

A Study on the Characteristic of Capacitor by Asymmetrical Voltage Unbalance

김 종 겹[†] · 박 영 진*

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

Abstract - As the increasing of Non-linear load, we have been growing interest for the harmonics. Harmonics has been focused on the current component rather than voltages. Voltage harmonics can be mainly generated at the PCC with non-linear load and act on voltage unbalance. Voltage harmonics can be enlarged at the capacitor with low impedance as frequency increases. Capacitor is basically used for the power-factor compensation and sometimes as the passive filter. Small voltage of low-order acts on quite a few at the capacitor by the current increase. Capacitor has easily fall under by harmonic components.

In this paper, we measured the magnitude and phase angle of asymmetrical voltage with harmonics components at the PCC and calculated with the same condition. we concluded that voltage harmonics of higher order increase each current component but have a little effect on capacitor rating.

Key Words : Voltage Harmonics, Voltage Unbalance, Capacitor, Non-Linear Load, THD

1. 서 론

에너지를 효율적으로 사용하기 위해 생산된 전력 중에서 유효전력 비율을 높이기 위해 전력용 커패시터를 많이 사용한다. 전력용 커패시터는 부하에 필요한 무효전력을 전원측을 대신하여 제공할 수 있고, 전압안정도에도 기여하고 있어 수용가에서 많이 사용하고 있다[1-5].

커패시터는 순간적인 사고보다는 지속적인 전압 및 전류 스트레스로 고장이 일어나는 경우가 많다. 그래서 전압 및 전류에 대해 엄격하게 기준을 정하여 그 범위 이내에서 사용하도록 권고하고 있다. 특히 비선형 부하의 사용증가로 고조파 전류에 대한 사고빈도가 높아지고 있어 점차적으로 예전 규정에 비해 그 범위를 매우 낮게 설정하고 있다[2-6].

수용가에서 비선형 부하 사용으로 전압이 종종 왜형된 형태로 나타나게 된다. 이 전압 고조파 왜형율은 전압의 크기와 설비의 중요도에 따라 다르게 규정하고 있는데 일반 수용가의 경우 개별 부하에 대해 전압고조파 왜형율은 3[%]이하로 규정하고 있다[6,7].

최근 비선형 부하기기의 사용증가로 전원 전압에 고조파 성분이 포함되어 있고, 부하기기의 각 상 임피던스에서 차이 등에 의해 3상 전압의 크기가 서로 다르거나 위상각이 120°에서 편차를 보이는 비대칭 전압불평형이 발생하고 있다[8].

본 논문에서는 간선에서 전압 고조파 성분이 포함된 비대칭 전압 불평형의 크기변화에 대해 선형부하의 낮은 역률

보상하기 위해 설치한 역률 개선용 커패시터가 어떤 특성변화가 있는지 계산과 측정을 실시하여 결과를 분석하였다.

2. 전압 불평형, 고조파 왜형율과 커패시터

2.1 전압 불평형

전압 불평형은 3상 전원에 단상부하의 불균형 배분과 불평형 3상 부하 임피던스 연결 및 운전 등에 의해 주로 발생한다. 설계시 부하의 효율적인 분배에 의해 전압 불평형이 최소가 되도록 고려하지만 단상 및 3상 부하를 함께 사용할 수 있는 3상 4선식과 같은 간선시스템에서는 3상 3선식에 비해 전압 불평형이 높아질 수 있다. 3상에서 상전압 또는 선간전압의 서로 다를 경우를 전압 불평형이라 한다[1].

전압 불평형율은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다[1,8].

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%] \quad (1)$$

3상 불평형 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 식 (2)와 같이 정상분 V_1 과 역상분 V_2 의 대칭성분으로 변환하면 불평형 조건하에서 기기의 동작특성을 해석할 때 편리하지만, 비대칭일 경우 해석에 약간의 오차를 발생할 수 있다.

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

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

[†] 교신저자, 시니어회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

* 정희원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 5월 4일

최종완료 : 2009년 9월 3일

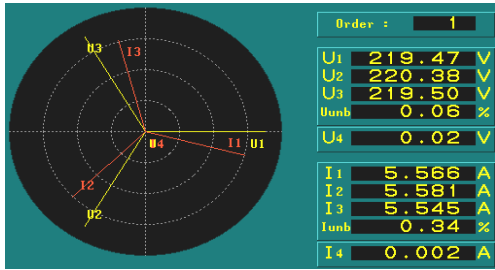
현장에서 엔지니어가 선간전압의 크기만으로 식 (1)에서와 같은 결과를 얻기 위해 식 (3)과 같이 전압 불평형율을 구하면 된다[8].

$$LVUR = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100[\%] \quad (3)$$

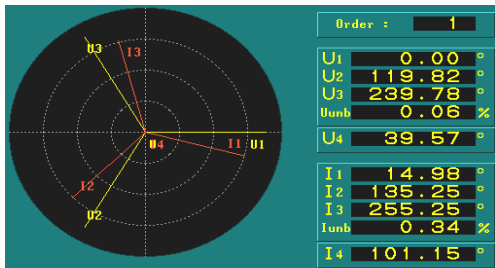
식 (3)에서 β 는 식 (4)로 계산한 것이다.

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

그림 1은 본 연구에서 역률 보상시에 전압 불평형이 거의 없는 상태에서 전압 및 전류 벡터도를 나타낸 것으로 위상각은 정확하게 120°가 아닌 미세한 비대칭을 나타내고 있으며, 상전압의 크기와 위상각을 고려하여 선간전압으로 바꾸어 식 (3)의 공식에 대입할 경우 정확한 전압 불평형율을 구할 수 있다.



(a) 크기



(b) 위상각

그림 1 역률 보상시 전압 전류 벡터도

Fig. 1 Vector diagram voltage & current at power correction

표 1 전압 불평형율

Table 1 Voltage unbalance ratio

구분	V_a	V_b	V_c	VUF[%]
balanced	219.47 $\angle 0^\circ$	220.38 $\angle -119.82^\circ$	219.50 $\angle -239.78^\circ$	0.06%
1%-asym	218.82 $\angle 0^\circ$	221.60 $\angle -118.90^\circ$	223.20 $\angle -239.17^\circ$	1.02%
2%-asym	218.14 $\angle 0^\circ$	222.53 $\angle -118.11^\circ$	227.30 $\angle 121.44^\circ$	2.00%
3%-asym	217.57 $\angle 0^\circ$	220.80 $\angle -117.60^\circ$	231.15 $\angle 122.38^\circ$	2.99%

본 연구에서 전압 불평형율이 없는 상황과 3[%]까지 존재할 경우에 대해 측정된 결과를 식 (3)으로 계산하여 나타낸 것이 표 1과 같다. 표 1에서는 기본파에 대한 것으로서 불평형율이 증가함에 따라 각 상전압의 위상각에 오차가 증가함을 알 수 있다. 따라서 전압의 크기뿐만 아니라 위상각을 고려한 불평형율 산정이 필요함을 알 수 있다.

2.2 전압 고조파 왜형률

전압 파형이 찌그러지는 주요 원인은 비선형부하 때문이다. 수용가에서 사용되는 컨버터와 같은 전력변환 장치는 정류 기간 동안 비정현적인 전류를 끌어들이므로 고조파 전류를 발생한다. 이 고조파 전류 성분들이 고조파 전압 성분을 발생시켜 수용가 간선 등의 시스템에 비정현적인 전압을 나타낸다.

전압 및 전류의 크기를 표시할 경우 기본파 외 고조파 성분도 포함되어야 된다. 정확한 해석을 위해서는 크기는 물론이고 위상각도 함께 고려해야 한다.

전압 고조파 왜형률의 허용범위는 설비의 중요도[2]와 고조파 차수별[6]로 허용범위를 두고 있다. 전압고조파 왜형률 (V_{THD})는 식 (5)와 같이 기본파에 대한 고조파 각 성분의 합으로 정하고 있다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_n^2}}{V_1} \quad (5)$$

일반적으로 전압 및 전류 고조파 중에서 주로 부하 또는 전원측에 영향을 주는 것은 전류 성분으로 이는 비선형 부하의 사용으로 전류 고조파성분의 크기가 전압 고조파 성분보다 높기 때문이다.

비선형 부하가 연결되어 있는 곳에서는 전압 고조파 성분이 발생한다. 이때 전압 성분에서 기본파와 고조파의 경우 각 크기와 위상각을 고려해야 정확한 특성을 알 수 있다. 표 2는 평형 전압에 가까운 운전 상태에서 HIOKO 3196 Power Analyzer로 측정된 전압의 크기와 위상각을 나타낸 것이다.

표 2에서 알 수 있듯이 기본파에 대해서 A상을 기준으로

표 2 상전압의 크기와 위상각

Table 2 Magnitude and angle of phase voltage

구분 차수	A상		B상		C상	
	크기 [V]	위상각 [deg]	크기 [V]	위상각 [deg]	크기 [V]	위상각 [deg]
1	219.55	0	220.40	-119.79	219.71	120.26
2	0.29	101.69	0.46	-136.19	0.30	-17.04
3	2.54	-143.29	2.26	178.55	2.89	-151.89
4	0.43	124.42	0.54	-27.34	0.21	-123.97
5	2.42	-150.21	2.68	-57.64	3.16	81.06
6	0.37	169.79	0.37	74.13	0.09	171.08
7	2.40	169.55	2.73	38.18	1.95	-53.79
8	0.18	87.68	0.43	171.40	0.42	-56.91
9	0.71	-132.06	0.15	-73.17	0.84	-162.36
10	0.18	30.87	0.16	-91.00	0.09	-20.77
11	0.18	148.77	0.38	-167.65	0.14	-19.64
12	0.06	75.62	0.09	17.94	0.05	79.39
13	0.14	45.75	0.17	-44.10	0.08	-92.83

3상 전압의 위상각이 120°씩 배치되지만 고조파의 경우 3상의 위상각이 120° 보다 약간 벗어나 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이와 같은 전압의 크기와 위상각을 고려해야 정확한 결과를 구할 수 있다.

2.3 커패시터

커패시터에 고조파 성분의 유입은 추가적인 열의 발생과 높은 유전체 스트레스를 주기 때문에 표 3과 같이 전압, 전류, 용량에 대해 동작시간과 연속적인 사용조건에 따라 제한을 두고 있다[2,3,4].

표 3 커패시터 허용 전압, 전류 및 용량

Table 3 Admissible voltage, current and reactive power

구분	배수	동작시간
전압	110%	24시간중 12시간 이내
	115%	24시간중 30분 이내
	120%	5분 이내
	130%	1분 이내
용량	135%	정격 무효전력
전류	135%	실효치
	130%	실효값(고조파 제외)

커패시터는 표 3에서와 같이 정격 실효치 전압의 110[%]에서 연속적으로 동작할 수 있어야 하고, 피크값은 정격전압의 $1.2\sqrt{2}$ 배를 초과하지 않도록 하고 있다[2,4]. 커패시터 유니트의 정격은 kVAR로 표시하고 연속적인 동작이 가능해야 하며 명판에 나타낸 값의 135[%]를 초과하지 않아야 한다[3,6,7]. 그러나 동작하는 전압이 공칭전압보다 증가하거나 감소할 경우 전달되는 정격은 다음과 같다.

$$kVAR_{delivered} = kVAR_{rated} \left(\frac{Operating\ Voltage}{Rated\ Voltage} \right)^2 \quad (6)$$

커패시터 출력은 시스템의 동작주파수에 비례하기 때문에 정격주파수와 다른 조건에서 동작할 경우 전달되는 용량은 다음과 같이 주파수에 반비례하는 특성을 나타낸다.

$$kVAR_{delivered} = kVAR_{rated} \left(\frac{Operating\ Frequency}{Rated\ Frequency} \right) \quad (7)$$

전압성분에 고조파가 존재할 경우 그 값이 작아도 주파수에 비례하여 임피던스가 줄어들기 때문에 커패시터에 전달되는 전류는 식 (8)과 같이 고조파 차수에 비례하여 확대될 수 있다.

$$i_{c_h} = \frac{V_{c_h}}{Z_{c_h}} [A] \quad (8)$$

즉 고조파 차수가 높아짐에 따라 전압의 크기는 작아도 전류 고조파 성분은 무시할 수 없을 정도가 됨을 알 수 있다. 그래서 국제 규격에서는 차수별 또는 사용의 중요성에 따라 전압 고조파 왜형율을 제한하고 있다[2,7].

3. 측정 및 결과 분석

수용가에서 사용하는 부하에는 선형부하와 비선형 부하가 있다. 그림 2에서와 같이 전력변환장치와 같은 비선형 부하가 사용되고 있을 경우 PCC에서는 전압고조파 성분이 존재한다. 이 전압 고조파 성분은 작은 값이라도 역률 보상을 위해 설치된 커패시터에는 전류 고조파 성분을 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 고조파 성분을 포함한 조건에서 전압 불평형이 존재할 경우 역률 보상을 위해 설치하는 커패시터에서의 전류 성분의 크기를 분석하였다. 사용된 선형 부하는 3.6[kW]이고, 역률은 0.8인 것을 역률을 0.96으로 높이기 위해 사용한 역률 개선용 커패시터는 3상 380[V] 30[μF]를 적용하였다.

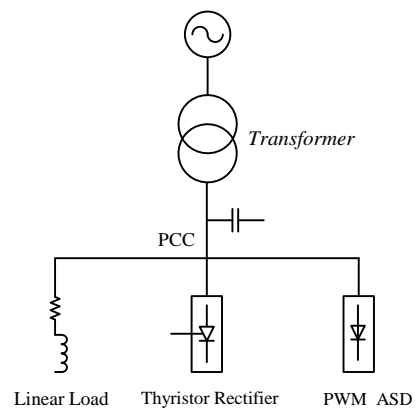
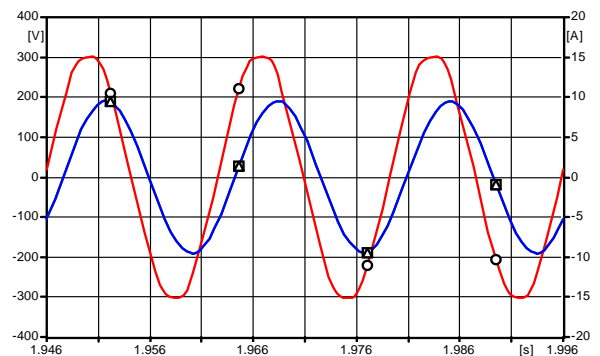


그림 2 해석 회로도

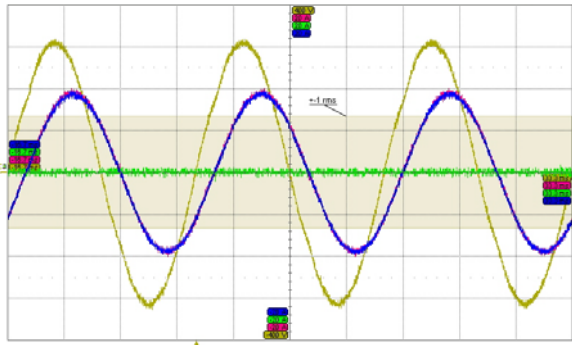
Fig. 2 Analysis circuit diagram

3.1 전압 평형시

그림 3은 전압 불평형이 거의 없는 상황에서 3.6[kW], 역률 0.8인 선형부하의 역률 보상 전에 PCC에서 전압(○) 및 커패시터 전류에 대해 시뮬레이션 및 측정된 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 위해 전자계과해석 프로그램을 이용하였다[9]. 시뮬레이션한 것과 측정 결과는 매우 정확하게 일치함을 확인할 수 있다. 전원 전압성분에 작은 크기의 고조파가 포함되더라도 부하측에 걸리는 전압과 전류 성분에는 큰 영향을 주지 않으므로 정현파에 가까운 형태를 유지하고 있다.



(a) 시뮬레이션

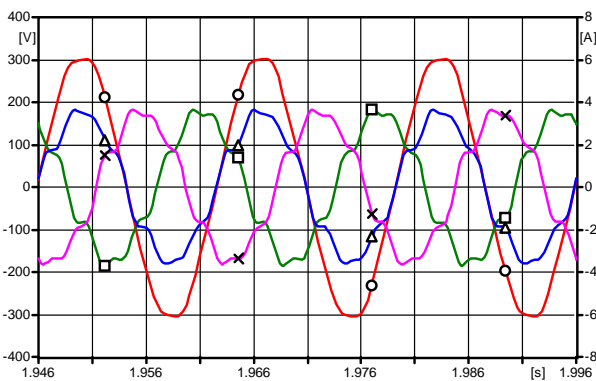


(b) 측정

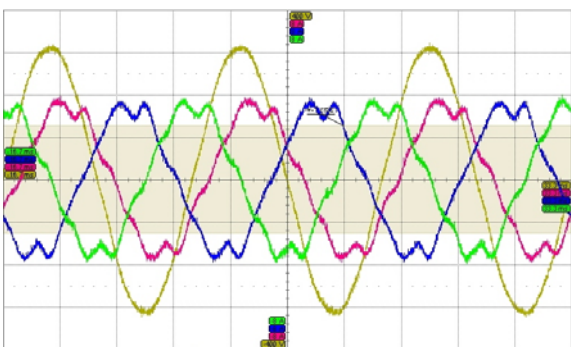
그림 3 전압평형시의 커패시터 설치 전 전압 및 전류
Fig. 3 Voltage and current at balanced voltage without capacitor

그림 4는 그림 3과 같은 선형부하에 역률을 높이기 위해 부하측에 30[μ F]의 커패시터를 설치하고서 전원전압에 고조파 성분을 고려하여 PCC에서의 전압 및 커패시터 전류 파형을 계산 및 측정한 것이다.

그림 4에서 전압평형시 전압 고조파 성분이 포함된 것으로서 전압파형의 미세한 변화에도 커패시터에 흐르는 전류 (A상:□, B상:△, C상:×) 성분에는 고조파 성분이 포함되어 전류 덩 현상을 나타내고 있음을 알 수 있다.



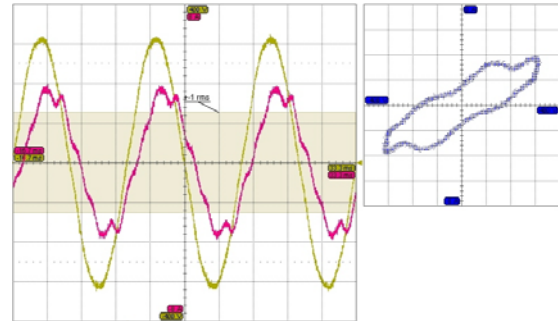
(a) 시뮬레이션



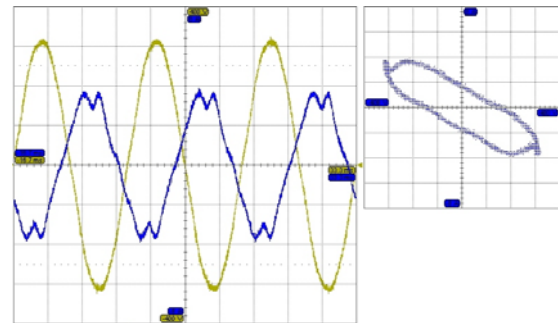
(b) 측정

그림 4 전압평형시의 커패시터 설치 후 전압 및 전류
Fig. 4 Voltage and current at balanced voltage with capacitor

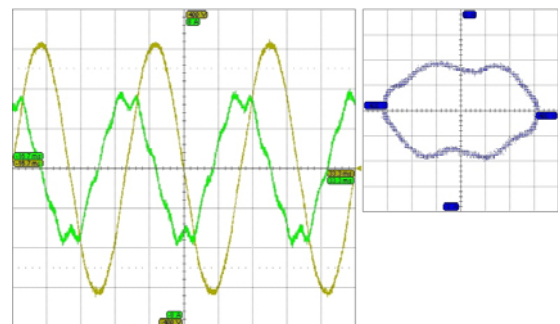
그림 5는 그림 4에서의 결과를 전압에 대해 고조파 성분이 포함된 전류를 리사주 파형으로 나타낸 것으로서 전압 고조파 성분이 포함되지 않은 경우 위상각의 변화에 따라 일정한 타원형 궤적을 그리지만 고조파 전압성분이 포함되기 때문에 궤적에서 요철현상이 존재함을 알 수 있다.



(a) R상



(b) S상



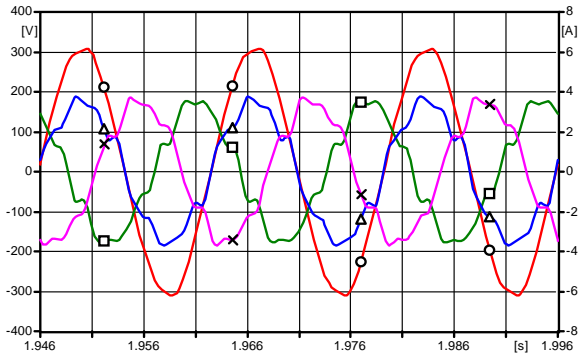
(c) T상

그림 5 상별 전압, 전류 및 리사주 파형
Fig. 5 Voltage, current and Lissajous figures

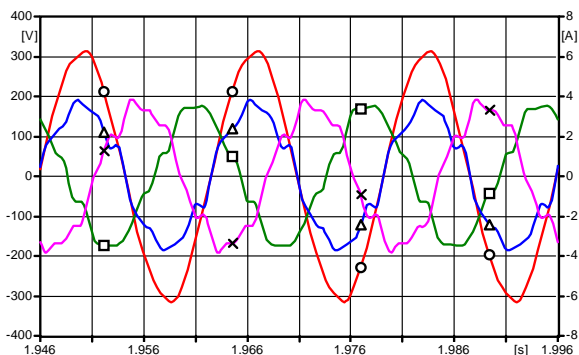
3.2 전압 불평형시

부하에 공급되는 전압이 3상 평형일 경우 부하의 최적운전에 가장 적합하지만, 실제 기기 임피던스 차이와 부하의 운전 상황에 따라 전압 불평형이 존재하게 된다. 이와 같은 전압 불평형 상황에서 커패시터가 역률을 높이는데 받는 전류 스트레스 정도의 분석이 필요하다. 그래서 전압 불평형을 표 1에서와 같이 1~3[%] 정도 변화시킬 경우에 발생하는 전압 및 전류 변화를 해석하였다.

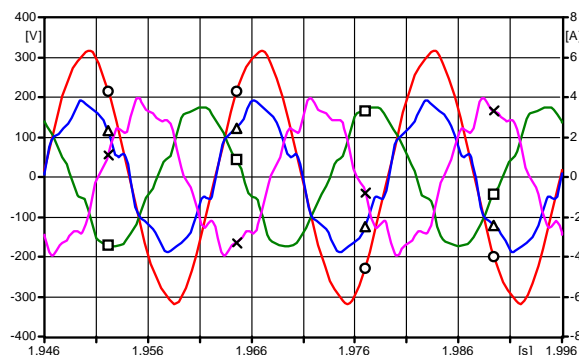
그림 6은 그림 2의 PCC에서 전압 고조파 성분이 포함된 조건하에서 선형부하 3.6[kW]의 역률을 향상시키기 위해 전압 불평형을 1~3[%]로 변화시킨 커패시터 단자에서의 전류파형을 해석한 것이다. 전압 불평형이 증가함에 따라 각 상의 전류파형은 왜형이 더욱 증가함을 알 수 있으나 각 상(A상:□, B상:△, C상:×)의 전류 크기에는 큰 차이가 나타나지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 1% 불평형



(b) 2% 불평형

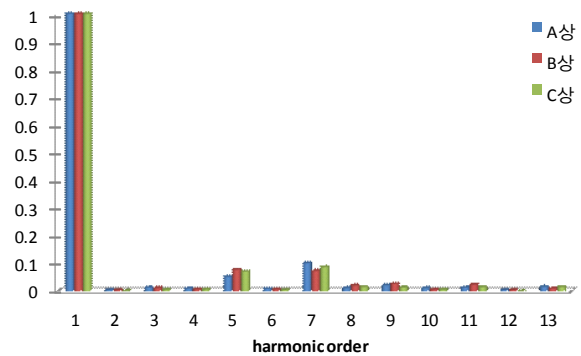


(c) 3% 불평형

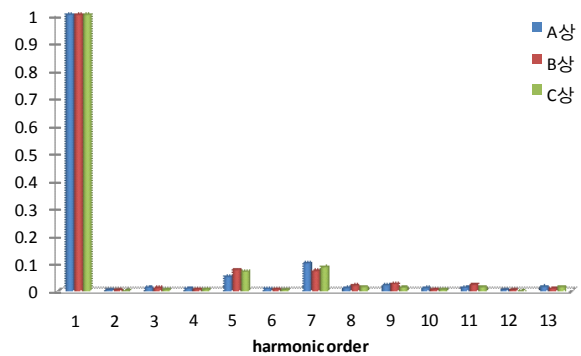
그림 6 전압 불평형에 따른 커패시터 전류
Fig. 6 Capacitor current by VUF

그림 7은 그림 6과 같은 전류 파형에 대해 전압 불평형에 따른 각 상의 전류에 대한 고조파 스펙트럼을 분석한 것으

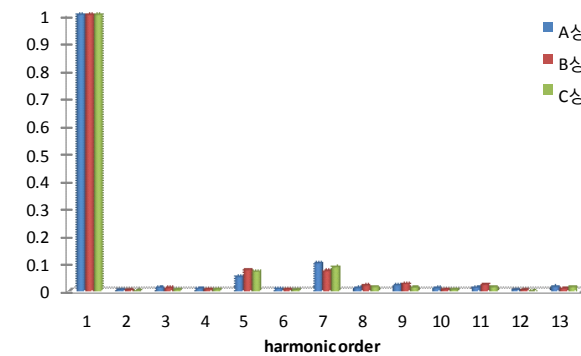
로서 전압 고조파 성분에 존재하는 것만큼 커패시터에도 같은 비율로 고조파 전류가 존재함을 알 수 있다. 1[%] 전압 불평형에서 커패시터의 전류 고조파 왜형율은 각각 11.95, 11.58 그리고 11.64[%]로서 상별로 비슷한 값을 나타내지만, 2[%]에서 각 상의 전류고조파는 각각 9.17[%]와 11.69 그리고 11.97[%]로서 상간에 약간의 편차가 발생하고, 3[%] 전압 불평형에서는 각각 7.64[%], 11.25[%] 그리고 13.03[%]로서 앞의 1[%]와 2[%] 전압 불평형에 비해 상별 전류 고조파 왜형율에 차이가 커짐을 확인할 수 있었다. 즉, 전압 불평형율이 높을 경우 어느 특정상에 흐르는 전류는 높아지게 된다.



(a) 1% 불평형



(b) 2% 불평형



(c) 3% 불평형

그림 7 전압 불평형에 따른 커패시터 고조파 스펙트럼
Fig. 7 Harmonics spectrum of capacitor current by VUF

표 4는 전압 불평형이 거의 없는 상태와 전압 불평형이 존재하는 경우 선형 부하의 역률을 보상하기 위해 전력용 커패시터를 사용하는 경우 각 상의 전압, 전류 및 커패시터 용량을 계산한 것으로서 전압 불평형이 증가할 경우 각 상의 전압 편차에 비해 전류 편차는 매우 작은 편이지만 전압의 크기에 의해 커패시터 용량은 정격용량보다 약간 증가함을 알 수 있다. 그러나 커패시터에서 규정하고 있는 값의 허용범위 이내로 안정된 값을 유지하고 있다. 전압 불평형율의 증가에 따라 커패시터 용량의 증가를 식 (6)으로 계산한 결과보다는 고조파 전압 성분의 포함으로 약간 증가함을 확인할 수 있다. 3[%] 전압 불평형일 경우 최소 용량과 최대 용량의 배율은 110[%]로서 허용된 범위 안에 들어가지만 커패시터 값에는 변화를 가져올 수 있다.

표 4 전압 불평형에 따른 커패시터 전압, 전류, 용량
Table 4 Capacitor voltage, current, VAR by VUF

구분	전압, 전류, 용량			비고 (평균)	
	ab간	bc간	ca간		
평형	V	379	379	379	379
	I	2.49	2.49	2.49	2.49
	VA	1,634.5	1,634.5	1,634.5	1,634.5
1%	V	377	383	382	380.67
	I	2.48	2.52	2.51	2.50
	VA	1,619.4	1,671.4	1,660.7	1,650.5
2%	V	376	388	387	383.67
	I	2.46	2.55	2.54	2.52
	VA	1602.1	1,713.7	1,702.6	1,672.8
3%	V	373	389	391	384.33
	I	2.44	2.56	2.58	2.53
	VA	1,576.4	1,724.8	1,747.3	1,742.8

4. 결 론

수용가에서 선형부하 외에도 전력변환장치와 같은 비선형 부하가 많이 사용되고 있다. 비선형 부하에서 발생한 고조파로 인해 선형부하와 함께 사용되는 PCC에서는 전압고조파가 발생한다.

3상 회로에서 부하의 각 상 임피던스에 약간의 차이로 인해 전원의 각상 전압의 크기가 다르고 위상각도 대칭이 아닌 경우가 발생하고 있다. 이와 같이 전압의 비대칭에 전압 고조파 성분이 존재하는 경우에 역률 보상을 위해 설치한 커패시터가 전압 불평형에 의해 어떤 동작을 하는지에 대해 해석과 측정을 실시하였다.

선형부하를 대상으로 전원측에 고조파 성분이 포함된 불평형 전압이 인가될 경우 역률 보상 커패시터는 전압 불평형율의 변화로 전압 불평형율이 증가할수록 전류의 편차는 낮지만 각 상전압의 크기에서 편차로 인해 커패시터 용량은 증가함을 확인할 수 있었다. 선형부하의 역률 보상을 위한 커패시터는 3[%] 정도의 전압 불평형에 대해 매우 안정적인 허용기준에서 정하고 있는 135[%]보다 아주 낮은 107[%]정도 밖에 되지 않아 안정적인 동작이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 전력산업 연구개발 사업으로 수행한 것의 일부입니다.(과제번호 : R-2008-3-186)

참 고 문 헌

- [1] 김일중, 김종겸, “불평형 전압 운전시 역률 보상용 커패시터의 특성 연구”, 대한전기학회 논문지, 제 57(P)권, No.1 pp.36-40, 2008. 03
- [2] IEEE Std 18-2002, “IEEE Std for Shunt Power Capacitor”
- [3] JIS C-4902, “고압 및 특별고압 진상 콘덴서 및 부속기기”, 1998.
- [4] Ramasamy Natarajan, “Power System Capacitors”, Taylor & Francis, 2005.
- [5] Thomas M. Blooming, “Capacitor Application Issues”, IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008.
- [6] IEEE Std 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”.
- [7] IEC 61000-2-2, “Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 2-2: Environment - Compatibility Levels for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Low-Voltage Power Supply Systems”.
- [8] 김종겸 외 3인, “비대칭 불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석” 대한전기학회 논문지(P) 제 53 권, No. 2, pp.58-64, 2004. 6.
- [9] H.W. Dommel, “Electromagnetic Transients Program. Reference Manual(EMTP Theory Book)”, BPA 1986.

저 자 소 개



김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 당학회 평의원, B부문 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(공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.
Tel : 033-760-8784
E-mail : popspark@nukw.ac.kr