

배전용 변압기 단락강도 시험설비 개발

박 지훈, 민 윤홍, 강 영학, 유 호근, 안 규선, 함 길호, 오 창주
 LG산전 전력시험기술센터, 한국전력공사 지재관리처, 동영기술

Development of Short-circuit Testing Facility for Distribution Transformers

Ji-Hun Park, Yun-Hong Min, Young-Hak Kang, Ho-Keun You, Kyu-Sun Ahn, Gil-Ho Ham, Chang-Ju Oh
 Power Testing & Technology Institute of LGIS, KEPCO Seoul Logistics Department, Dong Young Tech.

Abstract - To increase the short-circuit testing capacity of distribution transformers, testing facility has been installed for KEPCO in Ui-wang. The power supply of testing facility is directly supplied from the network substation located closely. Testing can be performed up to 300 kVA for single-phase transformers, 500 kVA for three-phase transformers. Operating with this facility, the distribution company is able to maintain the reliable supply of electricity. Also the critical quality of transformers from manufacturers can be verified by short-circuit testing. This paper describes the design concept and specification of newly developed equipment and the procedure of short-circuit test.

1. 서 론

변압기에 대한 단락강도시험은 아주 특별한 시험으로서 실제 배전계통에서 단락고장시 발생하는 전류가 일정시간 동안 흘러도 변압기의 내부 코일, 철심, 탭 등이 열적, 기계적 손상 없이 견딜 수 있는가를 검증하는 시험이다. 변압기의 사고전류는 선로와 선로간이 단락되었을때 최대인 단락전류가 발생된다. 이 경우 대용량 변압기의 경우 정격전류의 8~10배, 소용량의 경우 25~40배의 전류가 발생되며, 사고 직후 권선에는 과대한 전자 기계력이 작용하고 단락전류가 지속되면 권선의 온도가 현격히 상승하여 절연물을 손상시킨다. 변압기뿐만 아니라 차단기, 개폐기와 같은 전력기기는 계통에서 발생하는 각종 사고 유형에 따른 성능을 검증하기 위해 모터 회전력에 의한 관성 에너지를 이용하는 단락발전기로 단락시험을 실시하고 있다. 그러나 송전계통의 용량이 충분할 경우 계통의 전원을 이용한 단락시험을 수행할 수 있으며, 설비의 구성이 발전기 방식보다 매우 간단하므로 경제적인 설비의 구성이 가능하다.

한국전력에서는 변압기의 품질향상 대책의 일환으로 1989년부터 계통 전원을 이용한 단락용량 3 MVA 급의 단락강도 시험설비를 운영하여 왔다. 그러나 최근 구매시방서의 개정에 따라 배전용 변압기의 운전용량이 주상변압기류는 단상 150 kVA, 지상변압기류는 단상 300 kVA 및 삼상 500 kVA 급으로 상향 조정되었다. 이에 따라 한국전력과 LG산전은 국내 최초로 22.9 kV 배전선로를 이용한 단락용량 12 MVA 급의 변압기 단락강도 시험설비를 개발하여 2002년 1월부터 한국전력에서 본격적으로 운영되고 있다.

본 논문에서는 개발된 시험설비에 대한 시스템 구성, 주요기기의 개발내용과 특징을 소개하며 시험설비의 최적 운영을 위한 제어, 보호 및 측정시스템에 대하여 소개한다. 또한 한전표준구매시방서인 ES 148 (1998) 규격과 국제규격인 ANSI/IEEE C 57.12.00 (1993) 및 ANSI/IEEE C 57.12.90 (1993) 에 따른 시

험방법에 대하여 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1의 단선도와 같이 공급전원은 시험설비에 인접된 배전 변전소로부터 직접 공급받은 전원을 이용한다. 차단기류의 시험과 달리 시험전류는 시료변압기의 임피던스에 의해 결정되므로 시험전류를 제어하는 한류리액터는 구성할 필요가 없다. 대부분의 주회로 기기는 패쇄 배전반에 내장된 형태로 옥외에 설치되었으며, 시료 접속과 단락점 결선 장치는 옥내 시험장에 위치한다.

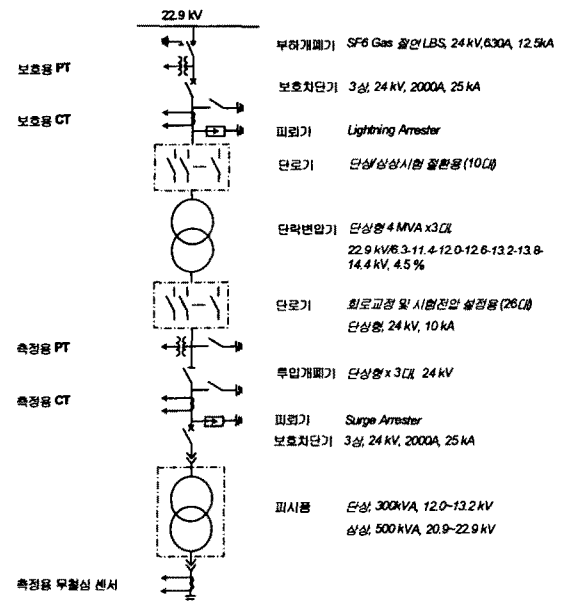


그림 1 변압기 단락강도 시험설비 단선도

2.1.1 보호차단기

보호차단기는 시험중 일때 시료 변압기의 손상에 따라 시험회로에서 발생할 수 있는 사고전류 및 이상전압에 대해 회로를 차단한다. 이러한 이상 상태에 따른 차단기의 보호 동작을 위해 최근에 적용되기 시작한 전자식 보호 계전기를 적용하였다.

2.1.2 단락변압기

배전용 변압기는 정격전압 단자 외에 5% 내외의 전압차를 갖는 탭이 마련되어 있다. 그러므로 배전선로에서 공급되는 전압은 단락변압기에 의해 필요한 시험전압으로 변환되어 시료 변압기에 인가된다. 제작된 단락변

압기는 시험중 안정된 전원을 공급하기 위해 시험시 필요한 단락용량보다 20배 이상의 단락용량을 갖도록 제작되었으며 회로교정(Calibration)을 위한 50%의 전압탭과 6가지의 시험전압을 얻을 수 있도록 설계되었다.

표 1 단락변압기 주요시방

형식	단상형 건식변압기
단락용량	12 MVA (4 MVA x 3)
% IZ	45 %
1차 전압	132 kV
2차 전압	6.3/11.4/12.0/12.6/13.2/13.8/14.4 kV
철심자속밀도	1.4 T
중량	9,000 kg

단락변압기는 그림 2와 같이 7개로 구성된 전압단자가 권선의 외부로 인출되어 공압식 단로기에 의해 자동으로 절환된다. 이 방식은 유압식 변압기에서 적용하고 있는 탭 절환기에 비해 높은 신뢰성과 유지보수성을 갖는다.

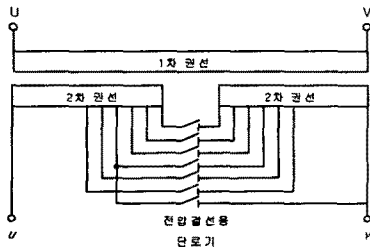


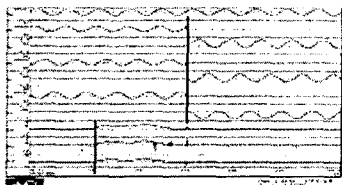
그림 2 단락변압기 권선배치도

2.1.3 투입개폐기

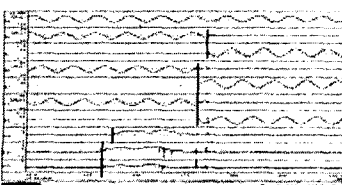
투입개폐기는 단락전류의 투입 위상을 제어하는 기능을 갖는다. 0.1~0.5 ms 이하의 투입 정밀도를 얻기 위해서는 고정밀도의 유압식 또는 공압식 구동방식을 채택한 고속도의 투입기를 적용하고 있는데, 이는 제작시 고비용과 정밀한 유지보수기술을 필요로 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 모터-스프링 동작방식의 진공차단기를 응용한 단상형 투입개폐기를 적용하였다.

적용된 투입개폐기는 실제의 시험전류를 투입하여 위상을 제어한 결과 0.5 ms 이하의 투입 정밀도를 얻을 수 있었으며 시험규격에서 요구되는 대칭 및 비대칭 전류를 충분히 제어할 수 있었다.

그림 3은 공인시험소의 시험을 통해 입증된 투입개폐기의 시험결과이다.



a) 삼상을 동시에 투입한 경우



b) 한상을 지연 투입한 경우

그림 3 투입개폐기에 의해 제어된 파형

2.2 제어 및 보호 시스템

2.2.1 시스템 구성

시험설비는 그림 4와 같이 중앙 조작반에서 모든 시험회로를 원격으로 제어하고, 조작상태의 표시 및 시험전압을 조작자가 쉽게 인식할 수 있도록 하였다. 특히 시험자의 오조작을 막기 위해 관련된 동작기기의 주접점과 연동되는 보조접점을 이용한 오동작 방지회로(Interlock circuit)를 구성하였다.

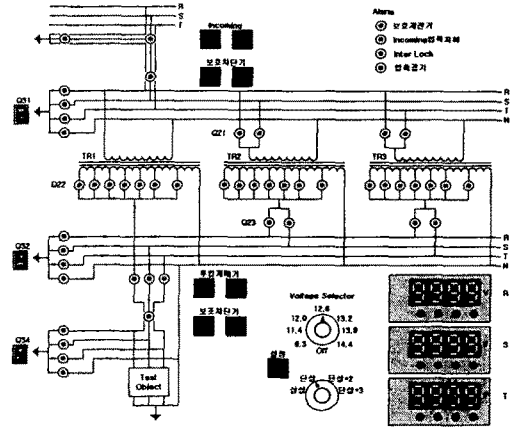


그림 4 조작 제어반

2.2.2 위상검출 및 정밀제어장치

인가되는 전압의 영점을 검출하고, 이를 기준으로 투입개폐기의 단락시점을 제어하여 규정된 비대칭 단락전류 및 대칭단락전류를 얻기 위한 장치이다. 시험에 따라 전류의 투입시점, 통전시간을 감안하여 순차적인 동작 프로그램을 입력시켜 구성된 회로기기를 정밀하게 제어한다.

개발된 제어장치의 정밀도는 0.02 ms 이하이며 주요 성능은 표 2와 같다.

표 2 위상검출 제어장치 성격

주요기능	영점검출(Zero crossing detection) 제어 프로그램 설정 제어 출력신호 발생
선택제어	동기/비동기 모드 초(s)/주기(cycle) 단위 선택 (원격)Remote/(현장)Local 선택
출력	12 채널, 250 Vd.c., 10 A
정밀도	+/-0.4 도 (60 Hz 기준)
절연방식	절연 릴레이(Isolate relay)
절연내압	2000 V

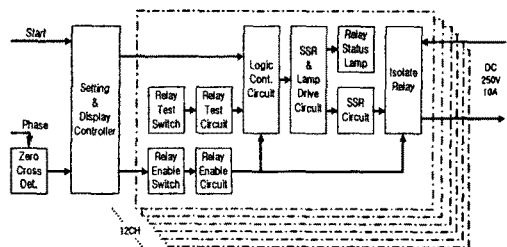


그림 5 위상검출 제어장치 블록도

2.3 측정시스템

시험과 관련된 전압, 전류의 측정과 시험파형 기록을 위해 상용화된 측정 레코더와 측정용 컴퓨터를 적용하였으며 측정된 데이터는 그림 7과 같이 측정된 값이 자동으로 기록된 시험파형이 출력된다.

시험전류의 측정은 전류크기에 따라 4가지의 변류비를 선택할 수 있도록 정밀급 변류기를 시료 변압기 1차측에 구성하였다. 또한 시료의 2차측 전류는 변류기에 비해 자속포화 특성이 양호한 무철심 전류센서를 적용하여 50 kA 까지 측정이 가능하도록 구성되었으며 1차측 전류와 비교측정이 가능하다. 개발된 무철심 전류센서의 측정 정밀도는 1%의 비오차를 가지고 있다.

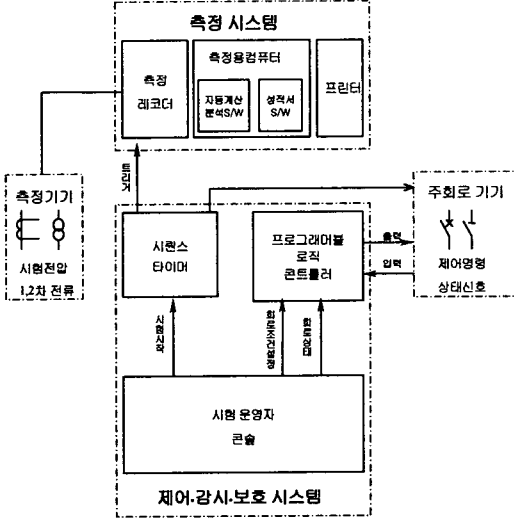


그림 6 측정, 제어시스템 구성도

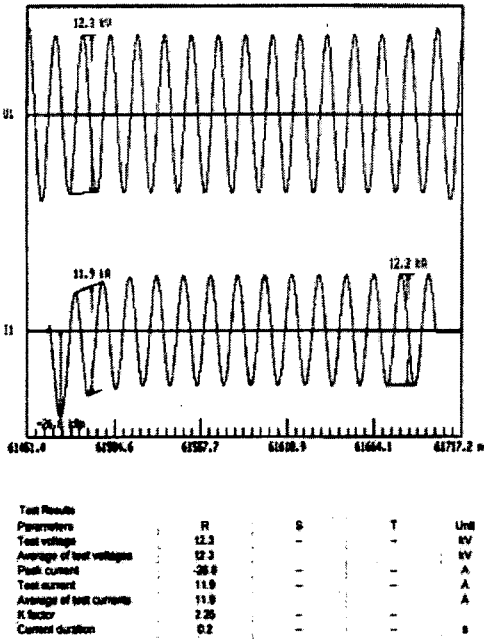


그림 7 시험성적서용 오실로그래프

2.4 규격시험조건 및 회로분석

2.4.1 규격시험조건

시험은 한전규격인 ES 148 (1998)을 기본으로 하였으며 규격조건과 적용된 시험방법은 다음과 같다.

1) 시험회로의 결선방법

시료 변압기의 전원 인가측은 1, 2차측 어느 곳이든 가능하나 본 설비는 2차측 단자를 단락한다.

2) 단락전류의 투입방법

가) 시료 변압기 여자 상태에서 단자를 단락하는 경우

이 방법은 그림 8과 같으며 규격에서 권장하는 방법으로서 단락전류의 투입은 시료의 단자와 단락점 사이에서 이루어진다. 이 경우 회로 구성 시 2차측 연결도체의 길이가 길어져 요구되는 단락전류를 얻기 위해서는 전원측에서 인가되는 전압은 시료의 정격전압보다 큰 전압이 인가되어야 한다. 그러나 인가전압은 정격전압의 110%를 초과할 수 없다고 규정되어 있고, 이러한 제한 조건과 더불어 특히 전원측이 고압권선이고 다른 권선이 저압권선일 경우 저압측 연결도체의 임피던스가 전원측 임피던스로 환산했을 때 아주 큰 값이 되므로 도체의 임피던스를 최소화하는데 어려운 점이 있다.

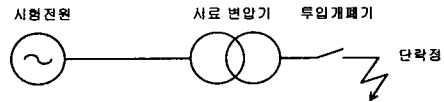


그림 8 변압기 단락시험회로 A

b) 단락 결선된 상태의 변압기에 전압을 인가하는 경우
이 방법은 본 설비에서 적용된 방법으로서 대부분의 시험소에서 채택하고 있는 방법이다. 시료 변압기의 저압측은 미리 단락된 상태에서 시험전원을 시료의 고압측에서 인가하는 방법이다.

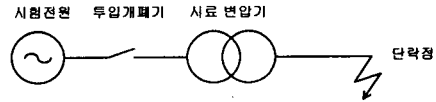


그림 9 변압기 단락시험회로 B

3) 전압조건

인가되는 전압은 시험회로 A의 경우 110%를 초과할 수 없으며, 시험중 측정된 전압은 전원 인가측의 시료 변압기 단자에서 95~105%가 유지되어야 한다.

그러므로 전압측정은 시료의 전원 인가측에서 측정되어야 하며, 시험회로 B의 경우 투입개폐기 앞단에서 측정된다. 규격에서는 PT적용을 권장하며 측정정밀도는 +/-5% 이하 이어야 한다.

4) 전류조건

전류는 시료 변압기의 전원측 단자에서 측정하며, 시험전류의 제 2 사이클에서 측정한다. 본 시험설비에서는 대칭전류의 변화 정도를 알 수 있도록 전류의 시작점과 종점에서의 전류값을 자동으로 측정, 기록할 수 있다. 또한 전류는 권선전류를 측정하여야 하며 1차측 권선이 Delta 결선일 경우 Wye 결선된 2차측 전류를 측정하여 변압비로 환산 적용할 수 있다.

측정된 전류는 요구되는 전류의 95% 이상 일때 유효한 시험이 된다.

규격에서는 시료 변압기 외함을 접지와 연결시켜 시험중 외함으로 흐르는 전류를 측정하도록 권장하며 있으며 본 시험설비의 경우 측정이 가능하다.

5) 단락시간 및 시험회수

500 kVA 급 이하의 변압기의 경우 단락시간은 0.25

초를 기본으로 하고 총 6회의 시험중 1회는 시료의 단락임피던스에 의해 결정되는 장시간 대칭전류를 흘려야 한다.

장시간 통전시험은 계통고장 발생시 계통의 보호장치가 고장제거를 위해 변압기가 견뎌야 하는 최대의 통전 시간이라고 볼 수 있다.

총 6 회의 시험 중 2 회의는 변압기 특성에 의해 결정되는 X/R 에 값에 따른 비대칭 전류를 흘려야 한다. 이렇게 결정되는 비대칭 전류는 계통에서 실제 발생할 수 있는 최대치로서 시료 변압기의 기계적 강도를 검증하는 방법이다.

2.4.2 회로분석

단락변압기의 임피던스에 의한 전압 강하분과 시험회로 및 단락측 도체에 의한 전류감소에 따라 시료에 인가되는 전압은 어느 정도 높게 인가하여야 한다. 본 시험설비는 단락변압기에 의한 전압강하분과 시료 2차측 접속 도체의 길이에 의한 전류의 감소분에 따른 전압보상을 위해 시료의 최대전압을 기준으로 110 % 의 전압을 인가할 수 있도록 구성되었다.

1) 시험회로분석

그림 10은 시료 변압기의 시험 전압값이 22.9 kV 일 때 인가되는 전압이 23.9 kV 인 시험회로이다. 요구되는 시험범위의 전압과 전류를 만족하기 위해서는 회로상의 단락변압기 임피던스와 회로구성 도체의 임피던스에 의한 전압을 고려하여야 한다.

시험회로의 분석을 위해 공급전원 이후의 단락변압기의 임피던스는 제작된 변압기의 시험 데이터를 적용하였으며 시료의 단락결선을 위한 2차측 임피던스는 도체의 배치형태 및 길이를 적용하여 계산된 값이다. 이에 대한 회로의 임피던스도를 그림 11에 나타내었다.

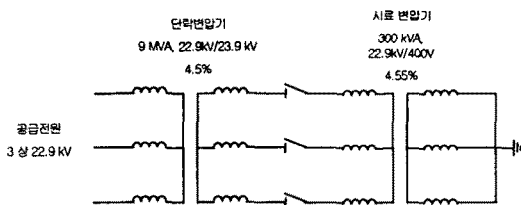


그림 10 시험회로도

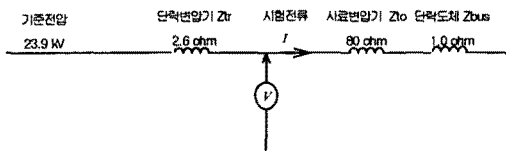


그림 11 임피던스도

2) 시험결과 비교

그림 11에서 시료 1차측 단자에서 측정되는 전압은 단락변압기에서 인가되는 공급전압의 97 % 가 시험전압이 되므로 인가전압은 시료의 정격값보다 3 % 이상의 높은 전압을 인가해야 시험전압의 100 %를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 500 kVA 급 이하인 변압기의 시험 기준전류는 시료의 단락임피던스만 고려하기 때문에 시험회로상의 임피던스에 의한 전압 및 전류에 대한 변화율을 감안해야 한다. 표 3에 단락시험시 시료 1차측 단자에서 시험전압 및 전류값을 계산에 의해 예측되는 값과 실제 측정된 값을 비교하였다.

표 3 시험결과 비교표

측정요소	규격조건	예측값	측정값
전압	21.8~24.0 kV (정격의 95~105%)	23.2 kV (101%)	23.0 kV (100%)
전류	158 A 이상 (규정전류의 95% 이상)	165 A (99%)	163 A (98%)

3. 결 론

제작된 시험설비의 주요기기는 모두 국내에서 제작, 개발된 기기를 적용하여 투자의 경제성과 시험운영의 효율성을 극대화 하였으며 단락강도 시험설비에 대한 제작 기술과 운영기술을 축적하였다. 또한 개발된 시험설비는 규격에서 요구하는 시험조건을 충분히 만족할 수 있을 뿐 아니라 시간당 수신회 반복되는 시험환경을 고려하여 조작오류의 방지, 회로설정의 편의성을 도모하였으며, 측정 파형의 기록 및 분석이 용이하도록 구성되었다.

단락시험용량이 12 MVA 로 증대됨에 따라 최대 500 kVA 까지 배전용 변압기의 단락강도 시험이 가능한 기반이 구축되었으며, 국내 변압기 제조업계의 제품 개발의 활성화와 품질향상이 기대되며, 배전계통의 안정된 전력공급에도 크게 이바지 할 것으로 예상된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Lou van der Sluis, "Transients in Power Systems", John Wiley & Sons, 2001.
- [2] ES 148 (1998), 변압기 단락강도 시험규격
- [3] ANSI/IEEE Std C57.12.00-1993, Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, And Regulating Transformers
- [4] ANSI/IEEE Std C57.12.90-1993, Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.
- [5] 민윤홍, 유효근, 한중희 "변압기 품질향상대책", 한국전력, 1996
- [6] 민윤홍, 유효근 "시험검사 실무수첩", 한국전력, 1998