

커패시터 스위칭 분석에 관한 연구

이승훈

여상민
성균관대학교

김철환

A Study on Analysis of Capacitor Switching

Seung Hun, Lee

Sang Min, Yeo
Sungkyunkwan University

Chul Hwan, Kim

Abstract - 전력계통에서 커패시터 스위칭으로 인해 과도성분이 발생한다. 이러한 과도성분에는 과도 과전압, 과도 과전류가 있는데 대상 계통을 EMTP를 이용해 구현하고 그 최고점과 지속시간을 살펴보았다. 또한 커패시터 스위칭에 의한 과도현상을 완화하는 방법으로 한류기를 이용해 과도 과전류가 어떻게 제한되는가를 살펴보고 대상 계통에서 한류기의 역할을 직접 확인해 보았다.

1. 서 론

전력계통에서 커패시터 뱅크를 사용하는 것은 역률을 개선하고 전압 강하를 보상하는 효율적인 방법이다. 그러나 커패시터 스위칭을 함으로써 몇가지 원치 않는 현상이 나타나 수용가까지 전달되기도 한다. 커패시터 스위칭에 의해 발생하는 과도현상에는 간단하게 과전압, 과전류를 생각할 수 있는데 이들을 다룰 때는 최대값에서의 값을 따져준다. 또 이들은 모두 저주파 과도성분에 해당한다. 뇌뢰나 유도성 부하 차단에 의해 일어나는 것은 고주파 과도성분에 해당되며 역률 개선이 목적인 커패시터 스위칭에 의한 것은 저주파 과도성분에 해당된다. 스위칭에 의한 과도성분은 보통 병렬 커패시터 뱅크의 스위칭이나 기 충전된 커패시터 뱅크가 있는 부스에서 또다른 커패시터 뱅크의 스위칭(back to back switching), 스위칭 장비에서의 재점화(restrike) 등에서 비롯된다. 이렇게 발생된 과도현상은 그 발생지점으로부터 배전계통의 다른 방향으로 전파된다. 병렬 커패시터의 적용은 심각한 고조파 왜곡, 과도 돌입전류의 증가, 과전압 생성, 커패시터 자체의 스트레스 증가 등의 부작용을 낳는다[1]. 본 논문에서는 EMTP를 통해 병렬 커패시터의 적용과 연속된 스위칭을 구현하고 한류기를 통해 과도현상을 완화하는 것에 관해 분석하였다.

2. 본 론

2.1 커패시터 스위칭

커패시터 스위칭은 일반적으로 공공계통에서의 평범한 동작으로 여겨지며 이러한 동작에 의해 발생한 과도현상은 계통 내에서는 문제로 여겨지지 않는다. 그러나 이러한 저주파 과도성분은 고객의 설비에서 그 현상이 확대되거나 전력전자장치의 트리핑을 방해하는데 기인한다. 커패시터의 충전은 공공계통에서 과도현상의 원인이 되는 많은 스위칭 현상 중의 하나이다. 그러나 커패시터 스위칭의 조절특성과 전력계통 설비에 주는 영향 때문에 종종 특별하게 취급된다.

커패시터 스위칭과 관련된 과도 과전압과 과전류는 크기의 최대값과 주파수, 지속시간에 따라 분류된다. 이 파라미터들은 과도현상이 전력계통설비에 주는 잠재적 영향을 분석하는데 유용한 요소이다. 최대값 절대치는 과도현상의 크기와 스위칭이 발생한 시점의 기본주파수 전압파형 지점에 의존한다[2].

2.1.1 커패시터 스위칭에 의한 과도현상

병렬 커패시터의 충전은 진동하는 과도현상을 정상계통 전압의 두배에 이르게 한다. 이러한 과도현상의 특성주파수(f_s)는 다음과 같이 주어진다.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx f_{system} \times \sqrt{\frac{X_c}{X_s}} \quad (1)$$

L : 전원 인덕턴스

C : 커패시터 뱅크의 커패시턴스

f_{system} : 계통 주파수(60Hz)

X_c : 커패시터 뱅크의 용량성 리액턴스

X_s : 전원 임피던스

그리고, 최대 돌입전류(I_{pk})는 다음과 같이 결정된다.

$$I_{pk} = \frac{V_{pk}}{Z_s}, \quad Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

V_{pk} : 상전압 최고치

Z_s : 서지 임피던스

최대 전압의 크기는 충전되는 순간의 순시계통의 전압에 의존하고 최악의 경우 정상계통 전압의 두배에 이른다. 전압서지는 돌입전류(I_{pk})와 같은 주파수를 가지고 급속하게 계통전압으로 감퇴한다.

실제 커패시터의 충전을 발생시키는 과도현상의 크기는 이론적으로 2배에 이른다는 것보다는 더 작을 것이다. 전형적인 과도현상의 크기는 1.2 ~ 1.8[p.u] 이고 전형적인 과도주파수는 일반적으로 300~1000Hz 범위에 있다[3].

2.1.2 한류기를 이용한 커패시터 스위칭에 의한 과도현상 완화

일반적으로 커패시터 스위칭에 의한 과도현상은 다음과 같은 방법으로 완화할 수 있다[1].

- 1) 한류기를 직렬로 연결
- 2) 저항 스위칭
- 3) 동기 브레이크(영전압에서 스위칭)
- 4) 서지 어레스터 적용
- 5) 커패시터 뱅크의 사이즈 축소
(사이즈를 작게하면 할수록 과도현상도 줄어든다.)
- 6) 이차적 공진의 가능성을 제거하기 위해 다중전압에 커패시터 적용을 피한다.

위와 같은 방법 중에서 한류기에 의한 과도현상 완화를 더 자세히 알아본다. 한류기(fault current limiter)란 고장사고시 평소의 수십 배에 이르는 고장전류를 초고속으로 감지하고 정상전류로 낮춰주는 보호장치의 일종이다. 여기서는 직렬로 한류기를 연결하여 돌입전류를 완화하는 한류기의 효과를 얻을 수 있다. 커패시터의 용량성 커패시턴스는 주파수에 반비례하여 주파수가 높을수록 커패시턴스는 저하되므로 전원전압에서 고조파가 포함되었을 때에는 그 고조파분을 증대하여 파형을 더욱더 왜곡시킨다. 커패시터를 삽입하여 파형이 왜곡되는 것은 제5고조파가 확대되기 때문인데 이것을 방지하기 위하여 커패시터와 직렬로 리액턴스를 설치하여 이 리액턴스와 커패시터의 용량성 커패시턴스를 제5고조파에 대하여 동조시키게 되면 합성리액턴스는 제5고조파에 대하여 0이 되어 단락된다.

제5고조파의 동조임피던스는 다음과 같다.

$$(2\pi \times 5f_0)^2 LC = 1 \quad \therefore (2\pi f_0)L = \frac{1}{25} \times \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (3)$$

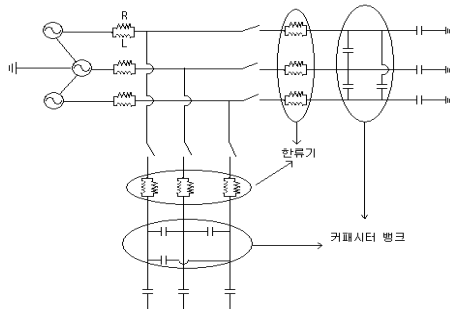
커패시턴스의 4%를 선택하면 되나 실제로는 전원회로에서의 주파수의 변동 등에 대하여 여유를 두어 커패시턴스의 6%의 직렬리액턴스를 취한다.

2.2 모의 및 결과

연속된 스위칭(back to back switching)과정에서 발생하는 과도성분을 관찰할 수 있는 대상계통을 구현하기 위해 두 개의 삼상 병렬 커패시턴스를 전원에 연결한다. 또 이때 발생하는 과도성분을 완화하기 위해 한류기를 직렬로 연결한다. 연속된 스위칭(back to back switching)은 이미 충전된 커패시터 뱅크가 있을 때 또다른 커패시터 뱅크를 같은 부스에 연결하여 충전되는 계통이다. 과도성분이 발생하여 지속되는 시간이 서로 겹치지 않도록 스위칭 순간이 한 주기가 차이나도록 설정한다. 대상 계통은 EMTP의 ATPDRAW를 이용하여 구현하였다.

2.2.1 대상 계통

대상 계통의 단선도는 다음 그림 1과 같다. 좌측에 삼상전원이 존재하고 수직 방향으로 한류기가 적용된 병렬 커패시터 뱅크가 존재한다.



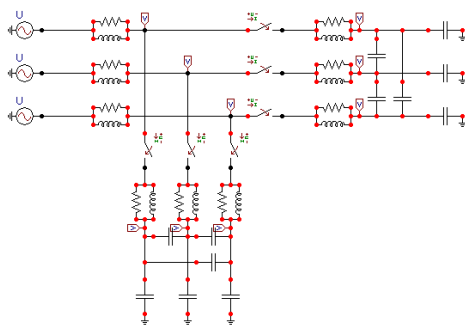
〈그림 1〉 모의계통의 단선도

대상 계통의 주요 파라미터는 다음 표 1과 같다.

〈표 1〉 대상 계통의 파라미터

	저항[Ω]	인덕턴스[mH]	커패시턴스[μF]
전원측 임피던스	5.3	0.24	X
한류기	10	0.025	
커패시터 뱅크	X		46
접지측 커패시터			0.001
삼상 전원	크기[V]	위상(a, b, c) [°]	주파수[Hz]
	1	120, 0, 240	

그림 1의 단선도와 표 1의 대상 계통의 파라미터를 참고로 EMTP의 ATPDRAW를 이용하여 대상 계통을 다음 그림 2와 같이 구현하였다. 전압프로브(probe)는 전원측과 병렬 커패시터 뱅크측에 각각 설치하고 스위치 양단에도 전압, 전류를 관찰할 수 있도록 하였다.



〈그림 2〉 ATPDRAW로 구현한 대상 계통

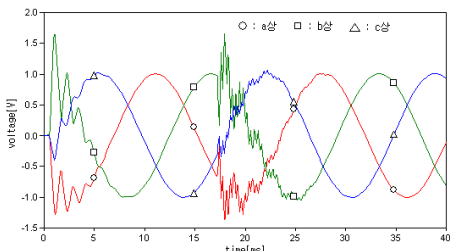
2.2.2 모의 결과

그림 2의 계통에서 연속된 스위칭, 한류기의 유무, 커패시터 뱅크의 커패시턴스 차이에 따른 커패시터 스위칭의 과도현상에 관해 모의하였다. 다음 표 2는 각 커패시터 뱅크의 투입시간이다.

〈표 2〉 커패시터 뱅크의 투입시간

투입시간	CLOSE[ms]
수평방향	0.5
수직방향	17.2

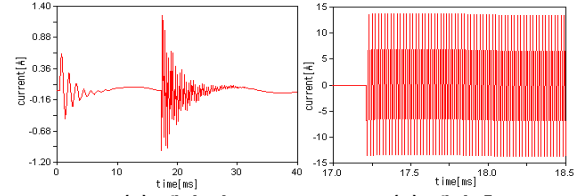
a상과 c상에서는 전압이 최대값일 때 스위칭이 일어나지 않지만 b상의 경우에는 최대값일 때 스위칭이 발생하고 이에 따라 과도 과전압도 최대값을 가지게 된다. 다음 그림 3은 커패시터 스위칭 시의 전압 파형이다.



〈그림 3〉 수평방향 커패시터 스위칭시 전압파형

그림 3을 보면 b상의 최대값이 1.655[p.u]에 이른다. 과도 과전압이 다른 상에 비해 크기가 크므로 과도 전류의 크기도 다른 상일 때보다 더 커지게 된다. 과도성분의 지속시간은 약 1/2주기이고 따라서 연속된 스위칭으로 인해 과도성분이 중첩되지는 않는다.

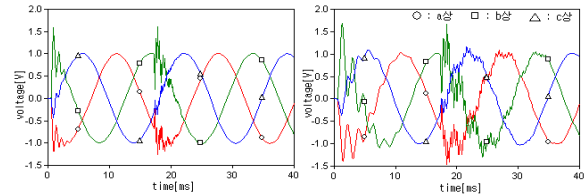
한류기가 효과적으로 과도 돌입전류를 완화하고 있는지를 확인하기 위해 한류기를 제거하기 전과 제거한 후의 b상에서의 수평방향 커패시터측 스위치의 전류파형을 비교하였다. 다음 그림 4는 한류기의 유무에 따른 커패시터측 스위치 전류 파형이다.



〈그림 4〉 한류기의 유무에 따른 커패시터측 스위치 전류파형

그림 4의 (a)에서 한류기 제거전 과도 돌입전류의 최대값은 1.253[pu]에 이른다. 그러나 이 값은 연결된 한류기에 의해 완화된 값이다. 수평방향, 수직방향의 모든 한류기를 제거한 후 커패시터 스위칭 전류파형을 관찰한 결과 그림 4의 (b)에서 모든 돌입전류의 최대값이 이전에 비해 11배인 13.8[p.u.]까지 상승하였으며 다시 정상전류로 회복되지 못하였다.

커패시터 뱅크의 커패시턴스 크기에 따른 스위칭 영향을 보기 위하여 커패시터 뱅크의 용량을 각각 23μF, 92μF로 변화시켜 보았다. 다음 그림 5는 커패시터의 크기에 따른 전압 파형이다.



〈그림 5〉 커패시턴스를 변화시켰을 때의 전압 파형

그림 5의 (a)에서 커패시턴스를 기존의 절반인 23μF로 감소시켰을 때 과도 과전압은 그림 3과 비교했을 때 그 크기와 지속시간이 감소하였음을 볼 수 있다. 최대값의 크기도 1.61[p.u.]로 감소하였다. 반대로 커패시턴스를 두 배인 92μF로 증가시켰을 때는 그림5의 (b)에서 보듯 눈에 띄게 과도 과전압이 증가하고 그 지속시간도 1주기 이상으로 증가하였다. 최대값의 크기도 1.665[p.u.]로 증가하였다.

3. 결 론

EMTP를 이용해 원하는 계통을 쉽게 구현할 수 있었고 효과적으로 커패시터 스위칭에서 발생하는 과도성분을 확인할 수 있었다. 전형적인 과도현상의 크기가 1.2 ~ 1.8[p.u.]에 포함됨을 대상계통을 통해 확인하였다. 이러한 과도현상을 완화하기 위해서는 몇 가지 방법이 있는데 그 중 한류기의 역할을 대상계통을 통해 확인하였다. 한류기를 제거했을 때 과도 돌입전류가 10배 이상 증가하고 정상상태로 회복되지 못함을 확인함으로써 실제로 한류기가 고장전류를 감지하고 과도현상을 완화하는 하나의 방법임을 확인하였다. 또 커패시터 뱅크의 용량의 변화가 과도 과전압의 크기와 지속시간에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. C. Das, "Analysis and Control of Large-Shunt-Capacitor-Bank Switching Transients", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 41, No. 6, pp. 1444 - 1451, Nov. 2005.
- [2] D. Daniel Sabin, Thomas E. Grebe, Daniel L. Brooks, Ashok Sundaram, "Rules-Based Algorithm for Detecting Transient Overvoltages due to Capacitor Switching and Statistical Analysis of Capacitor Switching in Distribution Systems", IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 2, pp. 630-635, April 1999.
- [3] T.E. Grebe, E.W. Gunther, "Application of the EMTP for Analysis of Utility Capacitor Switching Mitigation Techniques", Harmonics And Quality of Power, Volume 1, pp. 583-589, Oct. 1998.