

## 주파수응답분석기를 이용한 전력용 변압기 열화상태 평가방법 연구

(Research on Assessment Method of Deterioration Condition for Power Transformer Using Sweep Frequency Response Analyzer)

길형준\*

(Hyoung-Jun Gil)

### Abstract

This paper describes the assessment method of deterioration condition for a power transformer using SFRA. Frequency Response Analysis(FRA) is a method to evaluate the mechanical and geometrical integrity of the core and windings within a power transformer by measuring the electrical transfer functions over a wide frequency range. SFRA is sweep frequency response analyzer for power transformer winding diagnosis. The FRA is a comparative method, that evaluates the transformer condition by comparing the obtained set of FRA results to reference results on the same, or a similar, unit. FRA techniques were widely used and much more sensitive than the traditional and internationally accepted method of impedance measurements, but that work was required on standardization and interpretation. In order to analyze the deterioration condition for power transformer, overvoltage test and mechanical distortion test were carried out. The deterioration condition for power transformer was evaluated by SFRA. It is intended to present the elemental technology of assessment method for power transformer using SFRA.

Key Words : Assessment Method, Deterioration Condition, Power Transformer, SFRA

### 1. 서 론

주파수응답분석(FRA : Frequency Response Analysis)은 광대역 주파수 범위에서 전달함수를 측정

하여 전력용 변압기 내의 철심 및 권선의 기계적, 기하학적 변형을 평가하는 방법이고, SFRA(Sweep Frequency Response Analyzer)는 전력용 변압기 진단용 주파수응답분석기이다. FRA는 동일 또는 유사한 변압기에 대해 기준치와 측정된 결과를 비교하여 변압기 상태를 평가하는 비교 방법이다. FRA 기술은 전통적이고 국제적인 임피던스 측정방법보다 더 감응성이 높고 폭 넓게 사용되고 있다.

전력용 변압기는 선적을 한다거나, 고장 발생, 낙뢰, 설치 및 운전중 발생하는 기계적 충격에 견딜 수 있도

\* 주저자 : 전기안전연구원 선임연구원  
\* Main author : Senior Researcher, Electrical Safety Research Institute  
Tel : 031-580-3034, Fax : 031-580-3045  
E-mail : fa523@daum.net  
접수일자 : 2013년 3월 29일  
1차심사 : 2013년 4월 3일  
심사완료 : 2013년 6월 12일

록 만들어지나, 조임상태와 고정상태가 충분하지 못하면 운반 중 손상을 일으킬 수 있다. 이러한 손상은 코어나 권선 이동으로 이어질 수 있다. 현재 변압기 내부 기계적 변형을 예방하기 위해 여러 가지 점검 및 진단기술이 활용되고 있다. 예컨대 변압기 내부 부분 방전(PD)진단, 절연유 가스분석, SFRA 측정 등이 있으며, 주파수응답분석(FRA)을 통한 진단기법은 SFRA 개발과 더불어 범용화되어 전 세계 대부분의 전력기기 제작사 및 전력회사에서 기기의 품질증명과 이상 유무를 판단하기 위한 중요한 Tool로 사용되고 있다. SFRA는 권선형 기기의 고유 R, L, C 회로에 대한 주파수 응답을 측정하여 기기 내부의 구조적 변형을 분석할 수 있는 기기이다.

권선형기기가 운반 중 외부 충격으로 인한 손상, 고장전류 및 절연파괴로 인한 변형, 기기노후로 인한 권선의 이탈, 단락 등이 생겼을 경우 SFRA를 가지고 효과적인 진단이 가능하다. 현재 국제 대전력망 기술 협의회(CIGRE) Working Group A2.34의 “변압기 유지관리 지침(Guide for Transformer Maintenance)”에서 SFRA 측정시 제한치는 규정되어 있지 않은 것으로 명기되어 있다[1-5]. 따라서 본 논문에서는 SFRA를 통해 변압기 열화상태를 평가하기 위하여 변압기 과전압 실험 및 기계적 변형 실험이 수행되었고 이를 통해 변압기 열화 진단 평가방법의 요소기술을 제시하고자 한다.

## 2. 측정원리 및 방법

### 2.1 측정원리

권선형 기기 내부에는 철심 및 여러 권선의 조합으로 R-L-C 회로로 모델링이 가능하다. 권선-권선, 권선-대지, 권선-철심간에는 주로 커패시턴스(C) 값을, 철심에 감겨있는 권선에는 주로 인덕턴스(L)와 저항(R) 값을 측정할 수 있다[6].

SFRA의 측정목적은 정확한 R Ω, LmH, CpF 값 측정이 아니며, 이동함수를 이용하여 해당기기의 주파수 응답특성을 입력대 출력비로 나타낸 데시벨(dB) 값으로 초기 Data와 비교분석을 하기 위함이다. 그림

1에 변압기 R-L-C 회로를 나타내었다.

임피던스  $Z=R+j(\omega L-\frac{1}{\omega C})$ 에서 저항성분 R은 주파수의 변화와 무관하여 일정한 값을 지닌다. 특정 주파수에서 리액턴스 값이 0Ω이 되는 점( $\omega L=\frac{1}{\omega C}$ ) 즉, 공진점(Resonance)에서는 저항 R값만 존재하므로 임피던스 값은 저항성분에 의해 좌우된다.

유도성 리액턴스  $X_L=\omega L=2\pi fL\Omega$ 은 주파수에 정비례하여 주파수가 증가하면 유도성 리액턴스 값 또한 증가한다. 용량성 리액턴스  $X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}\Omega$ 은 주파수에 반비례하여 주파수가 증가하면 반대로 용량성 리액턴스 값은 감소하는 특성을 갖는다.

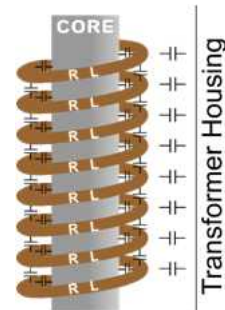


그림 1. 변압기의 R-L-C 회로  
Fig. 1. R-L-C circuit of transformer

SFRA는 대상 기기에 ±10V의 전압(peak to peak 20V)에 수 Hz~수 MHz의 주파수를 가하여 얻어진 응답을 측정한다. 이러한 응답특성은 입력대 출력비로 데시벨(dB)로 표시되며, 입력과 출력이 동일할 경우 0dB이다. 임피던스가 증가하면  $V_{out}$ 이 감소하게 되고 결국 dB는 감소하게 된다.  $20\log_{10}$ 은 전압의 입출력비(이득)를 일정비율로 분석하기 위함이다. 실제 SFRA는 50Ω의 별도 저항이 내장되어 있어 입출력회로를 구성한다.

$$\text{응답특성 } dB = 20\log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \tag{1}$$

$$\text{이동함수 } H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{50}{Z(j\omega) + 50} \tag{2}$$

$$H(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = 20\log_{10}H(j\omega) \quad (3)$$

$$\text{위상차 } H(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad (4)$$

### 2.2 측정방법

SFRA는 크게 개방회로(Open Circuit) 시험과 단락 회로(Short Circuit) 시험으로 나뉜다. SFRA는 선택된 주파수에서 정현파 전압을 발생시키고 두개의 입력 채널인 “Reference”와 “Measure”에서 입력 전압의 크기 및 위상을 측정한다. 장비는 “Reference”와 “Measure”의 전압과 위상 및 Measure/Reference 비율을 저장한다. 이 값들은 전압, 위상, 임피던스, 임피

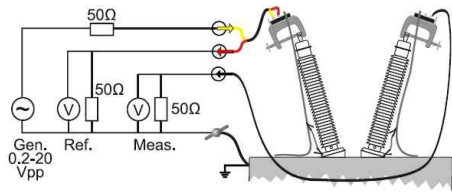


그림 2. SFRA 측정  
Fig. 2. Measurement of SFRA

표 1. 일반적인 용어  
Table 1. The general terminology

내용	표기	설명
변압기 1차 A,B,C,N상	H1, H2, H3, H0	변압기 1차측 부싱단자
변압기 2차 A,B,C,N상	X1, X2, X3, X0	변압기 2차측 부싱단자
변압기 3차 A,B,C,N상	Y1, Y2, Y3, Y0	변압기 3차측 부싱단자
단자간 단락	SC	Short Circuit
단자 Open	OC	Open Circuit

표기 예)  
 ○ 표기 : H1-H2-H3-H1  
 ○ 설명  
 - 변압기 1차측 A상-B상-C상-A상 단락  
 - 1차측 중성점 H0는 Floating

던스-위상, 어드미턴스 등으로 그려지며 전송된다. 그림 2에 측정회로 구성을 나타내었다[7]. SFRA에 의한 측정 및 Data 관리는 표 1의 일반적인 용어를 사용한다.

SFRA 측정시기는 변압기 제조 중, 변압기 운송 전 및 설치 후, 변압기 사고 후, 지진 및 허리케인 발생 후, 변압기에 경보가 발생했을 때 등이며, 이 중에서 변압기 운송 전 및 설치 후 충격에 의한 기계적 변화가 의심될 때 주로 SFRA 측정이 이루어진다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 과전압 실험 및 분석

본 연구에 사용된 SFRA(Megger Sweden) 특징은 DL/T 911-2004라는 분석기를 사용하여 데이터를 해석한다. DL/T 911-2004 분석기는 중국의 “Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China, DL/T 911-2004”에 기초한 것이다. 비교하고자 하는 2개의 스위프를 선택하기 위하여 시험 검색기를 사용한다. DL/T 911-2004 분석기는 다른 주파수 영역(1kHz~100kHz, 100kHz~600kHz 및 600kHz~1MHz)에 대한 상대 인자인 R을 계산한다. 표 2에 상대인자에 따른 변압기 권선의 변위 정도 판정 권고치를 나타내었다.

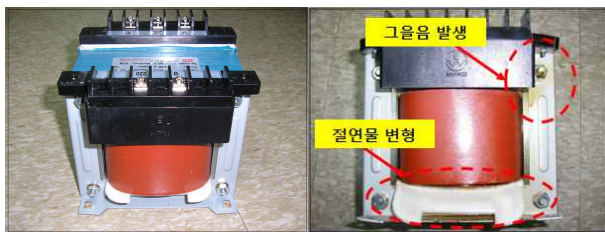
표 2. 판정 권고치  
Table 2. Recommendation value for adjudgment

권선 변위 정도	상대 인자 R
심각한 변위	$R_{LF} < 0.6$
명확한 변위	$1.0 > R_{LF} \geq 0.6$ 혹은 $R_{MF} < 0.6$
약한 변위	$2.0 > R_{LF} \geq 1.0$ 혹은 $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
정상적인 권선	$R_{LF} \geq 2.0$ , $R_{MF} \geq 1.0$ 및 $R_{HF} \geq 0.6$

○  $R_{LF}$ 는 곡선이 저주파 영역(1kHz~100kHz)일 때의 상대 인자  
 ○  $R_{MF}$ 는 곡선이 중간 주파수 영역(100kHz~600kHz)일 때의 상대 인자  
 ○  $R_{HF}$ 는 곡선이 고주파 영역(600kHz~1MHz)일 때의 상대 인자

그림 3은 과전압 인가 전·후의 변압기 상태를 나타낸다. 변압기를 과전압에 의해 열화시킨 후 SFRA를 이용해 변압기 열화 전·후를 비교 및 분석하기 위해 1kVA 단상 복권 변압기(정격전압 220V)를 사용하였으며, AC 1000V, 6A 용량의 과전압 전원장치를 이용하여 3시간 동안 정격전압의 2배인 440V, 3A를 H1 및 H0에 과전압을 인가하였다.

과전압 인가후에도 변압기 1차 및 2차측 전원에서 220V가 정상적으로 검출되었으며, 과전압에 의해 변압기의 절연물이 열에 의해 변형되었고 그을음이 발생한 것을 알 수 있다. 과전압 인가 전·후의 SFRA 측정 및 분석결과 H1-H0(OC), X1-X0(OC), H1-H0(SC, X1-X0 단락)에서 모두 정상 상태인 것으로 나타났으며 이를 그림 4에 나타내었다.



(a) 과전압 인가 전 (b) 과전압 인가 후

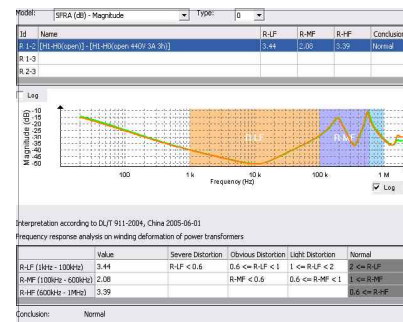
그림 3. 과전압 인가 전·후 변압기 외형 변화  
Fig. 3. Appearance variation of transformer before and after applying overvoltage

### 3.2 기계적 변형 실험 및 분석

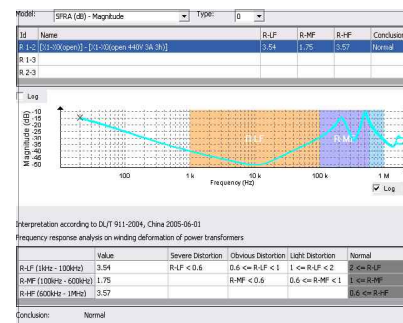
변압기를 기계적으로 변형시킨 후 SFRA를 이용해 변압기 열화 전·후를 비교 및 분석하기 위해 1kVA 단상 복권 변압기(정격전압 220V)를 사용하였다. 변압기의 1차 권선 변형, 2차 권선 변형, 2차 권선 단선 등을 그림 5에 나타내었다.

1차 권선 및 2차 권선을 기계적으로 변형시켰으며 상기한 실험과 마찬가지로 SFRA에 포함된 프로그램인 DL/T 911-2004 분석기를 활용하였다.

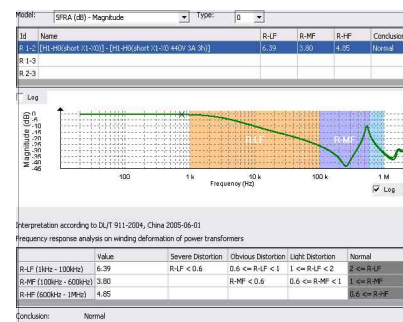
1차 권선의 기계적 변형 전·후의 SFRA 측정 및 분석결과 H1-H0(OC) 및 X1-X0(OC)에서 심각한 변



(a) H1-H0(OC, 모든 단자 Floating)



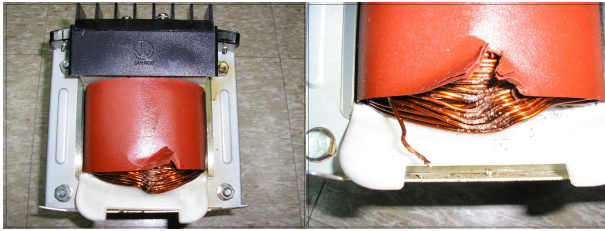
(b) X1-X0(OC, 모든 단자 Floating)



(c) H1-H0(SC, X1-X0 단락)

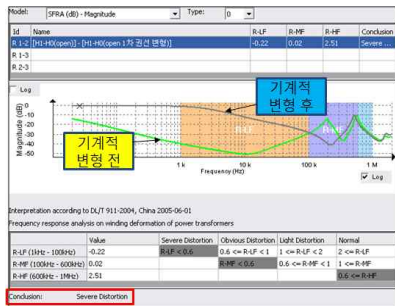
그림 4. 과전압 인가 전·후 SFRA 분석 및 평가  
Fig. 4. Analysis and assessment of SFRA before and after applying overvoltage

위로 판정되었고, H1-H0(SC, X1-X0 단락)에서는 정상 상태인 것으로 나타났으며 이를 그림 6에 나타내었다. 그림 6 (a) 및 (b)에 나타낸 바와 같이, 1차 권선을 변형시키면서 권선간 단락이 발생되어 열화 전보다 열화후가 더 낮은 저항 성분이 나타난 것으로 판단된다.

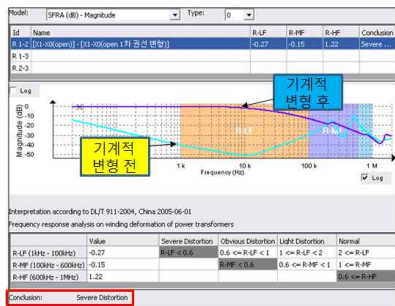


(a) 1차 권선 변형 (b) 2차 권선 변형 및 단선

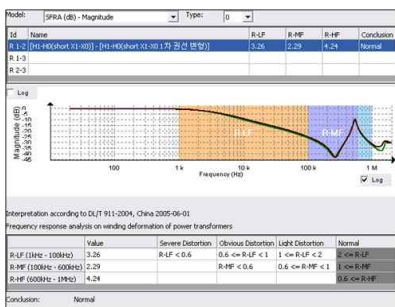
그림 5. 변압기 1차 및 2차 권선 변형  
Fig. 5. Distortion of primary and secondary winding in transformer



(a) H1-H0(OC, 모든 단자 Floating)



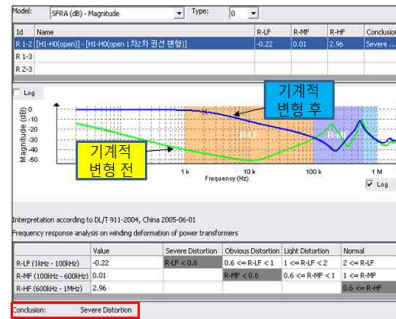
(b) X1-X0(OC, 모든 단자 Floating)



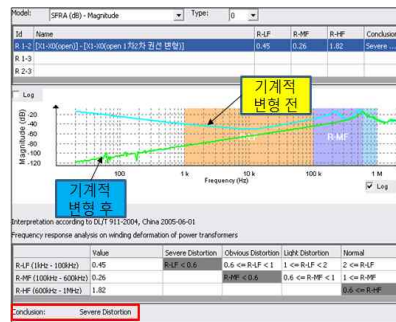
(c) H1-H0(SC, X1-X0 단락)

그림 6. 1차 권선 변형 전·후 SFRA 분석 및 평가  
Fig. 6. Analysis and assessment of SFRA before and after distorting primary winding

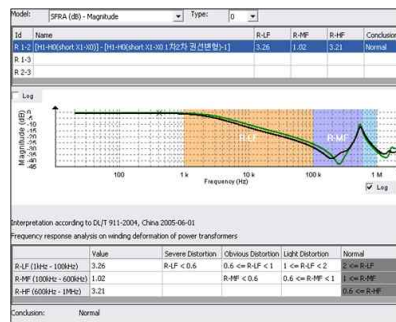
1차 및 2차 권선 변형(2차 권선 단선) 전·후의 SFRA 측정 및 분석결과를 그림 7에 나타내었다.



(a) H1-H0(OC, 모든 단자 Floating)



(b) X1-X0(OC, 모든 단자 Floating)



(c) H1-H0(SC, X1-X0 단락)

그림 7. 1차 및 2차 권선 변형 전·후 SFRA 분석 및 평가  
Fig. 7. Analysis and assessment of SFRA before and after distorting primary and secondary winding

그림 7 (a)에 나타낸 바와 같이, H1-H0에서 나타난 주파수응답 분석결과는 1차 권선을 변형시키면서 권선간 단락이 발생되어 열화전보다 열화후가 더 낮은 저항 성분이 나타난 것으로 판단된다. 또한 그림 7 (b)

의 X1-X0의 분석결과는 2차 권선이 단선됨으로 인해 열화전에는 -20dB에서 시작된 주파수 응답이 열화후에는 -120dB에서 시작된 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 SFRA를 통해 변압기 열화상태를 평가하기 위하여 변압기 과전압 실험 및 기계적 변형 실험이 수행되었고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 변압기 평가시 DL/T 911-2004 분석기가 사용되었으며 이는 특정 방정식들에 따른 다른 주파수 영역에 대한 상대 인자인 R을 계산하고, 이에 따라 권선 변위정도를 심각한 변위, 명확한 변위, 약한 변위, 정상적인 권선으로 나누어 평가한다.
- (2) 과전압 실험 및 분석의 경우 과전압 인가 전·후 변압기에서 정상적인 결과가 도출되었고, 기계적 변형 실험 및 분석에 있어서 상이한 결과가 도출되었다. 1차 권선 변형의 경우 권선을 변형시키면서 권선간 단락이 발생되어 열화전보다 열화후가 더 낮은 저항 성분이 나타나 시작점이 0dB에 근접하여 나타난 것으로 판단된다. 또한 1차 및 2차 권선 변형의 경우 변압기 1차측의 실험결과는 1차 권선을 변형시키면서 권선간 단락이 발생되어 열화전보다 열화후가 더 낮은 저항 성분이 나타난 것으로 판단되며, 변압기 2차측의 분석결과는 2차 권선이 단선됨으로 인해 열화전보다 열화후 더 낮은 시작점에서 주파수 응답이 시작된 것으로 사료된다.
- (3) SFRA에 의한 변압기 평가 제한치는 국제표준으로 아직 규정되지 않고 있으며, SFRA만으로 변압기를 진단하지 말고 가스, 절연열화, 여자전류 등 다른 시험결과를 종합하여 이상 유무를 판단하도록 하고 있다.

본 연구에서 제시한 변압기 열화 진단 평가방법의 요소기술은 기술전파에 따라 현장에서의 활용도가 클 것으로 예상된다.

#### References

- [1] Hyoung-Jun Gil, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, Ki-Yeon Lee, "Comparison of Assessment Method for Power Transformer Using SFRA", Summer Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers, pp.1597-1598, 2012.
- [2] Hyoung-Jun Gil, Dong-Woo Kim, "Research on Condition Diagnosis Method for Power Transformer Using SFRA", Autumn Conference of The Korean Society of Safety, pp.11, 2012.
- [3] CIGRE, "Guide for Transformer Maintenance", Working Group A2.34, pp.51-56, 2011.
- [4] Patrick Picher et al., "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis(FRA)", ELECTRA, pp.30-34, 2006.
- [5] Phil-Hoon Cho, "Case Study on SFRA Measurement of Power Transformer", Power Equipments Condition Monitoring and Diagnosis, pp.1-39, 2012.
- [6] Yun-Haeng Cho, "A Study of the Power Transformer Diagnostic Using Frequency Response Analysis", Master's Thesis of Hanyang University, pp.1-47, 2010.
- [7] Megger, "Sweep Frequency Response Analyzer", pp.10-40, 2010.

#### ◇ 저자소개 ◇



**김형준 (吉亨准)**

1969년 8월 27일생. 1997년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : (031)580-3034  
 Fax : (031)580-3045  
 E-mail : fa523@daum.net