

154 kV STATCON Bank용 콘덴서 셀 절연과피 원인분석

주형준, 권동진, 강연옥, 심응보, 이상일, 이흥호
한전 전력연구원, 한국전력공사, 충남대학교

Analysis of a breakdown in 154 kV STATCON Bank condenser cell

H.J.Ju, D.J.Kweon, Y.W.Kang, E.BShim, S.I.Lee, H.H.Lee
KEPRI, KEPCO, CNU

Abstract - 154 kV 변전소에 설치 운전 중인 SC Bank 콘덴서 셀의 절연과피 고장이 빈번하게 발생되어 전력계통의 운용 및 변전소 운전이 지장을 주는 사례가 많이 발생하였다.

따라서 이의 고장원인 진단을 통하여 대책수립을 하고자 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)를 이용하여 SC Bank의 정상상태시 과전압, 과전류에 의한 소손현상을 검토하고, 계통조건에 따른 공진점변화와 고조파에 따른 이상전압 및 콘덴서 셀 전압의 상승 현상을 검토 분석하고, 고조파 성분에서 따른 과전압 및 과전류를 분석하여 대책을 제시한 사례연구의 결과이다.

1. 서 론

한전에서는 저전압 개선 및 공급능력의 확보, 역률개선 등의 대책의 일환으로 송배전계통의 부하와 병렬로 접속하여 23 kV~154 kV급 정전SC Bank를 운전하여 왔으며 최근에는 154 kV급에서 SC Bank를 더욱 확대하여 운전하고 있다.

하지만 최근 154 kV SC Bank에서 정상상태 운전시 콘덴서 셀의 절연과피 고장이 발생되어 SC Bank의 운용상 문제가 우려되어짐에 따라, SC Bank의 고장 및 대책을 EMTP를 이용하여 고조파 유입과 SC Bank의 운전조건에 따른 과전압과 과전류 분석을 하였다.

정상상태운전시 콘덴서 셀이 파괴되는 현상은 전압에 포함되는 고조파 성분에 의한 과전압으로 추정되는 바, 이러한 고조파 성분에 영향을 가장 크게 미치는 공진과 진상조건에 따른 공진점의 추이를 검토하였다.

또한, 전력계통의 여건이 변화하여 진상 운전조건인 경우에도, 계통의 역률을 보상하기 위하여 SC Bank를 운전하는 경우가 있어, 진상운전조건일 경우 SC Bank의 콘덴서 셀에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 본 론

현재의 154 kV 변전소에 설치 운전중인 154 kV SC Bank는 그림 1과 같은 형태로 구성되어 있다.

각 상당 콘덴서의 연결은 5련 6렬로 조합하여 상당 30개의 콘덴서 셀로 구성되며 전체 5 μF의 콘덴서값을 갖는다. 연결형태는 각 상별로 Breaker, 리액터, 콘덴서의 직렬로 연결하고 중성점에 방전저항통하여 접지되어 있다. 리액터는 상당 35 mH의 값을 갖으며 SC Bank의 투입 차단시 돌입전류를 제한하는 역할을 한다.

중성점에는 제동저항을 50 옴을 배치하여 돌입전류에 대한 보호를 보장하였다. 보호방식은 접지저항측에 각상의 불평형을 검출할 수 있는 제전기를 응용시킨다.

정격시의 정격용량 및 각각의 소자값은 표 1에 정리하였다.

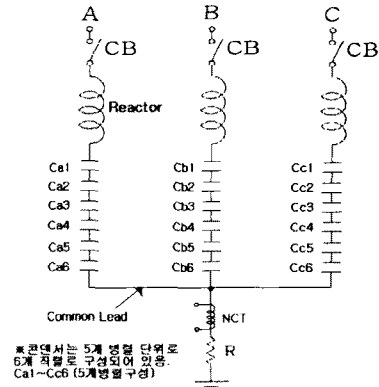


그림 1. SC Bank 회로도

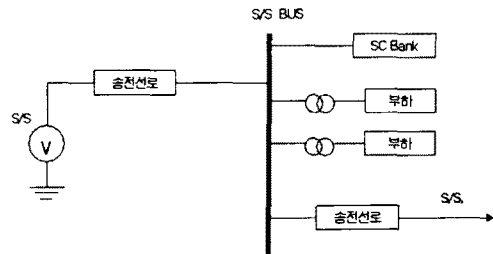


그림 2. 모의 대상 계통

표 1. 각상당 정상상태 분석값

	소자값 (성격서)	정격용량 (성격서)	정격전압 (성격서)	작용용량	작용전압
코 일	35mH	570.8 kVAR	2.744 kV	388.592 kVAR	2.264 kV
콘덴서	4.99μF	17.1 MVAR	95.314 kV	15.646 MVAR	91.157 kV
저 항	50 Ω				
1상당 SC Bank 용량				15257.894 kVAR	
3상 SC Bank 총용량				45.77368 MVAR	

실제의 계통조건에서의 현상을 모의하기 위하여 모의 대상계통을 그림 2와 같이 구성하였다. 각 선로와 부하 조건은 실제의 값으로 모델링한 PSS/E 데이터를 참조하였으며 변전소의 운전조건이 진상운전 조건일 경우와 경부하 중부하시의 공진주파수 변화 특성 및 5고조파 함유에 따른 SC Bank 전압, 전류를 분석하였다.

2.1 진상조건에 따른 SC Bank의 영향분석

2.1.1 진상운전 조건에 따른 공진주파수 특성분석

진상운전 조건시 그림 3과 같은 계통의 간성변전소측 모선에 0, 27, 54, 80, 107, 134 MVAR의 무효전력이 존재하는 진상조건인 경우, 계통의 공진주파수 변화특성을 검토하였다.

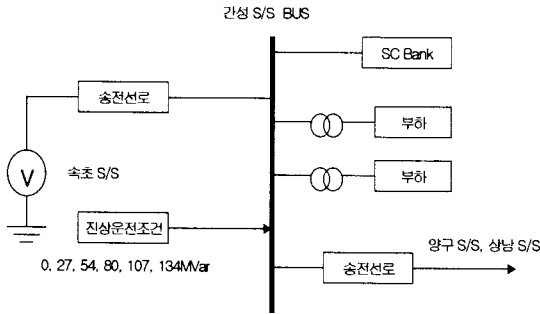


그림 3. 진상운전조건에 따른 공진주파수 분석을 위한 계통도

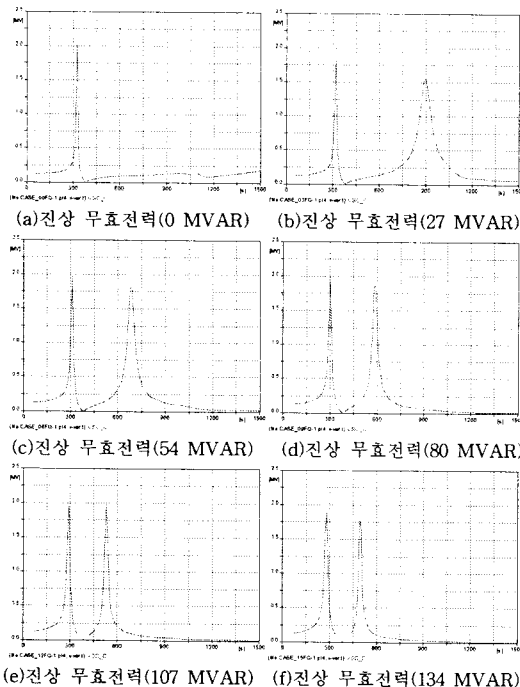


그림 4. 진상 무효전력 변화에 따른 공진주파수의 변화 특성

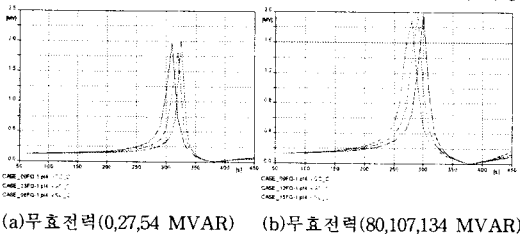


그림 5. 진상 무효전력 변화에 따른 공진주파수의 변화 추이

그림 4는 계통이 0, 27, 54, 80, 107, 134 MVAR의 진상 무효전력으로 운전되는 조건을 검토한 결과이다. 계통에는 약 320 Hz의 공진주파수 대역이 존재하며, 진상 무효전력이 증가함에 따라 공진주파수는 약 320 Hz에서 280 Hz로 감소하는 특성을 나타내는데, 진상 무효전력이 80 MVAR일 때 5고조파 존재시 공진이 발생하는 300 Hz의 공진주파수로 운전된다.

그림 5는 진상 무효전력의 증가에 따른 공진주파수의 변화추이를 보여준다. 계통이 약 320 Hz의 공진주파수 대역에서 운전되고, 진상 무효전력량이 증가함에 따라 280 Hz의 공진 주파수 대역이 이동함을 알 수 있다.

2.2 진상운전 조건 및 5고조파 함유율의 변화에 따른 SC 전압, 전류

위에서 살펴본 것과 같이 계통이 진상으로 운전될 경우, 진상운전조건에 따라 계통주파수는 약 320 Hz에서 280 Hz로 변하게 되는데, 특정한 진상운전조건인 80MVAR의 경우에는 5고조파 공진영역에서 운전된다. 따라서 본 논문에서는 진상운전조건에 따른 공진주파수의 변화 및 계통의 5고조파 함유율의 변화에 따른 SC 전압 및 전류의 특성을 분석하였다. 5고조파의 함유율이 각각 0.5, 1, 1.5, 2 %가 존재하는 경우, 계통의 진상운전 조건에 따른 모선전압 및 SC 전압 및 전류의 특성을 분석하였다. 그림 6은 진상운전조건 및 고조파 함유율의 변화에 따른 SC 전압, 전류를 분석하기 위한 기본 계통도이다.

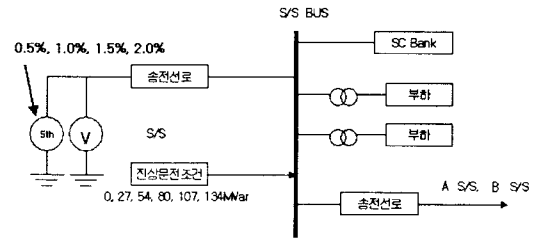


그림 6. 진상운전 및 고조파 함유율에 따른 SC 전압, 전류 분석을 위한 기본 계통도

계통이 진상조건으로 운전되고, 5고조파가 계통에 존재하여 SC Bank 콘덴서 셀에 과전압이 인가되어 견딜 수 있는 최고 허용 전압은 표 2의 규격을 기준으로 검토하였다.

표2. 최고 허용 전압과 허용 시간

전압배수	허용 인가 시간
1.10	24시간 중 12시간 이내
1.15	24시간 중 30분 이내
1.20	1개월 중 5분 이내가 2회 이하
1.30	1개월 중 1분 이내가 2회 이하

*한국산업규격(KSC 4802, 고압 및 특별 고압 진상 콘덴서, 1997)

2.2.1 0.5%의 5고조파 포함시의 진상운전 조건변화에 따른 SC 전압전류

가. 모선전압

모선전압은 계통의 진상운전량이 그림 7과 같이 증가함에 따라 증가하고, 진상 무효전력이 134 MVAR일 경우 약 3.5 %정도 증가하지만, 5고조파 공진주파수로 운전되는 계통조건인 80M MVAR에서는 0.4 % 증가한다.

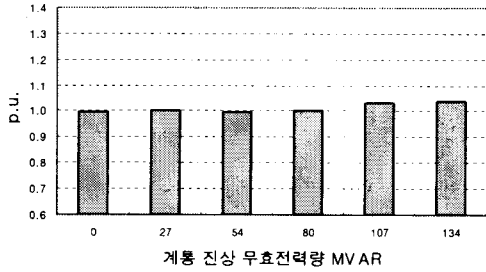


그림 7. 진상조건에 따른 모선전압 변화량(5th 0.5%)

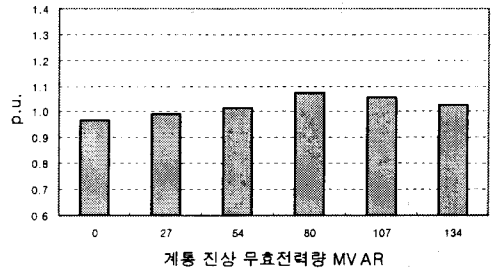


그림 10. 진상조건에 따른 콘덴서셀전압 변화량(5th 1%)

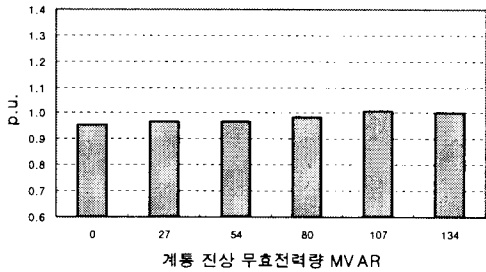


그림 8. 진상조건에 따른 콘덴서셀전압 변화량(5th 0.5%)

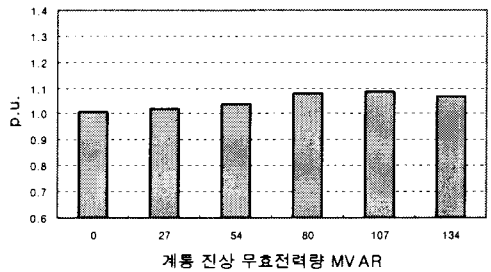


그림 11. 진상조건에 따른 모선전압 변화량(5th 2%)

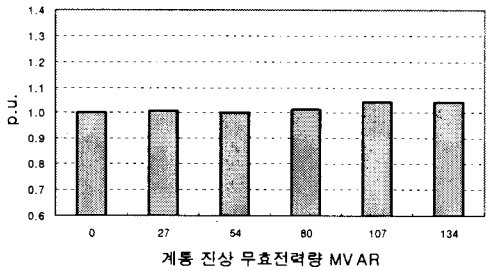


그림 9. 진상조건에 따른 모선전압 변화량(5th 1%)

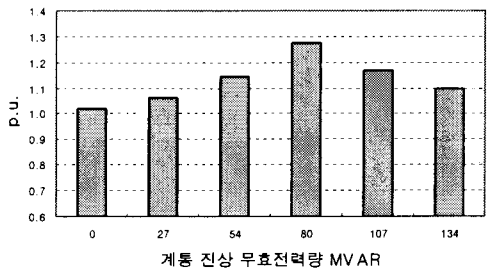


그림 12. 진상조건에 따른 콘덴서셀전압 변화량(5th 2%)

나. 콘덴서 셀에 부담되는 전압

공진주파수(300 Hz, 80 MVAR)에서 그림 8과 같이 모선전압은 0.4% 증가하였으나, 콘덴서 셀에 걸리는 전압은 2.8%(0 → 80 MVAR 운전조건시) 증가함을 알 수 있으며, 이것은 공진에 의한 영향으로 판단된다. 107 MVAR 및 134 MVAR 진상 운전 조건의 경우, 콘덴서 셀 전압의 증가량이 큰 것은 모선전압 증가에 따른 영향으로 판단된다.

2.2.2 1%의 5고조파 포함시의 진상운전 조건변화에 따른 SC 전압전류

가. 모선전압

계통에 5고조파가 1% 포함되어있을 경우 모선전압의 크기를 검토한 결과, 그림 9와 같이 진상 무효전력량이 0인 경우에도 모선전압은 약 0.2% 증가하며, 80 MVAR 운전시에는 1.4%, 134 MVAR 운전시에는 4.6% 증가한다.

나. 콘덴서 셀에 부담되는 전압

그림 10에서 알 수 있는 것과 같이 계통에 5고조파가 1% 존재시, 80 MVAR(공진주파수 300 Hz)에서 콘덴서 셀 전압은 가장 크게 걸리게 된다. 이것은 5고조파의 공진에 의한 영향으로 80 MVAR 진상운전 조건시 파형의 왜형도 심하게 나타남을 알 수 있다. 또한 5고조파가 0.5% 존재했을 경우와는 다르게 공진의 영향이 크게 나타나 진상 무효전력량이 80 MVAR이상 존재할 경우 공진점을 피하여 운전하는 조건이 되어 콘덴서 셀에 나타나는 전압은 감소한다.

5고조파가 1% 존재하고, 진상운전에 따라 모선전압은 1.4% 증가하였지만, 콘덴서 셀에 걸리는 전압은 7.6% 증가함을 알 수 있다.

2.2.3 2%의 5고조파 포함시의 진상운전 조건변화에 따른 SC 전압전류

가. 모선전압

계통에 5고조파가 2% 포함되어있을 경우 그림 11과 같이 모선전압은 80 MVAR 운전조건일때 까지 증가하다가 그 이후 감소하는 특성을 나타낸다. 즉 계통 자체는 공진에 의해 과전압이 크게 발생하지 않음을 알 수 있다.

나. 콘덴서 셀에 부담되는 전압

그림 12에서 알 수 있는 것처럼, 계통에 5고조파가 2% 포함되었을 경우, 콘덴서 셀에 인가되는 전압은 80 MVAR에서 1.27 p.u.로서 상당히 큰 값이 나타난다. 5고조파 공진의 영향으로 모션전압이 8.2% 증가한 조건에서 콘덴서 셀에 걸리는 전압은 27% 증가하였다.

이 전압은 모션전압의 증가를 고려하더라도 콘덴서 셀의 전압은 약 1.2 p.u.까지 증가할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 이 전압은 한국산업규격 KSC 4802(고압 및 특별 고압 진상 콘덴서, 1997)의 규격과 비교하면, 1개월 중 5 분이내의 운전이 3회 이상인 경우 절연파괴가 발생할 수 있다.

2.3 리액터의 교체방안검토

절연파괴현상을 예방하기 위해 관내 154 kV 변전소의 기존 SC에 존재하는 리액터 80.25mH로 교체하여 운영시 전압전류의 정격초과 여부를 검토하였다. 모션전압을 161kV로 가정하고 고조파의 유입이 없다고 가정하였을 때 Cell 1개에 분담되는 전압은 다음과 같다.

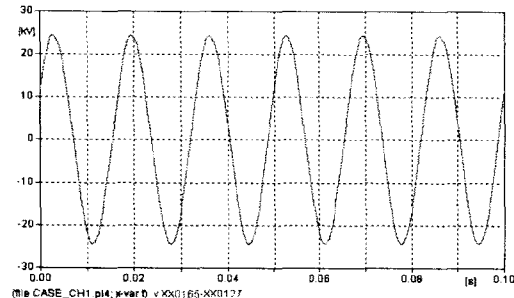


그림 13. SC 리액터 교체시 1개의 Cell 분담전압
Peak : 24.358kV RMS :17.226kV 정격용량의 108%로 증가

위의 가정에 전압에 5고조파 성분을 실측에 근거하여 1%정도 포함 운전하면 Cell 전압은 다음과 같이 110%로 증가하게 되어 운전이 불가능해진다.

즉 기존의 리액터를 활용하는 방안은 현장실측에 근거하면 1%의 이상의 5고조파가 함유됨으로 안정성을 확보하는 것은 어렵다.

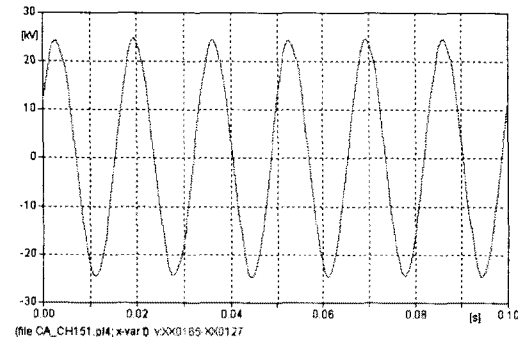


그림 14. 리액터 교체후 1%의 5고조파 포함시 Cell 분담전압
Peak : 24.783 RMS :17.527kV 정격용량의 110%이상 증가

3. 결 론

전력계통의 여건이 변화하여, 전력관리처 관내 154 kV 변전소의 경우 진상 운전조건인 경우에도, 계통의 역률을 보충하기 위하여 SC Bank를 운전하는 경우가 있어, 진상운전조건일 경우 SC Bank에 콘덴서 셀에 미치는 영향을 검토하였으며, 검토 결과는 다음과 같다.

1. 공진주파수의 이동
계통 진상 운전시, 진상운전조건에 따라 계통 공진주파수는 300 Hz(5고조파)로 이동할 수 있다.
2. SC Bank 콘덴서 셀 전압의 상승
계통의 공진주파수가 300 Hz(5고조파)로 이동하여 운전되고, 계통에 5고조파가 존재할 때 SC Bank 콘덴서 셀에 공진의 영향을 받은 전압이 발생한다. 계통에 5고조파 전압이 1.5% 존재할 경우 콘덴서 셀 전압은 1.15 p.u.를 초과하는 값이 발생하고, 이 전압은 하루 중 30분 이내에서 SC Bank를 운전할 수 있는 전압이며, 하루 중 30분 이상 운전하였을 경우 콘덴서 셀의 절연파괴가 발생할 수 있다.
또한 계통에 5고조파 전압이 2% 존재할 경우 콘덴서 셀 전압은 약 1.2 p.u.까지 증가할 수 있으며, 이 전압은 1개월 중 5 분이내로 3회 이상 인가될 경우 절연파괴가 발생할 수 있다.

3. 리액터의 교체방안 검토
현장실측에서 5고조파(300 Hz) 성분이 1.2% 미만의 크기로서, SC Bank의 리액터를 기존 SC에 존재하는 80.25mH로 교체하여 모의하였다.
Cell 에 분담되는 전압이 17.527[kV]로서 정격용량의 110% 이상으로 교체 전과 같이 절연파괴가 발생할 수 있다.
전류 파형을 통해 SC Bank가 5고조파의 영향을 받고 있음을 알 수 있지만, 콘덴서 셀 전압을 측정하지 못해 콘덴서 셀 전압의 검토는 EMTP 프로그램에 의존할 수밖에 없는 상황이다.

장기 대책을 위한 권고 사항

- 진상 운전조건에서 SC Bank를 투입하여 운전하는 변전소 파악
- 진상 운전조건에서 계통에 존재하는 고조파 종류 및 크기 파악
- SC Bank 설계 검토(직렬 리액터 용량을 작게 하는 방안 검토 필요)

[참 고 문 헌]

- [1] "IEEE Guide for the protection of shunt Capacitor Banks", IEEE-SA Standard Board, IEEE Std C37.99 2000
- [2] "Preferred Ratings and Related Required Capabilities" American National Standard, ANSI C37.06-1997
- [3] "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors", IEEE Std 18-1992
- [4] "IEEE Guide for Design and installation of cable system in substation", IEEE Std 525-1992
- [5] "IEEE Guide on Shielding Practice for Low voltage cable", IEEE Std 1143-1994
- [6] "IEEE Standard Rating Structure for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis", IEEE Std C37.2-1979
- [7] "IEEE Recommended Practice for Voice-Frequency Electrical-Noise Tests of Distribution Transformer", IEEE Std 469-1998
- [8] 정태호외, "EMTP를 이용한 154kV 정정콘덴서뱅크의 중성점 계동지향 정격 검토", 한국전력공사, 2001.4