

LVI 시험기의 개발과 변압기 권선변형 분석의 적용에 관한 연구

(A study on the development of LVI tester and applying the winding deformation of transformers with this tester)

조국희* · 김광화**

(Kook-Hee Cho · Kwang-Hwa Kim)

요 약

본 논문은 LVI시험기 및 모델 변압기의 설계와 제작에 관하여 기술하였다. 이들을 이용하여 LVI 시험 분석기술을 개발하였다. LVI시험기는 본체, 터미널 박스 및 케이블로 구성하였고, ANSI규격에서 요구하는 출력특성을 갖는 것으로 평가되었다.

모델변압기는 탭들을 만들어 변압기의 권선변형 모델을 만들 수 있도록 하였고, LVI시험기로써 실험을 실시하여 LVI시험분석 기술에 관하여 논하였다.

Abstract

This paper is described about design and manufacture of the LVI tester and the model transformer. And we develop the analysis technology of the LVI test with using the developed LVI tester and the model transformer. The LVI tester is consisted of a main body, terminal boxes and cables.

It is estimated that the tester has output characteristic to match ANSI specification. The winding deformation models are made of model transformer having taps and we discuss about the analysis technology of LVI test using the tester and the model transformer.

key words : LVI tester, model transformer, winding deformation

1. 서 론

송변전기기는 고압 대용량화로 기기고장이 전력계통에 미치는 영향이 높으므로 신뢰성 확보가 중요

하다. 전력용 변압기는 단락이나 과전압이 침입하면 권선은 매우 큰 스트레스를 받게 되어, 권선이 변형되거나 절연파괴가 발생하게 된다. 그러므로 권선변형 확인을 위한 측정과 검출방법이 필요하다 [1][2].

변압기의 권선변형 고장검출을 확인하는 방법은 FRA(Frequency Response Impulse), IS(Inductance Signature), LVI(Low Voltage Impulse)로 분류할 수 있다. FRA 방법은 변압기 권선 단자에 전압을 인가

* 정회원 : 한국전기연구원 선임연구원

E-mail : khcho@keri.re.kr

** 정회원 : 한국전기연구원 책임연구원

접수일자 : 2001년 8월 28일

1차심사일 : 2001년 8월 30일

심사완료일 : 2001년 10월 8일

하고 다른 단자로부터 얻어진 신호의 진폭과 위상을 주파수 함수로 나타낸다. 신호의 응답에서 진폭은 입력전압과 출력전압의 비로 측정하며, 위상은 파형의 형태를 분석하여 측정한다. 그러나 입력신호의 반사 문제 때문에 특성 임피던스를 고려해서 사용해야 하는 단점이 있다. IS는 단락시험을 하는 동안에 인덕턴스 변화를 확인하는 방법으로, 커패시턴스에 의한 고장검출에는 반응이 민감하지 못하고 위상의 확인이 불가능한 단점이 있다[3][4]. 따라서 권선변형을 측정하는 방법으로 1966년 폴란드의 Lech에 의해 LVI 방법이 처음 제안되었으며, 이것은 변압기의 한 쪽단자에 충격전압을 인가하여 변압기 권선에 흐르는 유도전류를 저항(shunt)을 통해 측정하는 방법이다. 1969년에는 Smith와 Waters가 고압충격시험 원리를 이용하여 2상 권선의 전류 차이를 측정하는 방법으로 절연파괴된 변압기에 적용한 결과, 권선의 변형에 대해 파형이 다르게 응답되어 변압기의 단락강도 시험 전후 권선상태 분석을 위해 널리 사용하게 되었다[5]-[8].

따라서 본 논문은 이와 같은 관점에서 규격에 만족할 수 있는 저압충격시험기를 제작하여 실험을 통해 성능을 평가하고, 제작된 모델변압기에서 LVI 파형의 특성을 분석하여 변압기 권선의 변형 진단기술에 관하여 연구하였다.

2. LVI 시험기 설계 및 제작

2.1 LVI 시험기의 필요 특성

LVI는 단락시험 전후의 권선변형을 파형으로 진폭의 크기, 주파수 및 위상을 비교 분석하여 판단하는 시험법이다. 그리고 권선 변형을 확인하기 위한 방법으로 육안검사, 임피던스 변화, 여자전류 변화, 절연확인 등이 있으나 이들 방법으로는 충분하지 못하다. 여자전류 변화시험은 코일의 잔여 자속이 영향을 미치고, 육안검사는 통계적으로 볼 때 변압기 5대 중에 2대 만이 육안으로 검출할 수 있으며, 절연확인 시험도 계속적으로 단락강도를 유지할 수 있는 판단 기준으로 보기 어렵기 때문이다.

LVI 차동 방법은 권선변화를 측정하는데 있어서 매우 유용한 방법으로, 축방향의 권선손상은 위상 및 주파수가 변화하며 반경 방향의 권선손상은 초기 주파수 성분을 유지하는 것처럼 보이나 진폭과 크기가

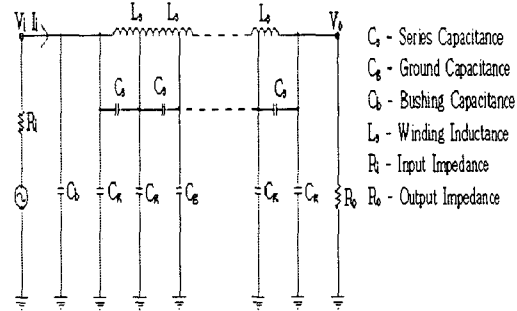


그림 1. 변압기의 고압권선 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of transformer

변화된 것으로 나타난다.

그림 1이 변압기의 고압권선 등가회로로서 이것을 이론적으로 검토하기 위해서 변압기 권선의 턴간에 분포정전용량을 C_s (Series Capacitance)라 하고, 권선과 대지간의 분포정전용량을 C_g (Ground Capacitance)라 하자. 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 측정방법은 기본적으로 변압기에서 권선 변형에 따른 캐패시턴스 변화를 검출하기 위한 것이다.

LVI의 시험기는 절연진단 시험에 있어서 감도가 매우 우수하여 외부 권선 직경이 신장하여 0.07% 증가하면 임피던스는 0.5% 변화한 것으로 보고되고 있다[5]. 변압기에서 권선변화를 측정하는 문제는 매우 복잡하나, LVI 시험은 주로 변압기 유지 보수 관점에 적용되며, 차동 방법은 권선의 변형 또는 손상을 검출하는데 가장 감도가 우수하여 변압기 내에 변화를 검출할 뿐만 아니라 잠재되어 있는 위험 수위의 권선 움직임도 검출할 수 있는 장점이 있다. 권선이 변화된 위치 검출은 진행파에 의한 펄스를 전송함으로써 입력 신호로부터 측정된 시간과 전달속도에 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, 오실로스코프로 연결되며 외부 접속도 포함된다.

2.2 LVI 시험기 설계 및 제작

본 연구에서는 LVI 시험측정을 위하여 LVI 시험기를 설계, 제작하였다. LVI 시험기는 LVI 시험규격(ANSI C57, 12. 90 Part II 3.4항 및 4.1.1항 1993)에 따라 실험실 및 현장에서 시험이 가능하도록 구성하였으며, 주 구성요소는 저압 충격 시험기, 케이블 및 단자함으로 분류되며 측정장치의 기본회로는 그림 2와 같이 설계되었다.

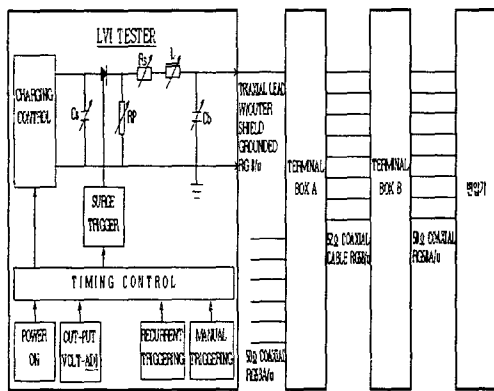


그림 2. 저압충격시험기의 구성
Fig. 2. Test connection of LVI tester

저압 충격 시험을 수행할 수 있도록 하기 위한 시험기의 특성을 다음과 같이 갖도록 시방설계를 하였다.

- ㉠ 출력전압 : 0~1,000 Vp-p(가변)
- ㉡ 반복율 : 60[pps]
- ㉢ 상승시간 : 50~1000[ns]
- ㉣ 펄스폭 : 200~1000[ns]

저압 충격 시험기에서 임펄스는 넓은 범위에서 형상의 변화가 가능하도록 캐패시터와 저항값을 다양하게 구성하여 선택 스위치를 이용해 사용할 수 있도록 제작하였다. 임펄스 전압의 최대값도 안정화시킬 수 있고 트리거가 연속적으로 인가할 수 있도록 하였으며, 파미에서 진동파형을 제거할 수 있도록 하였다.

모든 입력과 출력단자는 저압 충격 시험기 판넬 후면에 배치하였고 조작단자는 판넬 전면에 위치하도록 배열하였으며, 사용용지 및 보수를 편리하게 할 수 있도록 제작하였다.

임펄스 회로 구성 요소인 Cs(Impulse Capacitance

: nF) Rs(Front Resistor : Ω), L(Series Inductance : μ H), Rp(Tail Resistor : Ω), Cb(Load Capacitance : nF)의 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 있게 하였다. 그리고 임펄스 신호의 파형과 출력파형은 오실로스코프로 기록할 수 있는 터미널을 설계하였다.

저압 충격 시험기 제작을 하기 위해서는 회로에 사용하는 주요 부품을 선정할 필요가 있다. 특히 트리거 펄스를 위한 싸이리스터 소자는 di/dt가 클수록 상승시간이 빠르기 때문에 사양에 맞는 성능이 우수한 소자를 선택해야 한다. 또한 시험기의 파형은 파형 조정용 소자의 값에 의해 변하므로 표 1과 같이 파형조정용 소자의 값으로 설계하여 제작하였다.

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

항 목	역 활	설 계 치
Cs(nF) (Impulse Capacitance)	단계별로 구성	4.7/6.8/10/22/33/47/68/100 //470/680/1000 Selector push-button
L(μ H) (Series Inductance)	10 μ H 단계별구성	0 ~ 100 μ H, Selector Knob
Rs(Ω) (Front Resistor)	단계별로 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)	단계별로 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)	단계별로 구성	0.47/0.68/1/2.2/3.3/10/22/33 /47/68/100 Selector push-button
임펄스	Floating 전위	Umax=90V

케이블은 전압인가용과 측정용이 있으며 외부의 잡음을 제거하기 위하여 동축케이블을 사용하였다. 동축케이블은 2종류로 coaxial 케이블(RG58A/U)은 오실로스코프와 단자함 A 및 변압기와 단자함 B의

연결용이며, triaxial 케이블(RG8/U)은 단자함 A 및 B의 연결용으로 제작하였다. 또한 현장에서 필요한 케이블인 전압 인가용 케이블 1개, 측정용 케이블 14개, 단자함 연결용 케이블 8개를 미리 제작하였다. 단자함은 저압충격 시험기 본체와 시료의 연결을 위한 매칭박스로서 내부에는 현장에서 측정이 편리하도록 분류기 R(Shunt)과 분압기(Voltage Divider)을 내장하였고, 단자함 A는 본체 및 측정을 위한 연결용이고 단자함 B는 시료인 변압기 연결용이다.

2.3. LVI 시험기 성능 개선

LVI 시험기를 실험실에서 실험을 하였다. 그 결과 충전전압 300[V]에서 그림 3과 같이 나타났으며 임펄스 파형의 상승시간은 800[ns]이었다.

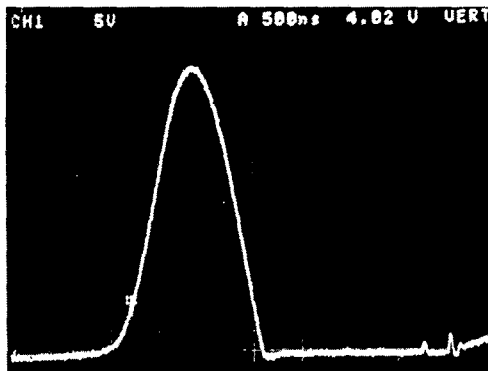


그림 3. 인가전압 300[V], ($R_p:10[\Omega]$, $C_s:68[\text{nF}]$, $L:20[\mu\text{H}]$, $R_s:6.8[\Omega]$, $C_b:4.7[\text{nF}]$)
 Fig. 3. Supplied Voltage 300[V], ($R_p:10[\Omega]$, $C_s:68[\text{nF}]$, $L:20[\mu\text{H}]$, $R_s:6.8[\Omega]$, $C_b:4.7[\text{nF}]$)

파형조정용 소자의 값을 변경하면 상승시간의 조절이 어느 정도 가능하며, 출력전압 및 각종 특성에서도 규격치에 만족하는 결과로 나타났다. 그러나 조정을 좀 더 넓은 범위로 하기 위해서는 임펄스의 상승시간을 빠르게 해야 하는 것으로 평가되었다. 가장 문제가 되었던 것은 싸이리스터의 dv/dt 특성으로 매우 큰 값을 요구하였다. 따라서 싸이리스터를 바꾸어 실험을 실시한 결과는 그림 4의 b 파형이었고 그림 3에 비해 300[ns]를 줄인 500[ns]의 상승시간을 얻었다. 그리고 싸이리스터의 게이트 신호 개선을 위하여

펄스 발생 변압기인 규소 강판 변압기를 Ferrite Core를 사용한 변압기로 대체하여 시험한 결과 그림 3(a:상단파형)에서와 같이 상승시간이 350[ns]로 더욱 빨라짐을 알 수 있었다.

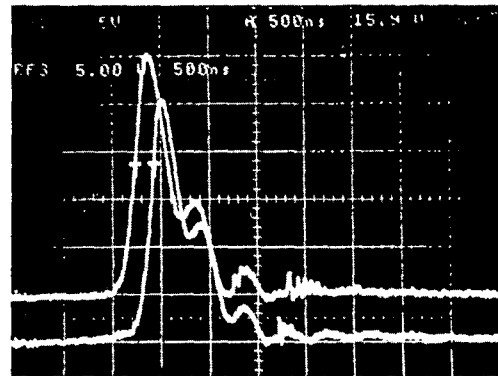
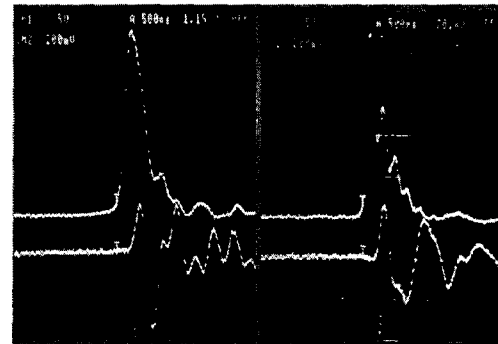


그림 4. 상승시간 파형 (a:상단, b:하단)
 Fig. 4. Rising Time Waveform

저압충격시험기의 성능을 확인하기 위해 H사(외국)에서 수입하여 사용하고 있는 시험기와 비교한 파형이 그림 5이다.



(a) 개발된 LVI Tester
 (b) 상품화된 H사(외국) LVI Tester
 그림 5. LVI 시험기의 펄스 상승시간 측정
 Fig. 5. Rising time measurement of LVI tester

그림 5(a)의 상단이 임펄스 전압으로 본 연구에서 자체 개발된 LVI 시험기 파형이고 펄스상승시간은 350[ns], 그림 5(b)(상단)은 H사의 제품으로 250[ns]를 나타내고 있다. 펄스폭은 두 제품 모두 규격의 만족치인 1000[ns] 미만으로 측정되었다. 따라서 LVI

LVI 시험기의 개발과 변압기 권선변형 분석의 적용에 관한 연구

시험에서 가장 중요한 펄스 상승시간이 50~1000[ns] 이므로 시험기로서 적합하다고 할 수 있다.

3. LVI 시험에 의한 권선변형 분석

3.1 모델변압기의 제작

모델변압기는 3상 50[kVA], 3.3[kV]/1.1[kV]로 설계하였고 권선변형을 모의하기 위하여 1차와 2차측에 그림 6과 같이 탭을 설계하였으며 탭전압은 표 2와 같다.

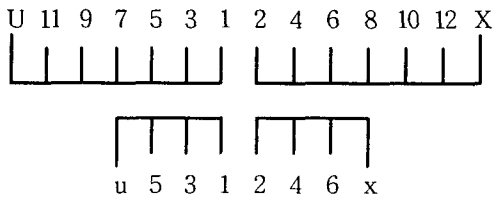


그림 6. 모델변압기 탭 결선도
Fig. 6. Tap diagram of model transformer

표 2. 탭과 정격전압
Table 2. Tap and rated voltage

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

이상과 같이 설계하여 제작된 변압기는 그림 7과 같다.

3.2 실험 방법 및 결과

LVI 시험은 단락강도 시험 전후의 권선상태 검사를 위해 가장 널리 사용되고 있으며 단상 변압기에

적용할 경우 측정원리는 한쪽 권선에 인가된 충격전압에 의해 발생한 유도전류를 저항을 통해 오실로스코프로 파형을 분석하는 것이다.

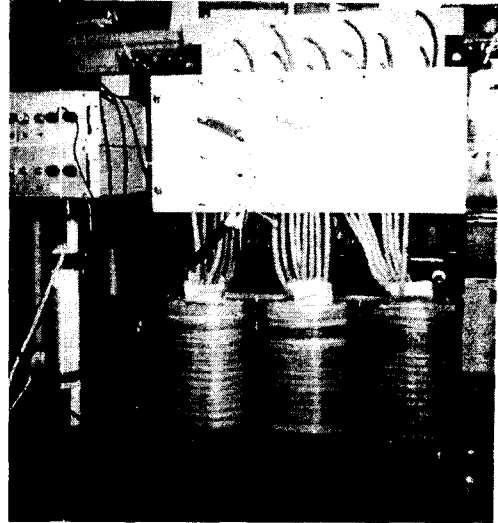


그림 7. 제작된 모델변압기
Fig. 7. Manufactured model transformer

본 실험에서는 제작된 LVI 시험기의 성능과 특성을 규명하고 분석기술의 개발을 위해서 단상 변압기의 시험회로를 이용하여 그림 8과 같이 구성하였다.

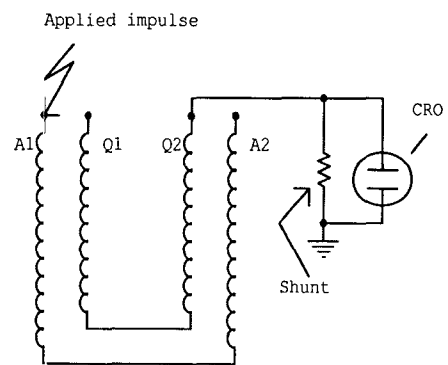


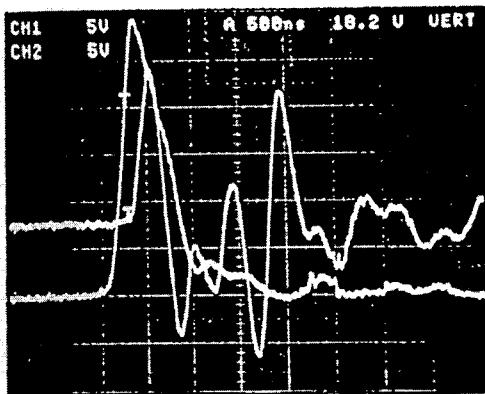
그림 8. 단상변압기 시험회로
Fig. 8. Single-phase transformer test circuits

표 3과 같이 1차/2차 탭 전압이 3300/1110[V]에 임펄스전압 300[V]를 인가하고 탭간에 캐패시턴스 200[nF]를 병렬로 연결하여 파형을 분석한 결과를

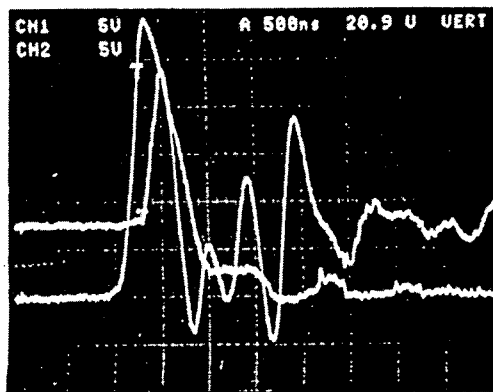
그림 9에 나타내었다. 이때 파형 조정용 소자는 $C_s=33[\text{nF}]$, $C_b=2.2[\text{nF}]$, $R_p=10[\Omega]$, $R_s=3.3[\Omega]$, $L=0[\mu\text{H}]$ 로 구성하였다.

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

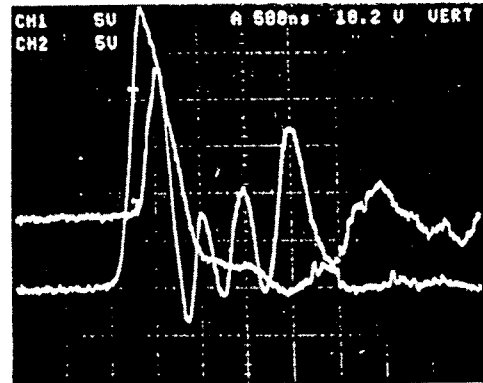
No	1차/2차값 [V]	캐패시턴스 결선 및 용량(1차값)	그림 No.
1	3300/1110	-	그림 9.(a)
2	3300/1110	3300~2970[V] 200[nF]	그림 9.(b)
3	3300/1110	2640[V] 200[nF]	그림 9.(c)
4	3300/1110	330[V] 200[nF]	그림 9.(d)



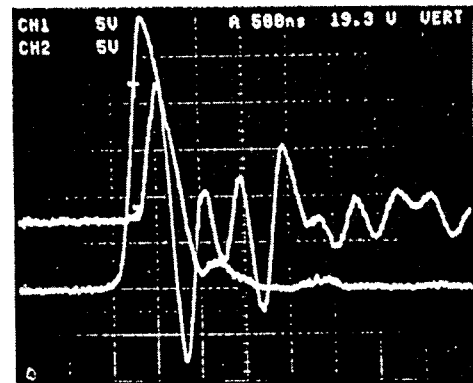
(a) No. 1인 경우



(b) No. 2인 경우



(d) No. 3인 경우

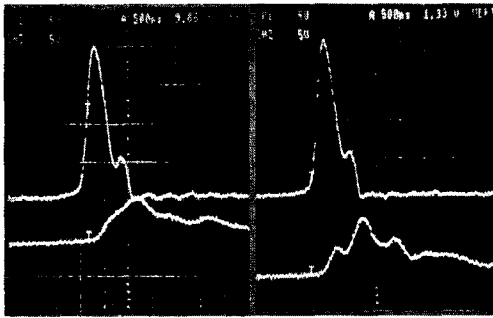


(d) No. 4인 경우

그림 9. V상에 캐패시턴스 200 [nF] 이 연결된 LVI 파형
Fig. 9. LVI Waveform of Capacitance 200 [nF] on V Phase

그림 9(a)는 임펄스전압을 인가시키고, 캐패시턴스가 없는 표 3의 No. 1인 정상상태에서의 LVI 파형으로 상단은 권선의 검출 파형이고 하단은 인가펄스이다. 그림 9(b)에서 그림 9(d)까지는 그림 9(a)와 같은 조건으로 탭간에 캐패시턴스 200[nF]을 병렬 연결하여 파형을 비교한 결과 진폭 및 위상이 심하게 변했음을 알 수 있다. 권선 자체의 스트레이 캐패시턴스를 LCR 메타로 측정된 결과 주파수 1[MHz]에서 그림 9(a)는 169[pF], 그림 9(b)는 180[pF], 그림 9(c)은 175[pF], 그림 9(d)는 1044[pF]이며, 200[nF] 캐패시턴스를 병렬로 연결하여 주파수 1[MHz]에서 측정된 결과는 그림 9(b)가 191[pF], 그림 9(c)가 199[pF], 그림 9(d)가 1378[pF]이다. 그림 9(b)와 같이 권선 변형이 어느 일부분에 국한되어 있을 때는 캐패시턴스가

6.1[%]변하면서 크기가 조금 변화였으며, 그림 9(c)는 13.7[%]가 변하면서 크기가 1[V]가 작아졌고, 그림 9(d)와 같이 전반적으로 넓게 분포되어 있을 때 캐패시턴스가 32[%]변하면서 크기가 1[V] 커졌으며 파형을 보면 크기가 크게 변했음을 알 수 있다. 탭간의 병렬로 연결된 캐패시턴스는 진폭 및 크기의 변화를 가져오며 이것은 반경방향의 권선 손상을 의미한다.



(a) 단락시험전 파형
(b) 단락시험후 파형

그림 10. 변압기의 파형 분석
Fig. 10. Waveform analysis of transformer

그림 10은 본 연구에서 제작한 LVI 시험기로 유입변압기의 단락시험 전후 파형을 측정된 것이다. 그림 10(a)가 단락시험 전 파형이고 10(b)는 단락시험 후 파형으로 하단 파형에서 보는바와 같이 변압기 권선 파형이 크게 변해 있음을 알 수 있다. 이와 같은 파형 분석으로 변압기의 상태를 예측할 수 있으며 변압기를 해체하여 분해한 결과 권선이 축과 반경방향으로 변형되어 있었다.

4. 결 론

이상과 같이 LVI 시험기의 제작과 모델변압기에 의한 LVI 시험의 실험결과에 따르면 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. ANSI LVI 시험 규격에 따라 시험할 수 있는 계측기로서 조작 및 측정을 쉽게 할 수 있으며 유지보수가 편리하도록 개발하였다.

나. 개발된 LVI 시험기는 시험규격에서 요구하는 LVI 파형의 상승시간을 충분히 만족할 수 있는 특성을 나타내었다.

다. LVI 시험분석을 위한 모델변압기를 설계 제작하였고 이로부터 분석기술을 개발하는데 있어서 충분히 활용이 가능하였다.

라. 개발된 LVI 시험기로 모델변압기를 통한 적용 실험이 우수하였고, 시험 분석기술의 개발을 위한 기반을 구축하였다.

참 고 문 헌

- (1) AC. Hall and P.G Parrott "Experience with the low voltage impulse testing of power transformers in service."
- (2) RE. 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. Humbar, " Low Voltage Impulse Testing of Power Transformers." IEEE Paper No.71, TP535-PWR, PP1281-1293, 1971.
- (7) "IEEE: Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers" PartII ANSI/IEEE C57. 12. 90 (1993) pp. 61-75.
- (8) 조 국희, 강 동식, 김 광화, 권 동진, "변압기 권선변형 LVI 진단 실험을 위한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, DHP-12, pp. 1638-1640, 1998. 7. 21.

◇ 저자소개 ◇

조 국희(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 전기물리연구그룹 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 신전력기기연구그룹 책임연구원.