 최대전압으로 평가 하였다.

$$\text{삽입손실 } [dB] = 20 \cdot \log \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (5)$$

(1) 서지(Surge)의 삽입손실,

1) 설정전압 0.5kV, 1차권선 측정값(E_1):+0.52kV,
2차권선 측정값(E_2):+0.3kV

삽입손실: 4.8 dB

2) 설정전압 1.0kV, 1차권선 측정값(E_1):+1.02kV,
2차권선 측정값(E_2):+0.6kV

삽입손실: 4.6 dB

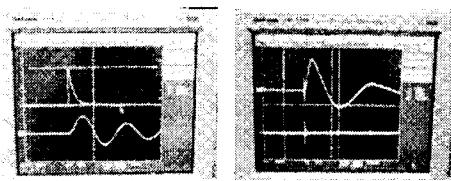
(2) 진동성 서지(100kHz ring-wave)의 삽입손실,

1) 설정전압 0.5kV, 1차권선 측정값(E_1):+0.44kV,
2차권선 측정값(E_2):+1.2V

삽입손실: 51 dB

2) 설정전압 1.0kV, 1차권선 측정값(E_1):+0.91kV,
2차권선 측정값(E_2):+0.2V

삽입손실: 73 dB



(a) $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 서지 (b) 100kHz 진동성 서지
그림 9. 유도 노이즈 과정

2.6 실험 결과분석

서지시험 삽입손실에서는 5dB이하로 나타났고 변압기 정수에 의해 감쇄 진동파 서지 형태로 차폐 성능은 낮다. 진동성시험 주파수 100kHz에서 삽입손실은 70dB이상으로 차폐성능은 우수한 것으로 나타났다.

3. 결 론

노이즈 차폐 변압기는 주파수 의존성이 높고 주파수에 따른 특성분석이 중요하다. 주파수가 $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 에서 삽입 손실은 약 5 dB로 서지에 대한 차폐 성능을 향상시킬 필요가 있다. 서지파형에 대하여 출력 단자에서 1.6kHz의 감쇄진동파가 유도되었고, 권선저항 보다 인덕턴스 성분이 큰 것으로 감쇄정수 a (damping constant)와 공진주파수 ω_0 관계를 규명할 필요가 있다. 본 논문에서는 등가회로를 구성하고 주파수에 따른 Y와 Z의 크기 ($Y=1/Z$)를 산출하였고, 향후 논문에서는 권선간의 상호 커패시턴스를 가변하는 방법, 권선 배치 간격을 변경에 따른 주파수 특성을 분석하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] H.Y.Lu, "Experimental determination of stray capacitance in high frequency transformers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.18, No.5, pp1105-1112, 2003
- [2] Allan Greenwood, "Electrical transients in power systems", John Wiley & Sons, INC., pp324-349, 1991
- [3] 박종배, "회로이론", 문운당, pp199-224, 1985
- [4] 강용철, "2004년 EMTP 충급자 강좌; 5. 변압기모델링 및 응용사례", 기초전력연구원, 2004
- [5] 김민찬, 윤도영, "MATLAB을 이용한 수치해석 및 그래픽", 도서출판 아진, pp101-111, 1999
- [6] 박민호, "유도기기", 동명사, pp143-158, 1991
- [7] IEEE Std. C62.41, "IEEE Recommended Practice on Surge voltages in Low-voltage AC Power Circuits", IEEE, 1991