주파수 응답 분석(FRA)을 이용한 전력용 변압기 고장예방 진단

조윤행*, 임태영, 김종선, 김기일, 안광원, 임성주
한국전력공사 경기본부

A fault prevention diagnostic of power transformer using Frequency Response Analysis

YunHaeng Cho, TaeYoung Lim, JongSeon Kim, Giil Kim, Kwang-won Ahn, Seong-joo Lim
KEPCO GYEONGGI DISTRICT DIVISION

Abstract - Currently, different kinds of diagnosis and inspection technologies are applied to prevent the internal mechanical transformation of transformers. For example, examination of internal Partial Discharge of transformer, analysis of transformer oil gas, and measurement Frequency Response Analyzer(FRA) are used to diagnose defect. Especially, diagnosis technique through Frequency Response Analyzer(FRA) has been used and developed from 1960, when it was first introduced, till now to become an important tool to examine presence of defect and to prove quality of machines for the most electric machine producers electric power company in the world. However, diagnosis through FRA is still in introduction level in Korea and the application method for FRA is not established yet. For that reason, study about the application of domestic electric installation according to the FRA is needed. It is expected that the study play an important part in the prevention of defect due to the internal transformation of transformer by introducing measurement theory, providing measurement method, and analyzing application cases.

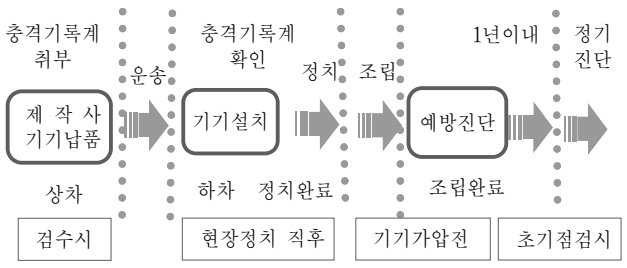
1. 서 론

전력용 변압기 고장원인 중 내부 권선변형에 의한 고장은 고장복구에 많은 시간과 비용이 수반되는 중대고장으로, 주파수 응답 분석 (FRA) 기법을 통한 변압기 내부 기계적 변형 여부에 대한 지속적 상태진단과 트랜드 분석은 대형사고를 미연에 예방하는 중요한 진단방법으로 활용되고있다. FRA 진단은 일반적으로 두 개의 주파수 응답 결과(Trace)를 비교하여 일치여부로 판단하게 되는데, 이전에 정상적인 변압기 측정데이터와 비교하여 변화가 생겼다면 권선의 이동이나 변형을 의심하게 된다. 그러나, 변압기 내부에 어느 부분이 변형되어 응답결과에 반영되었는지에 대한 진단분석은 경험있는 측정자들의 결과 해석에만 의존되어 온 것이 사실이다. 국내 FRA 측정장비 도입이후 KEPCO, 전력용 변압기 제작사등 각각의 진단주체들은 서로 다른 측정방법(측정시기,회로결선,데이터분석등)을 통해서 결과를 해석함으로써 데이터분석 및 공유에 한계가 있었고, 데이터 축적을 통한 추이 분석에도 어려움을 갖게되었다. 이에 본 논문에서는 FRA 진단이론과 표준화된 시험방법을 제시하고 국내 전력용 변압기에 대한 예방진단 적용사례 분석 및 데이터 축적을 통해 전력설비 고장예방에 기여하고자 한다.

2. 본 론

2.1 FRA 도입 및 적용

FRA(Frequency Response Analysis)는 1960년대 소개되어 1980년대 HP Network Analyzer로 사용되었다. 이 후 1990년 미국 Doble社에서 SFRA(Sweep FRA) Test Set를 개발함으로써 범용화 되었다. 현재 FRA는 전 세계 대부분의 전력기기 제작사 및 전력회사에서 기기의 품질증명과 이상진단을 위한 중요한 Tool로써 사용되고 있다.

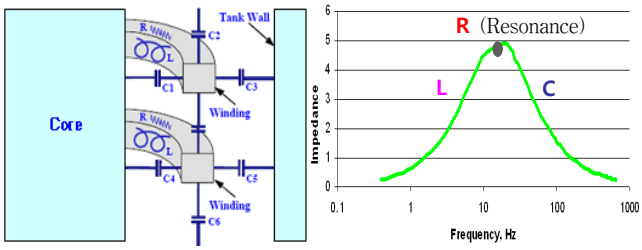


<그림 1> FRA 측정시기

FRA는 변압기 내부구조 변형 분석기법으로 일본등 지진이 많은 국가에서는 지진에 따른 변압기 이상유무 진단에 적용하기도 하며, 그림 1과 같이 국내 변압기 제작사의 경우 해외 수출등 운송시 FRA 데이터를 활용하는데, 변압기를 상차전(검수시) 측정을 시행하여 납품전 초기 데이터를 확보하고, 운반후 현장정치 직후 운송중 이상여부를 판단하기 위해 충격기록계(Impact Recorder)와 병행하여 측정데이터를 관리하고 있다. 또한 현장에서 조립 완료후 기기 가압전 해당 기기의 초기 데이터 확보를 위해 FRA를 측정하고, 초기점검시에는 기기 가압전 데이터와 비교분석하고 정기점검시는 기기의 변형진단 및 이력관리를 하고 있다. 이런 고장예방 활동 뿐만아니라 고장 발생시에도 고장분석을 위해 고장전류 또는 기타 요인으로 인한 기계적 변형여부를 진단하기도 한다. 또한 변압기 정밀점검시 절연유 배유상태에서도 측정하여 추후 정밀점검을 위한 초기데이터를 확보하고 있다. 이처럼 FRA는 변압기 철심의 접지 및 변형여부진단, 변압기 권선의 층간단락, 개방, 기계적 변형, 이탈여부 진단, 변압기 구조물의 기계적 손상 및 이완여부등 진단에 적용된다.

2.2 FRA 이론 및 측정

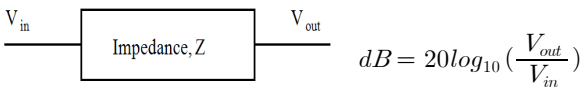
권선형 기기 내부는 철심 및 여러 권선의 조합으로 구성되며 전기적인 R-L-C 회로로 모델링할 수 있다. 전력용 변압기 내부 철심이나 권선의 기하학적 변화는 전기적 회로의 변화를 가져오고, 주파수 응답도의 변화로 이어진다.



(a) 권선형기기 R-L-C 모델링 (b) R-L-C 주파수에 따른 임피던스

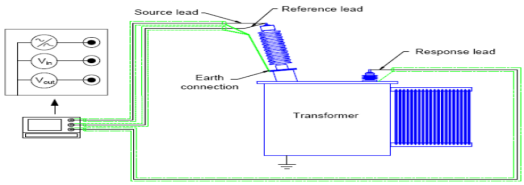
<그림 2> 변압기 R-L-C 임피던스 모델링

FRA는 권선이 변형하면 1차,2차 권선간이나 철심·권선 간 용량, 권선의 인덕턴스가 변화되어, 변형 부위에 대응하는 공진점의 주파수나 진폭이 변화하는 사실에 착안한 분석 방법으로, 단락 임피던스 측정회로에서 인가전압의 주파수를 변화시켜 주파수 응답을 측정하는 것이다.
임피던스(Z)에서 R은 주파수의 변화와 무관하여 일정한 값을 지닌다. 특정 주파수에서 리엑턴스 값이 0[Ω]이 되는 점, 즉 공진점(Resonance)에서는 저항 R값만 존재하므로 임피던스 값은 저항성분에 의해 좌우된다. 유도성 리엑턴스는 주파수에 정비례하여 L 곡선과 같이 주파수가 증가하면 유도성 리엑턴스 값 또한 증가한다. 용량성 리액턴스(Xc)는 주파수에 반비례하여 C곡선과 같이 주파수가 증가하면 반대로 용량성 리엑턴스 값은 감소하는 특성을 갖는다. FRA는 대상기기(전력용 변압기 등)에 ±10[V]의 전압(peak to peak 20[V])에 20[Hz]~2[MHz]의 주파수를 가하여 얻어진 응답을 측정한다. 이러한 응답특성은 입력대 출력비로 데시벨[dB]로 표시되며, 입력과 출력이 동일할 경우 0[dB]이다. 응답특성에서 임피던스가 증가하면 $Vout$ 감소하고 결국 dB는 감소한다.



<그림 3> 임피던스에 대한 전압 입출력

FRA 측정은 SFRA(Sweep FRA) 장비의 경우 기준 및 신호(Reference & Signal) 적색리드의 대형클립을 고압붓싱 단자에 연결하고, 측정(Measurement) 흑색리드의 대형클립을 중성점 부싱단자에 연결한다. 또한 적색/흑색의 소형 클립은 각 부싱 플랜지의 볼트부분에 연결하여 접지회로를 구성한다.



〈그림 4〉 SFRA 기본 측정 결선도

측정방법은 변압기 여자전류 측정과 비슷한 개방시험(Open Circuit)과 DC 저항측정과 같은 단락시험(Short Circuit)이 있으며 345kV 전력용 변압기 경우 아래와 같이 표준결선하여 측정을 시행한다.

〈표 1〉 345kV 단상 단권 3권선 변압기 결선

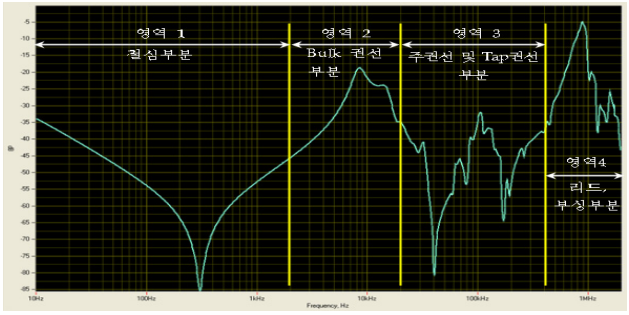
순서	결선	측정회로
1	H1-H0	1차 Open-Circuit (모든 단자 Floating)
2	X1-H0	2차 Open-Circuit (모든 단자 Floating)
3	Y1-Y2	3차 Open-Circuit (모든 단자 Floating)
4	H1-H0	Short-Circuit 1차-3차간 (Y1-Y2 단락)
5	X1-H0	Short-Circuit 2차-3차간 (Y1-Y2 단락)

2.3 FRA 데이터 분석 및 예방진단 사례

FRA 측정후 데이터 분석은 아래의 주파수 영역별 분석과 roll-off 직선 비교분석, 상관분석(correlation analysis)등을 통해 전력용 변압기 내부 이상여부를 진단할 수 있다.

2.3.1 주파수 영역별 분석

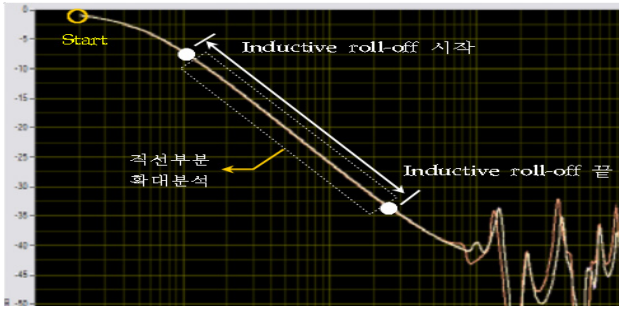
FRA 측정시 주파수 변화에 따라 대상기기의 각 부위별 R-L-C는 고유 응답특성을 나타낸다. 이러한 부위별 고유 응답특성을 가지고 측정결과 분석시 변형 부분을 진단할 수 있고 고장원인을 유추할 수 있다.



〈그림 5〉 주파수 대역별 진단부위 구분

2.3.2 저주파영역 인덕턴스 roll-off 직선부분 분석

FRA 측정데이터의 저주파 부분에서는 여자전류로 인해 비교적 커다란 인덕턴스 roll-off가 발생한다. 이 부분의 직선구간을 확대하여 과거 측정기록과 비교하면 변압기 철심부분의 이상여부를 판단할 수 있다.



〈그림 6〉 인덕턴스 roll-off 분석

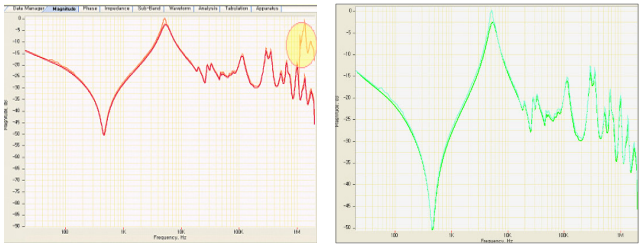
2.3.3 상관계수(CCF) 분석

두 변량 사이의 상관관계 정도를 나타내는 계수(정확히 일치할 경우 상관계수 1.0으로 산출)를 이용하여 변압기 내부변형 유무를 진단할 수 있다.

〈그림 7〉 주파수 대역별 상관계수 분석

2.3.4 FRA를 활용한 전력용 변압기 고장예방 진단사례

아래의 그림 8 Trace는 ○○○변전소 345kV 전력용 변압기 C상 (규격 : 345/161/23kV 166.7MVA) SFRA 측정결과 A,B상과 달리 주파수 영역별 진단을 통해 400[kHz]~1[MHz]이상 부분에서 응답도의 변화를 발견하고, 상관계수 분석에서 CCF값이 Band7 영역에서 정상치(CCF>0.96) 보다 낮아 3차 권선 및 Tap 권선의 리드 변형을 의심하고, 정밀점검을 시행하여 권선리드의 변형(이격거리 및 절연불량)을 발견 조치할 수 있었던 사례이다.



(a) 3차측(Y1-Y2) 점검전 데이터 (b) 3차측(Y1-Y2) 점검후 데이터

(c) 권선리드 변형 사진 (d) 권선리드 보강후 사진

〈그림 8〉 SFRA 측정데이터 및 권선리드 변형

3. 결 론

현재 FRA에 의한 변압기 진단은 과거 측정데이터가 거의 없는 상태에서 동일설비의 동일시기, 동일형식별 비교나 상별비교 등을 통한 데이터 분석을 하고 있어, 기기별 과거데이터의 축적을 통한 비교 및 향후 트랜드 관리는 매우 중요하다. 축적된 데이터들은 응답결과에 대한 패턴별 고장유형을 보여주기 때문에 진단분석에 유용한 자료가 될 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] SFRA진단 표준절차서 (한국전력공사, 2010)

[2] Nilanga Abeywickrama, *Student Mebmer, IEEE*, Yuriy V. Serdyuk, and Stanislaw M. Gubanski, *Fellow, IEEE* "Effect of Core Magnetization on Frequency Response Analysis(FRA) of Power Transformers" IEEE Transactions on power delivery, Vol. 23, No. 3, July 2008

[3] "Application of numericial evaluation techniques for interpreting frequency response measurement in power transformers" Published in IET Science, Measurement and Technology 2007

[4] J.A.S.B Jayasinghe, Z.D.Wang, P.N.Jarman, A.W.Darwin "Winding Movement in Power Transformers : A Comparision of FRA Measurement Connection Methods" Manuscript received on 18 April 2005, in final form 17 July 2006