

154kV SC Bank의 썬지 응답특성과 썬지전류 저감에 관한 연구

*허용호, *최명국, *이상일, **정재기
*한국전력공사, **한빛EDS(주)

Study on Surge Response Characteristics and Surge Current Reduction for 154kV Shunt Capacitor Bank

*Yong Ho Hur, *Myung Kuk Choi, *Sang Il Lee, **Jea Kee Jung
*Korea Electric Power Co., **HANBITEDS Co.Ltd

요약

우리나라 전력계통의 특성상 남부의 전원단과 수도권
의 부하중심단과의 거리가 존재하여 안정적인 계통전
압제어에 어려움이 존재한다. 이러한 계통전압제어의
어려움을 극복하기 위해 154kV 계통에 SC Bank를 설
치 운용중에 있다. 운전 환경상 차단기의 투입과 차단
이 잦은 154kV SC Bank에 리액터가 소손되는 등의
문제점이 발생하고 있어 154kV SC Bank의 썬지응답
특성을 규명하고 차단기의 투입차단시 발생하는 썬지전
류의 저감에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 154kV SC Bank를 대상으로하여 현
장조사와 현장실증을 통해 썬지전류를 측정하고, 모의
를 통해 썬지응답특성을 규명하였다. 그 결과, 차단기의
점점의 상태와 피뢰기의 동작여부에 의해 썬지전류가
크게 영향을 받는다는 점을 확인하였다.

154kV SV Bank를 대상으로한 현장시험과 썬지응
답특성의 분석결과를 기본으로 하여 피뢰기의 영향과
차단기의 투입차단 영향을 최소화하는 방안으로 피뢰기
의 분리운전으로 전류제한현상을 막아 급준썬지전류의
발생을 억제하고 저항투압방식의 차단기로 썬지전류를
30%이하로 억제할 수 있음을 실증과 모의로 확인하였
다.

1. 서론

산업에서 정밀기기와 정보기기의 사용이 증가되면
서 전기사업자가 공급하는 전력 품질의 중요성이 강조
되고 있다. 전력품질을 대표하는 두 가지의 요소는 변
동률이 적은 전압과 일정 주파수이다. 주파수는 발전기
에서 발전하는 전기에너지와 전력수요와의 평형과 직접
적인 관련이 있다. 순간적으로 수요가 줄면 주파수는
증가하고, 증가하면 감소하게 된다. 반면 전압은 에너지

와의 관계도 중요한 제어요소가 되나 무효전력과도 직
접적인 관계가 존재한다.

우리나라 전력계통의 발전단은 대부분 남부지역에
집중되어 있고, 부하는 수도권에 집중되어 있다. 그러므
로 전력계통의 전압제어에 어려운 기술적 문제점이 존
재하게 된다.

이러한 안정적인 전압을 수용가에게 공급하려는 목
적으로 무효전력을 제어하여 전압을 안정화하는 장치인
전력용 콘덴서를 두어 역률을 개선하는 목적을 달성하
고 또한 콘덴서 용량을 제어함으로써 변동률이 적은 전
압의 공급을 추구하고 있다. 이 때 콘덴서의 용량의 제
어는 주로 콘덴서 뱅크 전단의 차단기의 투입 혹은 차
단함으로써 전력계통과의 병입 및 차단을 수행하고 있
다. 그러므로 당연히 일반적인 차단기의 보다 전력용
콘덴서에 연결된 차단기는 동작횟수가 많다. 1년동안의
콘덴서 뱅크차단기의 동작횟수는 일반계통에 사용되는
차단기기를 수십년동안사용하는 횟수보다 많다.

콘덴서는 회로성적상 고조파에서 임피던스가 적게
작용하게 되므로 전력 계통에서 고조파 전압 혹은 서지
성 전압이 유기되어 전력용 콘덴서에 유입되면 그에 상
응하는 대전류가 흘러 콘덴서를 소손 혹은 열화시키는
원인이 된다. 이러한 문제점을 보완하기위해 콘덴서와
직렬로 직렬리액터를 설치하여 콘덴서에 흐를 수 있는
고조파성 혹은 서지성 전류를 억제하는 기능을 담당토
록 하고 있다. 이러한 콘덴서와 직렬리액터를 포함한
전력용콘덴서를 콘덴서 뱅크라 칭한다.

결국 콘덴서 뱅크는 콘덴서와 리액터의 직렬회로로
작용한다. 콘덴서를 보호하기 위해 콘덴서와 직렬로 리
액터를 설치하였지만 전기 회로적으로 직렬공진회로로
작용하게 된다. 직렬공진회로에 공진주파수에 해당하는
전압이 인가되면 이론상으로는 무한대의 전류가 흐를
수 있으므로 콘덴서 뱅크는 소손된다. 그러므로 이러한

점을 감안하여 리액터의 용량을 콘덴서용량의 6%로 하여 공진주파수를 상용주파수기준 4고조파에 해당하는 240Hz 근처로 설계하고 있다. 전력계통의 성격상 우수 고조파의 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 차단서지를 현장실험을 통해 실측한 후 이를 분석한다. 콘덴서 뱅크에 대한 이론적 현상구명파와 현장실측결과를 종합하여 대책을 강구하고 대책후의 현장실측을 통해 대책의 실효성을 검증하였다.

2 본론

2.1 콘덴서 뱅크의 구조와 전기 회로적 접근

콘덴서 뱅크는 그림 1에서 나타낸바와 같이 역률보상과 무효전력을 공급하기 위한 콘덴서를 전력계통에 연계시킴으로서 그 역할을 수행한다. 콘덴서가 기본적으로 고주파와 서지에 대해서 임피던스가 아주 작은 값으로 작용하므로 계통에서 발생하는 서지와 고조파가 콘덴서에 유입되면 상당히 큰 전류가 흐르게 되고 이 전류는 콘덴서를 소손 혹은 열화시키는 원인이 된다. 이러한 특성을 갖는 콘덴서를 보호하기 위해 콘덴서와 그림 1과 같이 직렬로 리액터를 연결하여 사용하고 있고 이를 직렬리액터라고 부른다.

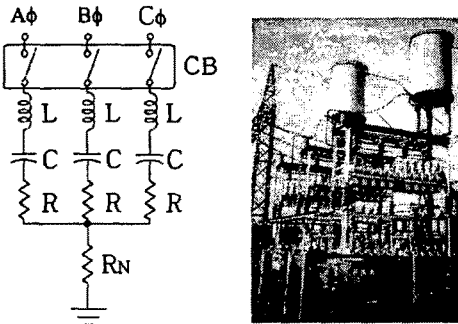


그림 1. 콘덴서 뱅크의 등가회로와 구성 사진

그림 1에서 R은 콘덴서와 직렬리액터에 포함된 직렬 저항성분을 등가 저항으로 실제적으로는 1Ω이하의 적은 값으로 작용한다. 또한 그림 1에서 CB는 콘덴서 뱅크를 계통과 연결과 차단 역할을 수행하는 차단기가

다. 그림 1에서 R_N 은 차단기의 동작시 발생하는 서지의 크기를 순간적으로 억제하는 역할을 수행하는 저항으로 중성점 저항기라고 부른다. 중성점 저항기는 평상시에 콘덴서 뱅크가 평형상태인 경우, 상용주파수기준 3상 전류의 합이 '영'이므로 60Hz의 성분전류는 1[A]이하의 적은 값이 흐르는 것이 보통이다. 그러나 상용주파수 기준 3의 배수고조파는 3상벡터합이 대수합이 되므로 실제운전중에는 3고조파성분이 더큰 값으로 작용한다. 그러나 차단기의 투입시는 차단기의 3상 투입시간차동안은 최대값 기준 1000[A]이상의 큰 전류가 60Hz 기준 수 사이클 동안 흐른다.

콘덴서를 보호하기 위해 연결한 직렬리액터가 콘덴서와 직렬로 연결되고, 아주 작은 값의 저항이 존재하므로 실제 콘덴서 뱅크의 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 뱅크는 4고조파 근처에서 공진주파수가 결정되도록 설계하고 있다.

2.2 콘덴서 뱅크의 수학적 모델링과 전압원별 전류응답특성

2.2.1 콘덴서 뱅크의 수학적 모델

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

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

식(1)에서 상수 a_1 , a_2 는 콘덴서 뱅크를 구성하고 있는 R, L, C소자로 구성되는 값이다. 실제로 시간과 온도특성에 의해 이러한 소자값이 변화할 수 있다. 여기서는 선형시스템으로 해석하고자 하므로 이러한 소자의 경련변화와 온도변화는 없는 것으로 한다. 이러한 소자특성이 변하는 경우의 해석은 다른 기회에 언급하기로 한다.

식(1)에서의 미분방정식을 주파수해석을 위해 라플라스변환하면 식(2)와 같은 라플라스방정식이 성립한다. 이때 전압을 입력V(s)으로 전류를 출력I(s)로 한다.

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

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

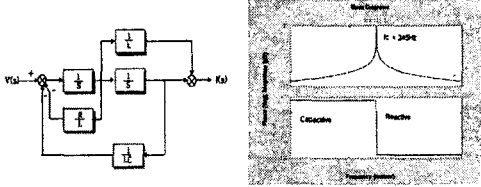


그림 2. 콘덴서뱅크의 볼릭선도 표현

식(2)와 그림 2에서의 표현은 콘덴서 뱅크가 전형적인 아주 좁은 통과폭을 갖는 밴드패스필터의 식으로 표현된다. 결국 콘덴서 뱅크는 공진주파수점을 기준으로 하여 지수적으로 감쇠하는 이득특성을 갖게 된다. 그러므로 콘덴서 뱅크를 구성하고 있는 소자값이 적은 변화에도 민감하게 동작한다. 특히, 공진주파수점에 계통내에 존재하는 고조파의 영역내에 있으므로 소자값이 변화하여 공진주파수가 내부에 존재하는 고조파의 주파수와 일치하면 이론상으로 무한대의 전류가 흘러 콘덴서 뱅크가 소손될 수 있다.

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

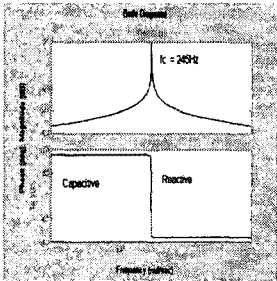
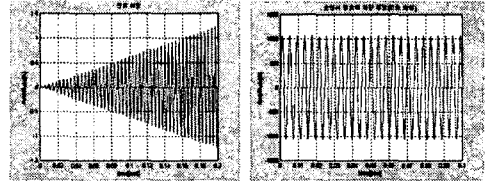


그림 3 154kV 콘덴서 뱅크의 주파수 응답특성

그림 3에서 가로축은 이득(dB)과 위상이고 세로축은 각주파수(ω)이다. 이때 콘덴서 뱅크의 소자값은 $C = 5.257 [\mu F]$ 이고 $L = 80.25 [mH]$, $R = 0.1 [\Omega]$ 이다. 공진주파수는 $245 [Hz]$ 로 계산된다. 위의 그림 3에서 알 수 있듯이 공진주파수 지점에서 어드미턴스가 커지고 공진주파수 점에서 위상의 진상에서 지상으로 변화하게 된다. 그러므로 임피던스는 공진주파수에서 매우 작은 값으로 작용함을 알 수 있다. 이때 60Hz에서의 임피던스 크기는 $475 [\Omega]$ 이고 용량성을 작용한다.

2.2.2 콘덴서 뱅크의 과도상태 응답특성

여기서의 과도상태라 함은 주로 차단기의 투입시 일어나는 수십 msec 동안의 전류특성으로 한정하고, 콘덴서 뱅크에 계단전압이 인가된 경우와 공진주파수에 해당하는 전압이 인가된 경우를 해석하고 현상을 명확하게 이해할 수 있도록하기 위해 저항은 '영'으로 하였다.



(a) 공진주파수 전압응답 (b) 계단응답

그림 4. 콘덴서 뱅크의 응답특성

그림 4의 (a)는 콘덴서 뱅크에 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 뱅크에 공진주파수 성분의 전압이 인가되면 공진주파수 성분의 전류가 연속적으로 증가하여 콘덴서 뱅크는 소손된다.

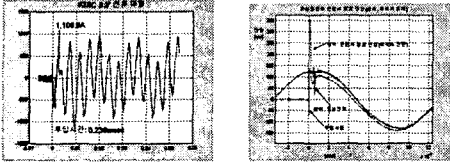
그림 4의 (b)는 콘덴서 뱅크의 계단응답을 나타낸 것이다. $154 [kV]$ 정격전압의 경우 변전소에서 $161 [kV]$ 정도에서 운용되고 있는 상황과 차단기가 전압의 최대점에서 투입된다고 할 때의 전류응답을 보기위한 것이다. 계산결과, 크기 $1064 [A]$ 이고 공진주파수성분으로 전류가 흐른 것을 알 수 있다. 물론 실제로는 저항성분이 작용하여 서서히 감소하는 형태가 된다. 이러한 응답과 서지응답, 상용주파수응답에 의한 전류의 성분을 합하면 정상적인 차단기형태에서 약 $1400 [A]$ 정도의 과도전류가 콘덴서 뱅크에 흐른다. 그런데 콘덴서 특성상 차단기의 동작이 빈번하여 점점동이 마모되어 표면상태가 나빠진 경우 상당히 큰 과도전류가 흐를 수 있다. 결국 차단기에서 발생하는 차단서지의 영향이 콘덴서 뱅크의 전류를 결정하는 한가지 큰 요인이 된다.

2.3 현장실측과 투입서지 분석

2.3.1 투입차단시 투입서지 측정

콘덴서 뱅크를 계통과 연결하는 차단기의 투입동작과 계통에서 콘덴서 뱅크를 이탈시키는 차단기의 차단동작시 차단기의 상태에 의해 차단서지가 발생하게 되고 투

입동작시 상용주파수의 전압파형의 투입시점에 따라 차단서지의 크기가 결정된다. 본 절에서는 차단기가 전압파형의 최고 시점에서 투입될 때까지 현장에서 반복시험을 수행하여 투입시 전압파형의 최고시점에서 투입될 때의 전류파형을 측정하고 분석하였다. 이때 전압은 161kV이고 3상중 최고시점에서 투입되는 상의 전류파형을 중심으로 설명한다.



(a) SC 투입시 전류파형 (b) 뱅크전압과 모선전압
그림 5. 투입시의 전류파형 및 전압파형

그림 5의 (a)에서 차단기 투입시의 전류실측파형을 나타내고 있다. 그림 5의 (b)는 차단기의 투입시 콘덴서 뱅크의 전압파형이다. 콘덴서 뱅크를 계통에 투입할 경우 전류는 1100[A]이상 전압은 350[kV]이상 측정된다. 투입시의 전압이 최고점이면 1000[A]이상 흐를 수 있고 투입시 전압파형에서 발생하는 서지에 의해 증가하므로 실측에 의한 결과는 순간적으로 2000[A]까지 증가한다. 이때의 조건은 차단기 전단에 피뢰기가 설치되어 있는 상태이고 이때 피뢰기가 동작하고, 피뢰기가 동작하면서 전류의 재단형상을 발생시키고 이 급준전류가 리액터와 작용하려 콘덴서 뱅크에 큰 전압을 순간적으로 유기시키고 이 전압은 154kV의 BIL전압인 170kV를 초과한다. 그러므로 이 과전압에 의해 리액터의 소손과 열화가 급진적으로 진행될 수 있다는 결론에 도달한다.

2.4 안정화운전을 위한 대책 및 검증

2.4.1 투입서지에 미치는 피뢰기의 영향

일반적으로 피뢰기는 산화아연소자로 구성되어 있다. 피뢰기 제조회사에서 공급하는 전기적 특성시험과 실제 시험결과에서 보면 산화아연소자의 특성상 아주 급준한 서지에 동작하지 못하는 특성과 어느정도의 에너지가 공급되어야 동작하는 시험특성을 갖고 있다. 결론적으로 그림 5의 시험결과에서 보면 피뢰기가 연결된 상태에서 피뢰기가 동작할 것인가가 관심의 대상이 된다. 이러한 문제점을 실측하기 위해 피뢰기의 동작상태를 그림 5의 data를 얻을 때 함께 측정하였다. 그 시험결과를 그림 6에 도시하였다.

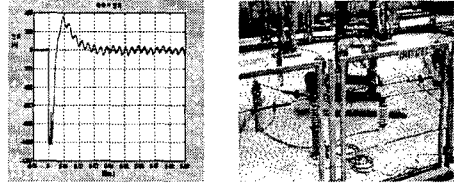


그림 6. 투입시의 피뢰기전류와 전류 측정사진

그림 6에서 알수 있듯이 피뢰기의 전류는 콘덴서 뱅크에 연결된 차단기가 투입할 때 1000[A]이상의 전류로 피뢰기가 동작함으로 알수 있다.

이 현장실측의 결과를 종합하면 콘덴서 뱅크의 차단기가 투입동작이 일어날 때 발생하는 서지는 피뢰기를 동작시킬 만큼의 에너지와 크기 그리고 충분한 지속시간을 갖고 있다는 결론에 도달한다. 결국 이러한 피뢰기의 동작이 전류재단의 원인이 되고 이 급준전류에 의해 리액터전단의 임피던스 특이점에 작용하여 리액터 연결단자 부근의 아크와 절연파괴의 원인이 됨을 알 수 있고, 실제로 소손된 리액터를 조사해 본 결과 대부분의 소손리액터는 시발점이 이 연결부위가 대부분이었다는 것을 확인하였다.

2.4.2 피뢰기 제거후 투입시험

이러한 이론적인 설명과 현장실측을 근거로 하여 154kV 콘덴서 뱅크에서 피뢰기를 이탈시키고 차단기의 투입시험을 행하였다.

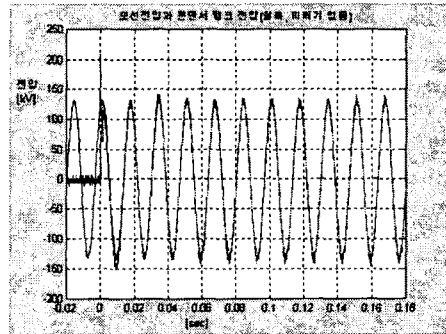


그림 6 피뢰기 제거시 투입전압 파형

그림 6에서 청색은 연속적으로 존재하는 파형으로 계통의 전압을 나타내고 있고, 시간축의 0점부근에서 상승된 전압(적색)은 콘덴서 뱅크의 전압이다. 그림 5의 결과와 비교하면 상당히 서지가 저감된 형태의 파형을 알 수 있다. 154kV 콘덴서 뱅크의 차단기 투입시

피뢰기가 미치는 영향을 이론적을 검토하고 현장실측을 통해 측정된 결과를 다음 표1에 정리하였다.

표 1. 피뢰기가 154kV 콘덴서 뱅크에 미치는 영향 실측 결과

구분	피뢰기 有	피뢰기 無
투입시전압 [kV]	131[kV]	131[kV]
콘덴서 뱅크전압 [kV]	358.3[kV]이상	131[kV]
LA 전류	1200[A]	
A상 전류	1140[A]	1100[A]
중성점 전류	842[A]	409[A]

2.4.3 저항투입방식에 의한 차단서지의 감소

154kV 콘덴서 뱅크는 차단기의 두가지 동작중 즉, 차단과 투입동작중 서지의 관점에서 보면 투입시가 대부분 가혹한 조건이 된다. 결국 차단기의 상태가 콘덴서 뱅크에 미치는 영향이 크다는 것을 현장실측의 결과로 검증할 수 있었다. 이러한 관점에서 차단기를 투입 동작시에만 저항이 작용하는 저항투입방식을 모의검토하였다.

저항 투입방식의 차단기의 적용시 중요하게 검토하여야 하는 점을 다음의 두가지 이다.

▷ 저항값을 얼마로 확정할 것인가?. 이 문제는 차단기의 크기 및 구조에 큰 영향을 미치므로 상당히 중요한 사항이 된다.

▷ 다른 한 가지는 저항을 투입하여 지속하는 시간을 결정하는 것이다. 이 또한 차단기의 고조 및 크기에 영향을 미치므로 주의하여 검토해야하는 사항이다.

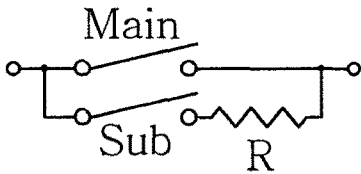
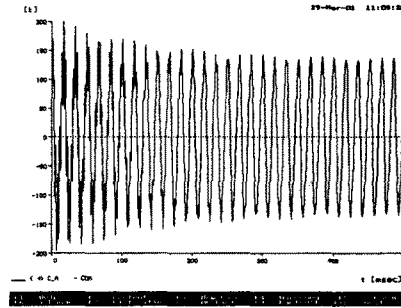


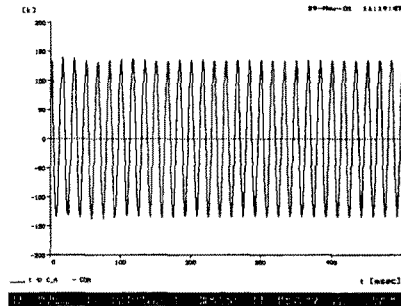
그림 7. 저항투입 방식 차단기의 전기회로 표현

그림 7의 저항투입방식 차단기의 동작은 투입시 'Sub'를 투입하고 수 msec 이후에 'Main'을 투입하는 방식이다. 그러므로 두 스위치의 투입차에 대한 시간동안 위의 저항'R'과 콘덴서의 임피던스가 전압을 분압하여 담당하므로써 콘덴서 뱅크에 과전압과 과전류의 영향을 적게하는 방식의 차단기이다.



(a)

저항투입(0옴)



(b) 저항투입(50옴)

그림 8 저항 투입방식에 의한 콘덴서 전압파형

검토 결과 저항 투입방식에서 저항값은 50Ω이 현실적인 제작측면을 고려할 때 가장 합당할 것으로 판단하고 콘덴서 전압(200kV 100%)를 기준으로 할 때 50Ω의 경우 70%정도가 된다. 즉 과전압 30%의 저감효과가 있다. 이것은 154kV의 BIL이 170kV를 감안하면 절연측면에서 상당한 효과가 있는 것으로 평가된다. 투입시간은 4msec로 할 때가 저항이 없을 때를 기준으로 20%의 과전압 저감효과가 있는 것으로 모의되었다.

3. 결론

현재 콘덴서 뱅크에서 발생하는 문제점은 콘덴서 셀의 소손, 리액터의 소손, 중성점 저항의 소손, CT의 소손으로 대별될 수 있고, 이중에서 리액터의 소손이 가장 많은 소손률을 점유한다. 본 논문에서는 이러한 현상을 규명할 수 있는 근거가 되는 과전압 및 과전류의 발생원인을 분석하고, 이를 저감할 수 있는 방법을 제안하여 현실적으로 적용 가능한 방법을 제시하고자 수행되

므로 우선 과전압 및 과전류의 발생원인에 따른 과전압 및 과전류를 분석하고 운용상의 방지대책을 제시하고자 한다. 가장 현실적이고 합리적인 154kV SC의 개선조건은 다음의 3가지로 종합된다.

첫째, 저항투입방식의 차단기를 채용한다. 그러나 이것은 새로운 차단기의 개발등의 문제점을 수반하고 있어 운용상의 장점과 경제적인 측면에 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다.

둘째, 154kV SC뱅크에 설치된 피뢰기를 운전하지 않는다. 이 방법은 운용상 채택이 가능할 것으로 판단되고 합리적인 운전방법으로의 채택이 가능하다.

마지막으로 콘덴서 뱅크는 공진회로를 갖는 상당히 민감한 전력기기이다. 현재 운전중인 전력기기중에서 가장 민감하고 이론적으로 불안정한 영역에서 운전될 수 있는 설비이다. 그러므로 차단기 투입시 및 정상상태 정수 및 측정data 집중관리와 지속적 관리가 필수적이다.

후후에 더많은 연구와 현장시험이 진행될 경우 전압 관리측면에서 중요한 역할을 담당하는 콘덴서뱅크의 안전운전에 기여하게 될 것이다.

참고문헌

- [1] "154kV SC Bank 고장 원인분석 및 대책수립", 2001.4, 한국전력공사
- [2] CRIEPI "전력중앙연구소 종합보고", 1985.1
- [3] CRIEPI "전력중앙연구소 연구보고", No. 175031,1976
- [4] Yasuo Watanabe and Naohiro Hozumi, "Diagnostic Techniques for Electric Power Equipment", T.IEE Japan, Vol. 112-B, No.7, 1992.
- [5] 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.
- [6] M. Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsu, "Time-frequence analysis of E-M signals emitted from a partial discharge occuring in GIS using wavelet transform", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.4, pp.786-798,1997
- [7] M.W. Montgomery, P. Rastgoufard, "Instrumentation and data acquisition techniques for develoment of predictive maintainance of load tap changers", Symposium on System Theory, pp.220~224,1998