

전산해석 검증을 위한 전력용 변압기의 단락강도 측정

오연호°, 송기동, 선종호, 김세창*, 우재희*
한국전기연구원, *현대중공업(주) 신제품개발실

Short Circuit Test of Power Transformer for Evaluation of Numerical Analysis

Y.H.Oh°, K.D.Song, C.H.Sun, S.C.Kim*, C.H.Woo*
KERI, *HHI Co., Ltd.

Abstract - This study shows method of measuring mechanical stresses during short circuit test, to evaluate numerical analysis of short circuit force. As test model, 400kVA transformers are used, to acquire short circuit force acceleration sensors used. Weak region of winding is found through short circuit test, and verification data of numerical calculation is obtained.

1. 서 론

변압기의 2차측 권선단에서 단락사고가 발생하면, 정격 전류의 수 ~ 수십배에 이르는 단락 전류가 권선에 흐르게 된다. 이로 인해 변압기 권선에는 단락전류의 상승에 비례하는 큰 전자기력이 작용하게 된다. 전력용 변압기의 경우 단락전류로 인한 전자기력의 크기는 수백만 [N]에 이르기도 한다[1]. 이러한 힘은 도체 권선의 배치를 변형시키거나, 심한 경우 기계적으로 고정시킨 고정부를 이탈하게 하여 고장을 일으킬 수 있다. 또한, 단락전류가 장시간 지속될 경우 권선 내에서 발생하는 열로 인해 도체가 소손되거나, 절연성능에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 그러므로, 변압기는 규격에 정한 단락 전류가 흘러도 기계적, 열적으로 견딜 수 있도록 설계 제작하여야 한다. 또한 시간과 비용의 절감 뿐 아니라 변압기 특성의 향상을 위하여, 제작 전 설계된 변수를 바탕으로 변압기의 단락강도 특성을 파악할 수 있는 해석 기법이 필요하다. 이러한 해석 기법은 시험결과와의 비교를 통해 신뢰성이 검증되어야 한다.

변압기의 단락강도 해석 기법은 크게 실험에 기초한 간단한 계산식을 이용하는 방법[1]과 컴퓨터를 이용한 수치해석 방법[2]이 있다. 저자들은 변압기의 단락강도를 파악하기 위해 수치해석 기법을 개발하여 왔으며, 해석 결과에 대한 신뢰성 검증을 위하여 단락강도 측정을 위한 시험을 수행하였다. 단락 시험에서는 시간 및 경제적 여건으로 인해 기존의 온도측정용으로 운전 중이던 변압기를 피시험체로 이용하였다. 이 경우 권선 내부에 센서를 취부하기가 어려웠으며, 운전에 따른 열화 및 노후로 인해 정격 단락 전류를 흘렸을 때, 권선이 파괴되는 문제가 발생하였다. 따라서, 정격 단락 전류의 40%~60% 범위에서 시험을 수행하여 단락강도를 측정하였다.

본 연구에서는 피시험 변압기의 단락강도 측정을 통해 수치해석 기법에 대한 검증 자료를 확보할 수 있었으며, 측정 방법 및 시험 결과를 제시하고 있다.

2. 본 론

2.1 피시험 모델변압기

본 연구에서는 시간 및 경제적 여건상 피시험 변압기를 따로 제작하지 않고, 기존에 온도상승 시험용으로 운전 중이던 피시험 변압기 2대를 단락시험용 모델변압기로

이용하고자 한다. 본 시험의 목적은 변압기의 정격 단락 시험에 대한 성공 여부가 아니라 단락강도 해석의 신뢰성을 평가하고, 이를 이용하여 단락설계에 대한 기준을 마련하는데 있다. 피시험 변압기의 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 피시험 변압기의 사양

항목	Transformer 1	Transformer 2
용량	400 kVA	400 kVA
% Imp.	5.43 %	5.49 %
상수	1Φ	1Φ
정격 전압	6600 / 220 V	6600 / 220 V
정격 전류	60 / 1818 A	60 / 1818 A
냉각매질	α 유	β 유

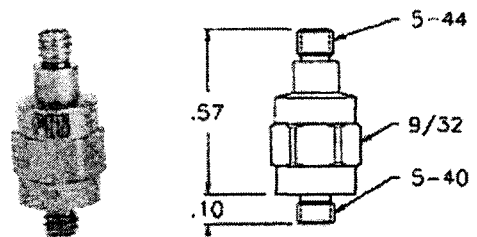
2.2 센서의 선정 및 취부

단락전류에 의한 권선의 파괴형태는 다양한 방향으로 발생하며 크게 축방향과 반경방향으로 나눌 수 있다. 이러한 권선의 파괴형태는 여러 문헌에 서술되어 있으며, 대개 권선의 끝단에서 가장 큰 힘을 받는다[2,3,4,5].

또한 단락강도 해석을 통해서도 이러한 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 센서는 가장 큰 힘이 발생하는 끝단의 반경 및 축방향, 그리고 중간 지점에 취부하였다.

피시험 변압기의 권선이 이미 제작된 상태이므로 권선의 바깥쪽 권선인 고압권선에만 센서를 취부해야 했다. 또한 변압기 내부가 협소하여 직접 힘을 측정할 수 있는 하중(Force) 센서를 취부하기가 불가능하였다. 따라서, 가속도 및 힘의 역학적 관계를 통해 권선이 받는 힘을 계산할 수 있으므로, 가속도 센서를 취부하여 단락시험을 수행하였다.

본 시험에서는 PCB 사의 가속도 센서를 선정하였으며, 그림 1에 사양 및 형상을 나타내었다.



- Quartz Shear Accelerometers / W353B16 (PCB Piezotronics, Inc. - SVS Division)
- 10mV/g sensitivity
- 0.7Hz to 20kHz frequency range
- 1.5grams in weight
- +/- 500g amplitude range

그림 1. 가속도 센서

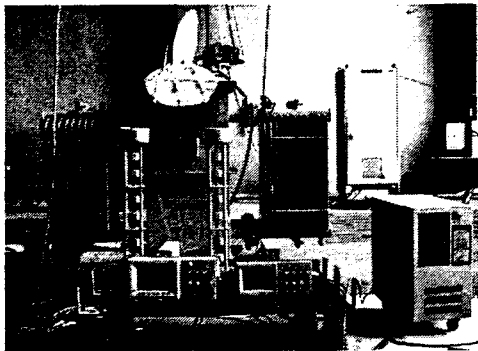
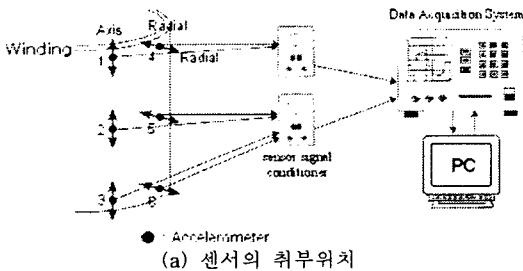
사용된 센서는 권선에 바로 취부될 경우 취부가 어려울 뿐만 아니라 취부점에서 이탈될 우려가 있고, 또한 도체에 직접 접촉되면 큰 전압이 유기되어 측정설비에 전기적 절연상의 문제점을 일으킬 우려가 있으므로 그림 2와 같이 센서와 도체 사이에 절연특성이 우수한 테플론(Teflon)을 끼워 사용하였다.



그림 2. 센서 취부

권선내부에 취부되는 센서의 취부점은 측정점에 해당되는 권선부의 대지간 전위차가 각각 다르다. 그러므로, 측정점이 다른 센서 사이에는 유도되는 전압의 차가 발생하며, 그 전압차는 온도측정 설비에 과전압 파괴고장을 발생시킬 수 있다. 따라서 이러한 고장을 방지하기 위해서는 인접한 전압차를 계속설비가 허용하는 내력 범위 이내로 낮추어서 설치해야 하며, 이를 위하여 가능한 한 센서 사이에는 전압차가 발생하지 않도록 센서를 인출하여야 한다. 또한 센서를 변압기 외함을 통하여 직접 인출하면 외함과 전기적인 절연이 되지 않으므로 외함과 절연이 되도록 인출해야 한다. 이를 위해 변압기 윗부분에 PVC 파이프를 삽입하여, 전압차가 작은 그룹으로 분리, 한 그룹씩 PVC 파이프를 통하여 인출하였다.

그림 3은 센서의 취부위치 및 전체 시스템 구성도를 나타내고 있다. 그림 3 (a)에서 권선의 축방향 가속도를 측정하기 위한 센서는 ch1, ch2, ch3이며, ch4, ch5, ch6 센서는 반경방향의 가속도를 측정한다.



(b) 전체 시스템 구성
그림 3. 센서 위치 및 측정 시스템 구성도

2.3. 단락강도 시험

본 시험에서는 정격 단락전압을 피시품 변압기에 인가하자 그 즉시 지락이 발생, 권선이 파괴되어 더 이상 시험을 수행할 수가 없었다. 제작된 피시품 변압기의 경우 온도상승 시험용 변압기로 제작되었으므로 단락시 권선

을 지지할 수 있는 구조물을 설계시 고려하지 않았던 것으로 판단된다. 그림 4는 파괴된 권선의 형상을 나타내고 있다.

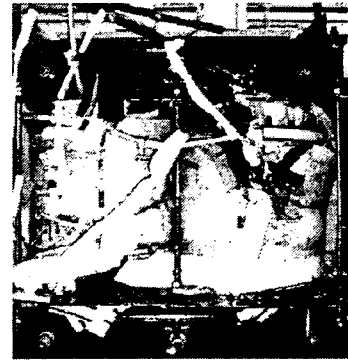


그림 4. 단락시험 후 파괴된 권선의 형상

따라서, 피시품 모델변압기 2의 단락시험에서는 100% 정격 단락전압을 인가하지 않고, 정격 단락전류의 40%가 흐르도록 전압을 인가하여 점차 전류값을 증가하였다. 그림 5는 정격 단락전류 40%인 경우 센서에서 측정된 가속도를 나타내고 있다.

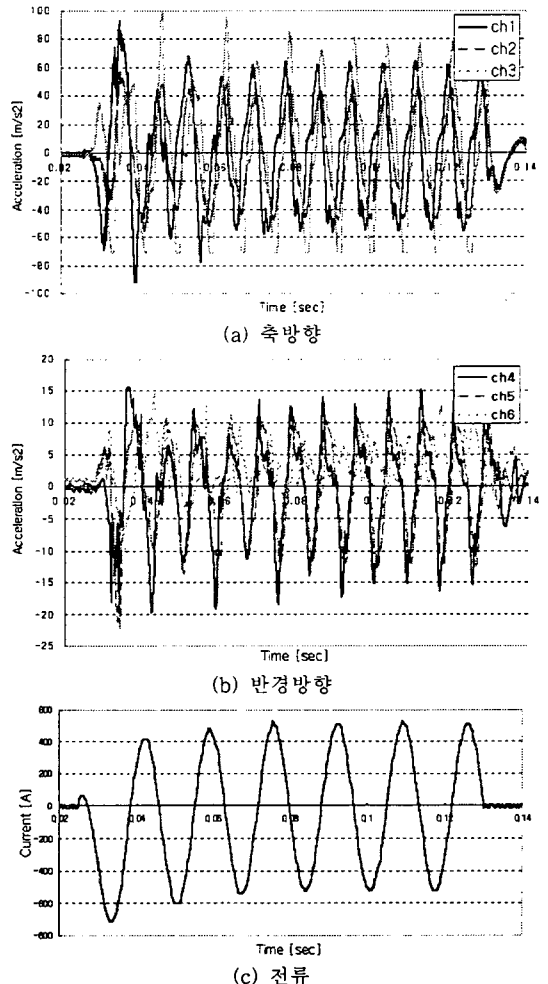


그림 5. 정격 단락전류 40%인 경우 측정된 가속도

측정결과, 축방향의 각 센서당 최대 가속도는 $ch1 = 93[m/s^2]$, $ch2 = 57.6[m/s^2]$, $ch3 = 98.4[m/s^2]$ 이며, 이는 권선 상단 및 하단에 축방향으로의 힘이 크게 작용한다는 것을 의미한다.

반경방향의 최대 가속도는 $ch4 = 19.6[m/s^2]$, $ch5 = 22[m/s^2]$, $ch6 = 14.4[m/s^2]$ 로서 권선의 상단 및 중간 지점에서 큰 힘을 받고 있다. 권선 지지구조물의 지지력이 약한 경우 전자기력에 의해 권선의 가속도가 증가하므로, 권선 상부의 반경방향에 대한 지지력을 보강해야 할 것으로 판단된다.

그림 6은 정격 단락전류의 40%, 50%, 60%인 경우 반경방향에서의 최대 가속도값을 나타내고 있다. 단락전류가 증가할수록 비선형적으로 가속도값이 증가하고 있다. 이는 단락전류의 증가와 더불어, 반복적인 단락시험으로 단락 스트레스가 권선 구조물에 누적되어 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 그림 7은 8번의 단락시험 후 다시 정격 단락전류 40%에서의 가속도 측정결과를 나타내고 있다. 이 경우 그림 5의 측정된 가속도값과 비교하여 최대 10배 이상의 차이를 보이고 있다. 이후 지락이 발생하여, 권선 지지력이 더 이상의 단락전류를 견딜 수 없음을 확인하였다.

그림 8은 시험 후 권선의 형태를 나타내고 있으며, 축방향으로 약간 변형된 것을 볼 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 수치해석 기법의 검증자료를 확보하기 위해 단락시험을 수행하였으며, 단락시 권선의 가속도를 측정하였다. 피시품 변압기 중 한대는 정격 단락 전류에서 권선이 파괴되어 측정이 불가능하였으며, 나머지 한대 또한 권선의 지지구조물이 취약하여, 정격의 40~60% 범위의 가속도만 측정할 수 있었다. 시험을 통해 권선의 상부가 취약함을 알 수 있었으며, 계속되는 시험으로 인해 축방향 및 반경방향 지지력이 감소하여 결국 권선이 변형, 지락이 발생하였다.

현재 수치해석 결과와 비교 검증하는 작업이 진행중에 있다. 자계계산을 통해 권선이 받는 전자기력을 계산하고, 이로 인한 권선의 변형 및 파괴를 모의하기 위해 응력해석을 수행하고 있다. 향후 좀더 다양한 시험결과와의 비교 작업을 통해 전산해석 기법이 검증된 후에는, 변압기의 단락설계에 유용한 자료가 될 것으로 판단한다.

(참 고 문 헌)

- [1] K.Karsai D et al., "Large Power Transformers", Oxford N.Y., 1987
- [2] P.Macor, G.Robert, "The Short-Circuit Resistance of Transformers : The Feedback in France Based on Tests, Service and Calculation Approaches", Cigre 2000 Session, 12-102
- [3] R.R.P.Sinha, "Evaluation of Short-Circuit Strength of Distribution Transformers", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7
- [4] R.B.Steel, W.M.Johnson, "Dynamic Measurements in Power Transformers Under Short-Circuit Conditions", Cigre, 1972 Session, 12-01
- [5] M.P.Saravolac, P.A.Vertigen, "Disign Verification Criteria for Evaluating the Short Circuit Withstand Capability of Transformer Inner Windings", Cigre, 2000 Session, 12-108

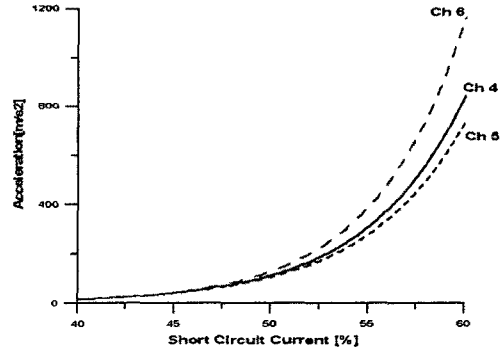


그림 6. 단락전류 크기에 따른 반경방향 최대 가속도

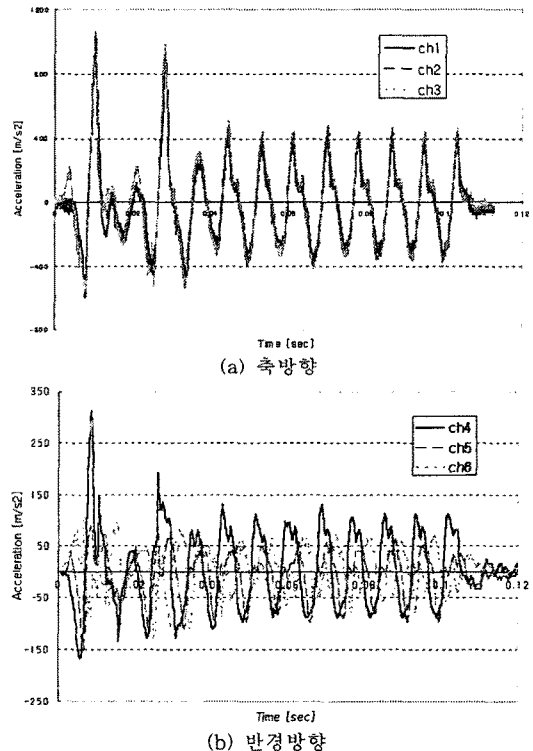


그림 7. 정격 단락전류 40%인 경우 측정된 가속도

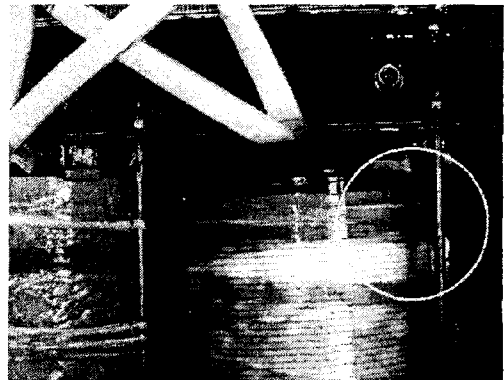


그림 8. 단락시험 후 권선의 형상(피시품 모델변압기 2)