

154 kV SC Neutral Resistor 절연이 콘덴서뱅크에 미치는 영향

전상동, 김기일, 정규원, 유희영, 이봉희
한국전력공사 중앙교육원

A Study on Effect of Neutral Resistance Deterioration to 154kV Power Capacitances

SangDong Jeon, giil Kim, KyuWon Jeong, HeeYoung Ryu, Bonghee Lee
Korea Electric Power Corporation Central Education Institute

Abstract - 최근에 콘덴서뱅크에서 자주 일어나는 고장의 유형은 콘덴서의 내부절연과, 리액터의 손손이 주를 이루고 있다. 그중에서 콘덴서 셀의 절연과파괴가 수대에서 십 수대까지 동시에 발생하기도 한다. 이러한 현상의 대부분은 차단기의 투입 시 서지전압과 전류에 의해 서서히 진행 혹은 갑작스런 고장으로 진행되고 있다. 이 중에서 저항기의 절연열화가 진행되면 차단기 투입 시 순간적인 절연과파괴를 일으켜 급준파의 전류를 더 급준하게 만들면서 콘덴서나 리액터의 열화를 더욱 더 가속시키며 순간적으로 저항기의 역할을 못하게 되어 안정상태를 더욱 해치는 역할을 수행하게 된다. 이 논문에서는 콘덴서뱅크와 중성점 저항기의 특성을 분석하고 중성점 저항기의 절연성능을 보장하여 전, 후의 서지전류 특성을 비교함으로써 실제 계통에서 중성점 저항기의 절연열화가 콘덴서뱅크에 미치는 영향에 대해서 알아보고자 한다.

1. 서론

콘덴서는 서지 등의 급준파에 약한 성질을 갖고 있어 전력용 콘덴서는 단독으로 계통에 연결하지 않고 리액터와 직렬로 결선하여 운전하고 리액터와 결합한 상태를 콘덴서뱅크라고 부른다. 차단기를 개폐할 때 발생하는 콘덴서뱅크의 과전압과 과전류를 해소하기 위한 한 가지 방법으로 콘덴서뱅크의 중성점에 저항을 삽입하는 방법이 있다. 이러한 방법은 3상이 평행상태에서는 저항에 흐르는 전류가 없어 저항으로서 작용을 거의 하지 않는다. 다만 불평형이 발생하는 경우에 작용을 하게 된다. 특히 차단기의 동작이 이루어지는 경우에 작용을 한다. 차단기의 투입동작시간 동안 저항은 두 가지의 측면에서 작용한다. 첫째 서지전압을 분배하여 과전압으로 인한 리액터나 콘덴서의 절연과파괴를 막는 작용을 한다. 또 다른 한 가지는 과도상태동안 안정도 향상에 기여한다.

2. 본론

2.1 콘덴서뱅크의 이론적 고찰 및 분석

<표 1> 제작사별 콘덴서뱅크 정격 비교

| 구분 | Cooper (미국) | ABB (스웨덴) |
|------|---|---|
| 정격전압 | 164.27/94.84 kV | 154/88.9 kV |
| 정격용량 | 56.9 MVAR (60 Hz, 3상) | 53.2 MVAR (60 Hz, 3상) |
| 구성 | 콘덴서셀 : 1상당 40개 (10개씩 병렬로 4련으로 구성) | 콘덴서셀 : 1상당 28개 (14개씩 병렬로 2련으로 구성) |

<표 2> 제작사별 차단기 투입시 가능한 최대 전류값 비교

| 항목 | Cooper | ABB |
|---------------------|---------------|---------------|
| 최대전류값 | 1392.97 Apeak | 1341.14 Apeak |
| 161 kV 기준 최대값 Apeak | 1097 Apeak | 1064 Apeak |
| 공진주파수값 Apeak | 295.97 Apeak | 277.14 Apeak |

이처럼 콘덴서뱅크회로는 단순히 리액터와 콘덴서로 이루어진 간단한 회로지만 공진현상, 서지임피던스 고조파성분의 전압, 차단기의 동작으로 인한 급준파의 침입 등 다양한 현상이 발생하는 상당히 복잡하게 작용하는 전기회로이다. 결국 콘덴서뱅크에서의 과전압과 과전류의 분포는 마치 시소게임에서와 같이 한쪽의 절연이나 부담을 크게 하면 다른 쪽으로 부담을 전가하는 현상을 발생시킨다. 이런 점에 비추어 볼 때 가장 이상적인 설계는 리액터와 콘덴서의 균등한 절연성능, 내력 등을 갖도록 설계하는 것이 가장 합리적인 설계방법이라는 접근이 가능하다.

2.2 154kV 콘덴서뱅크의 중성점 저항기

차단기의 동작 시 발생하는 과전압을 줄이는 방법으로 중성점에 설치된 50Ω의 중성점 저항기는 정상시에는 3상의 전류가 평행이 되므로 전류가 거의 흐르지 않는다. 그러나 차단기의 투입동작과 차단동작 시에는 각상의 서지를 저감시키는 역할을 수행하게 된다. 또한 운전 중인 콘덴서뱅크가 차단되면 리액터와 콘덴서에 축적된 에너지가 소비되지 않고 머무르게 된다. 저항기를 연결하면 저항기를 통해 축적에너지가 소멸되게 된다. 또한 차단기의 차단 동작 시에 발생하는 과전압을 저항기가 나누어 분담하므로 과전압을 줄이는 역할을 수행한다.

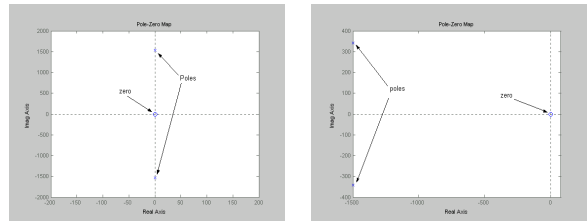
2.2.1 중성점 저항기 유무에 따른 안정성 해석

콘덴서뱅크의 전기 회로적 구성은 기본적으로 R-L-C 직렬회로로 작성된다. 이는 2계 1차 선형미분방정식으로 일반적으로 2차계로 불리는 미분방정식으로 표현된다. 콘덴서뱅크회로에서 전원은 전압이므로 전압을 제차항으로 하고 전류를 종속변수, 시간을 독립변수로 하면 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

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

상수 a_1, a_2 는 콘덴서뱅크를 구성하고 있는 R, L, C소자로 구성되는 값이다. 실제로 시간과 온도특성에 의해 이러한 소자값이 변화할 수 있다. 여기서는 선형시스템으로 해석하고자 하므로 이러한 소자의 경년변화와 온도변화는 없는 것으로 한다. 위 식에서 미분방정식을 주파수 해석을 위해 라플라스변환하면 다음과 같은 라플라스방정식이 성립한다. 이때 전압을 입력V(s)로 1상의 전류를 출력I(s)로 한다.

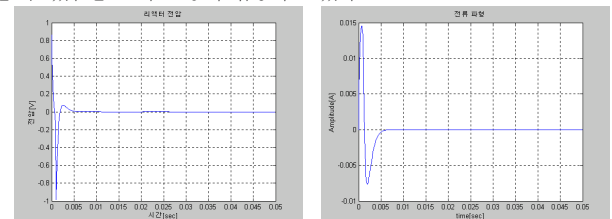
$$\frac{I(s)}{V(s)} = Y(s) = \frac{S/L}{S^2 + (R/L)S + 1/LC}$$



<그림 1> L-C 및 R-L-C 콘덴서뱅크의 영점과 극점 도시

2.2.2 L-C와 R-L-C 회로의 안정성 비교

R-L-C 콘덴서뱅크회로에 임펄스 전압을 인가하였을 때 콘덴서뱅크의 응답 중 리액터 전압과 콘덴서 전류과형을 모의하였다. 그림 2는 R-L-C 콘덴서뱅크회로에 임펄스전압을 인가하였을 때 리액터전압과 콘덴서 전류를 나타내고 있다. 리액터 전압과 콘덴서 전류는 공진하지 않고 아주 짧은 시간 내에 '0'으로 수렴한다. 그러므로 R-L-C 콘덴서뱅크는 차단기 동작이나 낙뢰와 같은 펄스성 전압에도 안정적으로 동작할 수 있음을 모의를 통해 입증하고 있다.

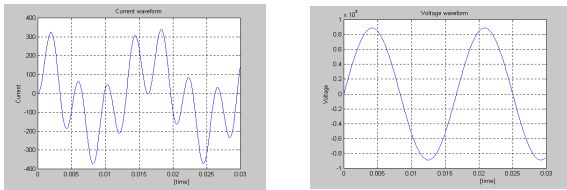


<그림 2> R-L-C 콘덴서뱅크 회로에 임펄스전압 인가시 전압, 전류

2.3 콘덴서 बैं크와 선로 및 변압기를 고려한 계통해석

기본적인 L-C회로는 순수한 콘덴서 बैं크의 콘덴서와 리액터만을 고려한 회로를 수식화하여 전달함수를 구하고 R-L-C 직렬회로는 선로에 작용하는 저항성분과 선로의 저항성분만을 고려한 경우 이를 수식화하여 전달함수를 구한다.

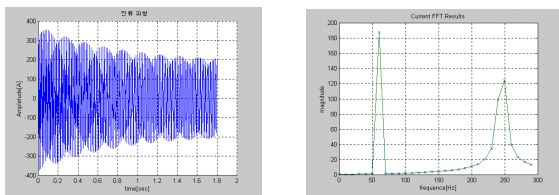
2.3.1 L-C 직렬회로 해석 및 모의결과



(a) 전류 파형 (b) 전압파형
<그림 3> L-C 직렬회로 전류, 전압파형

콘덴서 बैं크를 L, C 만의 회로로 모의하면 기본파와 4고조파가 존재하고 감쇄 없이 진행된다. 그러나 실제 현장에서는 병렬저항과 선로의 저항이 존재하므로 4고조파는 서서히 감소하는 결과를 분석에서 알게 되었다.

2.3.2 R-L-C 직렬회로 해석 및 모의결과



(a) 전류 파형 (b) 주파수 분석
<그림 4> R-L-C 직렬회로 전류파형 및 주파수 분석

콘덴서 बैं크를 R, L, C 의 회로로 모의하면 기본파와 4고조파가 존재하고 4고조파는 감쇄하며 진행된다. 정상상태에서는 4고조파 성분은 사라지고 기본파 성분이 남는다.

2.4 현장시험 및 고찰

현장에서 콘덴서 बैं크 차단기가 동작할 때 중성점 저항기의 절연성능이 낮아 제 역할을 하지 못하는 경우에 얼마나 큰 과전류가 흐르고 어떠한 현상이 일어나는지를 검토한 후 절연성능이 개선된 저항기로 교체한 후에 실시한 시험 결과와 비교하여 콘덴서 बैं크의 운전에서 중성점 저항기의 절연성능이 콘덴서 बैं크 운전에서 얼마나 큰 영향을 미치는지를 알아보았다. 절연성능이 개선된 중성점 저항기로 교체 전, 후의 시험결과를 먼저 정상상태에서 비교하고 그 후 차단기 투입시의 결과와 비교해 본다.

2.4.1 개선전/후 정상상태 비교



(a) 개선전 중성점 저항기 (b) 개선후 중성점 저항기

**<그림 5> 절연성능 개선전, 후 중성점 저항기
 <표 3> 중성점 저항기 개선 내용**

| 구분 | 개선 전 | 개선 후 |
|-------------|-------------------|--|
| 저항권선 절연연면거리 | 10 mm | 200 mm |
| 내부 기밀 | 통풍구 | 통풍구+필터 |
| 온습도 조절 | 없음 | 히터+온습도계+환풍기 |
| 정격 단시간 전류 | 800 A at 0.5 sec. | 3000 A at 0.5 sec. 1700 A at 1.0 sec. |
| BIL | 95 kV | 125 kV |

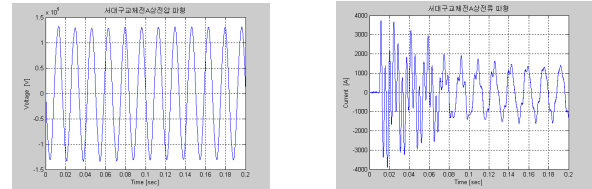
<표 4> 개선전/후 전압 및 전류 비교

| 상별 | 중성점 저항기 개선 전 | | 중성점 저항기 개선 후 | |
|----|--------------|----------|--------------|----------|
| | 전압[Vrms] | 전류[Arms] | 전압[Vrms] | 전류[Arms] |
| A상 | 93089 | 200.56 | 90685 | 191.76 |
| B상 | 93138 | 198.83 | 91402 | 190.39 |
| C상 | 93232 | 202.02 | 93003 | 193.17 |

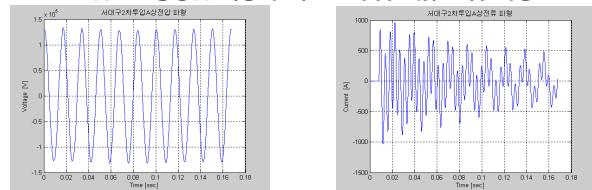
계통이 정상적일 때, 중성점 저항기 절연성능 개선 전 후의 콘덴서 बैं크의 전압 전류의 크기를 비교하였다. 위에서 알 수 있듯이 정상적인 상태에서는 위의 두 가지 경우 중 어느 경우도 정상적인 운전 상태를 보이고 있다.

2.4.2 콘덴서 बैं크 차단기 투입 시 특성 측정

다음은 콘덴서 बैं크가 정상상태 운전에서의 전류 파형이다. 다소 파형이 정현파에서 벗어난 것처럼 보인다. 각각의 고조파에 대한 전류가 합성되어 왜곡된 파형처럼 보이나 콘덴서 बैं크 회로 특성상 정상적인 전류이다. 기본파인 60 Hz의 전류값은 200 A 근처로 안정적인 전류파형이다. 중성점 저항기는 3상 불평형이 존재할 때만 작용하므로 콘덴서 बैं크가 정상운전인 경우 콘덴서 बैं크에 영향을 주지 않기 때문이다.



(a) 전류 파형 (b) 전압파형
<그림 6> 중성점 저항기 개선전 투입전류, 전압 파형



(a) 전류 파형 (b) 전압파형
<그림 7> 중성점 저항기 개선후 투입전류, 전압 파형

2.4.3 중성점 저항기 절연이 콘덴서 बैं크에 미치는 영향 고찰

표5에서와 같이 중성저항기의 최대 서지전류는 절연성능을 개선한 저항기보다 차단기 투입 시 콘덴서 बैं크에 약3.8배의 서지전류가 유입됨을 볼 수 있다. 중성점 저항기의 서지전류의 증가는 장기간에 걸쳐 서서히 진행되며 직렬리액터의 소손, 콘덴서 셀의 내부절연파괴를 일으키는 가장 큰 요인으로 작용함을 현장 실측으로 입증되었다.

<표 5> 개선전, 후 최대 서지전류 비교

| 구분 | 중성점 저항기 개선 전 최대 서지 전류[A] | 중성점 저항기 개선 후 최대 서지 전류[A] |
|----|-----------------------------|-----------------------------|
| A상 | 3890 | 1020 |

3. 결 론

이 논문에서는 콘덴서 बैं크에서의 중성점 저항기의 특성을 모의분석하고 절연성능을 개선한 중성점 저항기를 현장에 설치하여 실측을 통한 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

첫째, 콘덴서 बैं크 차단기 투입 시 절연부족 상태의 중성점 저항기에 흐르는 최대 서지전류는 저항기의 정격 단시간전류보다 훨씬 큰 것으로 나타나 중성점 저항기의 정격 단시간전류 용량을 800 A에서 3000 A로 충분히 늘릴 필요가 있다.

둘째, 계통 상시운전전압이 계통의 공칭전압(154 kV)보다 항상 높게 운전되며, 최고 161 kV까지 운전되고 있고, 차단기 개폐 시 중성점 저항기에 흐르는 서지전류를 감당할 수 있도록 권선 절연내력을 개선해야 한다.

이 연구 결과를 154 kV 콘덴서 बैं크 중성점 저항기의 구매규격에 반영하고 또한 현재 설치 운전 중인 설비의 개선에 유용한 참고가 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조성돈, "전력용 콘덴서 बैं크 개폐 과도현상과 대안", 2004 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2004 7,14-16
- [2] 정태호 외, "EMTP를 이용한 154 kV 정전콘덴서뱅크의 중성점 제동 저항 정격 검토", 2000.4, 한국전력공사
- [3] "154 kV SC Bank 고장 원인분석 및 대책수립", 2001.4, 한국전력공사
- [4] "Capacitor for high voltage", ABB Power Technology Seminar 14-18 June, 2004
- [5] 주형준 외, "154 kV SC Bank 콘덴서 절연파괴 대책연구", 2004 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2004 7,14-16
- [6] "SC Bank 구조 변경에 따른 정격 및 공진 영향 검토", 2004.5, 한국전력공사
- [7] 김경철 외, "전력회사 SC 투입시 과도 전압상승과 고조파 분석에 관한 연구", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Engineers Vol. 17, No.5, pp. 51-59 September 2003