

## SC 전용 보호계전기 개발

정재기, 윤시영, 김석중, 김근규\*  
한빛EDS(주), \*한국전력공사

### Research for Protection Relay of Static Condenser Bank

J.K.Jeong, S.Y.Yun, S.J.Kim, K.G.Kim\*  
Hanbiteds Co., Ltd., \*KEPCO

**Abstract** - SC(Static Condenser) in KEPCO is used in voltage control and power factor compensation. Currently KEPCO uses SC to 154kV 50MVA and 23kV 5MVA. It is not important in old days, because a SC bank accident has no effect on power system. But we are interested in the SC bank for power quality in these days. The SC Bank has a reactor and a condenser using series connection. It is operated in critical point for resonance circuit normally. Therefore the SC bank has a small reliability against other power instruments. If a 4th harmonic frequency as a resonance frequency is supplied in system, the condenser is damaged because of a resonance current. And a trip and a closing for CB(Circuit Breaker) in many times will have a big influence of SC bank destruction. General OCR(Over Current Relay) observing SC bank is not useful for this protection. We think that protection relay must be have the SC bank characteristics. A solution for this problem is active power, resonance frequency and impedance.

### 1. 서 론

산업에서 정밀기기와 정보기기의 사용이 증가되면서 전기사업자가 공급하는 전기품질의 중요성이 강조되고 있다. 전기품질을 대표하는 두 가지의 요소는 변동률이 적은 전압과 일정 주파수이다. 주파수는 발전기에서 발생하는 전기에너지와 전력수요와의 평형과 직접적인 관련이 있다. 순간적으로 수요가 줄면 주파수는 증가하고, 증가하면 감소하게 된다. 반면 전압은 에너지와의 관계도 중요한 제어요소가 되나 무효전력과도 직접적인 관계가 있다.

우리나라 전력계통의 발전단은 대부분 남부지역에 집중되어 있고, 부하는 수도권에 집중되어 있다. 그러므로 전력계통의 전압제어에 어려운 기술적 문제점이 존재하게 된다. 이러한 안정적인 전압을 수용가에게 공급하려는 목적으로 무효전력을 제어하여 전압을 안정화하는 장치인 전력용 콘덴서를 두어 역률을 개선하는 목적을 달성하고 또한 콘덴서 용량을 제어함으로서 변동률이 적은 전압의 공급을 추구하고 있다. 이 때 콘덴서의 용량의 제어는 주로 콘덴서 뱅크 전단의 차단기의 투입 혹은 차단함으로서 전력계통과의 병입 및 차단을 수행하고 있다. 그러므로 당연히 일반적인 차단기보다 전력용 콘덴서에 연결된 차단기의 동작횟수가 많다. 1년 동안의 콘덴서 뱅크차단기의 동작횟수는 일반계통에 사용되는 차단기가 수십 년 동안 사용하는 횟수보다 많다.

콘덴서는 회로성격상 고조파에서 임피던스가 작게 작용하게 되므로 전력계통에서 고조파 전압 혹은 써지성 전압이 유기되어 전력용 콘덴서에 유입되면 그에 상응하는 대전류가 흘러 콘덴서를 소손 혹은 열화시키는 원인

이 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 콘덴서와 직렬로 리액터를 설치하여 콘덴서에 흐를 수 있는 고조파성 혹은 써지성 전류를 억제하는 기능을 담당토록 하고 있다. 이러한 콘덴서와 직렬리액터를 포함한 전력용 콘덴서를 콘덴서 뱅크라 칭한다.

결국 콘덴서 뱅크는 콘덴서와 리액터의 직렬회로로 작용한다. 콘덴서를 보호하기 위해 콘덴서와 직렬로 리액터를 설치하였지만 이것은 전기회로적으로 직렬공진회로로 작용하게 된다. 직렬공진회로에 공진주파수에 해당하는 전압이 인가되면 이론상으로는 무한대의 전류가 흐를 수 있으므로 콘덴서 뱅크는 소손된다. 그러므로 이러한 점을 감안하여 리액터의 용량을 콘덴서 용량의 6%로 하여 공진주파수를 상용주파수 기준 제4고조파에 해당하는 240[Hz] 근처로 설계하고 있다. 전력계통의 성격상 우수고조파의 발생이 용이하지 않은 점을 이용하고 있다.

최근에 콘덴서 뱅크의 운전에서 리액터가 소손되는 경우가 있어, 본 논문에서는 이러한 현상의 원인을 규명하고, 대처방안을 강구하는데 목적을 두고 있다. 우선 이론적으로 콘덴서뱅크를 모의하여 현상을 구명하고, 차단기의 투입, 차단시 발생하는 차단써지를 현장실험을 통해 실측한 후 이를 분석한다. 콘덴서 뱅크에 대한 이론적 현상규명과 현장실태결과를 종합하여 대책을 강구하고 대책 후의 현장실태를 통해 대책의 실효성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 콘덴서 뱅크의 구조와 전기 회로적 접근

콘덴서 뱅크는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 역률보상과 무효전력을 공급하기 위한 콘덴서를 전력계통에 연계시킴으로서 그 역할을 수행한다. 콘덴서가 기본적으로 고주파와 써지에 대해서 임피던스가 아주 작은 값으로 작용하므로 계통에서 발생하는 써지와 고조파가 콘덴서에 유입되면 상당히 큰 전류가 흐르게 되고 이 전류는 콘덴서를 소손 혹은 열화시키는 원인이 된다.

그림 1에서 R은 콘덴서와 직렬리액터에 포함된 직렬저항성분을 등가저항으로 나타낸 것이고 실제적으로는 1[Ω] 이하의 작은 값으로 작용한다. CB(Circuit Breaker)는 콘덴서 뱅크를 계통과 연결, 차단하기 위한 역할을 수행한다. 그림 1에서 RN은 차단기 동작 시 발생하는 써지의 크기를 순간적으로 억제하는 역할을 수행하는 저항으로 중성점 저항기라고 부른다. 중성점 저항기는 평상시에 콘덴서 뱅크가 평형상태인 경우, 상용주파기준 3상 전류의 합이 '0'이므로 60[Hz]의 성분전류는 1[A]이하의 작은 값이 흐르는 것이 보통이다. 그러나 상용주파수 기준 3의 배수 고조파는 3상 벡터합이 대수합이 되므로 실제 운전 중에는 제3고조파 성분이 더 큰 값으로 작용한다. 그러나 차단기의 투입 시는 차단기의 3상 투입시간 차이 동안은 최대값 기준 1000[A] 이상의 큰 전류가 60[Hz] 기준 수 사이클 동안 흐른다.

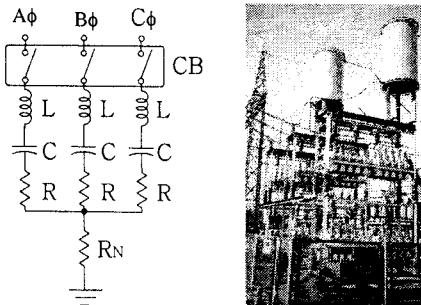


그림 1. 콘덴서 백크의 전기 등가회로와 사진

콘덴서를 보호하기 위해 연결한 직렬리액터가 콘덴서와 직렬로 연결되고, 아주 작은 값의 저항이 존재하므로 실제 콘덴서 백크의 회로는 L-C 직렬공진회로처럼 작용한다. 그러므로 직렬공진회로에는 공진주파수가 존재하게 되고 L과 C의 미소변화에도 공진주파수가 변화하게 된다. 일반적으로 전력계통에서는 우수고조파가 존재할 확률이 적다는 점을 이용하여 우수고조파 근방으로 공진주파수가 되도록 설계한다. 현재 대부분의 콘덴서 백크는 제4고조파 근처에서 공진주파수가 결정되도록 설계하고 있다.

## 2.2 콘덴서 백크의 수학적 모델링

콘덴서 백크의 전기회로적 구성은 기본적으로 R-L-C 직렬회로로 구성된다. 이는 2개 1차 선형미분방정식으로 일반적으로 2차계로 불리는 미분방정식으로 표현된다. 콘덴서 백크회로에서 전원은 전압이므로 전압을 제차항으로 하고 전류를 종속변수, 시간을 독립변수로 하면 식(1)과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{di(t)^2}{dt^2} + a_1 \frac{di(t)}{dt} + a_2 i(t) = v(t) \quad \text{---(1)}$$

식(1)에서 상수  $a_1, a_2$ 는 콘덴서 백크를 구성하고 있는  $R, L, C$  소자로 구성되는 값이다. 실제로 시간과 운도특성에 의해 이러한 소자값은 변화할 수 있다. 여기서는 선형시스템으로 해석하고자 하므로 이러한 소자의 경련변화와 온도변화는 없는 것으로 한다.

식(1)의 미분방정식을 주파수해석을 위해 라플라스변환하면 식(2)와 같은 라플라스방정식이 성립한다. 이때 전압을 입력  $V(s)$ 로, 전류를 출력  $I(s)$ 로 한다.

$$\frac{I(s)}{V(s)} = Y(s) = \frac{S/L}{S^2 + (R/L)S + 1/LC} \quad \text{---(2)}$$

식(2)에서 전달함수  $Y(s)$ 의 차원은 어드미턴스가 되고, 물력선도로 표현하면 그림 2와 같이 표현된다.

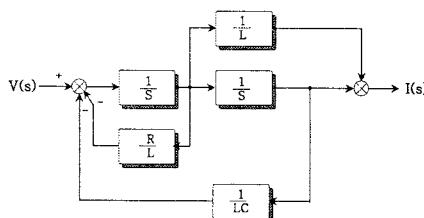


그림 2. 콘덴서 백크의 블록선도 표현

식(2)와 그림 2에서의 표현은 콘덴서 백크가 전형적인 아주 좁은 통과폭을 갖는 밴드패스필터의 식으로 표현된다. 결국 콘덴서 백크는 공진주파수점을 기준점으로 하여 지수적으로 감쇠하는 이득특성을 갖게 된다. 그러므로 콘덴서 백크를 구성하고 있는 소자값이 적은 변화에도 민감하게 동작한다. 특히, 공진주파수가 계통 내에 존재하는 고조파의 영역 내에 있으므로 소자값이 변화하여

공진주파수가 내부에 존재하는 고조파의 주파수와 일치하면 이론상으로 무한대의 전류가 흘러 콘덴서 백크가 소손될 수 있다.

그럼 2와 식(2)를 이용하여 주파수에 대한 응답을 도시하면 그림 3과 같다.

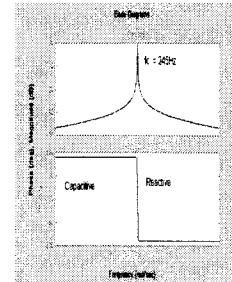
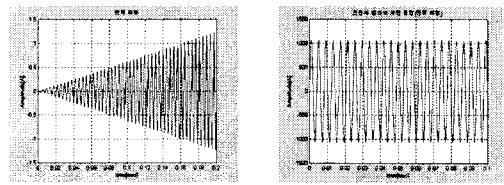


그림 3. 154kV 콘덴서 백크의 주파수 응답특성

그림 3에서 가로축은 이득(dB)과 위상이고 세로축은 각주파수( $\omega$ )이다. 이때 콘덴서 백크의 소자값은  $C=5.257[\mu F]$ 이고  $L=80.25[mH]$ ,  $R=0.1[\Omega]$ 이다. 따라서 공진주파수는  $245[Hz]$ 로 계산된다. 그림 3에서 알 수 있듯이 공진주파수 지점에서 어드미턴스가 커지고 공진주파수 지점에서 위상이 진상에서 지상으로 변화하게 된다. 임피던스는 공진주파수에서 매우 작은 값으로 작용함을 알 수 있다.

## 2.3 콘덴서 백크의 과도상태 응답특성

여기서의 과도상태란 함은 주로 차단기의 투입 시 일어나는 수십 msec 동안의 전류특성으로 한정하고, 콘덴서 백크에 계단전압이 인가된 경우와 공진주파수에 해당하는 전압이 인가된 경우를 해석하고 현상을 명확하게 이해할 수 있도록 하기 위해 저항은 '영'으로 하였다.



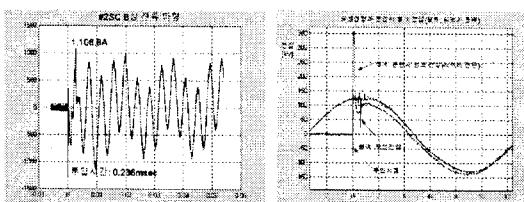
(a) 공진주파수 전류응답      (b) 계단응답  
그림 4. 콘덴서 백크의 응답특성

그림 4의 (a)는 콘덴서 백크에 공진주파수에 해당하는 크기 1[V]의 전압을 인가한 경우의 출력특성 즉 전류파형으로, 연속적으로 전류가 증가한다는 것으로 알 수 있다. 이때 전류의 주파수 성분은 공진주파수이다. 결국 콘덴서 백크에 공진주파수 성분의 전압이 인가되면 공진주파수 성분의 전류가 연속적으로 증가하여 콘덴서 백크는 소손된다.

그림 4의 (b)는 콘덴서 백크의 계단응답을 나타낸 것이다. 154[kV] 정격전압의 경우 변전소에서 161[kV] 정도에서 운용되고 있는 상황과 차단기가 전압의 최대점에서 투입된다고 할 때의 전류응답을 보기위한 것이다. 계산 결과, 크기 1,064[A]이고 공진주파수성분으로 전류가 흐를 것을 알 수 있다. 물론 실제로는 저항성분이 작용하여 서서히 감소하는 형태가 된다. 이러한 응답과 서지응답, 상용주파수응답에 의한 전류의 성분을 합하면 정상적인 차단기형태에서 약 1,400[A] 정도의 과도전류가 콘덴서 백크에 흐른다. 그런데 콘덴서 특성상 차단기의 동작이 빈번하여 접점 등이 마모되어 표면상태가 나빠진 경우 상당히 큰 과도전류가 흐를 수 있다. 결국 차단기에서 발생하는 차단씨지의 영향이 콘덴서 백크의 전류를 결정하는 큰 요인이다.

## 2.3 현장 실측

**2.3.1 콘덴서 뱅크의 투입, 차단 시 투입 써지 측정**  
 콘덴서 뱅크를 계통과 연결하는 차단기의 투입동작과 계통에서 콘덴서 뱅크를 이탈시키는 차단기의 차단동작 시 차단기의 상태에 의해 차단 써지가 발생하게 된다. 그리고 투입동작 시 상용주파수의 전압파형의 투입시점에 따라 차단서지의 크기가 결정된다. 본 연구에서는 차단기가 전압파형의 최고 시점에서 투입될 때까지 현장에서 반복시험을 수행하여 투입 시 전압파형의 최고시점에서 투입될 때의 전류파형을 측정하고 분석하였다. 이때 전압은 161[kV]이고 3상 중 최고시점에서 투입되는 상의 전류파형을 중심으로 설명한다.



(a) SC 투입시 전류파형      (b) 콘덴서 뱅크전압과 모션전압  
 그림 5. 154kV SC 투입시의 전류파형 및 전압파형

그림 5의 (a)는 차단기 투입 시의 전류실측 파형을 나타낸다. 그림 5의 (b)는 차단기의 투입 시 콘덴서 뱅크의 전압파형이다. 콘덴서 뱅크를 계통에 투입할 경우 전류는 1,100[A] 이상, 전압은 350[kV] 이상 측정된다. 투입 시의 전압이 최고점이면 1,000[A] 이상 흐를 수 있고 투입 시 전압파형에서 발생하는 써지에 의해 증가하므로 실측에 의한 결과는 순간적으로 2,000[A]까지 증가한다. 이때의 조건은 차단기 전단에 피뢰기가 설치되어 있는 상태이고 이때 피뢰기가 동작하고, 피뢰기가 동작하면서 전류의 재단현상을 발생시키고 이 급준전류가 리액터와 작용하여 콘덴서 뱅크에 큰 전압을 순간적으로 유기시킨다. 이 전압은 154kV의 BIL전압인 170kV를 초과한다. 그러므로 이 과전압에 의해 리액터의 소손과 열화가 급진적으로 진행될 수 있다고 판단된다.

## 2.3.2 직렬리액터 열화 실험

154kV SC Bank 용 Reactor 4개(정상분:84mH, 소손분:81.6mH, 74mH, 47.5mH - 측정치)에 대해 교체해 가면서 제5고조파 현상을 파악하였다.

►Reactor : Dry-Type air core current limiting Reactor  
 225A/30.254/80.225mH/1531.6kVA  
 SYSTEM: 154kV/60Hz (Haefely Trench)

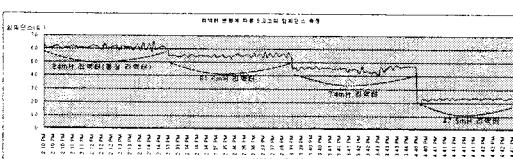


그림 6. 리액터 교체실험에 따른 5고조파 임피던스변화

리액터가 열화될 때는 리액터의 인덕턴스 값이 감소하는 쪽으로 변화하게 된다. 리액터의 열화진행은 5고조파의 전압·전류 측정, 임피던스 변화를 통해 상태를 예측할 수 있으나 60[Hz](기본파)와 제 3고조파 성분은 특정한 경향성이 나타나지 않아 상태를 예측할 수 없다.

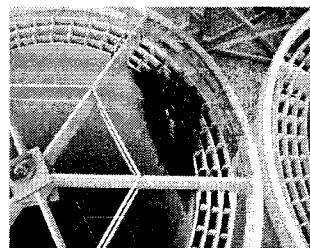


그림 7. 열화된 리액터

최대 허용전류는 정격 전류의 130%로 한다. 단, 이것은 용량의 실측값이 용량의 허용치 범위 내에서 풀리스 측인 것은, 그 분량만큼 다시 과전류의 증가를 인정한다. 고조파가 제 5고조파뿐인 경우를 고려한다면, 콘덴서의 기본파 전류를  $I_1$ , 제5차 고조파전류를  $I_5$ 로 하면

$$\sqrt{I_1^2 + I_5^2} \leq 1.30I_1, \quad I_5 \leq 0.83I_1 \text{ 이 된다. 콘덴서에서 제5차 고조파 전류는 } 83\%(기본파 전류에 대해) \text{ 까지 허용한다. 한편 리액터는 위의 규정과 같이 제5차 고조파 전류는 } 35\%(기본파 전류에 대해서) \text{ 까지만 허용된다.}$$

전원전압에 3.5%이상의 제 5고조파 전압이 함유된 경우에는 직렬 리액터에 흐르는 전류가 허용전류 (제5차 고조파전류 35%) 이상이 되어 직렬 리액터가 소손될 가능성이 있다.

## 3. 결 론

현재 콘덴서 뱅크에서 발생하는 문제점으로 콘덴서 셀의 소손, 리액터의 소손, 중성점 저항의 소손, CT의 소손으로 나타낼 수 있으며 이 중에서 리액터의 소손이 가장 많은 소손율을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 현상을 규명할 수 있는 근거가 되는 과전압 및 과전류의 발생 원인을 분석하고, 실험 및 실측 자료를 콘덴서 뱅크를 보호할 수 있는 계전기의 개발에 이용하였다. 또한 SC Bank 전용 보호계전기에는 기존의 계전기가 가지고 있지 않는 공진주파수 및 유효전력, 고조파 분석을 포함하여 사전에 사고를 감지하여 예방할 수 있도록 하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] "154kV SC Bank 고장 원인분석 및 대책수립", 한국전력공사, 2001.3
- [2] "154kV SC 열화진단 및 계통분석 기술검토 용역", 한국전력공사, 2005.12
- [3] Yasuo Watanabe and Naohiro Hozumi, "Diagnostic Techniques for Electric Power Equipment", T.IEE Japan, Vol. 112-B, No.7, 1992.
- [4] S. Oakbe Nakamoto, "A Study on Deterioration Characteristics of Power Capacitors with Oil-impregnated Paper", The Transactions of The Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.115-A, No.6, pp.485-491, 1995.
- [5] M. Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsu, "Time-frequence analysis of E-M signals emitted from a partial discharge occurring in GIS using wavelet transform", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.4, pp.786-798, 1997
- [6] M.W. Montgomery, P. Rastgoufard, "Instrumentation and data acquisition techniques for development of predictive maintainance of load tap changers", Symposium on System Theory, pp. 220-224, 1998