

### 저압충격을 이용한 변압기에서 권선변형 측정

조국희\*, 강동식\*, 김광화\*  
\* 한국전기연구소

권동진\*\*  
\*\* 전력연구원

#### Measurement of winding deformation in transformers using low voltage impulse

Kook-Hee Cho\*, Dong-Sik Kang\*, Kwang-Hwa Kim\*  
\* KERI

Dong-Jin Kweon\*\*  
\*\* KEPRI

#### Abstract

We describe the characteristic of LVI(Low-voltage Impulse) test system and methods to detect the deformation of windings in the power transformers.

Any winding deformation will result in a change of capacitance between winding parts and possibly some change in the winding inductance. These changes will then result in a change in the response to the applied pulse in both the magnitude and period of the resulting oscillations.

A results of measured differential method in stead of typical method, the sensitivity is greatly improved by the use of differential methods where the pulse is applied to two identical windings and the response measured with a differential amplifier.

#### 1. 서론

최근 송변전 및 발전기는 고압 대용량화로 진행되어, 1대의 기기 고장이 전력계통에 미치는 영향이 높아 신뢰성의 확보가 매우 중요하므로, 예방보수의 점검차원에서 각종진단기술을 이용하여 전력기기의 사고를 미연에 방지하는 것이 요구된다.

전력기에 이용되는 변압기는 대부분 유압변압기로서, 단락이나 과전압이 침입하면 권선층간 절연이 파괴되어 층간단락을 일으키는 결과를 초래하며, 기계적인 힘은 빈압기 권선내에서 전진되어 권선의 길이에 따른 스트레스가 형성되고, 반경 방향 스트레스에 의해 권선이 변형되거나 절연파괴가 발생하게 된다. 그러므로 권선변형 확인을 위한 측정과 검출방법이 필요하다.

권선변형을 측정하는 방법은 1966년 폴란드의 Lech와 Tyminski에 의해 LVI 방법이 처음 제안되었으며, 1969년에는 Smith 와 Waters 가 고압충격 시험원리를 이용한 임펄스 전압을 인가하여 2상권선에 흐르는 전류간의 차이를 측정하는 방법으로, 단락강도 시험중에 파괴된 변압기에 적용한 결과 권선상태 짐사를 위해 차분 측정방법으로 널리 사용되고 있다.

LVI 시험장치는 출력전압 가변(300~600[V])과 안정성이 요구되며, 반복률은 50~1000[pps] (pulse/sec)이고, 펄스상승시간과 펄스폭은 변압기 권선 변화의 검출이 가능하도록 설계되어야 한다.

본 연구에서는 LVI Tester 및 3상, 50[kVA], 3.3[kV]/1.1[kV]인 외함이 없고 권선간에 텀이 있는 시험용 모델 변압기를 제작하여 캐패시턴스를 이용하여 권선변형에 따른 출력파형을 기본회로와 차

분측정회로로 비교 분석하였고, 이에 따른 LVI Tester의 성능을 평가하였으며, 현장에서도 사용여부를 확인한 결과 감도가 우수하여 LVI 시험이 가능한 것으로 나타났다.

#### 2. LVI Tester 및 모의 변압기 제작

LVI 시험 규격(ANSI C57. 12. 90 Part II 3.4항 및 4.1.1항 1993)에 따라 현장에서 시험이 가능하도록 구성하면, 주 구성요소는 저압 충격 시험기, 케이블 및 단자함으로 분류되고, 기본적인 측정장치의 블록 다이어그램은 그림 1과 같다

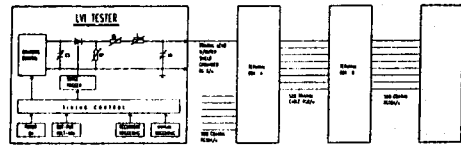


그림 1. 저압 충격 시험 측정장치의 블록 다이어그램

저압충격 시험기는 전압 펄스를 인가하는 데 빠르고 신뢰성 있게 설계되었고, 펄스회로는 개개 요소로 되어 있기 때문에 펄스 형태는 선택 스위치로 변화가 가능하며, 반복율을 크게하여 오실로스코프에 잘 나타나도록 하였다. 저압충격 시험기를 이용할 수 있는 대상은 변압기, 리액터등의 권선 모델이 있고, 가변이 가능한 임펄스 전압 조건으로 권선의 비파괴 시험을 실시하여 권선의 이상유무를 확인한다.

임펄스 출력전압은 사용상 넓은 범위에서 변화가 가능하도록 캐패시터와 저항값을 다양하게 구성하였다. 임펄스 출력전압 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 쉽게 임펄스 출력파형을 오실로스코프로 확인하면서 선택하는 것으로 설계하였다.

저압 충격 시험기 설계를 하기 위해서는 트리거 펄스를 위한 싸이리스터 소자는 펄스 파두시간과 밀접한 관계가 있어 매우 중요하며 전압은 800[V]이상 이어야 하고 di/dt는 클수록 상승시간이 빠르기 때문에 규격에 맞는 성능이 우수한 소자를 선택할 필요가 있다.

Recurrent Trigger(RT)는 반복률 60[pps]로 주파수에 동기하여 임펄스 전압을 자동 인가하며, Manual Trigger(MT)는 조작자가 수동으로 1회씩 임펄스전압을 인가하는 회로로 설계하였다.

케이블은 동축 케이블과 이중 동축 케이블을 사용하였으며, 이중

동축 케이블(52Ω RG 8/U)은 외부잡음을 줄이기 위해 사용되며, 현장 실험장치를 구성하는 데 필수적이다. 신호전송과 측정 기록용 동축 케이블(RG 58A/U)은 반사의 영향을 최소화하기 위하여 같은 특성 임피던스를 가진 케이블로 연결하여 구성하였다.

이중 동축 케이블 사용은 필스를 인가하여 권선에 대한 응답을 측정하는 데 필수적인 것으로, 변압기와 측정기 사이의 이중 동축 케이블 길이는 케이블 접속효과로 인해 15[m]이내가 적당하며 단자함은 동축 케이블과 이중 동축 케이블을 연결하기 위한 박스이다.

3상, 50[kVA], 3.3[kV]/1.1[kV]인 외함이 없는 시험용 모델 변압기를 제작하여 권선변형에 따른 출력파형을 비교분석 하였다. 이 시험용 변압기는 각 상에 1차/2차의 탭을 이리개로 만들어 각 탭들간에 콘덴서를 연결하여 권선변형을 모의한 것이다.

1차 탭 전압[V] :

U/3630/3300/2970/2640/2310/1980/1650/1320/990/660/330/X

2차 탭 전압[V] : u/1850/1480/1110/740/370/x

이 변압기는 단상결선 및 3상결선이 가능하며, 3상 시험시 결선으로 사용자의 결정에 따라 Δ-Δ, Δ-Y, Y-Δ, Y-Y결선으로 구분해 사용할 수 있다.

3상 변압기에 적용되는 LVI 시험회로 구성은 그림 2와 같이 기본적인 회로와 차분측정 시험방법이 있으며, 단상변압기의 시험회로는 그림 3과 같이 구성된다.

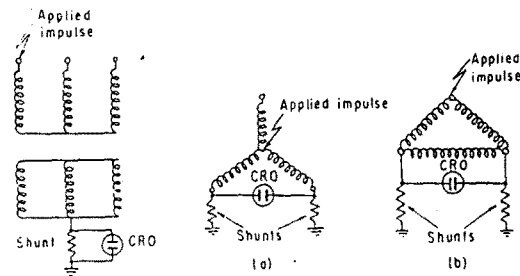


그림 2. 기본적인 회로와 차분측정 시험 회로도

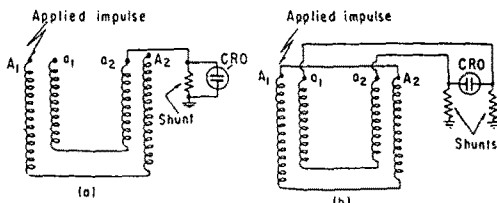


그림 3. 단상 변압기 시험회로도

### 3. 시험 결과

표 1. 캐패시턴스를 이용한 LVI 파형 비교분석표

No.	1차/2차탭[V]	캐패시턴스 결선 및 용량	파형 조정용 소자					진폭 크기	그림 No.
			Cs	Cb	Rp	Rs	L		
1	W상3300/1110	-	33	2.2	10	3.3	0	28.0	4
2	W상3300/1110	1차 3300~2970V 200nF	33	2.2	10	3.3	0	27.0	5
3	W상3300/1110	1차 2640V 200nF	33	2.2	10	3.3	0	26.0	6
4	W상3300/1110	1차 330V 200nF	33	2.2	10	3.3	0	30.0	7

표 1에서의 같이 단상으로 모의하여 W상에 임펄스전압 300[V]를 인가하고 탭간에 캐패시턴스 200[nF]를 병렬로 연결하여 파형을 분석한 결과는 그림 4에서 그림 7까지이다.

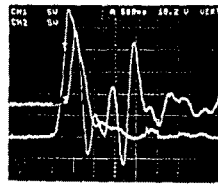


그림 4. 정상적인 LVI 파형

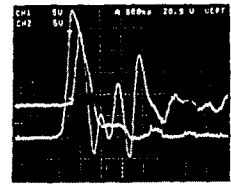


그림 5. 1차측 3300~2970[V]탭에 200[nF]이 연결된 파형

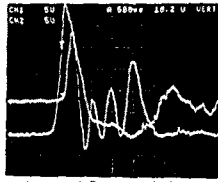


그림 6. 1차측 2640탭에 200[nF]이 연결된 파형

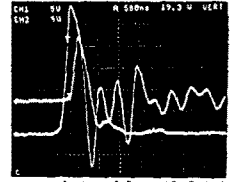


그림 7. 1차측 330[V]탭에 200[nF]이 연결된 파형

그림 4는 모델변압기 1차측 U상에 임펄스 전압을 인가시키고, 캐패시턴스가 없는 정상상태에서의 LVI 파형으로 상당은 권선의 검출파형이고 하단은 인가펄스이다.

모의 변압기 자체의 스트레이 캐패시턴스는 LCR메타로 측정한 결과 주파수 1[MHz]에서 그림 4는 169[pF], 그림 5는 180[pF], 그림 6은 175[pF], 그림 7은 1044[pF]이며, 200[nF] 캐패시턴스를 병렬로 연결하여 주파수 1[MHz]에서 측정한 결과는 그림 5가 191[pF], 그림 6이 199[pF], 그림 7은 1378[pF]이다.

그림 5에서 그림 7까지는 그림 4와 같은 조건으로 파형을 비교한 결과 그림 5와 같이 권선변형이 어느 일부분에 국한되어 있을 때는 캐패시턴스가 6.1[%]변하면서 진폭은 1[V],그림 6은 13.7[%]가 변하면서 진폭은 2[V]가 작아졌고, 그림 7과 같이 전반적으로 넓게 분포되어 있을 때 캐패시턴스가 32[%]변하면서 진폭은 2[V]가 컸으며 파형을 보면 진폭이 뚜렷하게 변했음을 알 수 있다.

이것은 전체의 권선중에서 일부분의 스트레이 캐패시턴스 값과 병렬 연결된 캐패시턴스 값을 합친것보다 권선 전체의 스트레이 캐패시턴스 값과 병렬 연결된 캐패시턴스 값을 합친 것이 더 크기 때문이다.

현장에 있는 변압기 시험을 모의해 결선상태가 3상 Y-Y일때를 가정하여 중성점에 임펄스 전압을 인가하고 두상(U상,V상)을 비교하였다.

표 2. Y-Y결선 일 때 LVI파형 비교분석표(U상,V상)

No.	U상,V상 1차/2차탭[V]	V상 캐패시턴스 결선 및 용량	파형 조정용 소자					그림 No.
			Cs	Cb	Rp	Rs	L	
1	3300/1110	-	47	3.3	15	3.3	10	8
2	3300/1110	1차 330V 2nF	47	3.3	15	3.3	10	9
3	3300/1110	1차 330V 100nF	47	3.3	15	3.3	10	10
4	3300/1110	1차 330V 1200nF	47	3.3	15	3.3	10	11

표 2는 3상으로 모의하여 중성점에 임펄스전압을 인가하였고 탭간

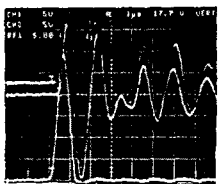


그림 8. 정상적인 LVI파형

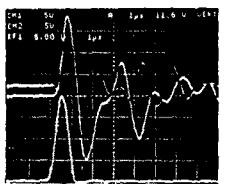


그림 9. V상 1차측 330[V]탭에 2[nF]이 연결된 파형

에 캐패시턴스는 2[nF]에서 1200[nF]까지 변화시켜 파형을 분석하였다. 실제 현장에서는 두상씩(U,V상, V,W상, W,U상)으로 거의 같은 파형이 생길 것을 예상해 비교하여 분석하므로 본 실험에서도 U,V상을 측정할 것이며 U상은 캐패시턴스를 연결하지 않았고, V상만 파형을 비교하기 위해 캐패시턴스를 연결하였다.

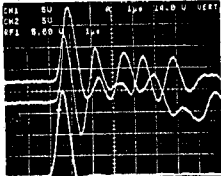


그림 10. V상 1차측 330[V]때에 100[nF]이 연결된 파형

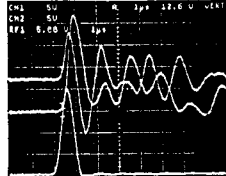


그림 11. V상 1차측 330[V]때에 1200[nF]이 연결된 파형

그림 8은 캐패시턴스가 없는 정상상태에서의 LVI파형으로 상단이 권선의 검출파형(U상,V상)이고, 하단이 인가펄스이다. 검출파형에서 나타난 바와 같이 U상이 V상보다 비교적 파형의 진폭이 크나 위상과 주파수는 거의 일치하고 있다. 이때의 임펄스전압이 300[V]이며, 상승시간은 600[ns]이다.

그림 9에서 그림 11까지 330[V] 댐간에 2[nF], 100[nF], 1200[nF]를 병렬 연결한 것이며 진폭과 주파수가 변하고 있음을 알 수 있다.

또한 변압기 결선상태가 Y-Y일 때 1차측 중성점에 임펄스전압을 인가하고 두상(U,V상)을 차분측정방법으로 비교하였다.

표 3. Y-Y결선 일 때 차분방법으로 측정된 비교표(U,V상)

No.	U상,V상 1차/2차뎀[V]	V상 캐패시턴스 결선 및 용량	파형 조정용 소자					그림 No.
			Cs	Cb	Rp	Rs	L	
1	3300/1110	-	33	2.2	15	3.3	10	12
2	3300/1110	1차 330V 2nF	33	2.2	15	3.3	10	13
3	3300/1110	1차 330V 100nF	33	2.2	15	3.3	10	14
4	3300/1110	1차 330V 1200nF	33	2.2	15	3.3	10	15

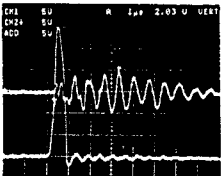


그림 12. 정상적인 LVI파형

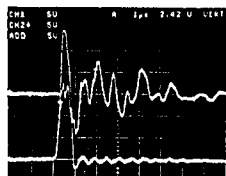


그림 13. V상 1차측 330[V]때에 2[nF]이 연결된 파형

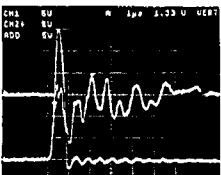


그림 14. V상 1차측 330[V]때에 100[nF]이 연결된 파형

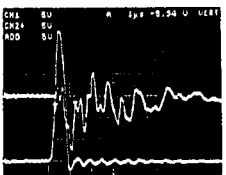


그림 15. V상 1차측 330[V]때에 1200[nF]이 연결된 파형

그림 12는 캐패시턴스가 없는 정상상태에서의 LVI파형으로 상단이 U상과 V상을 합한 차분방법으로 측정된 파형이고 하단이 인가펄스이다. 임펄스 전압은 300[V]이고 상승시간은 500[ns]이다.

그림 13 및 14와 마찬가지로 그림 15는 330[V] 뎐에 캐패시턴스 1200[nF]를 병렬로 연결한 것으로 진폭의 크기와 주파수가 변하였으므로 그림 12와 비교할 때 파형의 구별이 뚜렷함을 알 수 있다.

따라서 차분 측정 방법으로 측정된 결과 파형변화를 확인하는데

있어서 더 효과적인 것으로 나타났다.

이상과 같이 실험실에서 측정된 결과를 토대로 모 변전소에서 사용하고 있는 154[kV]급 ( $\Delta$ -Y)변압기에 제작된 LVI tester로 시험을 실시하였다.

시험은 고압측과 저압측으로 구분하였고 고압측은  $\Delta$ 결선이므로 한상에 임펄스를 인가하고 두상을 측정하였으며(U상 인가 V,W상 측정, V상 인가 W,U상 측정, V상 인가 W,U상 측정), 차분 측정 방법으로도 시험을 하였다. 서로의 상을 비교한 결과 측정파형은 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

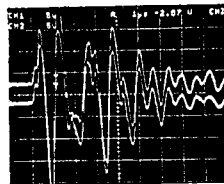


그림 16. 고압측 U상 인가 V상, W상 측정

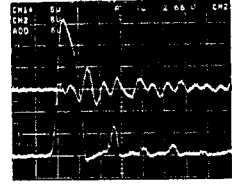


그림 17. 고압측 U상 인가 V상 + W상 측정

여기서는 대표적인 파형으로 고압측에 임펄스를 U상에 인가하고 V,W상을 측정된 파형으로 그림 16 및 17에 나타내었고, 실험실과 현장에 제작된 LVI tester를 사용하여 시험을 한 결과 LVI 시험이 가능한 것으로 사료되었다.

#### 4. 결론

변압기에서 권선변형을 확인하기 위한 방법으로 육안 검사, 임피던스 변화, 여자전류 변화, 절연화인, LVI 시험 등이 있으나 전 세계적으로 ANSI 규격에 의거하여 LVI 시험을 수행하므로 LVI 시험기를 제작하여 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 변압기 권선변형을 모의한 결과 캐패시턴스 값이 커지므로서 진폭 및 주파수가 뚜렷하게 변화함을 알 수 있었다.
2. 캐패시턴스의 변화량에 따라 진폭, 위상, 주파수가 변하는 정도를 추측할 수 있는 가능성을 제시하였고, 기본회로 보다는 차분 측정 방법으로 측정된 결과 파형변화를 확인하는데 있어서 더 효과적인 것으로 나타났다.
3. 현장시험을 위해 인가전압용 케이블과 단자함 간의 거리를 15[m]로 모의해 RG8/U 트라이 엑시얼 케이블을 사용하여 시험한 결과 감도도 우수하고 외부 잡음도 효과적으로 제거할 수 있었다.
4. 현장에서 진단시험중 하나인 LVI는 저압측시험기, 단자함, 케이블을 제작하여 실험실 및 현장에서 실험을 한 결과 충분히 적용할 수 있을것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] W. Lech and L. Tyminski, "Detecting Transformer winding Damage. The Low Voltage Impulse Method", Electrical Review Vol. 179, No.21, PP. 768-772, 1966
- [2] R. A. Smith and M. Waters, "Detection of winding Damage in Power Transformers using the Low Voltage Impulse Method.", ERA Report No. 5252, 1969
- [3] E. J. Rogers and L. E. Hubbard, "Low Voltage Impulse Testing of Power Transformers." IEEE Paper No.71, TP535-PWR., PP. 1281-1293, 1971.
- [4] "IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers" Part II ANSI/IEEE C57. 12. 90(1993) pp. 61-75