

주파수 응답 분석기를 이용한 주상변압기 상태진단 사례

강문호*, 피재환*, 진승환*, 이강세*
한국전력공사*

Case Study on the Fault Discrimination of Pole Transformer using Frequency Response Analyzer

Moon-Ho Kang*, Jae-Hwan Pi*, Seung-Hwan Jin*, Kang-Se Lee*
Korea Electric Power Corporation*

Abstract - 주파수 응답 분석기(Frequency Response Analyzer, FRA)는 수십 MHz 고주파수 범위까지 기기의 전달함수를 측정하여 변압기, 리액터 등과 같은 권선형 기기 내 기계적, 기하학적 변형을 진단하는 장치이다. 배전선로에 운영 중인 권선형 기기인 주상변압기는 현재 193만대(2015. 4 기준)가 현장에 설치되어 운전 중에 있다. 그러나 변압기의 상태진단은 권선저항 측정, 전압비 측정 등 기초적인 단계에 있으며 일부 PD 분석기법이 연구 중에 있다. 본 논문에서는 권선형 기기의 진단에 기 활용하고 있는 주파수 응답 분석기(FRA)의 측정원리를 바탕으로 주상 변압기에 적용하여 적용 가능성을 검토하였다.

1. 서 론

배전계통에서 사용되는 주상변압기는 타 기자재와 비교하여 고장 발생률이 높고 기술지원 요청건수도 많으나, 변압기 내부의 기계적 변형의 검출은 현실적으로 어렵다.

변압기는 운반, 고장, 이상전압 등으로 인해 발생하는 기계적 충격으로 코어나 권선이 이동할 수 있으며, 이러한 변형은 주파수 응답 분석기를 이용하여 검출이 가능하다. FRA는 동일하거나 유사한 변압기에 대해 기준치와 측정된 결과를 비교하여 변압기 상태를 진단하는 방법이다.

2 본 론

2.1 FRA 분석 장치

변압기, 리액터 등 권선형 기기 철심의 접지 및 변형 여부, 권선의 층간단락, 개방 등을 진단하는 장비로 철심이동, 단선 및 권선 벌어짐, 권선의 축변형, 철심 접지상태, 권선 뒤틀림 등을 진단하는데 이용되고 있다. 그림 1은 본 연구에 사용된 FRA 5310 주파수 응답 분석기(Haefely 제작) 외형을 나타내었다.



〈그림 1〉 FRA 5310 외형(분석기와 프로브)

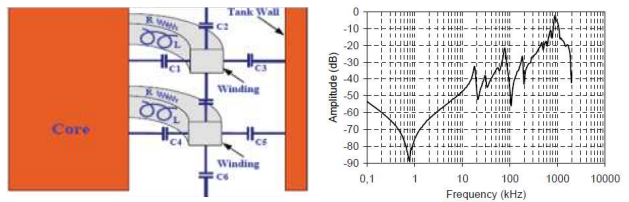
측정에 이용된 FRA 5310 주파수 응답 분석기의 주요사양을 아래 표 1에 기술하였다.

〈표 1〉 FRA 5310 주요사항

구 분	범 위	비 교
인가 주파수	10Hz ~ 10MHz	
출력전압	0.1V _{P-P} ~ 12V _{P-P}	
입력임피던스	50Ω 또는 1MΩ	
출력임피던스	50Ω	
정확도	± 0.1dB	실험실 조건

2.1.1 FRA 측정원리

권선형 기기의 내부는 철심과 권선의 조합으로 구성되며 전기적으로 아래 그림 2와 같이 R-L-C 회로로 모델링할 수 있다. 변압기 내부 철심과 권선의 기하학적 변화는 전기적 회로의 변화와 함께 주파수 응답의 변화로 이어진다[1].



〈그림 2〉 권선형 기기 모델과 주파수별 전달함수 예시

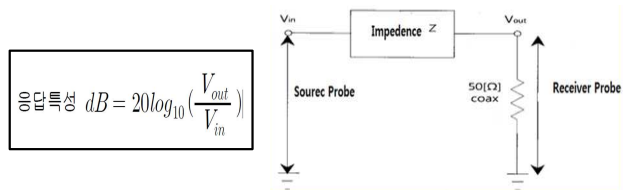
FRA 분석은 권선이 변형되면 1차 및 2차 권선간 또는 철심과 권선간 커패시턴스, 권선의 인덕턴스가 변화하고 이에 따라 공진점의 주파수 또는 진폭이 변화하는 것에 기초한 분석기법이다.

측정회로는 인가전압의 주파수를 가변하여 주파수 응답을 측정한다. 임피던스에서 저항은 주파수에 무관한 값을 가지며, 리액턴스가 0[Ω]이 되는 특정 주파수에서 저항성분만 존재하는 공진점의 임피던스 값은 저항성분에 의해 좌우된다.

유도성 리액턴스는 주파수에 정비례하여 주파수가 증가하면 증가하고, 용량성 리액턴스는 주파수에 반비례하여 주파수가 증가하면 감소하는 특성을 갖고 있다.

2.1.2 FRA 주파수 응답특성

FRA는 권선형 기기에 10Hz ~ 10MHz 대역의 12[V_{P-P}] 전압을 인가하여 얻어진 주파수 응답을 측정한다. 이러한 응답특성은 입력 대 출력비 즉 데시벨(dB)로 표시되며 입력과 출력전압이 동일할 경우, 0[dB]가 된다. 응답특성에서 임피던스가 증가하면 출력이 감소하여 응답특성[dB] 값은 감소하는 경향을 보인다.



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

〈그림 3〉 FRA 측정 기본회로와 응답특성

FRA는 50[Ω] 입력임피던스와 함께 측정회로를 구성하며, 50[Ω]에 나타나는 출력에 따른 임출력 전달함수는 아래의 식과 같다.

$$H(w) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{50}{Z(w) + 50}$$

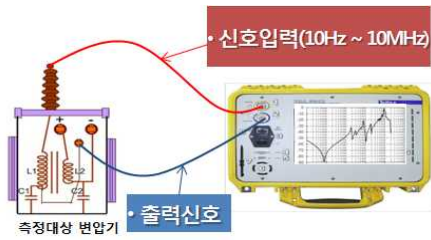
여기서, 응답특성과 위상은 아래와 같다.

$$H(dB) = 20 \log H(w)$$

$$H(\theta) = \tan^{-1} H(w)$$

2.2 FRA 측정 결선도

FRA의 노란색 프로브는 소스단자(붉은선)로 입력측에 해당하고 노란색 프로브(파란선)는 측정단자로 출력측에 해당한다. 각 단자의 소형클립은 접지측과 연결하여 측정회로를 구성한다. FRA 측정 결선도 구성을 아래 그림 4에 나타내었다.



<그림 4> FRA 측정 결선도

FRA 측정방법은 변압기 여자전류 측정과 유사한 개방시험과 1, 2차 직렬 임피던스 측정과 유사한 단락시험으로 구분되며, 단상 주상변압기의 경우 아래와 같은 4가지 측정모드가 있다.

<표 2> FRA 측정모드

측정모드	입력단	출력단	단락	접지
개방회로	H1	H2	No	No
개방회로	X1	X2	No	No
단락회로	H1	H2	X1-X2	No
1-2차 간	H1	X1	No	-

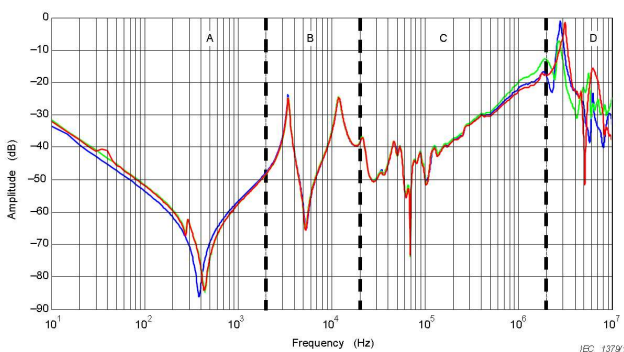
여기서, H1, H2는 고압측 1, 2차를 X1, X2는 저압측 1, 2차를 나타냄.

2.3 FRA 분석 및 진단사례

FRA 분석은 주파수 영역별 분석과 일치도(Coherence) 및 불일치도(Difference)를 통해 변압기 내부 이상여부를 진단할 수 있다. 일치도는 0 ~ 1의 값을 가지며 1은 두 파형이 완전히 일치하는 것을 의미한다.

2.3.1 FRA 주파수 영역별 분석

FRA 분석 시 각 영역별 R-L-C 특성은 주파수에 따라 고유 응답특성을 보이며, 각 부분별 고유 응답특성을 바탕으로 분석 시 변형부분을 진단하고 고장원인을 유추할 수 있다. IEC 60076-18에 제시된 주파수와 변압기 구조와의 관계를 그림 5에 나타내었다[2].



<그림 5> 주파수와 변압기 구조와의 관계

여기서 A는 코어, B는 권선간, C는 권선구조, D는 접지-리드선 등에 영향을 받는 영역이다.

2.3.2 FRA를 이용한 주상변압기 상태진단 사례

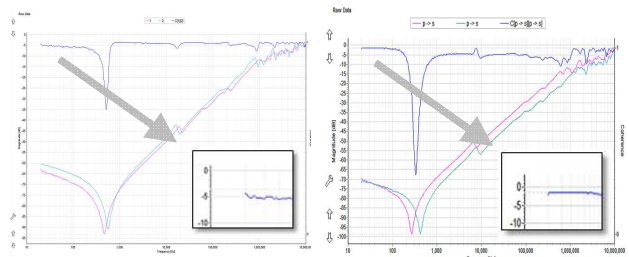
FRA 진단기준의 경우, 국제 대전력망 기술협의회(CIGRE) WG A2.34의 "변압기 유지관리 지침"에도 제한 값에 대한 규정이 명기되어 있지 않다. 또한 국제규격으로 FRA 진단에 따른 판정기준을 제시한 곳은 현재 없는 것으로 조사되었다.

따라서 본 연구에서는 부분적으로 절연지가 손상된 주상변압기와 권선이 소손된 주상변압기에 대해 FRA를 측정하고 중국의 DL/T 911-2004 기준을 바탕으로 상태를 진단하였다[3]. 본 연구에서 사용된 절연지 손상 및 권선소손 변압기의 결합모습을 그림 6에 나타내었다.



<그림 6> 분석용 주상변압기 결합 사진

위의 두 가지 사례에 대해 FRA 5310을 이용하여 FRA 응답특성을 측정하고 일치도를 분석하고 그 결과를 그림 7에 나타내었다.



<그림 7> 결합 유형별 FRA 일치도 파형

DL/T 911-2004 기준을 바탕으로 두 가지 사례에 대해 상태를 진단하고 그 결과를 아래 그림 8에 나타내었다.



<그림 8> DL/T 911-2004 기준 분석결과

DL/T 911-2004 기준에 따른 분석결과, 부분적인 미소 절연지 손상은 FRA를 이용하여 검출하지 못하였으나, 권선 소손의 경우 600kHz ~ 1MHz 대역에서 약한 변위가 검출되었다.

3 결 론

변압기, 리액터 등과 같은 권선형 기기 내 권선의 기계적, 기하학적 변형을 진단하기 위해 주파수 응답 분석기(FRA)가 사용되고 있다. 배전선로에 운영 중인 주상변압기의 상태진단은 권선저항 측정, 전압비 측정 등 기초적인 수준으로 새로운 기법의 도입이 필요하였다.

본 논문에서는 두 가지 유형의 주상변압기를 대상으로 FRA 측정하고 중국의 DL/T 911-2004 기준을 바탕으로 분석하였다. 분석결과 부분적인 미소 절연지 손상을 검출이 되지 않았으나, 권선 소손의 경우는 검출이 가능함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조윤행, 임태영 외, "주파수 응답 분석(FRA)을 이용한 전력용 변압기 고장예방 진단", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 463~464, 2011
- [2] IEC 60076-18 Ed. 1, "Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response", 2012
- [3] 김형준, "주파수응답분석기를 이용한 전력용 변압기 열화상태 평가 방법 연구", 한국조명전기설비학회지, Vol. 27, pp. 30~32, 2013