

## 특고압 가스 절연 부하 개폐기의 통합형 대전력 시험 방법 및 회로 구성에 관한 연구

(A Study on the Construction of Test circuit and Unification of Experiment Method for High Voltage Gas-insulated Load Switch using High Power Testing System)

정흥수\* · 김민영 · 김준석

(Heung-Soo Jung · Min-Young Kim · Juen-Suk Kim)

### 요 약

본 논문은 대전력시험설비를 이용한 특고압 가스 절연 부하 개폐기의 대전력 시험회로의 구성과 통합형 시험 방법에 관하여 연구하였다.

대전력시험설비는 전기기기의 전기적 및 기계적인 성능을 검증하는 설비로서 단락발전기, 보호차단기, 투입스위치, 임피던스, 고압변압기, 저압변압기, 측정 및 보호시스템 등으로 구성되며, 이 시스템을 이용하여 단시간전류시험, 전류개폐용량시험, 단락투입 및 차단시험 등을 실시한다.

특고압 가스 절연 부하 개폐기의 규격으로는 국내 배전계통에 적용되는 ES(한국전력공사 표준규격) 5925-0002가 있으며, 국제 규격으로는 IEC 60265-1, 62271-1 및 IEEE C 37.74 등이 있다. 본 논문에서는 여러 규격에 각각 규정되어 있는 시험 절차, 시험회로 구성 및 시험 방법등을 통합하여 600[MVA]급 대전력 시험설비에 적용하였다.

### Abstract

This paper is to study on the Construction of Test circuit and Unification of Experiment Method for high voltage gas-insulated load switch using high power testing system. The high power testing system is a equipment to verify electrical and mechanical performance on electrical product. The system consist of short-circuit generator, back-up breaker, making switch, impedance, high voltage transformer, low voltage transformer, measuring and protection system, etc. Using this system, we can test related to high power, for example, short-time current test, active load current test, magnetizing current test, capacitive current test, closed loop current test, etc. Standards of high voltage gas-insulated load switch that is in use domestic distribution line are ES 5925-0002, IEC 60265-1, IEC 62271-1 and IEEE C 37.74, etc. In this paper, we standardized on the test procedure, organization of test circuit and analysis of measured data prescribed many difference standards, and applied this test method to 600[MVA] high power testing system . So that we can test the load switch satisfied standards.

Key Words : High power testing, Load switch

\* 주저자 : 한국전기연구원 선임기술원

Tel : 031-420-6062, Fax : 031-420-6089, E-mail : hsjung@keri.re.kr

접수일자 : 2008년 6월 20일, 1차심사 : 2008년 7월 3일, 심사완료 : 2008년 9월 5일

## 1. 서 론

전력 계통에서 지락 사고나 단락 사고가 발생되어 사고 전류가 전기기기에 흘렀을 때, 그 기기는 전류량에 의한 전기적(열적) 스트레스와 전자력에 의한 기계적 스트레스를 받는다. 이때 전력 계통에 접속되어 있는 각종 전기기기는 이 사고 전류를 견디면서 고유의 기능을 발휘할 수 있어야 하는데, 이러한 사고 전류가 흐르는 상태에서 전기기기의 성능을 평가하기 위해서는 적절한 전압과 전류를 발생시킬 수 있는 시험 시스템이 필요하다. 이러한 시험 시스템을 대전력 시험 설비(High Power Testing Facilities)라고 하며, 이러한 설비를 이용한 모든 시험을 대전력 시험이라고 한다.

본 논문에서는 여러 전기기기 중에서 대전력 시험 수요의 약 70[%]를 차지하고 있는 특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)에 대한 ES 5925-0002, IEC 60265-1, IEEE C 37.74의 국내 및 국제 규격에 규정된 각 시험항목별 시험조건등이 상세하게 규정되어 있지 않아 시험규격 및 방법을 달리하는 비효율적인 문제가 발생되고 있다.

본 논문에서는 각 규격별 필수 시험항목 및 규격에 규정 되지 않은 시험조건, 방법, 회로구성을 연구

하여, 대부분의 규격에 부합하는 통합형 대전력 시험 방법을 제시한다. 600[MVA]급 대전력 시험회로를 구성하고, 특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)에 대한 시험을 실시하여 타당성을 검증한다. 연구된 방법으로 시험 시 특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)의 시험에 해당되는 국내 및 국제 규격을 모두 만족하는 시험이 됨으로써 경제성, 효율성, 실용성등의 증대를 가져오며 국가 경제에도 이익을 줄 것이다. 또한 여러 시험기관에서 폭넓게 적용할 수 있을 것이다.

대전력 시험을 실시하기 위해서는 시험 전류를 발생하는 전류원과 시험 전압을 발생하는 전압원이 필요하다. 따라서 특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)에 대한 대전력 시험을 할 수 있도록 전원측에는 600[MVA]의 단락 발전기, 보호 차단기, 투입 스위치, 단상 100[MVA] 고압 변압기, 단상 19.6[MVA] 저압 변압기, 전류 조정용 임피던스, 측정 및 보호 장치로 설비를 구성하였다.

특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)에 대한 대표적인 규격은 ES(한국전력공사 표준구매 규격) 5925-0002(25.8[kV] 가스 절연 부하 개폐기(지중용))[1], IEC(국제 전기 표준 회의) 60265-1(고압 스위치, 제1부 : 정격 전압 1[kV] 초과 52[kV] 이하의

표 1. 국내 및 국제 규격 비교

Table 1. Compare of Domestic and International Standards

시험항목/규격	ES-5925-0002	IEC 60265-1	IEC 62271-1	IEEE C37.74
- 개폐시험의 일반사항	-	- IEC 62271-1을 따름	- 실사용 상태 및 이와 동등한 상태로 시험실시의 19항목	-
- 단시간 전류시험	- 시험전류:12.5[kA] 1s 외 1항목	- IEC 62271-1을 따름	- 주 회로와 접지회로에 대하여 실시함 외 9항목	-
- 부하전류 개폐시험	- 100[%] 부하전류(600[A]) 개폐시험 100회 외 2항목	- TRV 조건 : 표 참조외 2항목	-	-
- 여자전류 개폐시험	- 시험전류:21[A] 10회 외 1항목	-	-	- SF6 가스압 : 최소 외 3항목
- 루프전류 개폐시험	- 시험전류:600[A] 20회 외 1항목	- 시험전압:정격전압의 20[%]외 2항목	-	-
- 충전전류 개폐시험	- 선로 충전전류 1.5[A] 10회 외 2항목	- 시험전압 규정 외 6항목	-	-

개폐기)[2], IEC 62271-1(고압 스위치기어 및 콘트롤기어, 제1부 : 일반 사항)[3], IEEE(전기·전자 기술자 협회) C 37.74(정격 전압 38[kV] 이하의 부하 개폐기)[4] 등이 있다. ES 5925-0002[1]는 국내 배전계통에 사용되는 특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)에 대한 구조, 일반적인 요건, 전기적 특성 시험(절연 시험, 온도상승 시험 등), 대전력 시험(단시간 전류 시험, 부하 전류 개폐 시험 등) 및 기타 시험(가스 누설 시험, 환경 시험 등)을 규정하고 있으며, 각 항목별 시험 조건은 대부분 IEC 및 IEEE 규격을 인용하고 있다. IEC 62271-1[3]은 고압용 개폐기, 퓨즈, 차단기, 배전반 등 고압 스위치기어 및 콘트롤기어에 적용되는 모든 시험에 대한 시험 조건 등을 규정하는 일반 규격이며, IEC 60265-1[2]은 1[kV] 초과 52[kV] 이하의 고압 개폐기에 대한 구조, 일반적인 요건, 전기적 특성 시험, 대전력 시험 및 기타 시험을 규정한다. IEEE C 37.74[4]는 38[kV] 이하의 지상 설치형 부하 개폐기에 대한 구조, 일반적인 요건, 전기적 특성 시험, 대전력 시험 및 기타 시험을 규정한다. IEC 및 IEEE의 규격은 적용이 광범위하여 여러 기기에 적용할 수 있는 규격이므로, 국내 배전계통에 사용되는 특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)에 대한 구체적인 요건과 시험 항목은 ES의 규격에서 규정하며, 시험 방법조건은 국제 규격인 IEC 및 IEEE의 규격을 인용하고 있다.

특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)의 국내 및 국제 규격의 비교는 논문의 끝 부분의 표 2와 같다. ES, IEC, IEEE의 각 규격별 시험조건, 방법, 회로구성 등이 상세하게 규정되어 있지 않으며, 따라서 각 기관에서 시험 시 규격의 해석을 달리하는 문제를 해결하고, 대부분의 규격에 만족하는 통합형 시험방법을 제시하며, 대전력 기기 시험을 실시할 때 정확하게 성능을 평가하여 경제성, 효율성, 실용성 등을 높이고자 한다.

국내 및 국제의 여러 규격에 규정된 시험 중 대전력 시험에 대하여 대표적으로 ①~⑤의 시험 방법을 연구하여 통합형 시험방법을 제시한다.

- ① 단락전류가 통전되었을 때 그 통전 능력을 검증하는 단시간 전류 시험
- ② 정상적인 부하상태의 변화 및 회로 변경 등을

모의한 부하 전류 개폐 시험

- ③ 무부하 변압기와 분로 리액터 등의 유도성(역자) 부하전류의 개폐를 모의하는 여자 전류 개폐 시험
- ④ 무부하 가공선로(또는 케이블)와 무효전력보상을 위한 커패시터 뱅크 등의 용량성(충전) 부하전류의 개폐를 모의하는 충전 전류 개폐 시험
- ⑤ 페루프 배전선로 회로나 전력용 변압기회로의 개폐를 모의하는 루프 전류 개폐 시험

## 2. 특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)의 통합형 시험 방법

### 2.1 단시간 전류 시험

단시간 전류 시험은 비대칭 성분을 포함한 단락 전류를 규정 시간 통전하여 기계적(진동 및 도체의 변형) 및 전기적 스트레스(접촉부 및 도체의 온도상승)에 대한 개폐기의 통전 능력을 검증하는 시험이다[5-7]. 시험 회로를 구성할 때 저전압 대전류를 발생시키는 저압 시험 회로를 사용한다.

특고압 가스 절연 부하 개폐기(지중용)의 단시간 전류는 12.5[kA] 32.5[kAp] 1[s]( $I^2t : 156.25 MA^2s$ )이며, 다음과 같이 시험한다.

#### • 실험 조건

- ▷ 시험 전압(Vg) ⇨ 정격전압 이하[3]
- ▷ 주파수 ⇨ 60[Hz] ± 10[%][3]
- ▷ 시험 전류(Ir, Is, It) ⇨ 12.5[kA][1] + 10[%][3]
- ▷ 파고치 전류 ⇨ 정격 주파수 60[Hz]에서 2.6배(50[Hz]는 2.5배)이므로 32.5[kAp] + 5[%][3]
- ▷  $I^2t(MA^2s)$  ⇨ 156.25  $MA^2s$  + 10[%][1-3]

#### • 실험 과정

- ▷ 통전시간 ⇨ 1.0초(허용오차는  $I^2t$ 에 따름)

#### • 실험 결과 확인

- ▷ 가스압 확인 ⇨ 변화 없을 것
- ▷ 주회로 저항 변화 ⇨ 20[%] 미만[3]
- ▷ 시료 파손 여부 확인

회로 구성은 다음과 같다.

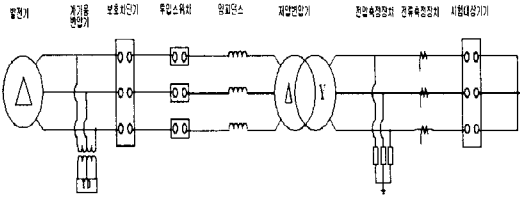


그림 1. 단시간 전류 시험 회로도  
Fig. 1. Circuit diagram of short time current test

## 2.2 부하 전류 개폐 시험

부하 전류 개폐 시험은 개폐기의 정상적인 동작상태 즉 정격 전압, 정격 부하 전류에서 규격에 정해진 개폐 횟수로 개폐기의 전기적 내구성을 검증하기 위한 시험으로 점점의 내구성과 통전능력 등 정상 상태에서의 개폐 성능을 시험한다.

부하 개폐 시험 시 전류를 차단하기 위하여 개폐기의 점점이 분리가 되기 시작하면 그 순간 전류는 차단이 되고 그에 따른 아크가 발생하면서 개폐기의 점점 간에 정상 전압이 아닌 과도 상태의 회복 전압이 인가된다. 이것을 과도 회복 전압(TRV)이라고 하는데, 전압의 크기가 크고 주파수가 굉장히 높은 일종의 서지 전압이다[8].

부하 전류 개폐 시험은 다음과 같이 시험한다.

- 실험 조건
  - ▷ 시험 전압(Vg) ⇨ 25.8[kV][1] + 10[%][3]
  - ▷ 주파수 ⇨ 60[Hz][1] ± 10[%][3]
  - ▷ 회복 전압(3상, [kV]) ⇨ 25.8[kV][1] + 10[%][3]
  - ▷ 부하 전류 ⇨ 600[A][1] + 10[%][3], 30[A][1] + 10[%][3]
  - ▷ 회로 역률 ⇨ 0.7 이하[3]
- 실험 과정
  - 100[%] 부하전류 개폐시험(3상 25.8[kV] 600[A])

- ▷ 최소 조작 전압으로 실시하고, 회복 전압은 0.3s이상 인가[1]
- ▷ 개폐 횟수 100회(시험간격 3분)[1]
- 5[%] 부하전류 개폐 시험(3상 25.8[kV] 30[A])
- ▷ 최소 조작 전압으로 실시하고, 회복 전압은 0.3 s이상 인가[1]
- ▷ 개폐 횟수 20회(시험간격 3분)[1]
- 실험 결과 확인
  - ▷ 가스압 확인 ⇨ 변화 없을 것
  - ▷ 시료 파손 여부 확인

100[%] 부하 전류 개폐 시험(3상 25.8[kV] 600[A])을 위한 적용 파라미터 및 회로 구성은 다음과 같다.

- 시험 전압 :  $\frac{25.8}{\sqrt{3}}$  [kV] = 14.89[kV]
- 시험 전류 : 600[A]
- 시험 주파수 : 60[Hz]
- 시험 회로의 전체 임피던스
 
$$Z_{to} = \frac{14,890}{600} = 24.81[\Omega]$$
- TRV 임피던스 ( $U_c = 44.2$ [kV],  $t_3 = 88$ [ $\mu$ s])
 
$$\Gamma = (88 \times 10^{-6} / 0.8) \times 2 = 220[\mu\text{s}]$$

$$f = 1/\Gamma = 1/(220 \times 10^{-6}) = 4,540[\text{Hz}]$$

$$= 1/2\pi\sqrt{LC}$$

$$C_e = 1/(4\pi^2 f^2 L)$$

$$= 1/(4\pi^2 \times 4,540^2 \times 9.87 \times 10^{-3}) = 0.124[\mu\text{F}]$$
- $R_e = R_c \sqrt{\frac{L}{C}}$ 

$$= \frac{1}{4} \times \sqrt{\frac{9.87 \text{ mH}}{0.124 \mu\text{F}}} = 70.53[\Omega]$$

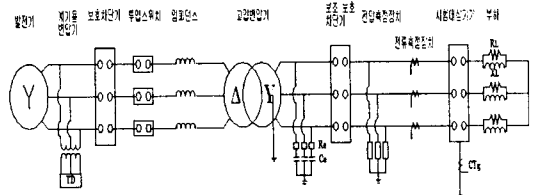


그림 2. 부하 전류 개폐 시험 회로도  
Fig. 2. Circuit diagram of active load current test

### 2.3 여자 전류 개폐 시험

여자 전류 개폐 시험은 유도성 부하 전류 개폐 시험 또는 지상 소전류 개폐 시험이라고 하며 무부하 변압기, 분로 리액터, 전동기 등에 전원이 인가되거나 분리될 때 권선의 인덕턴스 특성에 따른 잔류 전류가 개폐 특성에 영향을 미치는데 개폐기가 무부하 상태에서 여자 전류와 같은 지상 소전류 개폐시 발생하는 과전압에 대한 개폐기의 절연성능을 검증하기 위한 시험이다. 즉 지상 소전류를 차단하게 될 때 아크 억제(arc suppression)에 의한 전류 재단 현상(current chopping)이 발생하게 된다[8]. 전류 영점이 아닌 지점에서 전류가 차단하는 경우 인덕턴스에는 잔류 전류가 남게 되고 잔류 전류와 개폐기나 변압기 권선 간의 커패시턴스와 충, 방전을 하는데 커패시턴스가 작은 값일 때는 아주 높은 주파수의 전압이 개폐기에 인가되므로, 이 특성에 대하여 개폐기의 성능을 검증하기 위한 시험이다.

여자 전류 개폐 시험은 다음과 같이 시험한다.

- 실험 조건
  - ▷ 시험 전압(Vg) ⇨ 25.8[kV][1] + 10[%][4]
  - ▷ 주파수 ⇨ 60[Hz][1] ± 10[%][4]
  - ▷ 시험 전압(3상,[kV]) ⇨ 25.8[kV][1] + 10[%][4]
  - ▷ 여자 전류(3상,[A]) ⇨ 21[A][1] + 10[%][4]
- 실험 과정
  - ▷ 개폐 횟수 ⇨ 최소 보증 압력에서 10회 실시[1]
  - ▷ 개폐 간격 ⇨ 3분 이하[1]
- 실험 결과 확인
  - ▷ 가스압의 상승확인 ⇨ 변화 없을 것
  - ▷ 시료 파손 여부 확인

적용 파라미터 및 회로 구성은 다음과 같다.

- 시험 전압 :  $\frac{25.8}{\sqrt{3}}$  [kV] = 14.89[kV]
- 시험 전류 : 21[A]
- 시험 회로의 전체 임피던스

$$Z_{to} = \frac{14,890}{21} = 709.0[\Omega]$$

- 전원 회로의 임피던스  
부하 전류 개폐 시험 회로와 동일함
- 부하 회로(공심 리액터로 구성)  
 $X_L = 709.0 - 3.72 = 705.28[\Omega]$

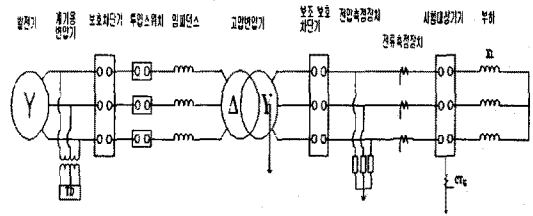


그림 3. 여자 전류 개폐 시험 회로도  
Fig. 3. Circuit diagram of magnetizing current test

### 2.4 충전 전류 개폐 시험

충전 전류 개폐 시험은 용량성 전류 개폐 시험 또는 진상 소전류 개폐 시험이라고 하며 무부하 가공선로 또는 지중 케이블에 전원이 인가되거나 분리될 때 선로 또는 케이블에 충전되는 진상 소전류 개폐시 개폐의 극(Pole)간에 인가되는 회복 전압에 대한 절연 성능을 검증하는 시험이다.

시험 중 개폐기의 절연이 파괴되는 경우 부하측 전압은 전원측 전압을 기준으로 진동이 시작되며 연속적인 재점호(restrike)가 발생한다.

이 시험은 용량성 부하를 사용하므로 시험 전류가 시험 전압보다 전기각으로 90[°] 진상이다. 투입 시 급격한 충전 전류로 인한 돌입 전류가 발생하며, 차단시 부하측의 콘덴서에는 시험 전압의 파고치로 충전된 상태의 충전 전압으로 되며 전원측 전압은 계통 전압이 복구되어 일시적으로 과도 전압이 발생되는데 과도 전압의 크기와 주파수는 계통에 존재하는 회로 정수에 의해 식 (1)과 같게 된다.

$$f_o = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

부하측 전압은 페란티 효과에 의해 전원측 전압보

다 다소 상승하며 이러한 과도기간이 지난 0.5 주기 후 극간 전압은 시험 전압의 2배 전압(콘덴서 충전 전압 + 시험 전압)이 극간에 발생하여 재점호가 발생하며, 최대 재점호 전류는 식 (2)와 같다.

$$I_p = 2 V_p \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t [5-6] \quad (2)$$

충전 전류 개폐 시험은 다음과 같이 시험한다.

● 실험 조건

- ▷ 시험 전압(Vg) ⇨ 25.8[kV][1] + 10[%][3]
- ▷ 주파수 ⇨ 60[Hz][1] ± 10[%][3]
- ▷ 전원측 전압(3상,[kV]) ⇨ 25.8[kV][1] + 10[%][3]
- ▷ 부하측 전압(3상,[kV]) ⇨ 25.8[kV][1] + 10[%][3]
- ▷ 100[%] 충전 전류(3상,A) ⇨ 25[A][1] + 10[%][3]
- ▷ 30[%] 충전 전류(3상,[A]) ⇨ 7.5[A](5~10[A])[1]
- ▷ 선로 충전 전류(3상,[A]) ⇨ 1.5[A] + 10[%][1]

● 실험 과정

- ▷ 개폐 횟수 ⇨ 최소 보증 압력에서 10회 실시[1]
- ▷ 개폐 간격 ⇨ 3분 이하[1]
- ▷ 투입시 돌입 전류와 차단시 절연 회복 전압 및 재점호 특성을 검증

● 실험 결과 확인

- ▷ 재점호 유무 및 가스압의 상승확인 ⇨ 재점호가 없고 가스압은 변화 없을 것
- ▷ 시료 파손 여부 확인

시험 회로의 접지는 100[%] 및 30[%] 케이블 충전 전류 시험은 전원측 및 부하측을 동시에 접지하고, 선로 충전 전류 시험은 부하측을 접지한다. 콘덴서를 사용한 케이블 모의 회로는 용량성 임피던스의 5[%] 범위 내에 무유도성 저항을 직렬 연결하여 돌입 파고 전류를 억제한다.

100[%] 케이블 충전 전류 개폐 시험(3상 25.8[kV] 25[A])의 파라미터 및 회로 구성은 다음과 같다.

- 시험 전압 :  $\frac{25.8}{\sqrt{3}}$  [kV] = 14.89[kV]

- 시험 전류 : 25[A]

- 시험 회로의 전체 임피던스

$$Z_{to} = \frac{14,890}{25} = 595.6[\Omega]$$

- 전원 회로 및 TRV 임피던스

부하 전류 개폐 시험 회로와 동일함

- 부하 회로(콘덴서와 저항으로 구성)

$$Z_L : 595.6 - 3.7 = 591.9[\Omega]$$

$$R_L : 29.6[\Omega](\text{콘덴서 부하의 } 5[\%] \text{ 이하})$$

$$C_L : 562.3[\mu]$$

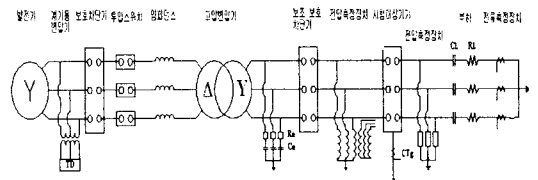


그림 4. 충전 전류 개폐 시험 회로도  
Fig. 4. Circuit diagram of capacitive current test

### 2.5 루프 전류 개폐 시험

폐루프 배전선로 회로를 개폐하거나 하나 이상의 전력용 변압기와 병렬로 연결된 전력용 변압기 회로를 개폐할 때 개폐기의 성능을 검증하기 위한 시험으로, 차단 후 개폐기 양단에 전압이 인가되고 단자간에 나타나는 전압은 개통 전압보다 대체로 낮아 시험 전압은 정격 전압보다 낮은 전압에서 실시하며 기기에 부하를 접속하지 않고 전원측 회로를 폐루프로 구성하여 시험한다.

루프 전류 개폐 시험은 다음과 같이 시험한다.

● 실험 조건

- ▷ 시험 전압(Vg) ⇨ 5.16[kV][1][3] + 10[%][3]
- ▷ 주파수 ⇨ 60 H[1]z ± 10[%][3]

- ▷ 루프 전류(3상,[A]) ⇨ 600[A][1]
- ▷ 회로 역률(PF) ⇨ 0.3 이하[3]
  - 실험 과정
- ▷ 개폐 횟수 ⇨ 최소 보증 압력에서 20회 실시[1]
- ▷ 개폐 간격 ⇨ 3분 이하[1]
  - 실험 결과 확인
- ▷ 가스압의 상승확인 ⇨ 변화 없을 것
- ▷ 시료 파손 여부 확인

루프 전류 개폐 시험을 5.16[kV] 600[A] 역률 0.3으로 실시하는 경우 파라미터 및 회로 구성은 다음과 같다.

- 시험 전압 :  $\frac{5.16}{\sqrt{3}} [kV] = 2.98[kV]$
- 시험 전류 : 600[A]
- 시험 회로의 전체 임피던스
 
$$Z_{to} = \frac{2,980}{600} = 4.96[\Omega]$$
- 전원 회로의 임피던스(역률 0.3  $\angle 72.54$ )
 
$$R = 4.96 \times 0.3 = 1.488[\Omega]$$

$$CLR = 4.96 \times 0.95 = 4.712[\Omega]$$

$$L = (X_L/2\pi f) = 4.712/377 = 12.52[mH]$$
- TRV 임피던스( $U_c = 8.9[kV]$ ,  $t_3 = 250[\mu s]$ )
 
$$T = (250 \times 10^{-6} / 0.8) \times 2 = 625[\mu s]$$

$$f = 1/T = 1/(625 \times 10^{-6}) = 1\ 600[Hz]$$

$$= 1/2\pi\sqrt{LC}$$

$$C_e = 1/(4\pi^2 f^2 L)$$

$$= 1/(4\pi^2 \times 1\ 600^2 \times 12.52 \times 10^{-3}) = 0.79[\mu F]$$

$$R_e = k\sqrt{L/C}$$

$$= 1/4 \times \sqrt{(12.52[mH]/0.79[\mu F])} = 31.47[\Omega]$$

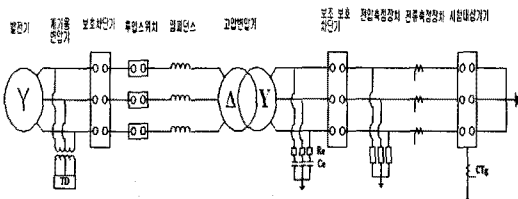


그림 5. 루프 전류 개폐 시험 회로도  
Fig. 5. Circuit diagram of closed loop current test

### 3. 대전력 시험 설비의 구성

전기기기의 대전력 시험을 위한 설비는 그림 6과 같이 구성되는데, 발전기, 보호 차단기, 투입 스위치, 임피던스, 변압기, 측정 시스템 및 보호 시스템 등으로 구분한다. 대전력 시험 설비는 계통의 사고 상태를 모의하는 것이므로, 대전력 시험 설비의 핵심 설비인 발전기는 계통의 사고 시 발생하는 예측 불가능한 요소들을 포함하여 전기적 및 기계적 스트레스에 견딜 수 있도록 특수하게 제작하고, 시험 중 일정한 출력 전압과 전류를 유지할 수 있으며, 시험 완료 후 다음 시험을 시작할 수 있도록 시험 전의 정상 상태로 신속히 복귀하는 특성을 갖는다.

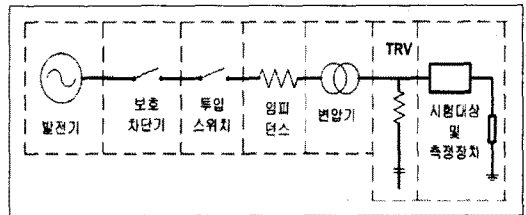


그림 6 대전력 시험 설비 개요  
Fig. 6. Outline of high power testing facilities

보호 차단기는 대전력 시험 시 시험의 종료, 실패 또는 안전상의 필요한 경우 발전기의 출력을 시험 회로로부터 신속히 분리하기 위한 차단기로서 대전력을 이상 없이 차단하여 발전기 및 시험 설비를 보호하며, 저전압 소전류에서 고전압 대전류까지 모든 시험 범위의 대전력에 대한 확실한 차단 성능을 갖는 것이 중요하므로 차단 성능이 우수한 가스 차단기를 사용하며, 발전기 출력을 시험 회로에서 분리하여야 하므로 발전기 출력 측에 설치한다.

투입 스위치는 발전기의 출력을 시험회로에 인가하여 시험을 시작하는 스위치로서 실제 계통의 모의 및 정확한 시험을 위하여, 규격에서 요구되는 초기 파고치 전류를 제어하기 위한 투입 시점의 정밀 제어가 가능하며, 이러한 제어를 통해 시험 전류의 투입 시점을 조정하여 요구되는 파고치 전류를 발생시킬 수 있다.

임피던스는 전력 계통의 임피던스를 모의하여 단락 전류의 크기 및 회로의 역률을 조정하기 위한 전

류 제한 임피던스(CLR & R), 부하를 모의하기 위한 부하 설비, 기기의 극간에 전류 차단 후 인가되는 과도 회복 전압의 크기 및 주파수를 조정하기 위한 TRV(Transient Recovery Voltage)용 설비 등으로 구성된다.

대전력 시험회로의 시험 전압은 발전기 및 변압기를 통하여 조정하는데, 시험 전압이 정하여지면 시험 전류는 임피던스로 조정한다. 임피던스 배치는 고압회로 및 저압 회로의 임피던스를 함께 사용하도록 고압 및 저압 변압기의 1차측에 배치한다.

TRV용 설비는 기기의 스위칭 시 발생하는 회복 전압 상승률(Rate of Rise of Recovery Voltage)과 파고치 전압의 크기를 조정하며, 단락 회로의 인덕턴스 성분에 의한 TRV 주파수 조정용 커패시터와 서지 임피던스에 의한 파고치 전압의 크기 조정용 저항으로 구성된다.

변압기는 발전기의 출력 전압을 고전압으로 변환시키는 고압 변압기, 저전압 대전류로 변환시키는 저압 변압기 등으로 구성된다. 대전력 시험 시 발전기의 출력 전압을 직접 이용하는 시험 방법은 다양한 시험 전압을 조정할 수 없으므로 변압기를 사용하여 시험 전압을 조정한다.

측정 시스템 및 보호 시스템은 시험 회로의 전압 측정 장치, 전류 측정 장치, 측정된 데이터를 분석하는 DAS시스템, 기기의 순차적인 동작 명령을 설정하는 시퀀스 타이머, 측정된 데이터를 분석하여 시험 설비를 보호하는 보호 시스템 등으로 구성된다.

#### 4. 시스템 구성 및 통합형 시험 절차에 의한 시험 결과

600[MVA] 대전력 시험 설비를 이용하여 ES, IEC 및 IEEE 규격에 규정된 시험 항목 중 단시간 전류 시험, 부하 전류 개폐 시험, 여자 전류 개폐 시험, 충전 전류 개폐 시험 및 루프 전류 개폐 시험을 통합형 시험방법에 의하여 시험을 실시하였다.

그림 7은 600[MVA]급 대전력 시험설비의 구성도이다.

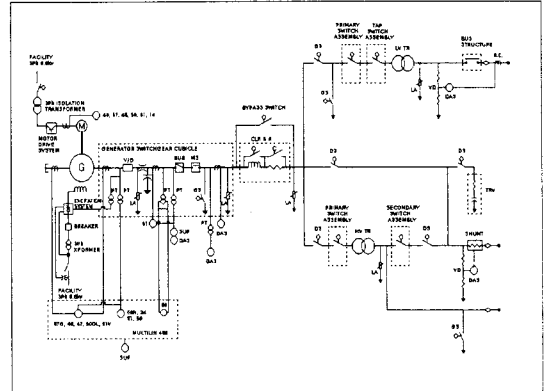


그림 7. 대전력 시험 설비 구성도  
Fig. 7. Diagram of high power testing facilities

표 2. 600(MVA) 대전력 시험 설비 시험 용량  
Table 2. Test capacity of 600(MVA) high power testing facilities

시험 항목	시험 용량
고압 차단 시험	3상 7.2[kV] 25[kA] 이하
저압 차단 시험	3상 220[V] 200[kA] 1[s] 이하
	3상 440[V] 100[kA] 1[s] 이하
	3상 600[V] 100[kA] 1[s] 이하
부하개폐 시험	3상 25.8[kV] 900[A] 이하
	3상 660[V] 4,000[A] 이하
변압기 단락 강도 시험	3상 22.9[kV] 2,000[kVA] 이하
단시간 전류 시험	3상 200[kA] 1[s] 이하

이 설비의 주요 특성은 다음과 같다.

- ◇ 시험 용량
- ◇ 발전기 : 3상 600[MVA] at 3 cycle
- ◇ 보호 차단기 : 3상 15[kV] 63[kA]
- ◇ 투입 스위치 : 단상 24[kV] 80[kA] ±0.2[ms]
- ◇ 고압 변압기 : 단상 100[MVA] 12.5/15.5[kV]
- ◇ 저압 변압기 : 단상 19.636[MVA]  
19.636-8.9-7.2[kV] / 600[V]
- ◇ 임피던스  
CLR & R : CLR 3.531[mΩ]~3.612[Ω]  
R 1.3[mΩ]~1.171[Ω]



고압 부하 : L 1.2~2,454.4[Ω]  
 R 0.75~2 094[Ω]  
 C 0.252~92.104[μF]  
 TRV : R 3.8~3 191[Ω]  
 C 0.000 7~1.17[μF]

◇ 측정 장치 : 변성기 등

#### 4.1 단시간 전류 시험

그림 8은 단시간 전류 시험결과이다. 3상 12.5[kA] 1[s]의 시험을 실시하였을 때, 주파수, 실효치 전류, 파고치 전류,  $I^2t$ , 통전 시간은 다음과 같다.

- ◇ 주파수 : 60[Hz]
- ◇ 실효치 전류 : 12.5[kA](3상 평균)
- ◇ 파고치 전류 : 32.8[kAp](R상)
- ◇  $I^2t$  : 159.4  $MA^2s$
- ◇ 통전 시간 : 1.0[s]
- ◇ 가스압 : 제조자의 최소 보증 압력

2장의 시험방법에 따라 시험하였으며, 시험 후에 가스압 확인(변화 없을 것), 주회로 저항 변화(20[%] 미만), 시료 파손 여부 확인하여 모든 규격에 부합하는 시험 결과를 얻었다.

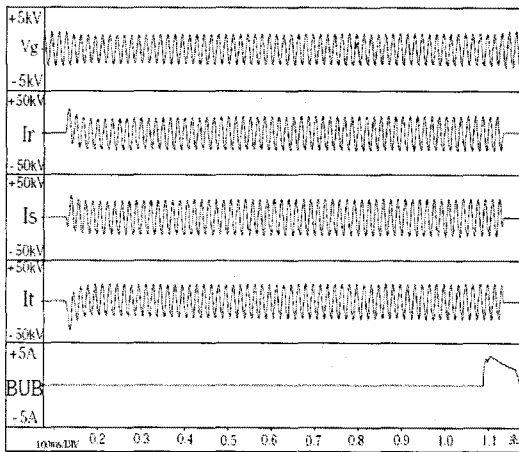


그림 8. 단시간 전류 시험 파형(Vg : 발전기 전압, Ir, Is, It : 시험 전류, BUB : 보호차단기 동작신호)  
 Fig. 8. Experiment waveform of short time current

#### 4.2 부하 전류 개폐 시험

그림 9는 부하 전류 개폐 시험결과이다. 3상 25.8 [kV] 600[A]의 시험을 실시하였을 때 시험 주파수, 회복 전압, 부하 전류는 다음과 같다.

- ◇ 주파수 : 60[Hz]
- ◇ 회복 전압 : 25.9[kV](3상 평균)
- ◇ 부하 전류 : 607[A](3상 평균)
- ◇ 전원 회로 조건(Calibration 데이터)  
 임피던스 = 15[%], 역률 = 0.18  
 TRV :  $U_c = 44.2[kV]$ ,  $t_3 = 88[\mu s]$
- ◇ 부하 회로 조건 : 역률 = 0.7
- ◇ 개폐 횟수 및 시험 간격 : 100회, 3분

2장의 시험방법에 따라 시험하였으며, 시험 후에 가스압 확인(변화 없을 것), 시료 파손 여부 확인하여 모든 규격에 부합하는 시험 결과를 얻었다.

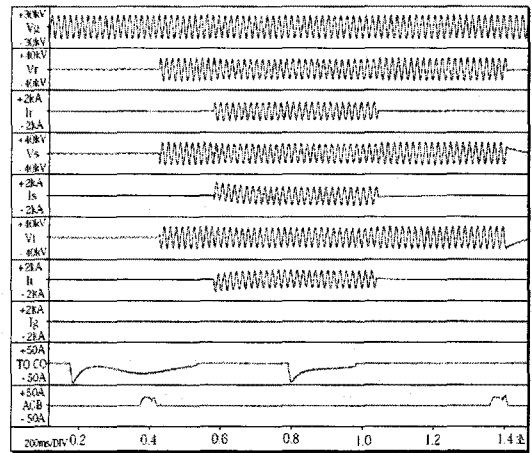


그림 9. 부하전류 개폐 시험 파형(Vg : 발전기 전압, Vr, Vs, Vt : 시험 전압, Ir, Is, It : 부하 전류, Ig : 지락 전류, TO CO : 시료 동작 신호, ACB : 보호 차단기 동작 신호)  
 Fig. 9. Experiment waveform of active load current test

#### 4.3 여자 전류 개폐 시험

그림 10은 여자 전류 개폐 시험결과이다. 3상 25.8

[kV] 21[A]의 시험을 실시하였을 때 시험 주파수, 회복 전압, 여자 전류는 다음과 같다.

- ◇ 주파수 : 60[Hz]
- ◇ 회복 전압 : 25.9[kV](3상 평균)
- ◇ 여자 전류 : 21.2[A](3상 평균)
- ◇ 부하 회로 : 공심 리액터로 구성
- ◇ 개폐 횟수 및 시험 간격 : 10회, 3분

2장의 시험방법에 따라 시험하였으며, 시험 후에 가스압 확인(변화 없을 것), 시료 파손 여부 확인하여 모든 규격에 부합하는 시험 결과를 얻었다.

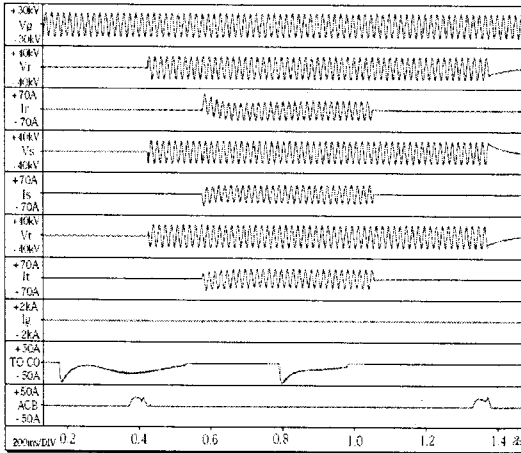


그림 10. 여자전류 개폐 시험 파형(Vg : 발전기 전압, Vr, Vs, Vt : 시험 전압, Ir, Is, It : 여자 전류, Ig : 지락 전류, TO CO : 시료 동작 신호, ACB : 보호 차단기 동작 신호)

Fig. 10. Experiment waveform of magnetizing current test

#### 4.4 충전 전류 개폐 시험

그림 11은 충전전류 개폐 시험결과이다. 3상 25.8 [kV] 25[A]의 시험을 실시하였을 때 시험 주파수, 회복 전압, 충전 전류는 다음과 같다.

- ◇ 주파수 : 60[Hz]
- ◇ 회복 전압 : 25.9[kV](3상 평균)
- ◇ 충전 전류 : 25.8[A](3상 평균)

◇ 전원 회로 조건(Calibration 데이터)

임피던스 = 15[%], 역률 = 0.18

TRV :  $U_c = 44.2[kV]$ ,  $t_3 = 88[\mu s]$

◇ 재점호 발생유무 : 무

◇ 개폐 횟수 및 시험 간격 : 10회, 3분

2장의 시험방법에 따라 시험하였으며, 시험 중에 투입시 돌입 전류와 차단시 절연 회복 전압 및 재점호 특성을 검증하고, 시험 후 가스압 확인(변화 없을 것), 시료 파손 여부 확인하여 모든 규격에 부합하는 시험 결과를 얻었다.

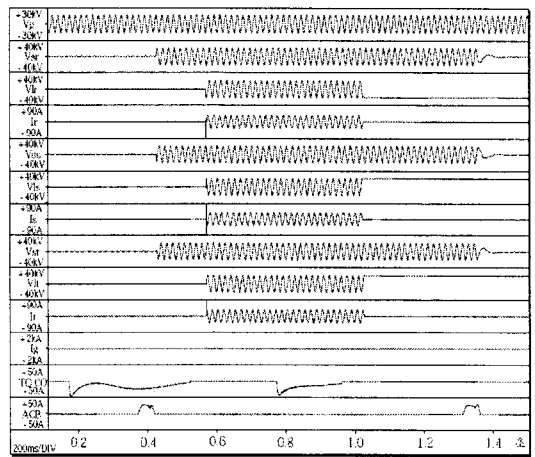


그림 11. 충전 전류 개폐 시험 파형(Vg : 발전기 전압, Vsr, Vss, Vst : 전원측 전압, Vlr, Vls, Vlt : 회복 전압, Ir, Is, It : 충전 전류, Ig : 지락 전류, TO CO : 시료 동작 신호, ACB : 보호 차단기 동작 신호)

Fig. 11. Experiment waveform of capacitive current test

#### 4.5 루프 전류 개폐 시험

그림 12는 루프 전류 개폐 시험결과이다. 3상 5.16[kV] 600[A]의 시험을 실시하였을 때 시험 주파수, 회복 전압, 루프 전류는 다음과 같다.

- ◇ 주파수 : 60[Hz]
- ◇ 회복 전압 : 5.2[kV](3상 평균)
- ◇ 루프 전류 : 612.7[A](3상 평균)
- ◇ 전원 회로 조건(Calibration 데이터)  
역률 = 0.28

$$TRV : U_c = 9.0[kV], t_3 = 247.1[\mu s]$$

◇ 개폐 횟수 및 시험 간격 : 20회, 3분

2장의 시험방법에 따라 시험하였으며, 시험 후에 가스압 확인(변화 없을 것), 시료 파손 여부 확인하여 모든 규격에 부합하는 시험 결과를 얻었다.

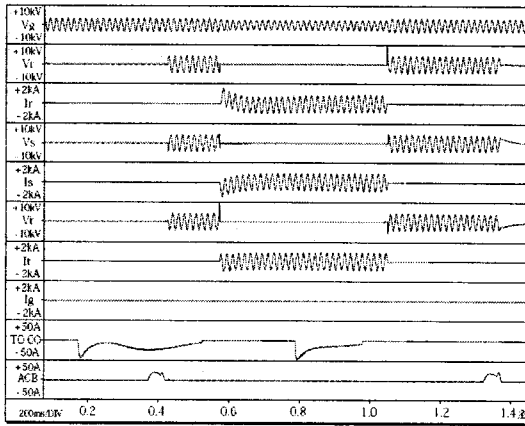


그림 12. 루프 전류 개폐 시험 파형(Vg : 발전기 전압, Vr, Vs, Vt : 시험 전압, Ir, Is, It : 루프 전류, Ig : 지락 전류, TO CO : 시료 동작 신호, ACB : 보호 차단기 동작 신호)

Fig. 12. Experiment waveform of closed loop current test

## 5. 결 론

본 논문에서는 국내 배전 계통에서 널리 사용되는 특고압용 기기 중에서 배전용으로 가장 많이 사용하는 25.8[kV] 가스 절연 부하 개폐기(지중용)에 대하여 국내 및 국제 규격에 근거하여 대전력 시험의 목적 및 방법을 분석 연구하여 최적의 시험 절차를 제시하였다. 국내에서 개폐기에 적용되는 규격은 ES 5925-0002(25.8[kV] 가스 절연 부하 개폐기(지중용))[1]이나, 실제 시험시 적용하는 규격은 IEC 60265-1[2], IEC 62271-1[3] 및 IEEE C 37.74[4]이며, 각 규격에 시험 항목별 시험조건 등이 상세하게 규정되지 않아 각 시험 기관에서 개폐기에 대한 시험을 실시할 때, 각 시험 기관별로 규격의 해석을 달리하여 규격의 의도와 달리 시험하는 경우가 발생할 수 있으며, 이로 인하여 부정확하게 성능 평가가 이

루어져, 제작 회사에서는 과설계나 오설계가 될 수 있다. 본 논문에서는 시험의 목적을 명확히 하고 규격에 규정되지 않는 시험 절차를 제시하여, 각 시험 기관에서 시험을 실시할 때 시험 방법은 설비의 여건에 따라 달리 실시하더라도, 동일한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 이러한 시험 절차를 600[MVA]급 대전력 시험 설비의 운영에 적용하여 개폐기에 대한 시험을 실시한 결과 규격의 모든 요건을 만족하는 시험을 실시할 수 있었다.

## References

- (1) ES 5925-0002, "25.8(kV) 가스 절연 부하 개폐기(지중용)" 한국전력공사, 2007.
- (2) IEC 60265-1, "High-voltage switches - Part 1: Switches for rated voltages above 1(kV) and less than 52(kV)", IEC, 1998.
- (3) IEC 62271-1, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 1 : Common specifications", IEC, 2007.
- (4) IEEE C 37.74, "IEEE standard requirements for subsurface, vault, and pad-mounted load-interrupter switchgear and fused load-interrupter switchgear for alternating current systems up to 38(kV)", IEEE, 2004.
- (5) Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Wiley-Interscience, 1990.
- (6) Lou van der Sluis, "Transients in Power Systems", John Wiley & Sons, 2001.
- (7) Dieter Kind, Kurt Feser, "High-Voltage Test Techniques" Newnes, 2001.
- (8) C. H. Flurschheim, "Power circuit breaker - Theory and design" Peter Peregrinus Ltd., 1985.

## ◇ 저자소개 ◇

### 정흥수 (鄭興洙)

1967년 5월 26일생. 1991년 전남대학교 졸업. 2008년 인천대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전기연구원.

### 김민영 (金敏泳)

1964년 4월 4일생. 2004년 인천대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 박사과정 수료. 2008년~현재 유한대학 겸임교수. 현 에이치디전력기술단 대표이사.

### 김준석 (金峻奭)

1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1997년~현재 인천대학교 전기공학과 재직.

전 공 : 전력전자  
관심분야 : 전력변환기 및 전동기제어