

순간적인 전압강하 및 순간 전압 용기 발생시 전력용 커패시터의 특성 해석

(Characteristics Analysis of Power Capacitor at Sag & Swell)

김중겸* · 박영진 · 김일중

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Il-Jung Kim)

요 약

전력용 커패시터는 유도성 부하의 낮은 역율을 보상하기 위해 사용되지만, 전력변환장치 등에 의해 발생하는 고조파를 저감하기 위해 리액터와 함께 사용하기도 한다.

전기품질은 대부분이 전압품질에 관련된 것으로서 부하의 안정적인 동작에 매우 중요하지만, 순간적인 전압강하 또는 순간 전압 용기 발생시와 같이 전압의 크기가 일시적으로 변할 경우 커패시터에 전기적인 스트레스로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 순간적인 전압강하 및 순간 전압 용기 발생시 커패시터에서의 전압, 전류 및 용량의 변화를 해석하였으며, 커패시터에 리액터를 설치할 경우 순간적인 전압 강하시는 문제가 되지 않지만, 순간 전압 용기 발생 영역에서는 커패시터에 상당한 스트레스를 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

Power capacitor has been used to compensate for the low power factor of inductive load and to reduce harmonics generated by the power conversion device with reactor.

Power quality is mainly referred to the voltage quality and it is very important for the stable operation of load. But if voltage rms is temporary changed, it acts on capacitor as an electrical stress.

In this paper, we analyzed that capacitor can be given by voltage, current and capacity's variance under the sag and swell condition. If reactor is connected at capacitor, sag can be aside from the question. But it can act an amount of stress on capacitor in the swell region.

Key Words : Capacitor, Reactor, Swell, Sag, Power Quality

* 주저자 : 강릉원주대학교 전기정보통신공학부 교수

Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8780

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2009년 6월 3일

1차심사 : 2009년 6월 9일

심사완료 : 2009년 7월 28일

1. 서론

커패시터는 무효전력의 공급, 전압 안정화, 역률 개선 그리고 시스템 전력 손실의 감소에 따른 시스템 용량의 증가를 가능하므로 널리 이용되고 있지만 온도, 전류, 전압 등의 영향으로 정상적인 수명이 보장받지 못하고 절연파괴 등으로 소손되는 경우가 많다. 커패시터의 수명에 큰 영향을 주는 요소로서는 온도 상승 외에 전압품질에 관련된 것들이 많다. 커패시터는 사용하는 동안 순간적인 사고보다는 지속적인 전압 및 전류 스트레스로 고장이 일어나는 경우가 많다[1-3]. 따라서 각 나라별 또는 기관별로 커패시터의 안정적인 사용을 보장하기 위해 전압, 전류 등에 따른 제 규격을 정해 운영하고 있다[2-5].

순간적인 전압강하(sag)나 순간 전압 용기 발생시(swell)는 일시적인 전압 불평형이지만 부하의 변동이나 순간적인 고장에 의해 자주 발생할 수 있다. 커패시터는 전압의 공급에 비례하므로 일시적인 전압 변동이 자주 발생할 경우 절연체에 전기적인 스트레스를 가하게 된다.

커패시터는 무효전력의 공급 외에 리액터와 결합할 경우 고조파 저감효과가 있어 널리 사용되고 있지만, 전압이 상승할 경우 용량도 변하기 때문에 선택시 신중해야 한다[2,4]. 특히 순간 전압 용기 발생시와 같은 일시적인 전압상승이 반복될 경우 콘덴서는 전압에 의한 스트레스를 더 많이 받을 수 있다.

본 연구에서는 커패시터가 순간적인 전압강하 및 순간 전압 용기시와 같은 일시적인 전압의 변동시 커패시터 단독 그리고 리액터가 더해진 경우에서 전압, 전류 및 용량의 변화를 분석하였다.

2. 순간적인 전압강하 및 순간 전압 용기 발생시의 개요

순간적인 전압강하나 순간 전압 용기 발생시는 0.5~30(cycles)동안 순시적인(instantaneous)변화를 가지는 것에서 부터 30[cycles]~3[sec] 동안 순간적으로(momentary) 변화하는 것 외 3[sec]~1[min] 이내에 일시적으로(temporary) 전압의 크기가 0.1~0.9 또는 1.1~1.8[pu]까지 변동하는 것을 말한다[7].

그렇지만 대부분의 순간적인 전압강하는 0.5[sec]에서 1[min] 사이 전원주파수에서 실효치 전압 및 전류의 크기가 0.1과 0.9[pu]까지 줄어드는 것을 말하며, 순간 전압 용기시는 순간적인 전압강하와 같은 조건에서 전원주파수에서 공칭전압의 크기가 정격보다 10[%] 이상인 경우를 말한다.

순간적인 전압강하는 대부분 시스템에서 고장과 관련이 있지만, 대형 부하에 전원을 공급하는 경우나 전동기의 기동시에 발생하며 주로 짧은 시간에 일시적으로 발생한다. 순간 전압 용기시는 순간적인 전압강하와 마찬가지로 시스템 고장시에 발생하는 것으로 순간적인 전압강하와 같이 혼한 것은 아니지만, 1선 지락사고 동안 고장 나지 않은 상에서 나타나게 되며, 대형 부하를 개방하거나 대형 커패시터 뱅크에 전원 공급할 때 발생한다.

3. 순간적인 전압강하 및 순간 전압 용기 발생시시의 영향

커패시터에 인가되는 전압은 항상 일정하게 공급되는 것이 가장 이상적이지만, 대형 부하의 연결이나 큰 용량의 전동기를 기동시킬 때 또는 일시적인 고장으로 순간적인 전압강하나 초과현상이 일어난다. 부하에 필요한 무효전력을 제공하기 위해 커패시터를 역률보상으로 사용하거나 비선형 부하에 고조파를 저감하기 위해 리액터와 함께 커패시터를 사용할 경우 전압의 변화에 따라 커패시터에서의 전압, 전류 및 용량은 허용범위를 초과하는 경우가 있으므로 일시적인 전압의 변동에 따라 어떤 변화를 나타내는지 확인할 필요가 있다.

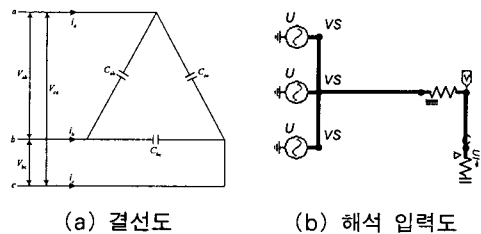


그림 1. 해석용 단선 및 결선도
Fig. 1. Single line and connection diagram for analysis

그림 1은 해석하고자 하는 회로에 대한 결선도와 해석 프로그램의 입력도를 나타낸 것이다. 해석에 사용된 커패시터는 3상 380[V], 100[μF]로서 용량은 5.44[kVA]이고 정격 선전류는 8.27[A]이다.

커패시터의 정격용량 Q는 식 (1)과 같이 전압의 제곱에 비례하지만, 커패시터에 흐르는 전류는 식 (2)와 용량이 일정한 경우 전압에 반비례한다.

$$Q = 2\pi f CV^2 \tag{1}$$

$$i_c = \frac{Q}{\sqrt{3} \times V} \tag{2}$$

식 (1)에서와 같이 전압이 변할 경우 커패시터 용량은 제곱에 해당하는 만큼의 변화가 발생하게 된다. 전압의 변화로 커패시터 용량도 달라진다.

따라서 전압과 주파수가 함께 바뀌는 곳에서의 커패시터 출력은 다음과 같다.

$$Q_{new} = Q_{cn} \times \left(\frac{V_{new}}{V_{cn}} \right)^2 \times \frac{f_{new}}{f_{cn}} \tag{3}$$

여기서

V_{new} 는 커패시터가 요구하는 공급전압

V_{cn} 는 정격 커패시터 전압

f_{new} 는 커패시터가 요구하는 주파수

f_{cn} 는 정격 커패시터 주파수

Q_{new} 는 V_{new} 과 f_{new} 에서 커패시터 출력

Q_{cn} 는 V_{cn} 과 f_{cn} 에서 정격 커패시터 출력

최근 비선형 부하의 사용 등으로 인해 커패시터를 단독으로 사용하는 경우보다는 커패시터에 직렬로 리액터(L[%])를 연결하여 사용하는 경우가 많다 [2,4]. 비선형 부하에서 발생하는 고조파에서는 5고조파의 크기가 가장 높기 때문에 이 고조파를 저감하는 동시에 역률 보상이 가능하도록 커패시터에 리액터를 설치할 경우 식 (4)와 같이 커패시터 전압 (V_c)이 상승한다. 이 V_c 는 식 (3)에서는 V_{new} 에 해당된다.

$$V_c = \frac{V}{1 - \frac{L(\%)}{100}} \tag{4}$$

5고조파에 줄이기 위해 커패시터에 부착하는 리액터를 설계할 경우 공진으로 전압 및 전류가 확대될 수 있으므로 유도성이 되도록 여유를 두어 5차에 해당되는 4[%] 대신 6[%]로 사용하고 있다[2,4]. 이때 식 (4)에 6[%]에 해당되는 리액터를 사용할 경우 380[V]의 커패시터에서의 전압은 404[V]로 정격전압에 비해 약 6[%]가 높아진다. 3조파와 같은 설비에서는 리액터의 값을 13[%]로 선정하게 되는데 이때 커패시터의 실효치 전압은 436.8[V]로서 당초보다 115[%]로 상승하게 되어 지속적으로 운전하는 경우의 허용범위를 넘게 된다.

현장에서 리액터의 추가로 커패시터에 전압이 상승할 경우 안전을 고려하여 한 단계 높은 정격의 커패시터를 적용하는 경우도 있다. 당초 무효전력 Q_1 인 시스템에 리액터의 추가로 상승된 V_1 에 대해 안전을 고려하여 커패시터 정격전압을 V_2 로 높일 경우 무효전력은 줄어들게 된다. 따라서 리액터에 걸리는 무효전력은 감소하게 된다.

전압 및 전류의 변화로부터 커패시터가 안정하게 동작할 수 있도록 실효치 전압, 전류 및 피크 전압과 용량에 대하여 허용범위를 표 1과 같이 규정하고 있다[2~6]. 전압에서는 아주 짧은 기간에는 배수가 높지만 오랜 시간 사용하는 경우 허용범위를 낮게 규정하고 있으며, 전류와 용량은 같은 비율로 정해놓고 있다[5,6].

표 1. 커패시터 허용 전압, 전류 및 용량

Table 1. Admissible voltage, current and reactive power of capacitor

구분	배수	동작시간
전압	110[%]	24시간 중 8시간 이내
	115[%]	24시간 중 30분 이내
	120[%]	5분 이내
	130[%]	1분 이내
용량	135[%]	정격 무효전력
전류	135[%]	실효치

4. 동작 특성 해석

4.1 순간전압 강하시 동작 특성

그림 2는 정상적으로 운전되고 있는 상태에서 전압이 정격전압에서 0.2[sec]의 짧은 시간 동안 80[%]로 순간적인 전압강하가 지속되다가 다시 정상적으로 회복되는 경우 커패시터에서의 전압, 전류 및 용량의 변화를 나타낸 것이다. 본 해석에는 전자계 과도해석 프로그램을 이용하였다[8].

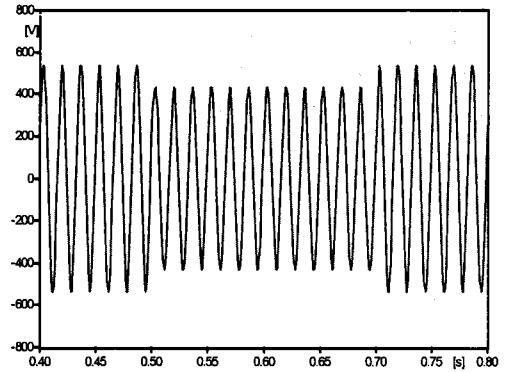
그림 2에서와 같이 순간적인 전압강하시 전압 및 전류가 감소함에 따라 커패시터의 용량이 줄어들기 때문에 커패시터에 문제를 나타내지 않는다. 그림 2(a)에서와 같이 일시적으로 전압이 0.8[pu]로 떨어졌을 때 식 (1)에서 알 수 있듯이 전압의 제공에 비례하는 분만큼 용량이 줄어들고 식 (2)에서 줄어든 커패시터 용량과 전압감소분에 의해 구해지는 전류는 전압의 감소분에 비례하는 전류의 크기를 그림 2(b)와 같이 구할 수 있다. 커패시터 용량은 식 (1)에서와 같이 정상적인 전압 회복시에 비해 제공에 비례하는 값까지 감소됨을 확인할 수 있다. 결과적으로 0.8[pu]의 순간적인 전압강하시 전류, 용량이 정격보다 낮기 때문에 커패시터에서 정하고 있는 허용 범위를 초과하지 않음을 알 수 있다.

그림 3은 그림 2와 같은 순간적인 전압강하 상황에서 커패시터 용량의 6[%]에 해당되는 리액터를 설치할 경우 커패시터 단자에서의 전압, 전류 그리고 용량의 변화를 해석한 결과이다.

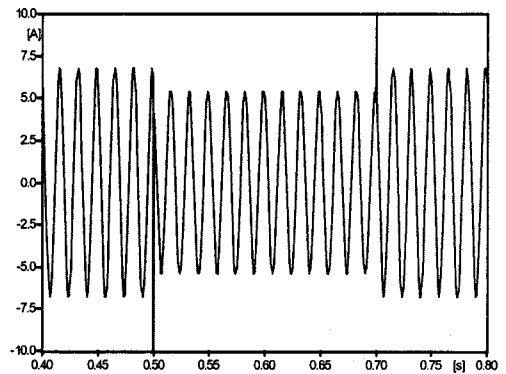
그림 3에서 커패시터에 리액터를 부착한 경우 리액터를 부착하지 않은 그림 2의 경우에 비해 정상 및 순간적인 전압강하 영역에서 전압, 전류성분이 높아졌으며, 직렬공진현상이 발생하여 순간적인 전압강하 발생 동안에 전류가 확대되어 용량도 증가함을 알 수 있다.

표 2는 순간적인 전압강하 영역과 정상 전압 동작 영역에서 커패시터에 리액터의 부착 전후의 전압, 전류, 용량의 변화를 계산한 결과이다. 계산결과 리액터가 부착되지 않은 정상영역에서의 크기에 대해 순간적인 전압강하 영역시는 전압, 전류는 각각 80[%]로 그리고 커패시터 용량은 전압의 제공

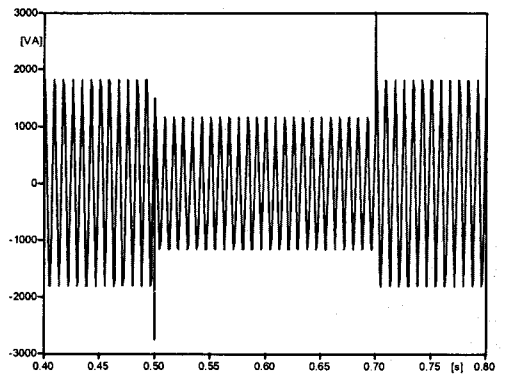
에 비례하는 양만큼 줄어들지만, 리액터가 커패시터에 추가된 경우 순간적인 전압강하 영역에서 전



(a) 전압



(b) 전류



(c) 용량

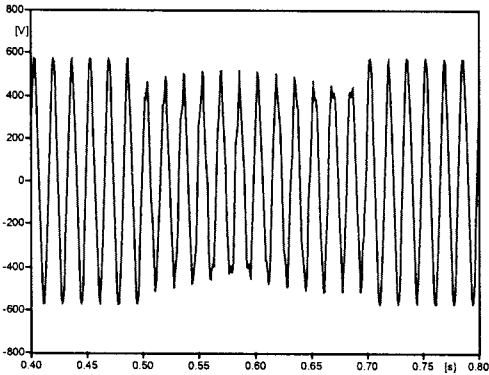
그림 2. 순간전압 강하시 전압, 전류 및 커패시터 용량
Fig. 2. Voltage, current and capacitor capacity at sag(without reactor)

류는 정상영역에 가까워지고, 정상영역에서는 식 (1)과 (2)에서 같이 전류와 용량이 증가하는 것을

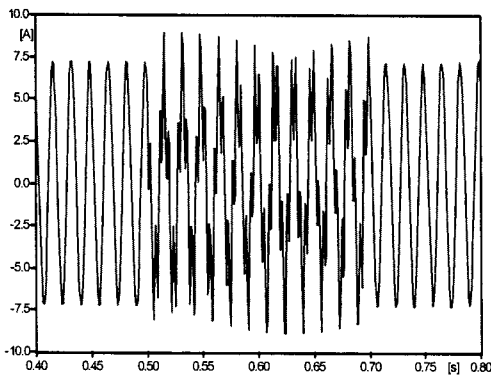
알 수 있다.

표 2. 80[%] 전압 순간적인 전압강하시 해석 결과
Table 2. Analysis result at 80[%] voltage sag

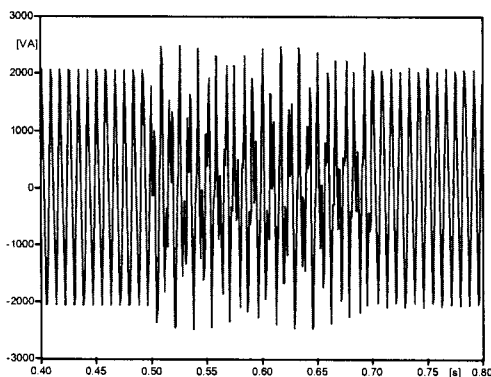
구분	정상 영역		Sag 영역	
	without reactor	with reactor	without reactor	with reactor
전압 [V]	380 (100[%])	404.3 (106[%])	304 (80[%])	323.85 (85.2[%])
전류 [A]	4.775 (100[%])	5.08 (106[%])	3.82 (80[%])	4.145 (86.8[%])
용량 [VA]	1,814 (100[%])	2,053 (113[%])	1,161 (64[%])	1,342 (73.9[%])



(a) 전압



(b) 전류



(c) 용량

그림 3. 순간전압 강하시 전압, 전류 및 커패시터 용량
Fig. 3. Voltage, current and capacitor capacity at sag(with reactor)

4.2 순간전압 용기 발생시 동작 특성

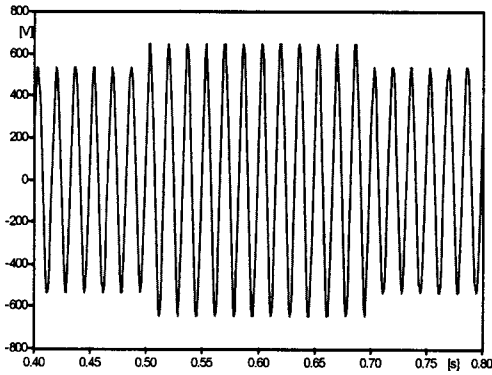
그림 4는 표 1에서 허용하는 범위에서 전압이 정격보다 높은 120[%]로 0.2[sec]의 짧은 시간 동안 지속되다가 다시 정상적으로 회복되는 순간 전압 용기 발생시 동작의 경우 커패시터에서의 전압, 전류 및 용량의 변화를 나타낸 것이다.

그림 4에서는 그림 2, 3과 달리 일시적으로 전압이 상승하는 순간 전압 용기 발생시 동작에서 커패시터에서의 전압, 전류 그리고 용량의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4 (b)의 경우 그림 4 (a)와 같이 전압이 일시적으로 증가할 때 커패시터에 흐르는 전류도 증가하므로 그림 4 (c)의 경우에서 알 수 있듯이 커패시터 용량은 정상적인 전압 회복시에 비해 제공에 비례하는 값까지 증가됨을 확인할 수 있다. 그러나 이 보다 약간 높은 순간 전압 용기 발생시영역에서는 전압 및 전류의 동시 증가로 커패시터 용량은 규정치를 초과할 수 있다.

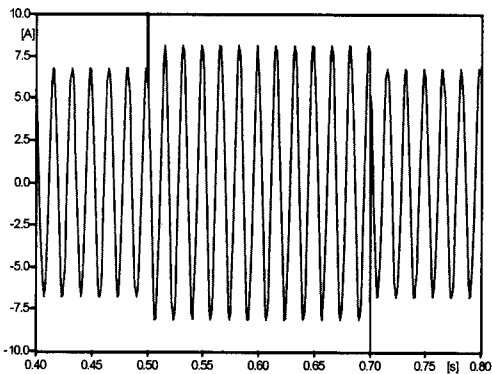
전압이 일시적으로 120[%]로 상승할 경우 식 (1)과 그림 4에서와 같이 커패시터 용량이 144[%]로 상승하기 때문에 표 1에서 제시한 규정된 허용범위를 초과함을 알 수 있다. 따라서 커패시터 용량은 135[%] 이내로 제한시키기 위해서는 전압의 제공에 해당되는 전압의 상승분만큼만 유지되기 하면 된다. 따라서 135[%]의 허용범위 안에서 커패시터 용량이 운전되게 하기 위해서는 약 116[%]의 전압상승까지

순간적인 전압강아 및 순간 전압 옹기 발생시 전력용 커패시터의 특성 해석

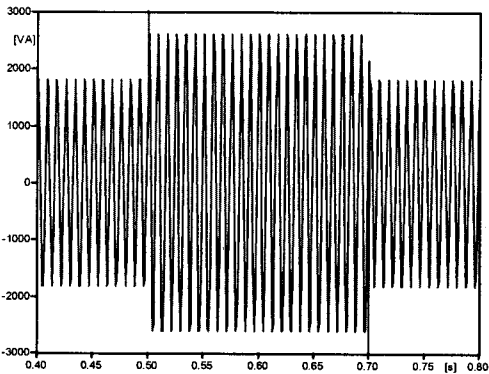
만 허용이 가능하다.



(a) 전압

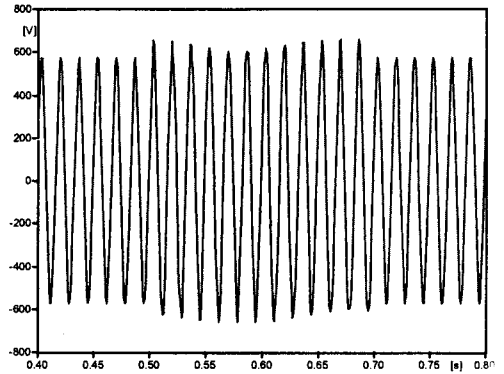


(b) 전류

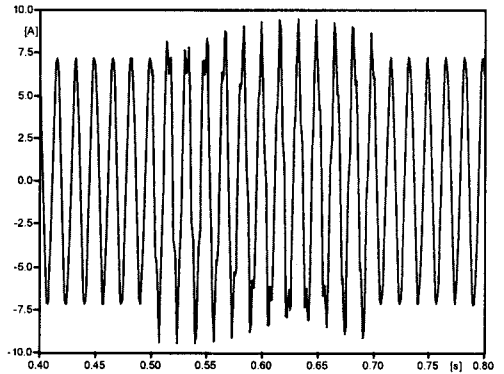


(c) 용량

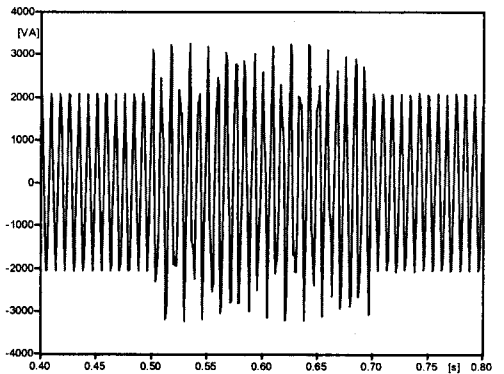
그림 4. 순간 전압 옹기 발생시 전압, 전류 및 용량
Fig. 4. Voltage, current and capacitor capacity at swell(without reactor)



(a) 전압



(b) 전류



(c) 커패시터 용량

그림 5. 순간 전압 옹기 발생시 전압, 전류 및 용량
Fig. 5. Voltage, current and capacity at swell(with reactor)

그림 5는 그림 1과 같은 380[V] 100[μF]커패시터에 직렬로 6[%]에 해당되는 리액터를 연결한 상태에

서 순간 전압 용기 발생시 동작 전후에서 전압, 전류 및 커패시터 용량의 변화를 나타낸 것이다. 커패시터에 리액터 추가는 전압을 상승시키므로 정격전압보다 10[%]만 일시적으로 상승하는 순간 전압 용기 발생시 특성 변화를 계산하였다.

그림 5 (c)에서와 같이 커패시터에 리액터 추가시 그림 4의 120[%]보다 낮은 110[%]의 전압 상승구간에서도 커패시터 용량은 더 증가함을 확인할 수 있다. 표 3은 그림 5에 대해 정상전압 동작 구간과 순간 전압 용기 발생시 구간에서 리액터의 부착전후 전압, 전류 그리고 커패시터 용량의 크기를 비교한 것이다.

그림 5 및 표 3에서와 같이 전압변동이 없는 정상적인 구간에서 커패시터에 리액터의 부착전후에는 표 1에서 규정하고 있는 전압, 전류, 용량은 허용범위내이지만, 정격보다 10[%] 전압이 일시적으로 높은 순간적인 전압 강하시에 커패시터 용량은 표 1에서 제시한 허용범위를 초과함을 확인할 수 있다. 전압이 10[%] 이상일 경우 순간 전압 용기 발생시 상황에서는 전압은 물론이고 용량도 더욱 높은 값을 나타낼 수 있다. 따라서 커패시터에 리액터를 추가할 경우 순간 전압 용기 발생시 영역에서 안전한 동작을 확보하기 위해서는 전압의 허용범위를 더욱 줄이거나 리액터의 값을 더 낮추는 등의 대책이 필요하다고 할 수 있다.

표 3. 110[%] 전압 순간 전압 용기 발생시 해석 결과

Table 3. Analysis result at 110[%] voltage swell

구분	정상 영역		Swell 영역	
	without reactor	with reactor	without reactor	with reactor
전압 [V]	380 (100[%])	404.3 (106[%])	418 (110[%])	445.96 (117.1[%])
전류 [A]	4.775 (100[%])	5.08 (106[%])	5.252 (110[%])	5.63 (117.9[%])
용량 [VA]	1,814 (100[%])	2,053 (113[%])	2,195 (121[%])	2,510.7 (138.4[%])

5. 결 론

전기품질에서 전압품질이 차지하는 비중이 매우 높은 편이다. 이 전압품질에서 일시적으로 전압이 높거나 낮아지는 순간적인 전압강하 및 순간 전압 용기 발생시는 자주 발생할 수 있다. 본 논문에서는 매우 짧은 시간동안 순간적인 전압강하나 순간 전압 용기 발생시 현상이 자주 발생할 경우 커패시터에 어떤 영향을 주는지에 대한 변화를 리액터를 부착 전후에 대해 해석하였다.

순간적인 전압강하시에는 전압이 낮아짐에 따라 전류도 함께 감소하므로 커패시터 용량이 줄어들게 되어 규정된 값보다 낮아 문제는 없지만, 전압이 일시적으로 상승하는 순간 전압 용기 발생시 영역에서는 전압의 제곱에 해당되는 커패시터 용량이 증가하므로 규정에서 제시된 허용범위에서도 문제가 될 수 있음을 계산결과로 제시하였다. 또한 커패시터에 리액터를 연결할 경우 10[%]의 순간 전압 용기 발생시 동작에서도 용량이 증가하여 커패시터의 허용정격을 초과함을 계산결과로 제시하였다.

본 연구결과는 역률 보상용 커패시터에서 고조파 성분을 저감하기 위해 리액터를 설치하는 경우에서 전압의 일시적인 크기 변화에 따라 커패시터 용량의 적정성 판단에 많은 도움이 될 것으로 생각합니다. 본 연구결과에 이어서는 일시적인 전압상승 외 지속적인 과전압에 대해 커패시터와 리액터의 고장 원인 분석을 진행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 전력산업 연구개발 사업으로 수행한 것의 일부입니다. (과제번호 : R-2007-3-186)

References

- (1) Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005.
- (2) 김일중, 김종겸, "수동형 필터의 리액터 및 커패시터 특성 해석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.23, No.2, pp.82-88, 2009.
- (3) KSC 4801, "저압 진상콘덴서", 2003.
- (4) JIS C 4902, "고압 및 특고압 진상콘덴서용 직렬 리액터"

순간적인 전압강아 및 순간 전압 용기 발생시 전력용 커패시터의 특성 해석

진상콘덴서”, 2000.

- (5) IEEE Std 18-2002, “IEEE Std For Shunt Power Capacitors”.
- (6) Thomas M. Blooming, “Capacitor Application Issues”, IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008.
- (7) Roger C. Dugan. et al, “Electrical Power Systems Quality”, McGraw-Hill, 2002.
- (8) H.W. Dommel, “Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)”, BPA 1986.

◇ 저자소개 ◇

김중겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 한국통신공사 근무. 1988~1996 한국수자원공사 근무. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기정보통신공학부 교수. 대한전기학회 평위원. 전기기기 및 에너지 변환시스템부문 총무이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

박영진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수.

Tel : (033)760-8784

E-mail : popspark@gwnu.ac.kr

김일중 (金一中)

1958년 12월 10일생. 1980년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~2005년 주성대학 전기과 교수. 2006년 (주)일신엔지니어링 기술연구소장. 2007년~현재 호서대학교 기계공학과 교수.

Tel : (041)540-9633

E-mail : ilkim@hoseo.edu