

진상소전류시험용 Capacitor Load Bank 설계

노창일, 나대열, 김선구, 정홍수, 김원만, 이동준  
한국전기연구원

Design of Capacitor Load Bank for Capacitive Current Switching Tests

Chang-il Roh, Dae-Ryeol La, Sun-Koo Kim, Heung-Soo Jung, Won-Man Kim, Dong-Jun Lee  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - Capacitive current switching test for circuit breaker and load breaker switch requires special attention because, after current interruption, the capacitive load contains an electrical charge and can cause dielectric restrike and re-ignition of the switching devices. therefore dielectric strength of capacitor load bank shall be able to withstand 4Vt (Vt : test voltage) and charging voltage discharged within 1 min.

In this paper presents both characteristic of capacitive current switching tests and design of capacitor load bank.

1. 서 론

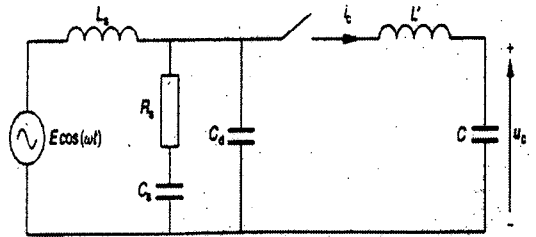
개폐기, 차단기가 콘덴서, 케이블등의 용량성 부하에 대한 투입 및 차단능력을 검증하기 위하여 실시하는 진상소전류시험은 용량성 부하( $1/\omega C \gg \omega L$ )를 사용하여 시험전류가 시험전압보다 전기각으로  $90^\circ$  진상이다. 투입시는 급격한 충전전류로 인한 돌입전류가 발생하며, 진상소전류로 차단시 부하측에는 시험전압의 파고치로 콘덴서는 충전된 상태의 충전전압으로 되며 전원측 전압은 계통전압으로 복구되어 일시적으로 회복되지만 과도전압이 발생된다. 과도전압의 크기와 주파수는 계통에 존재하는 회로정수에 의하여 결정되며 부하측 전압은 페란티효과(ferranti effect)에 의해 전원측 전압보다 다소 상승하여 과도기간 0.5cycle 후 극간전압은 시험전압의 2배전압(콘덴서 충전전압 + 시험전압)이 발생하며 재발호(re-ignition) 및 재점호(restrike)가 발생한다. 이와같이 진상소전류시험은 투입시 돌입전류와 차단시 절연회복전압 및 재점호 전류에 대한 특성을 검증하기 위한 시험이다. 진상소전류시험을 실시하기 위한 capacitor load bank는 시험전압에 대하여 최대 4배의 절연내력을 보유하고 충전전압이 기준시간(1분 이내)에 방전하여 capacitor가 과충전되지 않도록 하여야 하며 시험전류가 사용용도에 따라 1.5A, 4.8A, 7.5A, 10A, 16A, 25A 50A 로 다양하기 때문에 회로결선의 편리성을 고려한 다양한 설계기법이 요구된다.

2. 본 론

2.1 진상소전류시험

전력시스템은 가공선로, 배전선로의 케이블망, 전압조정 및 역률개선용 capacitor bank의 용량성부하로 구성 되어있다. 가공선로의 용량성 전류는 10A이하이며, 배전선로의 케이블망의 전류는 수십 A, capacitor bank의 해당전류는 수백 A가 된다. 이러한 용량성부하의 시험은 전류차단 후 전기적인 충전이 유지된 상태로 switch에 재발호(re-ignition)를 발생시키기 때문에 주의가 요망된다. 용량성 부하회로에 대하여 간단히 설명하면 그림1과 같이 구성할 수 있다. 여기서  $L_s$ 는 전원측 인덕턴스(발전기 및 변압기인덕턴스),  $R_s$ 와  $C_s$ 는 전원측 TRV,

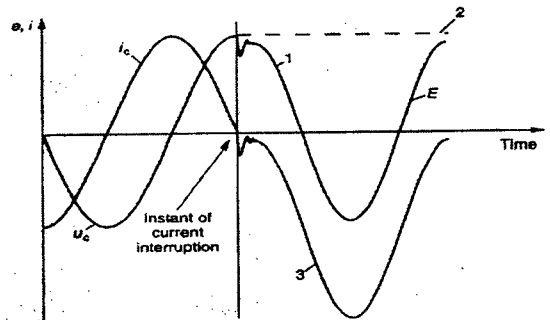
표류인덕턴스  $L'$ , capacitor load bank C로 되어 있으며, 여기서  $L_s \gg L'$ ,  $\omega L_s \ll \frac{1}{\omega C}$ , 회로전류는 전원전압보다  $90^\circ$ 진상이다.



(그림 1. 단상 용량성 부하회로)

그림1의 용량성 부하회로에서 capacitor는 그림2에서 표시된 내용과 같이 전류의 차단순간 전원전압의 파고치로 충전되어지며 0.5 cycle후 전원전압은 극성이 바뀌고 switch 양극간의 전압은 전원전압 파고치의 2배로 된다. 투입시 switch 전압은 전원전압보다 크며 전압차  $U=U_c-E$ 로 나타내며 이를 페란티상승(ferranti rise)라하며 유도성 전원으로 인한 capacitor 효과로 볼 수 있으며 switch 인가전압을 증가시키는 요인이 되며 다음식으로 나타낼 수 있다.

주파수:  $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$ , 전압증가율:  $\frac{dU}{dT} = Z_s \frac{diC}{dt}$ , 여기서  $Z_s = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$



1:전원전압, 2:capacitor 전압, 3: 차단기 극간전압

(그림 2. 용량성 부하 차단시험 전압 전류 특성)

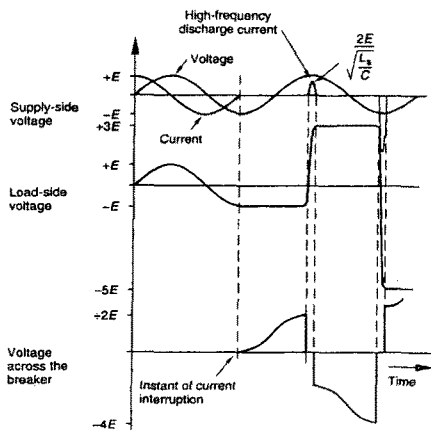
switch가 비정상적으로 재발호 및 재점호가 발생하는 현상에 대하여 설명하면 다음과 같다.

진상소전류 차단시험 중 원활한 차단을 위하여 접점간의 최소이격거리 및 최소 arcing time을 고려해야만 한다. 최소이격거리는 접점이 완전히 이격된 거리가 아닌 지점에서 최대회복전압이 인가되기 때문에 절연과파현상이 발생한다. 재발호(re-ignition)는 capacitor의 재발호 arc방전, 전원측 인덕턴스 $L_s$ 와 부하측  $L'$ 으로도 발생할

수도 있다. 이에 따른 주파수 =  $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}}$ ,  $L_s \gg L'$

$I = \sqrt{\frac{2E}{L_s C}}$  가 되며 전원측 인덕턴스  $L_s$ 가 적으면 주파수는 커지고 과도전류의 크기는 커진다. 그림3의 내용과 같이 재발호가 발생되면 capacitor전압은  $-E$ 가 되며 전류 첫 번째 영점에서의 전압은  $+3E$ 가 되며 전류 차단후 극간회복전압은  $4E$ 가 된다.(전원전압: $E$ , 충전전압: $+3E$ ) 만약 switch의 arcing 접점의 분리시 재발호 현상이 또 다시 발생된다면 capacitor의 충전전압은  $5E$ 로 되고 극간회복전압은  $6E$ 로 되어서 고전압이 차단부로 유기되고 차단부 내, 외부로 삼락현상이 발생하며 절연과파 및 단락현상이 발생하여 제 기능을 수행하지 못한다.

용량성 부하에 대하여 switch를 투입시에는 접점이 접촉시에 인가전압이 가장커서 절연매질에 절연과파 현상이 일어날 수 있다. 이 절연과파현상을 pre-strike라하며 이는 절연매질 내부에 급준파형을 발생시키는 plasma경로를 만들어서 절연과파현상을 발생시킨다.



(그림 3. 용량성회로 차단 재점호 발생시 회로전압)

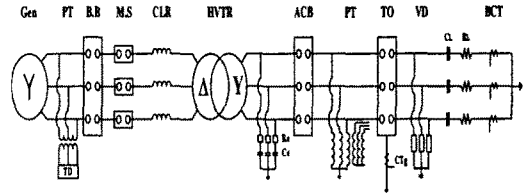
## 2.2. Capacitor Load Bank 설계

2.1항의 진상소전류시험의 이론에 근거하여 system의 절연 level를 시험품의 시험전압에 대하여 4배의 절연내력을 가지도록 설계하였으며 각 구성품 특성, 회로구성, 시험결과에 대한 내용은 다음과 같다.

### 2.2.1 시험정격

	전압(kV)	전류(A)	정전용량(#)
#1	25.8	50	9.4
#2		25	4.7
#3		16	3.0
#4		10	1.9
#5		7.5	1.4
#6		4.8	0.9
#7		1.5	0.3

### 2.2.2 시험회로



(그림 4. 시험회로)

### 2.2.3 각 구성품의 특성

#### 1) capacitor

##### - 정격

구분	용량	3#	1#
정격전압(kV)		25.8	25.8
용량(kvar)		251	83.6
정격전류(A)		16.9	5.6
고유주파수(kHz)		>30kHz	>30kHz
상(phase)		단상	단상

##### - 성능

- ① 정전용량 tolerance:  $-0, +10\%$ 이내
- ② 절연 level : 150BIL
- ③ 절연성능
  - 극간 :  $32kV_{ac}/10s$
  - 대지간 :  $50kV_{ac}/10s$
- ④ 최대허용전압 : 정격전압의  $110\%$
- ⑤ 최대허용전류 : 정격전류의  $130\%$
- ⑥ 기타시험은 IEC60831-1의 시험항목에 준하여 실시

#### 2) 잔류전하방전용 외부저항

- 용량 :  $200\mu 3kW$
- 2분 이내에 단자전압이  $50V$ 이하로 방전
- 계산식 : 잔류전압  $V_r = \sqrt{2} V_i \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

	전류(A)	정전용량 (#)	방전시간 (s)	1s 경과 후 잔류전압율(%)
#1	50	9.4	11.4	58.8
#2	25	4.7	5.7	34.5
#3	16	3.0	3.6	18.9
#4	10	1.9	2.3	7.2
#5	7.5	1.4	1.7	2.8
#6	4.8	0.9	1.1	0.4
#7	1.5	0.3	0.4	0.0

#### 3) 회로절체 switch

- 정격  $25.8kV 200A$
- 1P 공기조작방식, 3로 switch
- 절연계급 :  $60kV_{ac}/1분, 150 BIL$

#### 4) 회로결선용부품

- clamp(+, I type), blade

### 2.2.4 capacitor bank 설치 방법

그림4 시험회로, 그림5 설치외형도 및 그림6 결선도를 기준으로 다음과 같이 설치한다.

1) 각 상의 bank는 16개의 capacitor로 구성되어 있으며 각 bank는 2개의 단(story)으로 구성되어 아래의 시험조건을 만족할 수 있도록 capacitor를 직병렬 결선을 하여 절연성능 및 시험전류용량에 적합하게 system을 구성한다.

시험전류(A)	정전용량( $\mu$ )	capacitor 결선
#1	50	$\{3\#*6+1\#*1\}*2series$
#2	25	$\{3\#*3+1\#*1\}*2series$
#3	16	$\{3\#*2\}*2series$
#4	10	$\{3\#*1+1\#*1\}*2series$
#5	7.5	$\{3\#*1\}*2series$
#6	4.8	$\{1\#*2\}*2series$
#7	1.5	$\{1\#*1\}*3series$

### 3. 결 론

차단기, 개폐기의 진상소전류시험을 실시하기 위한 부하설비인 capacitor load bank는 진상소전류시험중 시험품의 투입 및 차단시 발생할 수 있는 절연과과현상이 시험설비에 영향을 미치기 때문에 시험설비 보호를 위한 특성 및 회로조건에 적합한 정수를 설계에 반영하였다.

절연내력의 확보를 위하여 시험설비의 면적과 높이가 과다 소요되어 한정된 공간 내에서의 설치에 어려움이 있었으며 특히 설비 주 구성품인 capacitor의 체적이 크고 대당 무게가 약 80kg인 고 중량물 관계로 설치에 문제점이 있었다. 추후 해결해야할 과제는 내구성, 절연계급, 성능을 보유한 최적의 capacitor를 설계하여 system을 compact화 하는데 있다.

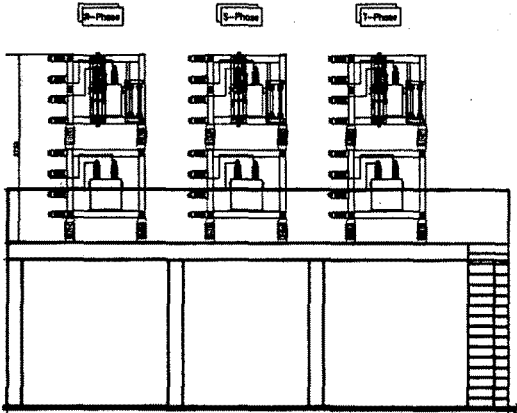
2)절연은 기준전압 상용주파내전압 60kVac./1min, 충격내전압 150BIL의 절연내력을 보유하여야 하며 지지구조물 및 지지애자(TR-208)는 하중에 견딜 수 있는 구조로 제작한다. 특히 지지애자(TR-208)는 base와 단(story)사이에 배치하여 시험전압에 대하여 4배의 절연내력을 가질 수 있도록 설치한다.

3)시험중 인체 및 설비보호를 위한 방전저항을 설치하여 회로절체 switch를 방전저항으로 연결 시 회로의 충전전하를 방전시킬 수 있도록 한다.

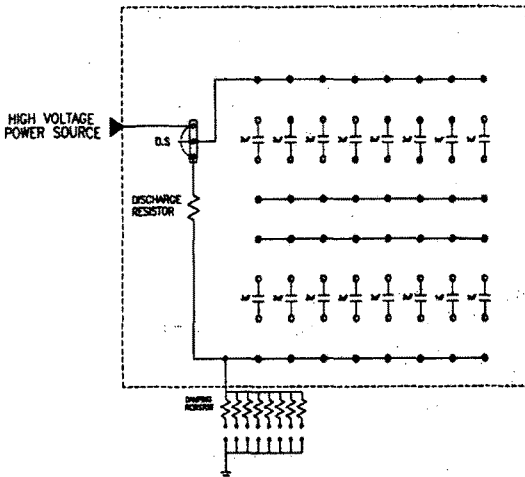
4)공기조작용 회로절체 switch를 설치하여 control room에서 원방조작이 가능하도록 구성하여 시험의 안전 및 편리성을 도모한다.

### [참 고 문 헌]

- [1]Allan Greenwood "Electrical Transients in Power System" pp100-113, 132-139, Second Edition(1990)
- [2]Lou van der Sluis"Transient in power Systems" pp83-95 (2001)
- [3]Ruben D. Garzon "High Voltage Circuit Breakers"(1996)
- [4]IEC 60265-1 "High Voltage Switches" IEC SC-17A(1998-01)



(그림 5. 설치의형도)



(그림 6. 회로결선도)