

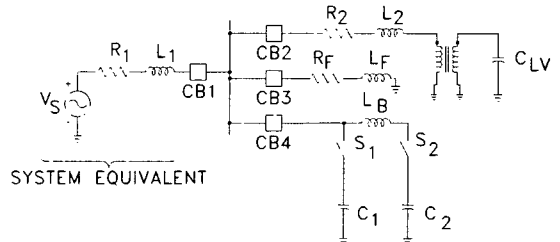
전력용 콘덴서 뱅크 개폐 과도현상과 대안

조 성 돈  
삼성물산 플랜트기술팀

Capacitor Bank Switching Transients and Countermeasures

Sung Don Cho  
Samsung Engineering and Construction

**Abstract** - 콘덴서 뱅크는 계통의 전압 유지와 무효전력 공급을 위해 많이 사용되고 있다. 전력용 콘덴서는 주로 배전계통에 많이 사용되었으나 근래에는 송전용 계통에도 많이 투입되고 있다. 송전용 콘덴서 뱅크는 대용량이며 송전계통의 X/R비가 높기 때문에 콘덴서 뱅크 개폐시에 높은 주파수의 과도전류와 과전압과 같은 과도현상이 발생하며 이로 인해 전력계통의 신뢰도에 중요한 전력기기가 손상을 받을 수 있다. 본고에서는 154-kV 계통을 예를 들어 콘덴서 뱅크에 의해 발생하는 다음의 과도현상들과 그에 대한 대안을 검토하였다. 1) 1차 콘덴서뱅크 투입시 과도현상 2) 2차 콘덴서뱅크 투입시 과도현상 3) 단락사고시 고장전류 4) 공진에 의한 과전압 과도현상해석을 위해서는 ATP(Alternative Transient Program) 프로그램을 사용하였다



R1 = 0.1 ohm, L1 = 5.9 mH, R2 = 1 ohm, L2 = 100 mH  
C1 = C2 = 5.6 micro-F (50 MVAR), CLV = 15.2 micro-F (3 MVAR), Dist. Transformer: 154/22.9 ratio, LB = 0.01 mH

그림1. 154kV 모의계통 단선도

1. 서 론

전력용 콘덴서뱅크 개폐시 발생하는 과도현상에 대한 대안으로 직렬리액터가 많이 사용되고 있다. 직렬리액터는 콘덴서 투입시 돌입전류를 억제하며, 고조파에 의한 파형 일그러짐을 방지하기도 한다. 일반적으로 1mH 정도의 리액터가 투입시 발생하는 과도돌입전류를 억제하기 위해 또는 외부고장시 콘덴서뱅크에 의한 고장전류를 제한하기 위해 각각 사용되고 있다. 우리나라에서는 제5고조파 이상에 대해 콘덴서 회로의 리액턴스를 유도성으로 하기 위해 콘덴서 임피던스의 6%가 되는 직렬리액터를 많이 사용하고 있다. ([6]~ 10)

2. 본 론

전력용콘덴서 개폐에 따른 과도현상을 검토하기 위해 그림1과 같은 154kV 계통을 예로 들었다. 그림1의 R1과 L1은 계통의 등가임피던스이며 CB4는 두 전력용콘덴서 뱅크를 공급하는 차단기이다, 그리고 S1과 S2는 전력용콘덴서 C1과 C2를 각각 개폐하는 차단기를 의미 한다. LB는 두 콘덴서뱅크를 연결하는 모선의 인덕턴스 이며 R2와 L2는 배전용변압기와 배전용선로의 임피던스가 된다. 배전용콘덴서(CLv)가 배전용변압기의 저압측에 설치되어 있다. CB3은 변전소에서 일정거리가 떨어진 곳에서 발생한 단락사고를 차단하는 차단기이다.

2.1 1차 콘덴서뱅크 투입시 과도현상 (Energization Inrush)

1차 콘덴서뱅크 투입시 과도현상은 변전소에 설치된 뱅크 중 첫 뱅크가 투입될때 발생한다. 이때 발생하는 과도현상은 수 백 Hz의 과도돌입전류가 흐르며 이로 인해 과도전압도 발생한다.

예를 들기위해 초기조건으로 CB1과 CB4가 닫혀 있고 CB2와 CB3은 열린 상태에서 C1을 가압하기 위해 S1를 닫고자 한다 계통의 저항성분을 무시하면 돌입전류는 식1과 같다.

여기서 V(0)는 차단기 S1이 투입되는 순간의 모선전압과 콘덴서뱅크 전압과의 차이이다.

과도전류는 모선전압 피크에서 투입될때 가장 크며 모선전압 제로에서 투입될때 가장 작다 따라서 모선전압 제로에서 S1을 투입하는 동기투입장치가 사용되기도 하나 이때 사용되는 차단기는 단상투입이 가능하여야 하므로 고가이며 또한 투입시 오차가 있으므로 많이 사용되고 있지는 않다. 뱅크의 용량이 증가하면 일반적으로 과도전류의 크기는 증가하고 과도주파수는 감소한다.

$$i(t) = \frac{V(0)}{Z_0} \sin \omega_0 t, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \dots (식1)$$

저항성분에 의한 제동효과 등을 고려하기 위해서는 ATP에 의한 시뮬레이션이 필요하다. 표1과 그림2~3는 ATP로 계산한 결과이다. 약조건으로 직렬리액터와 모선에 부하가 없는 조건에서 B상 전압 피크에서 차단기 S1이 투입된 것으로 가정하였다. 154kV 모선전압은 차단기 투입직후 최저 0pu, 최대 2pu 이다. 참고문헌[2] 에 의하면 차단기는 20kApeak와 4,250Hz의 돌입전류와 310kV의 과도전압에 각각 견디게 설계되어있으므로 직렬리액터가 없어도 1차 콘덴서뱅크 투입에 따른 차단기에 대한 손상은 없다고 볼 수 있다. 직렬리액터가 있는 경우에는 돌입전류의 크기와 주파수가 작아지나 과도전압의 크기는 큰 변화가 없었다.

표 1. Inrush Simulation Result

Case	Inrush Current Thru Breaker S1			154kV Bus Voltage	
	1-peak (A)	Freq (Hz)	1 x freq (A.Hz)	Min kV(p.u.)	Max kV (p.u.)
No Reactor	3,000	1,080	0.3E+07	0 (0)	249(1.98)

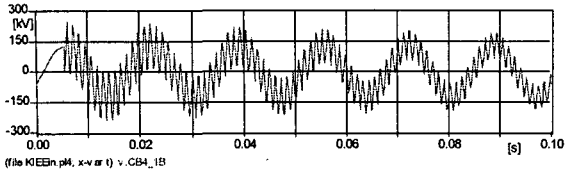


그림 2. 154kV B-phase Bus Voltage, Closing CB S<sub>1</sub> with CB S<sub>2</sub> opened (No reactor case)

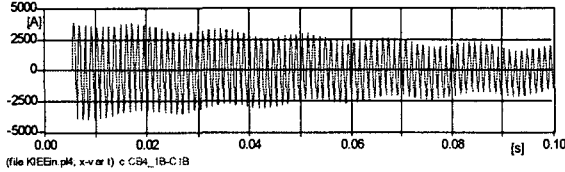


그림 3. Inrush current of Phase B, Closing CB S<sub>1</sub> with CB S<sub>2</sub> opened (No reactor case)

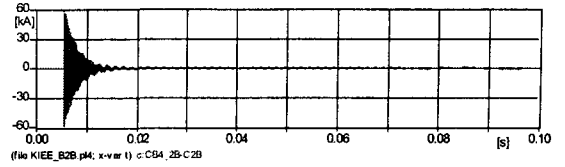


그림 5. Inrush current of Phase B, Closing CB S<sub>2</sub> with CB S<sub>1</sub> closed (No reactor case)

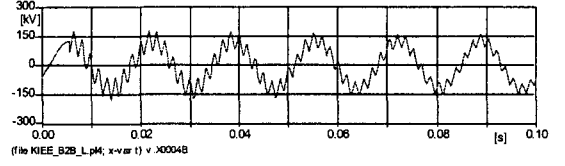


그림 6. 154kV B-phase Bus Voltage, Closing CB S<sub>2</sub> with CB S<sub>1</sub> closed (1mH reactor case)

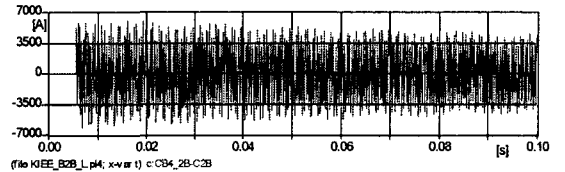


그림 7. Inrush current of Phase B, Closing CB S<sub>2</sub> with CB S<sub>1</sub> closed (1mH reactor case)

## 2.2 2차 콘덴서뱅크 투입시 과도현상 (Back-to-back Switching)

2차 콘덴서뱅크 투입시 과도현상은 C<sub>1</sub>이 이미 투입되어 있는 상태에서 S<sub>2</sub>를 투입하므로써 C<sub>2</sub>를 가압할 때 나타나는 과도현상이다. 이때의 과도전류는 식2와 같이 C<sub>1</sub>, L<sub>B</sub>, C<sub>2</sub>의 직렬 조합에 의한 임피던스와 S<sub>2</sub>가 투입되는 순간에 C<sub>1</sub>에 있던 전압 V(0)으로 나타낼수 있으며 1차 뱅크 투입시와 마찬가지로 전압이 피크일때 가장 큰 전류가 발생한다

$$i(t) = \frac{V(0)}{Z_{01}} \sin \omega_{01} t \quad \dots\dots\dots (식2)$$

$$Z_{01} = \sqrt{C_{EQ}} \quad \omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_B C_{EQ}}} \quad C_{EQ} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

식2의 계산방법에서는 계통의 임피던스와 저항에 의한 제동 효과등이 제외되어 있으며 다른 전력기와 상호 전력수수 등도 제외된 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub> 그리고 L<sub>B</sub>만 고려된 약식계산이며 ATP로 계산한 결과는 표2, 그림 4~7과 같다. 먼저 직렬리액터를 사용하지 않은 경우 그림5와 같이 참고 문헌2에 의한 차단기 설계기준 20kApeak와 4,250Hz의 돌입 전류를 초과하고 있다. 다음 1mH의 직렬리액터를 각 콘덴서에 설치하는 경우 그 결과는 그림7 와 같이 차단기의 한계 이내이다.

표2. Back-to-Back Switching Simulation Result

Case	Inrush Current Thru Breaker S <sub>2</sub>		
	I-peak (A)	Freq (Hz)	1 x freq (A.Hz)
No Reactor	56,200	28,600	161E+07
1 mH Reactor	2,900	2,520	7.6E+06

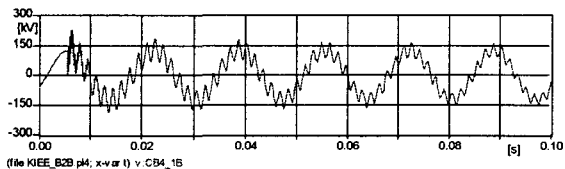


그림 4. 154kV B-phase Bus Voltage, Closing CB S<sub>2</sub> with CB S<sub>1</sub> closed (No reactor case)

## 2.3 단락사고시 고장전류 (Outrush Transient)

그림1에서 154kV 모선 가까이에서 3상지락과 같은 고장이 발생하면 콘덴서 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>는 단락지점으로 CB3을 통해 방전 전류를 보낸다. 이때 방전전류의 크기는 식3과 같다. V(0)은 단락사고 발생시 콘덴서 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>의 전압이며 뱅크의 용량이 증가하면 일반적으로 과도전류의 크기는 증가하고 과도주파수는 감소한다.

$$i(t) = \frac{V(0)}{Z_{02}} \sin \omega_{02} t \quad \dots\dots\dots (식3)$$

$$Z_{02} = \sqrt{C_{EQ}} \quad \omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L_F C_{EQ}}} \quad C_{EQ} = C_1 + C_2$$

모의계통에 대해 ATP로 계산한 결과는 표3, 그림 8~9와 같다. 먼저 직렬리액터를 사용하지 않은 경우 그림8과 같이 참고 문헌3에 의한 차단기기준 20kApeak와 4,250Hz의 돌입 전류를 초과하고 있다. 다음 1mH의 직렬리액터를 각 콘덴서에 설치하는 경우 그 결과는 그림9와 같이 차단기의 한계 이내이다.

표3. Outrush Simulation Result

Case	Inrush Current Thru Breaker S <sub>1</sub>		
	I-peak (A)	Freq (Hz)	1 x freq (A.Hz)
No Reactor	117,200	11,700	1.37E+09
1 mH Reactor	10,500	1,400	1.47E+07

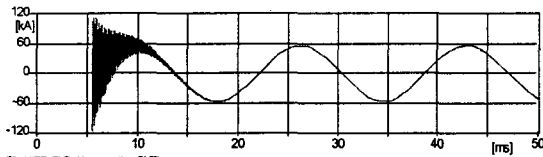


그림 8. Thru Current of CB 3 - B Phase, a fault outside CB 3 (No reactor case)

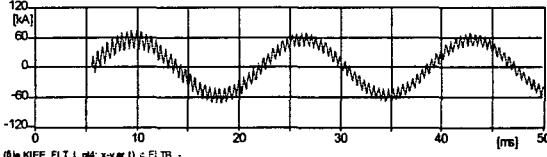


그림 9. Thru Current of CB 3 - B Phase, a fault outside CB 3 (1mH reactor case)

### 2.4 공진에 의한 과전압 (Voltage Magnification)

그림1에서 CB<sub>2</sub>가 이미 투입되어 있는 경우 S<sub>1</sub>을 투입하여 1차 콘덴서를 투입하는 경우 과도전류에 의한 과도전압이 발생한다. 이러한 과도현상은 변압기 저압측에 있는 다른 콘덴서뱅크와 식4와 같은 조건에서는 공진에 의해 전압을 증폭시키기도 한다. 이러한 현상이 발생하면 저압측에 높은 과도전압을 유기하며 심각한 경우 저압측에 있는 콘덴서뱅크 또는 피뢰기 등에 손상을 주기도 한다. 따라서 변전소에 대용량콘덴서를 추가하는 경우 변압기 2차측, 또는 배전계통을 통해 가까이에 위치한 인근 콘덴서 뱅크와 상호작용에 의한 전압증폭현상을 발생하지 않는지를 검토할 필요가 있다. 이에 대한 대안으로서는 서지전압을 억제하기위해 차단기에 투입저항을 설치하거나 저압측 뱅크의 비접지운전 또는 콘덴서뱅크의 용량을 조정하는 방안 등이 있다.

또한 공진이 발생하지 않는 경우라도 고압측 모션전압이 순간적인 고압측 모션전압 강하시 저압측 모션에도 영향을 미치므로 이로 인해 저압측 부하에 순간전압강하가 나타난다.[8]

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{LV}}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \dots\dots\dots(식4)$$

모의계통에 대해 ATP로 계산한 결과는 표4, 그림 10~11과 같다. 먼저 직렬리액터를 사용하지 않는 조건에서 B상 전압 피크에서 S1을 투입하는 경우 그림 10와 같이 22.9kV 모션 전압은 차단기 투입직후 최저 0.13pu, 최대 4.59pu 이다. 다음 1mH의 직렬리액터를 사용하는 조건에서는 그림 11과 같이 22.9kV 모션전압은 차단기 투입직후 최저 0.19pu, 최대 4.83pu 이다. 따라서 22.9kV 계통의 기기절연에 손상을 줄 수 있다.

표 4. Voltage magnification Result

Case	154kV Bus Voltage		22.9kV Bus Voltage	
	Min kV(p.u.)	Max kV(p.u.)	Min kV(p.u.)	Max kV(p.u.)
No Reactor	0 (0)	240.9(1.92)	2.4 (0.13)	85.9(4.59)
1 mH Reactor	19.2 (0.15)	223.2(1.78)	3.6 (0.19)	90.3(4.83)

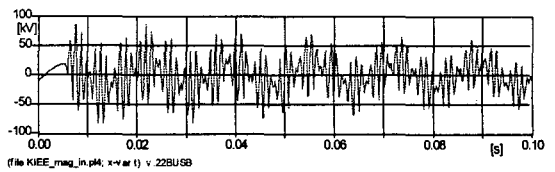
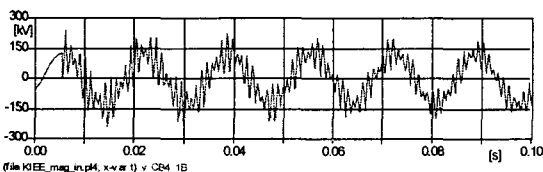


그림 10. 154kV(top) and 22.9kV(bottom) B-phase Bus Voltages, Closing CB S<sub>1</sub> with CB S<sub>2</sub> opened (No reactor case)

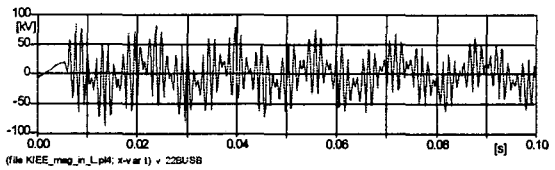
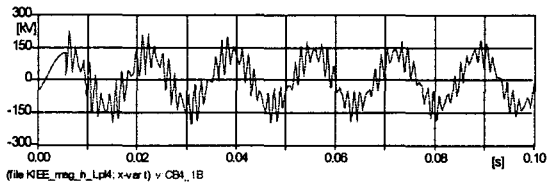


그림 11. 154kV(top) and 22.9kV(bottom) B-phase Bus Voltages, Closing CB S<sub>1</sub> with CB S<sub>2</sub> opened (1mH reactor case)

### 3. 결 론

지금까지 콘덴서 뱅크 개폐시 발생하는 과도현상과 직렬리액터의 필요성에 대해 검토하여 보았다. 검토결과 2차 콘덴서 뱅크 투입시 과도돌입전류를 억제하기 위해 직렬리액터가 필요한 것으로 나타났으며 직렬리액터의 크기는 1mH 정도의 크기면 차단기의 설계기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 우리나라에서 많이 사용하고 있는 6%의 직렬리액터를 사용하는 경우 콘덴서의 전압이 증가하므로 콘덴서를 직렬로 추가해야 하며 또한 직렬리액터의 비용도 추가되므로 다소 비경제적인 설계가 될 수 있다. 직렬리액터를 사용하여도 특별한 조건에서 공진에 의해 배전측 또는 저압측에 순간적인 과전압과 저전압 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 송전용 또는 배전용 콘덴서 뱅크를 계통에 추가하는 경우 이를 면밀히 검토할 필요가 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., 1991
- [2] ANSI C37.06-2000 AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current basis Preferred Ratings and Related Required Capabilities
- [3] IEEE Standard C37.012-1979 - Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers
- [4] IEEE Standard 1036-1992 - Application of Shunt Power Capacitors
- [5] IEEE Standard 18-2002 - Standard for Shunt Power Capacitors
- [6] John H. Brunke, "Application of Power Circuit Breakers for Capacitive and Small Inductive Current switching," *Application of Power Circuit Breakers*, IEEE Tutorial Course 93 EHO 388-9-PWR, 1993.
- [7] *Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs*, IEEE PES Special Publication TP-133-0 (Ch.4 Modeling Guidelines for Switching Transients).
- [8] 조남훈, 전영재, 박희철, '고압 커패시터 투입시 수용가측 엘러베이트 정지사태 분석', 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2003.7.2
- [9] KSC 4802-1997, 고압 및 특별 고압 진상 콘덴서
- [10] KSC 4806-1999, 고압 및 특별 고압 진상 커패시터용 직렬 리액터