

변압기 권선변형 진단에 적용하기 위한 LVI 시험기 개발

(The development of LVI tester for application of transformers winding deformation diagnosis)

조국희* · 김광화

(Kook - Hee Cho · Kwang - Hwa Kim)

요 약

본 논문은 LVI 시험기를 개발하여 모델 변압기 및 유입식 변압기에 적용해 LVI 시험 분석기술을 개발하였다. LVI 시험기는 본체, 터미널 박스 및 케이블로 구성하였고, ANSI 규격에서 요구하는 출력특성을 갖도록 설계 제작하였다. 모델 변압기는 탭들을 만들어 변압기의 권선변형 모델을 만들 수 있도록 하였고, 유입식 변압기는 실제 현장에서 사용되는 3상 변압기이다. LVI 시험기는 펄스폭이 1000 ns 이하의 파두 시간과 펄스 최대 전압 500 V로 제작되었다. LVI 시험기로써 실험을 실시하여 성능을 평가한 결과 측정된 파형 분석으로 권선의 축방향과 반경방향으로의 움직임을 구별할 수 있어 변압기 예방 진단에도 효과가 기대된다.

Abstract

The assessment of the condition of a transformer winding which is suspected of having suffered short circuit damage can be difficult. Conventional test such as winding resistance, magnetic current or insulation resistance will only detect damage if a permanent electrical fault exists. Visual inspection of windings necessitates the removal of oil and in many cases only a very small proportion of the winding can be seen. We describe the characteristic of LVI test system and methods to detect the deformation of windings in the power transformers. As the front rise time of recurrent-surge generator pulse less than 1000 ns and the peak value of pulse is about 500 V, we have the good results of detecting winding deformation in the LVI test of transformers.

Key Words : LVI tester, model transformer, winding deformation.

1. 서 론

* 주저자 : 한국전기연구원 선임연구원
Tel : 055-280-1577, Fax : 055-280-1490
E-mail : khcho@keri.re.kr
접수일자 : 2002년 8월 8일
1차심사 : 2002년 8월 9일
심사완료 : 2002년 9월 2일

송변전기기의 고압 대응량화로 인해 송변전기기의 고장이 전력 계통에 미치는 영향이 높으므로 신뢰성 확보가 중요하다. 전력용 변압기에 단락이나 과전압이 침입하면 권선은 매우 큰 스트레스를 받게 되어, 권선이 변형되거나 파괴가 발생하게 된다. 그러므로 권선 변형 확인을 위한 측정과 검출 방법이 필요하다 [1][2]. 변압기의 권선 변형 고장 검출을 확인하는 방

변압기 권선변형 진단에 적용하기 위한 LVI 시험기 개발

범으로는 FRA(Frequency Response Impulse), IS(Inductance Signature), LVI(Low Voltage Impulse)로 분류할 수 있다.

FRA 방법은 변압기 권선 단자에 전압을 인가하고, 다른 단자로부터 얻어진 신호의 진폭과 위상을 주파수 함수로 나타낸다. 신호의 응답에서 진폭은 입력 전압과 출력 전압의 비로 측정하며, 위상은 파형의 형태를 분석하여 측정한다. 그러나 입력 신호의 반사 문제 때문에 특성 임피던스를 고려해서 사용해야 하는 단점이 있다. IS는 단락 시험을 하는 동안에 인덕턴스 변화를 확인하는 방법으로, 커패시턴스에 의한 고장 검출에는 반응이 민감하지 못하고 위상의 확인이 불가능한 단점이 있다[3][4]. 따라서 권선 변형을 확인하기 위해 변압기의 한쪽 단자에 충격 전압을 인가하여 변압기 권선에 흐르는 유도 전류를 저항(shunt)을 통해 측정하는 LVI 측정 방법이 1966년 폴란드의 Lech에 의해 처음으로 제안되었다. 1969년에는 Smith와 Waters가 고압 충격 시험 원리를 이용하여 2상 권선의 전류 차이를 측정하는 방법으로 절연 파괴된 변압기에 적용한 결과, 권선의 변형에 대해 파형이 다르게 응답되어 변압기의 단락 강도 시험 전후 권선 상태 분석을 위해 널리 사용하게 되었다[5]-[8]. 본 논문은 이와 같은 관점에서 규격에 만족할 수 있는 저압 충격 시험기를 제작하여 실험을 통해 성능을 평가하고, 제작된 모델 변압기 및 유입 변압기를 이용해 LVI 파형의 특성을 분석하여 변압기 권선의 변형 진단 기술에 관하여 연구하였다.

2. LVI 시험기 설계 및 제작

2.1. LVI 시험기의 필요성

LVI는 단락 시험 전후의 권선 변형을 파형으로 진폭의 크기, 주파수 및 위상을 비교 분석하여 판단하는 시험법으로 통상 권선의 변형은 육안 검사를 통한다. 차동 방법은 권선 변화를 측정하는데 있어서 매우 유용한 방법으로, 축방향의 권선 손상은 위상 및 주파수가 변화하며, 반경방향의 권선 손상은 초기 주파수 성분을 유지하는 것처럼 보이나 진폭과 크기가 변화한 것으로 나타난다.

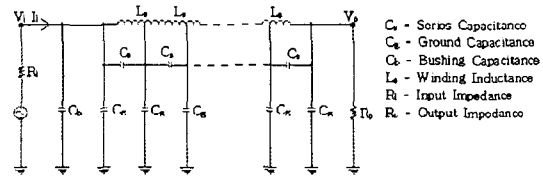


그림 1. 변압기의 고압 권선 등가 회로
Fig. 1. Equivalent circuit of transformer

그림 1은 변압기의 고압 권선의 등가 회로이다. 이것을 설명하기 위하여 변압기 권선의 턴 사이에 분포 정전 용량을 C_s (Series Capacitance), 권선과 대지간의 분포 정전 용량이 C_g (Ground Capacitance)라 정의했을 때, 만약 권선 변화가 반경방향으로 발생한다면 C_s 가 조금 변하는 대신 C_g 는 상당히 변하며, 반대로 축방향으로 권선이 변화했다면 C_s 가 상당히 변하고, C_g 는 조금 변한다. 이와 같이 LVI 측정 방법은 기본적으로 변압기에서 권선 변형에 따른 커패시턴스 변화를 검출하기 위한 것이다.

LVI 시험기는 절연 진단 시험에 있어서 감도가 매우 우수하여 외부 권선 직경이 신장하여 0.07% 증가하면 임피던스는 0.5% 변화한 것으로 보고되고 있다 [5]. 변압기에서 권선 변화를 측정하는 문제는 매우 복잡하나, LVI 시험은 주로 변압기의 유지 보수 관점에 적용되며, 차동 방법은 권선 변형 또는 손상을 검출하는데 가장 감도가 우수하여 변압기 내에 변화를 검출할 뿐만 아니라, 위험이 잠재되어 있는 권선 움직임도 검출할 수 있다. 권선의 변화된 위치 검출은 진행파에 의한 펄스를 전송함으로써 입력 신호로부터 측정된 시간과 전달 속도에 의해 가능하다.

저압 충격 방법에 의해 변압기를 측정할 때, 변압기의 측정은 접지나 배열의 어떤 변화에도 영향을 받지 않아야 하므로 변압기가 운전할 때 연결된 단자는 모두 분리하는 것이 바람직하며, 시험 결선은 변압기 단자, 전류 측정용 저항(Shunt), 저압 충격기 및 오실로스코프로 연결되며 외부 접속도 포함된다.

2.2. LVI 시험기 설계 및 제작

본 연구는 LVI 시험 측정을 위하여 LVI 시험기를 설계 제작하였다. 주 구성 요소는 저압 충격 시험기, 케이블 및 단자함으로 분류되며, 측정 장치의 기본 회

로는 그림 2와 같이 설계되었다.

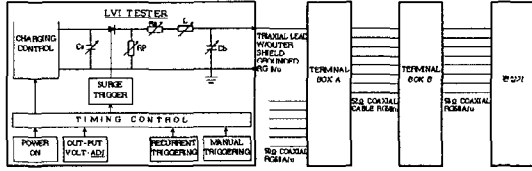


그림 2. 저압 충격 시험기의 구성
Fig. 2. Test connection of LVI tester

저압 충격 시험을 수행하기 위한 시험기의 특성을 다음과 같이 갖도록 시방 설계를 하였다.

- ㉠ 출력전압 : 0 ~ 1,000 Vp-p(가변)
- ㉡ 반 복 율 : 60 pps
- ㉢ 상승시간 : 50 ~ 1000 ns
- ㉣ 펄스 폭 : 200 ~ 1000 ns

저압 충격 시험기에서 임펄스는 커패시터와 저항 값을 다양한 선택 스위치를 이용해 사용할 수 있도록 제작하였다. 트리거가 연속적으로 인가할 수 있고, 파미에서 진동 파형을 제거할 수 있도록 하였다. 입력과 출력 시험기 후면에 배치하였고, 조작 단자는 전면배열하였으며, 사용 유지 및 보수를 편리하게 할 수 있도록 제작하였다.

표 1. 저압 충격 시험기의 설계치
Table 1. Design value of LV impulse tester

항 목	역 할	설 계 치
Cs nF (Impulse Capacitance)	단계별 구성	4.7/6.8/10/22/33/47/68/100 /470/680/1000 Selector push-button
L μH (Series Inductance)	10 μH 단계별 구성	0 ~ 100μH, Selector Knob
Rs Ω (Front Resistor)	단계별 구성	3.3/4.7/6.8/10/15/22/33/47/68/100/150/220/330/470/680 /1K/1.5K/2.2K/3.3K/4.7K Selector Knob
Rp Ω (Tail Resistor)	단계별 구성	10/15/22/33/68/100/150/220 /330/470/680/ 1K/3.3K/4.7K/10K/15K Selector Knob
Cb nF (Load Capacitance)	단계별 구성	0.47/0.68/1/2.2/3.3/10/22/33 /47/68/100 Selector push-button
임펄스	Floating 전위	Umax=90V

임펄스 회로 구성 요소인 Cs(Impulse Capacitance : nF),

Rs(Front Resistor : Ω), L(Series Inductance : μH), Rp(Tail Resistor : Ω), Cb(Load Capacitance : nF)는 선택 스위치로 조작자가 임펄스 파형을 임의적으로 선택할 수 있다. 임펄스 발생이 가능하도록 Recurrent triggering과 수동으로 1회 발생 가능하도록 Manual triggering을 설계하여 push button으로 조작할 수 있다. 시험기의 파형은 파형 조정용 소자의 값에 의해 변하므로 표 1과 같이 파형 조정용 소자의 값으로 설계 제작하였다.

2.3. 모델 변압기의 제작

모델 변압기는 3상 50 [kVA], 3.3/1.1[kV]로 설계하였고, 권선 변형을 모의하기 위하여 1차와 2차 측에 탭을 설계하였으며, 탭 전압은 표 2와 같다.

표 2. 탭과 정격 전압
Table 2. Tap and rated voltage

탭 번호	구분		탭 번호	구분	
	1차측 V	2차측 V		1차측 V	1차측 V
1-2	3630	1850	7-8	1650	-
2-3	3300	1480	8-9	1320	-
3-4	2970	1110	9-10	990	-
4-5	2640	740	10-11	660	-
5-6	2310	370	11-12	330	-
6-7	1890	-			

이상과 같이 설계 제작된 변압기는 그림 3과 같다.

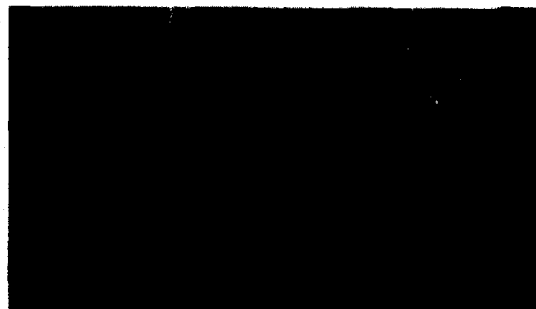


그림 3. 제작된 모델 변압기
Fig. 3. Manufactured model transformer

2.4 실험 방법

LVI 시험은 ANSI C57. 12. 90(1993) Part II 3.4항 및 4.1.1 항에 의거하여 시행되며, 단락 강도 시험 전

변압기 권선변형 진단에 적용하기 위한 LVI 시험기 개발

후의 권선 상태를 검사하기 위해 가장 널리 사용되고 있다. 단상 변압기의 측정 원리는 한쪽 권선에 인가된 충격 전압에 의해 발생한 유도 전류를 저항을 통해 오실로스코프로 파형을 분석하는 것이다. 또한 본 연구는 제작된 LVI 시험기의 성능과 특성을 규명하고, 분석 기술의 개발을 위해서 그림 4의 단상 변압기 시험 회로 및 그림 5의 차분 측정 회로를 이용하였다.

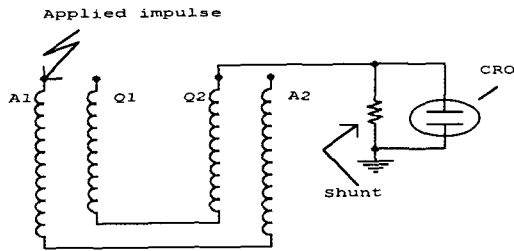


그림 4. 단상 변압기 시험 회로
Fig. 4. Single-phase transformer test circuits

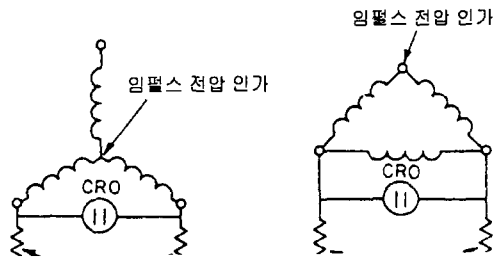


그림 5. 차분 측정 시험 회로도
Fig. 5. Differential test circuits

변압기 단락 강도 시험은 IEEE Transformer Committee에서 단락 강도 시험 규격을 제시하였고, 시험의 중요 목적은 권선의 손상을 검출하는 것이다.

우리나라의 변압기 단락 강도 시험은 한국전력 표준규격 BS-148(1968)에 따라 실시하고 있다. 변압기 단락 강도 시험시 외부 회로 단락으로 단락 전류가 소정의 시간 흘러도 탭에서 열적, 기계적 손상이 없도록 설계 제작하여야 하며, 이 때 외부 회로 단락이란 3상 단락, 선로와 선로의 단락, 이중 단락, 1선 지락 고장을 의미한다. 그림 6은 변압기 단락 강도 시험 회로도이다.

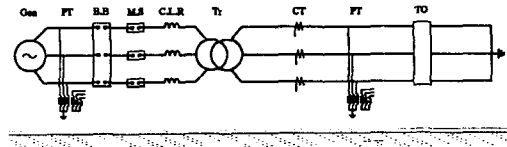


그림 6. 변압기 단락 강도 시험 회로
Fig. 6. Transformer short-circuit test circuit

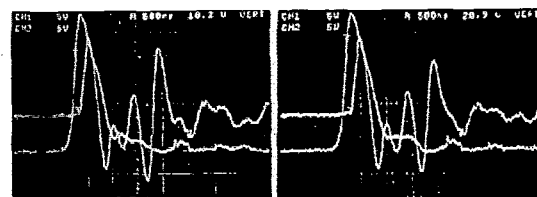
3. LVI 시험에 의한 권선변형 분석

3.1. 단상 측정

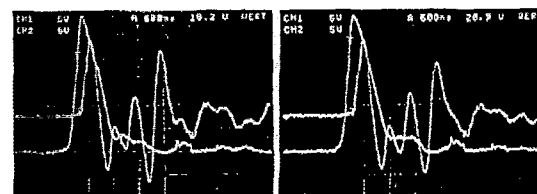
표 3과 같이 1차/2차 탭 전압이 3300/1110[V]에 임펄스 전압 300 V를 인가하고, 탭 사이에 커패시턴스 200 nF를 병렬 연결하여 파형 분석 결과를 그림 7에 나타내었다. 파형 조정용 소자는 $C_s=33$ nF, $C_b=2.2$ nF, $R_p=10$ Ω , $R_s=3.3$ Ω , $L=0$ μ H로 구성하였다.

표 3. 커패시턴스를 이용한 LVI 파형 비교
Table 3. LVI Waveform Comparison using Capacitance

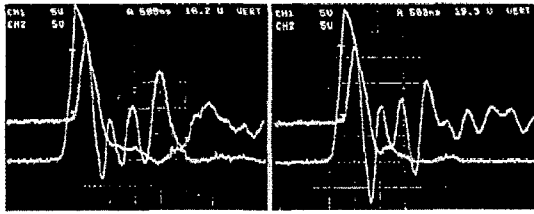
No.	1차/2차 탭 V	커패시턴스 결선 및 용량 (1차 탭)	그림 No.
1	3300/1110	-	그림 7.(a)
2	3300/1110	3300~2970 V 200 nF	그림 7.(b)
3	3300/1110	2640 V 200 nF	그림 7.(c)
4	3300/1110	330 V 200 nF	그림 7.(d)



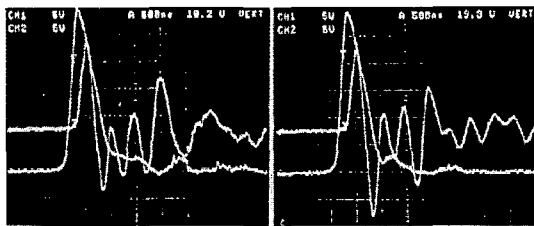
(a) No. 1인 경우



(b) No. 2인 경우



(c) No. 3인 경우



(d) No. 4인 경우

그림 7. V상에 커패시턴스 200 nF이 연결된 LVI 파형
Fig. 7. LVI Waveform of Capacitance 200 nF on V Phase

그림 7(a)는 임펄스 전압 인가시 커패시턴스가 없는 표 3에서의 No. 1의 정상 상태에서의 LVI 파형으로 상단은 권선의 검출 파형이고, 하단은 인가 펄스를 의미한다. 그림 7(b)에서 그림 7(d)까지는 그림 7(a)와 같은 조건으로 뿔 사이에 커패시턴스 200 nF을 병렬 연결하여 파형을 비교한 결과, 진폭과 위상이 심하게 변했음을 알 수 있다. 권선 자체의 스트레이 커패시턴스를 LCR 메타로 측정된 결과, 주파수 1[MHz]에서 그림 7(a)는 169 pF, 그림 7(b)는 180 pF, 그림 7(c)는 175 pF, 그림 7(d)는 1044 pF이었으며, 200 nF 커패시턴스를 병렬 연결하여 주파수 1[MHz]에서 측정된 결과, 그림 7(b)가 191 pF, 그림 7(c)가 199 pF, 그림 7(d)가 1378 pF이었다. 그림 7(b)와 같이 권선 변형이 일부분에 국한될 때에는 커패시턴스가 6.1% 변하면서 크기가 조금 변화하였고, 그림 7(c)는 13.7%가 변하면서 크기가 작아졌고, 그림 7(d)와 같이 넓게 분포되어 있을 때 커패시턴스가 32% 변하면서 크기가 커졌으며, 파형을 보면 크기가 크게 변했음을 알 수 있다. 뿔 사이에 병렬 연결된 커패시턴스는 진폭과 크기의 변화를 가져오며, 이것은 반경방향의 권선 손상을 의미한다.

3.2. 차분방식 측정

변압기를 3상으로 결선하여 중성점에 임펄스 전압을 인가하고, 두 상(U상, V상)을 차분방식으로 측정하여 비교하였다.

표 4. 커패시턴스와 파형 조정용 소자

Table 4. Capacitance and wave control devices

Case	U상, V상 1차/2차 탭 V	V상 커패시턴스 결선 및 용량	파형 조정용 소자				Pic No.
			Cs	Cb	Rp	Rs	
1	3300/1110	-	33	22	15	3.3	8
2	3300/1110	3300V 1200nF	33	22	15	3.3	9
3	3300/1110	2640V 1200nF	33	22	15	3.3	10
4	3300/1110	330V 1200nF	33	22	15	3.3	11

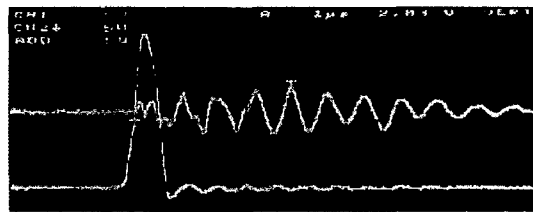


그림 8. Case 1인 경우
Fig. 8. Case 1

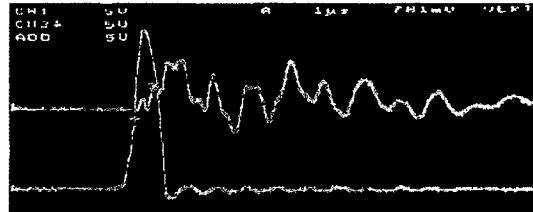


그림 9. Case 2인 경우
Fig. 9. Case 2

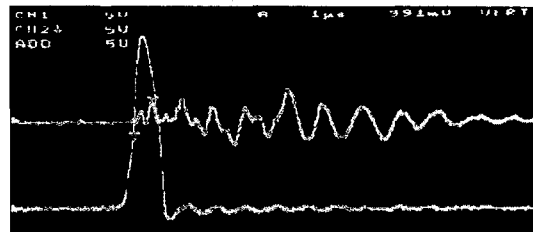


그림 10. Case 3인 경우
Fig. 10. Case 3

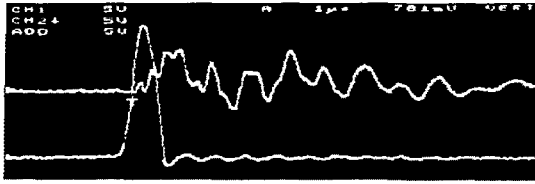


그림 11. Case 4인 경우
Fig. 11. Case 4

그림 8은 커패시턴스가 없는 정상 상태의 LVI 파형으로 U상과 V상을 합한 차분방식으로 측정된 파형이고, 하단은 인가 펄스이다. 임펄스 전압은 300[V]이고, 상승 시간은 500 ns이다. 그림 9는 3300[V], V상의 탭에 커패시턴스 1,200 nF을 병렬 연결하여 측정하였다. 그림 8과 비교하였을 때 임펄스 전압을 인가하고, 1.5 [μs] 후에 주파수와 크기가 조금 변화하였음을 알 수 있다. 2.5[μs]에서 주파수의 위상이 180 % 바뀌어 있어 권선의 변형을 예측할 수 있었다. 그림 10은 2640[V], V상의 탭에 커패시턴스 1,200 nF을 병렬 연결하여 측정하였다. 그림 8과 비교하였을 때 임펄스 전압을 인가하고 0.5[μs] 후에 주파수와 크기가 변화하였는데, 특히 크기가 1.5 배 커졌음을 알 수 있고, 변화된 파형의 구별이 가능하였다. 그림 11은 330[V], V상의 탭에 커패시턴스 1,200 nF을 병렬 연결하여 측정된 것이다. 그림 8과 비교하였을 때 임펄스 전압을 인가하고 0.5 [μs] 후에 주파수와 크기가 확실하게 변화하였고, 특히 크기가 5 배 커졌음을 알 수 있었고, 주파수의 변화도 심하게 관측되어 변화된 파형의 구별이 가능하였다. 권선 변형은 전반적으로 넓게 분포하는 차분방식의 측정은 파형 변화를 확인하는데 있어서 효과적이었다.

3.3. 유입 변압기 권선 변형 측정

실제 사용되고 있는 3상, 200[kVA], 22.9[kV]/220 [V]로서 고압측이 외부 권선이고, 저압측이 내부 권선인 탭이 없는 유입 변압기를 제작하여 단락 강도 시험 전후 권선 변형에 따른 출력파형을 비교 분석하였고, 변압기 단락 강도 시험 전에 차분방식으로 LVI 파형을 분석한 결과 이상한 점은 검출되지 않았다.

그림 12와 그림 13은 차분방식으로 측정된 파형이다. 그림 14는 변압기 단락 강도 시험 결과를 오실로 그래프로 나타낸 것이다. 측정된 결과 단락 전류가 계

산치보다 상승하였으며, 임피던스를 계산 결과 30 % 변하였다. 그림 15과 그림 16은 시험 후, 차분방식으로 LVI 파형을 분석한 것이다. 그림 15는 그림 12이 비해 그 크기가 작아졌고, 주파수 변화가 구분이 되어 권선 변형 예측이 가능하였다. 그림 16을 그림 13과 비교하면, 주파수 변화가 확연히 드러나고, 그 크기가 3 배로 커졌다. V상보다 U상으로 차분 측정할 경우, 파형 변화가 뚜렷하여 더 큰 권선의 변화를 예측할 수 있었고, 3상 모두 측방향보다 반경방향으로 권선 변형을 예측할 수 있었다. 시험용 모델 변압기와 비교했을 때, 그림 16은 크기가 5 배 커졌고, 주파수가 저주파 형태로 나타나 모델 변압기에서 커패시턴스 변화에 따른 데이터로 실 변압기를 측정해 정상적 임피던스 변화를 예측할 수 있으리라 사료되었다. LVI 시험을 끝내고 유입 변압기를 해체 분해한 결과를 살펴보면, 고압측 권선은 측방향의 위로 올라갔고, 저압측은 아래로 처졌으며, 권선의 버팀목은 파괴되었다.

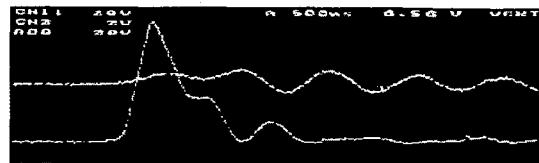


그림 12. W상+V상이 중첩된 파형
Fig. 12. Superposition waveform(W+V)

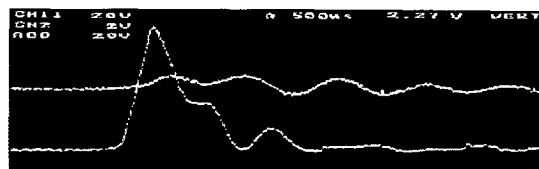


그림 13. W상+U상이 중첩된 파형
Fig. 13. Superposition waveform(W+U)

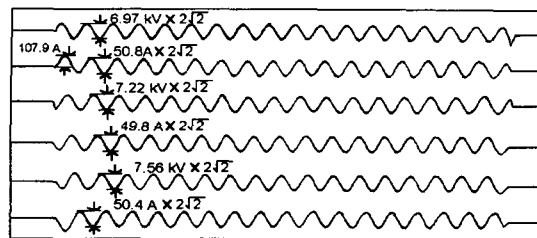


그림 14. 3상 단락 강도 오실로그래프
Fig. 14. 3 phase short-circuit oscillogram

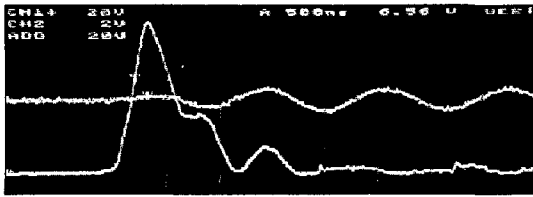


그림 15. W상+V상이 중첩된 파형
Fig. 15. Superposition waveform(W+V)

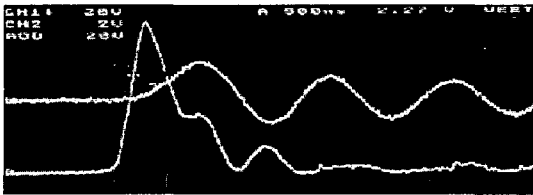


그림 16. W상+U상이 중첩된 파형
Fig. 16. Superposition waveform(W+U)

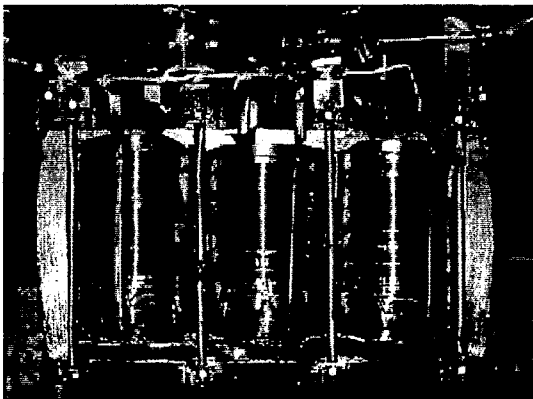


그림 17. 유입 변압기의 권선 변형
Fig. 17. Test Transformer

그림 17은 해체된 유입 변압기의 사진이다. 3상 모두 반경 방향으로 권선 배열이 일정하지 않게 벌어졌으며, 특히, U상(그림 오른쪽)이 가장 심하게 변형되어 있어, LVI 시험 결과와 일치함을 보여준다.

4. 결 론

본 연구는 LVI 시험기를 제작하여 LVI 시험기의 성능을 평가하였고, 모델 변압기와 74유입 변압기를 단락강도 시험 전후에 LVI 시험으로 파형을 분석하여 비교 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

조영 · 전기설비학회논문지 제16권 제5호, 2002년 9월

가. 개발된 LVI 시험기는 ANSI LVI 시험 규격에서 요구하는 LVI 파형의 상승 시간을 충분히 만족할 수 있는 특성을 나타내었다.

나. 3상으로 권선 변형을 커패시턴스로 모의한 결과 권선 변형 분포에 따라 크기, 위상 및 주파수가 변하는 정도를 추측할 수 있으므로 분석 기술을 개발하는데 있어서 충분히 활용이 가능하였다.

다. 시험용 모델 변압기의 커패시턴스 변화에 따른 진폭 크기 변화와 권선 변형 분포에 따른 시험 결과를 실 변압기에 적용한 결과 커패시턴스 변화에 의한 데이터 확보에 따라 주파수와 진폭의 크기로 변압기 임피던스의 변화율을 예측할 수 있으리라 사료된다.

References

- (1) A.C. Hall and P.G Parrott "Experience with the low voltage impulse testing of power transformers."
- (2) R.E. Ayers "Low-voltage impulse testing of transformer."
- (3) E.P. Dick and C.C. Erven Transformer diagnostic testing by frequency response analysis", IEEE paper F78 024-2.
- (4) W. Lech and L. Tyminski, "Detecting Transformer winding Damage. The Low Voltage Impulse Method", Electrical Review Vol. 179, No.21, pp. 768-772, 1966.
- (5) R. A. Smith and M. Waters, " Detection of winding Damage in Power Transformers using the Low Voltage Impulse Method.", ERA Report No. 5252, 1969.
- (6) E. J. Rogers and L. E. Humbard, " Low Voltage Impulse Testing of Power Transformers." IEEE Paper No.71, TP 535-PWR, pp. 1281-1293, 1971.
- (7) "IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers" Part III IEEE C57, pp. 61-75, 1993.
- (8) 조 국희, 강 동식, 김 광화, 권 동진, "변압기 권선변형 LVI. 진단 실적응을 위한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, D-P-12, pp. 1638-1640, 1998.

◇ 저자소개 ◇

조 국 희 (趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리 연구그룹 선임연구원.

김 광 화 (金光和)

1956년 5월 12일생. 1983년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 신전력기기 연구그룹 책임연구원.