

전압 불평형시 콘덴서 전압, 전류 및 용량의 변화

(Variance of Condenser Voltage, Current & Capacity by Voltage Unbalance)

김 중 검 · 박 영 진 · 김 일 중
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Il-Jung Kim)

요 약

3상 전압의 크기가 일정하고, 위상차도 120°인 전압이 부하에 공급되는 것이 가장 바람직하지만, 부하의 운전조건과 설계에 따라 부하 단자에서의 3상에서는 균등한 전압이 되지 않는 경우가 많은 편이다. 이와 같은 전압 불평형이 존재할 경우 전류 불평형으로 이어져 기기의 출력저하나 부하에 좋지 않은 결과를 낳게 된다. 커패시터는 역률 보상으로 사용되며, 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 저감하기 위해 리액터와 함께 사용되기도 한다. 커패시터에 리액터를 부착하여 사용하는 경우 사고 발생이 높은 편이다. 그래서 커패시터 설비에 전압 불평형이 존재할 경우 전압, 전류 그리고 용량의 변화가 어떻게 진행되는지 확인하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 전압 불평형이 존재할 경우 커패시터 단독운전과 리액터의 부착시 전압, 전류 및 용량의 크기가 규정에서 제시한 범위 이내 인지를 계산하였다.

1. 서 론

전력용 커패시터는 무효전력의 제공, 전압 안정화, 역률 개선 그리고 시스템 전력 손실의 감소에 따른 시스템 용량의 증가를 가능하게 하므로 산업현장에서 널리 적용되고 있다. 이 전력용 커패시터는 주로 온도, 전류, 전압 등의 영향으로 정상적인 수명이 보장받지 못하고 절연파괴 등으로 소손되는 경우가 많다[1-3].

커패시터의 수명에 큰 영향을 주는 요소로서는 온도 상승 외에 과부하, 전압변동, 고조파 등 전기품질에 관련된 영향을 받아 사고가 나는 비중이 점차 높아지고 있다. 따라서 각 나라별 또는 기관별로 커패시터의 안정적인 사용을 보장하기 위해 전압, 전류 등에 따른 제 규격을 정해 운영하고 있다[3].

새그나 스텔은 일시적인 전압 불평형이지만 부하의 변동에 따라 전압 불평형은 부하 운전동안 지속적으로 존재할 수 있다. 고조파도 부하의 운전동안 지속적으로 존재하는 것으로서 이 고조파를 저감하기 위해 커패시터와 직렬로 연결 사용한다. 커패시터에 리액터의 추가는 전압을 상승시켜 전압, 전류의 증가로 용량에도 변화를 일으킨다.

본 연구에서는 커패시터 단자에 전압이 일정하지 않은 불평형이 존재할 경우 커패시터에서의 전압, 전류 및 용량의 변화를 분석하였다.

2. 전압 불평형

3상 회로에서 전압 불평형은 단상부하의 불평형 배분과 운전 그리고 불평형된 3상 부하의 임피던스 연결로 발생하기도 하고, 평형 3상 부하에서도 불평형 전압 전원에 연결되면 흐르는 전류는 불평형이 되어 각 상에 서로 다른 전압의 크기가 부하에 나타난다[2].

전압 불평형을(VUF)은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다.

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

식 (1) 에서 정상분 V_1 과 역상분 V_2 은 3상 불평형 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 식 (2)와 같은 대칭성분으로서 불평형 조건 하에서 부하기기의 특성 동작을 해석할 때 편리하다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 \cdot V_{ca}}{3} \\ V_2 &= \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a \cdot V_{ca}}{3} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $a = 1 \angle 120^\circ$, $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ 이다.

현장에서 3상 선간전압만의 측정으로 식 (3)을 이용하면 전압 불평형율은 식 (2)보다 쉽게 정확한 값을 구할 수 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3)$$

식 (3)에서 β 는 다음으로 구한 것이다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

전압 불평형이 증가할 경우 선형적인 전류 불평형으로 이어져 손실증가로 인해 기기의 출력을 감소시키는 요인으로도 작용한다. 그래서 전압 불평형이 최소화될 수 있도록 시스템의 설계나 운전이 필요하다.

3. 전압 불평형시 커패시터 전압

커패시터에서 전압은 3상이 모두 정확하게 일치하지 않는

경우가 대부분이다. 각 상 또는 선간전압이 정격전압보다 높은 경우 또는 낮은 경우에 전압 불평형이 발생한다.

전압 불평형은 결상과 같은 특별한 경우를 제외하고는 대개 3%이하에서 분포하는 경우가 많다.

각 상전압이나 선간전압이 정격전압보다 낮은 전압 불평형은 커패시터에 영향을 주지 않으므로 정격전압보다 높은 전압이 단자에 나타날 경우에 대한 영향 분석이 필요하다.

그림 1은 해석하고자 하는 회로에 대한 결선도와 해석 프로그램의 입력도를 나타낸 것이다. 본 해석에는 전자계 과도 해석 프로그램을 이용하였다[4]. 전압의 크기 변화를 위해서 그림 1(b)에서 상전압의 크기를 조정할 경우 전압 불평형에 대한 크기 변화를 확인 할 수 있다.

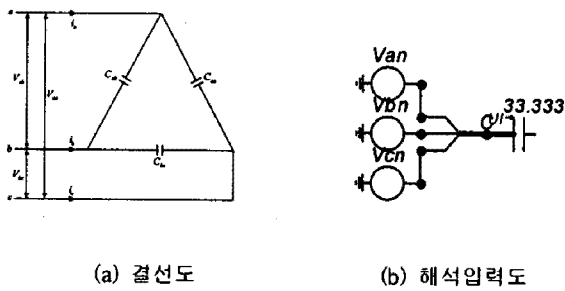


그림 1. 해석용 단선도 및 결선도

해석에 사용된 커패시터는 3상 380[V], 100[μF]를 사용하였다. 커패시터의 정격용량 Q 및 선간전류 i는 다음과 같이 구하면 된다.

$$Q = 2\pi f C V^2 = 377 \times 100 \times 10^{-6} \times 380^2 = 5,442 [VA] \quad (4)$$

$$i_L = \frac{Q}{\sqrt{3} \times V} = \frac{5442}{\sqrt{3} \times 380} = 8.27 [A] \quad (5)$$

커패시터에 인가되는 전압이 일정하지 않고 다음과 같이 각각 $V_{ab} = 386.97 [V]$, $V_{bc} = 386.88 [V]$, $V_{ca} = 381.14 [V]$ 의 선간전압이 커패시터에 인가될 경우 1%의 전압 불평형이 된다. 이와 같은 조건하에서 커패시터 한 상의 전류는 다음과 같이 구할 수 있으며, 식 (5)에서 구한 값보다 약간 높다.

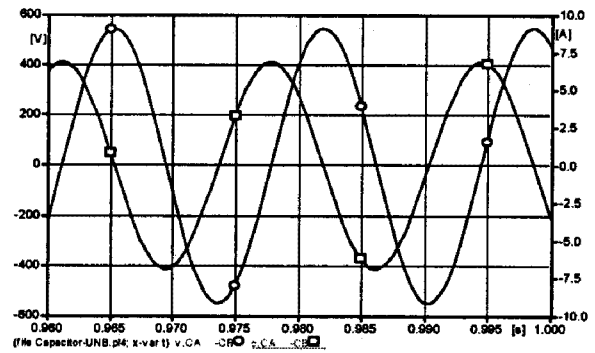
$$i_p = \frac{V}{X_c} = \frac{386.9699}{79.576} = 4.863 [A] \quad (6)$$

이와 같은 전압 및 전류에서 한 상의 커패시터 용량은 다음과 같다.

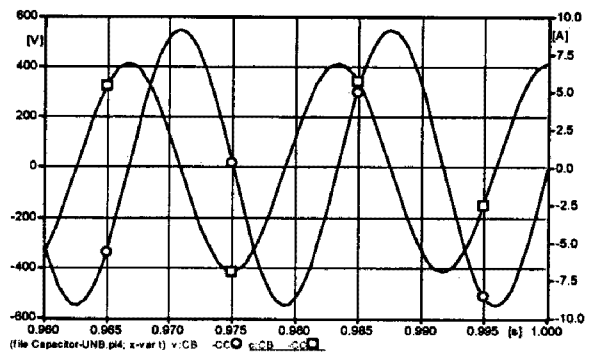
$$Q_1 = V \times i = 386.97 \times 4.863 = 1881.8 [VA] \quad (7)$$

위의 식 (7)에서 구한 계산 값은 식 (4)에서 구한 값의 1/3에 해당되는 것이지만 전압 불평형이 없는 기준 보다는 약간 높다는 것을 알 수 있다. 나머지 두 상에 대해서도 같은 방법으로 구하면 각상의 전압과 전류 그리고 용량을 계산할 수 있다.

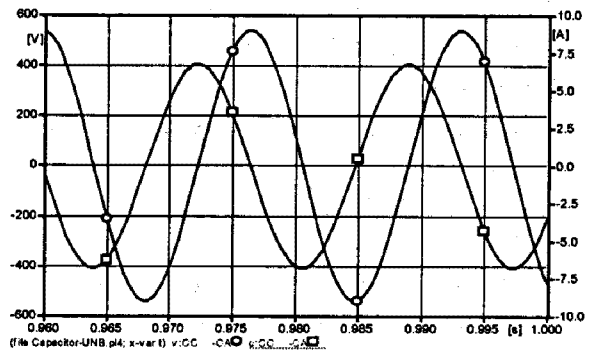
그림 2는 1% 전압 불평형시 각 상의 용량 및 전압과 전류를 나타낸 것이다.



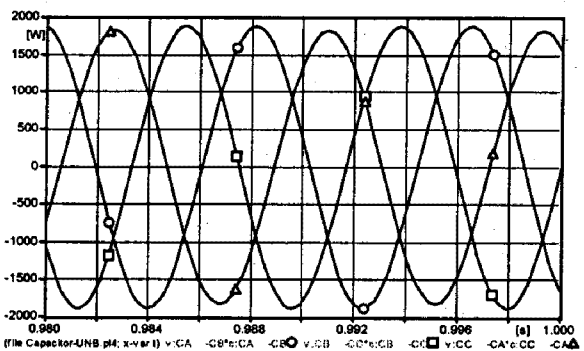
(a) A상 전압 386.9V, 전류 4.863A



(b) B상 전압 387.0V, 전류 4.861A



(c) C상 전압 381.1V, 전류 4.79A



(d) QA=1882, QB=1881, QC=1825, 합=5,588(VA)

그림 2. 전압, 전류 및 용량

그림 2에서 전압 및 전류는 실효치를 나타내고 있으며, 정격전압보다 높은 상태에서의 전압 불평형일 경우 각상에서의 전압 크기와 커패시터에 흐르는 전류가 서로 다르며, 또한 각상에서의 전류는 정격치보다 높아 콘덴서에서의 용량은 규격

에서 명시한 것보다 약간 높게 분포함을 알 수 있다.

커패시터에 미치는 영향으로부터 안전한 사용을 위해 실효치 전압, 전류 및 피크 전압과 용량에 대하여 허용범위를 표 1과 같이 규정하고 있다[5].

표 1 커패시터 허용 전압, 전류 및 용량

구분	배수	동작시간
전압	110%	24시간 중 12시간 이내
	110%	24시간 중 30분 이내
	120%	5분 이내
	130%	1분 이내
용량	135%	정격 무효전력
전류	135%	실효치

다음 표 2~4는 전압 불평형이 없는 경우에 대하여 전압 불평형율의 증가에 따른 전압, 전류 및 용량의 크기를 나타낸 것이다.

표 2. 1[%] 전압 불평형시의 전압, 전류, 용량비교

기준	A상	B상	C상
380[V]	$\frac{386.9}{380}$ = 101.8%	$\frac{387}{380}$ = 101.84%	$\frac{381.1}{380}$ = 100.29%
4.7753 [A]	$\frac{4.863}{4.7753}$ = 101.84%	$\frac{4.861}{4.7753}$ = 101.79%	$\frac{4.79}{4.7753}$ = 100.3%
1,814.6 [VA]	$\frac{1882}{1814.6}$ = 103.71%	$\frac{1881}{1814.6}$ = 103.66%	$\frac{1825}{1814.6}$ = 100.57%

표 3. 2[%] 전압불평형시의 전압, 전류, 용량비교

기준	A상	B상	C상
380[V]	$\frac{386.2}{380}$ = 101.63%	$\frac{399.8}{380}$ = 105.21%	$\frac{394.6}{380}$ = 103.84%
4.7753 [A]	$\frac{4.853}{4.7753}$ = 101.627%	$\frac{5.022}{4.7753}$ = 105.17%	$\frac{4.959}{4.7753}$ = 103.85%
1,814.6 [VA]	$\frac{1874}{1814.6}$ = 103.27%	$\frac{2008}{1814.6}$ = 110.66%	$\frac{1957}{1814.6}$ = 107.85%

표 4. 3[%] 전압불평형시의 전압, 전류, 용량비교

기준	A상	B상	C상
380[V]	$\frac{392.3}{380}$ = 103.24%	$\frac{413.3}{380}$ = 108.76%	$\frac{402.1}{380}$ = 105.82%
4.7753 [A]	$\frac{4.931}{4.7753}$ = 103.26%	$\frac{5.192}{4.7753}$ = 108.73%	$\frac{5.054}{4.7753}$ = 105.84%
1,814.6 [VA]	$\frac{1934}{1814.6}$ = 106.58%	$\frac{2146}{1814.6}$ = 118.26%	$\frac{2032}{1814.6}$ = 111.98%

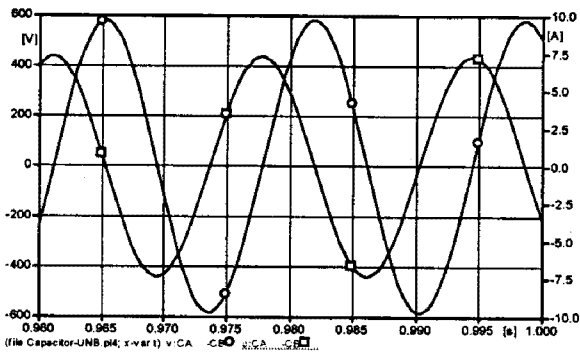
커패시터에 인가되는 전압의 불평형율에 따라 전압 및 전류 크기 그리고 용량에 대한 계산결과 전압 불평형율이 증가함에 따라 전압, 전류 그리고 용량의 값이 조금씩 증가하지만, 모두다 표 1에서 제시한 값의 범위 이내임을 확인할 수 있다.

최근 비선형 부하의 사용 등으로 인해 커패시터를 단독으로 사용하는 경우보다는 커패시터에 직렬로 리액터(L[%])를 연결하여 사용하는 경우가 많다. 비선형 부하에서 발생하는 고조파 중에서는 5고조파의 크기가 높기 때문에 이 고조파를 저감하는 동시에 역률 보상이 가능하도록 할 때 커패시터에 리액터를 설치할 경우 식 (8)과 같이 커패시터 전압(V_c)이 상승한다.

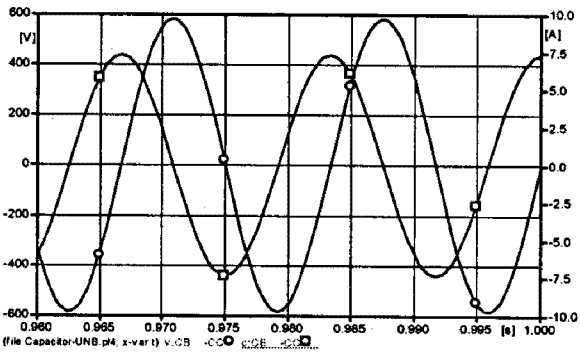
$$V_c = \frac{V}{1 - \frac{L(\%)}{100}} [V] \quad (8)$$

커패시터에 부착하는 리액터를 5고조파에 정확하게 맞출 경우 공진으로 전압 및 전류가 확대될 수 있으므로 필터와 같은 경우 유도성으로 만들기 위해 여유를 두어 5차에 해당되는 4[%] 대신 리액터를 6[%]로 사용하고 있다. 이때 식 (8)에 6[%]에 해당되는 리액터를 사용할 경우 380[V]의 커패시터에서의 전압은 404[V]로 높아진다. 3조파와 같은 설비에서는 리액터의 값을 13[%]를 선정하게 되는데 이때 커패시터의 실효치 전압은 115[%]로서 허용범위를 넘게 된다.

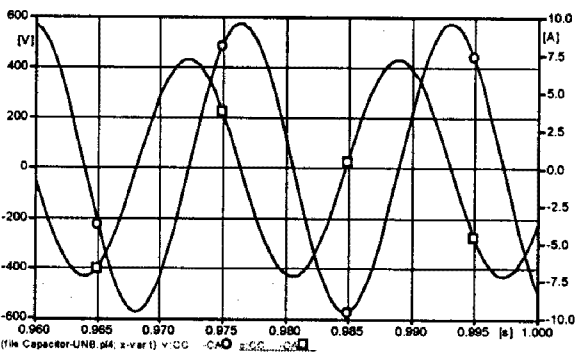
그림 3은 그림 1과 같은 380[V] 100[μF]커패시터에 직렬로 6[%]에 해당되는 리액터를 연결한 상태에서 전압 불평형이 존재한다고 가정하여 전압, 전류 및 커패시터 용량의 변화를 나타낸 것이다.



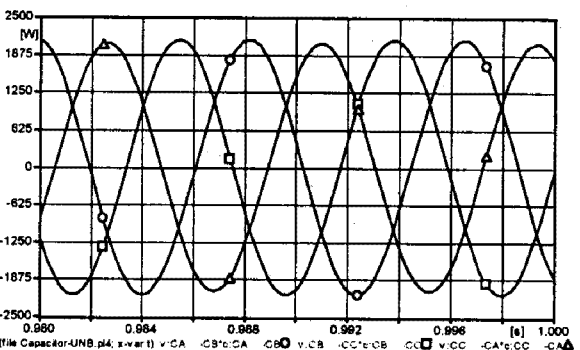
(a) A상 전압 411.6V, 전류 5.174A



(b) B상 전압 411.6V, 전류 5.171A



(c) C상 전압 405.4V, 전류 5.096A



(d) QA=2129, QB=2129, QC=2066, 합=6,324[VA]

그림 3. 전압, 전류 및 용량(6%)리액터 부착

그림 3은 같은 조건하에서 커패시터에 리액터를 부착하기 전의 그림 (2)에 비해서 전압과 전류가 증가된 것을 확인할 수 있다. 그러나 표 1에서 제시한 값의 허용범위 안에 들어감을 알 수 있다. 그러나 전압과 전류의 증가는 바로 커패시터의

용량을 변화시키기 때문에 안전한 운전위해서는 전압의 증가나 용량이 변경이 필요하다.

표 4는 표 2~3에서와 같은 전압 불평형 운전 상태에서 커패시터에 6% 리액터를 추가한 경우 전압, 전류 그리고 용량의 변화를 나타낸 것이다.

표 4. 전압 불평형시 전압, 전류, 용량(리액터부착)

구분	A상	B상	C상	
1%	전압[V]	411.6	411.6	405.4
	전류[A]	5.174	5.171	5.096
	용량[VA]	2,129	2,129	2,066
2%	전압[V]	410.8	425.3	419.8
	전류[A]	5.163	5.342	5.276
	용량[VA]	2,121	2,272	2,214
3%	전압[V]	417.4	439.7	427.7
	전류[A]	5.246	5.523	5.376
	용량[VA]	2,189	2,429	2,299

표 4에서와 같이 1%의 전압 불평형에서도 커패시터의 피크 전압이나 실효치 전압 그리고 전류 및 용량은 허용범위 안에 존재하지만, 2%의 전압 불평형에서 B상의 실효치 전압은 허용기준 110%보다 높은 111.9%의 전압이 나타나고, 3% 전압 불평형시 B상에서는 115.7%에 해당되는 전압이 나타나고 있다. 전류는 모두 허용범위 안에 들고 용량도 같은 조건임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 커패시터에 인가되는 전압에 불평형이 존재할 경우 전압, 전류 및 용량의 변화를 해석하였다. 해석결과 커패시터에 리액터를 부착하지 않은 경우는 전압 불평형을 3%에서도 허용기준 이내에 존재함을 알 수 있지만, 역률 보상 또는 고조파를 저감하기 위해 6%에 해당되는 리액터를 커패시터에 부착한 상태에서 전압 불평형율이 2%를 초과할 경우 커패시터의 전압의 허용범위를 초과함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행된 과제의 일부임(과제번호 : R-2007-3-186)

참고 문헌

- (1) Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005
- (2) 김종겸외 2인, "불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.22, No.5, pp.64-72, 2008. 05
- (3) Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008
- (4) H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.
- (5) IEEE Std 18-2002, "IEEE Std For Shunt Power Capacitors"