

A Study on the Characteristic of Capacitor Current by Voltage Harmonics

김종겸[†] · 김성현* · 김일중**
(Jong-Gyeum Kim · Sung-Hyun Kim · Il-Jung Kim)

Abstract - As the increasing of non-linear load, we have a growing interest in power quality. Power quality has come to the voltage quality. Voltage harmonics consist in at the PCC by the non-linear load. Capacitor is generally used for the power compensation and as the passive filter by the serial connection with reactor. Capacitor has low impedance as the frequency increases, so easily fall down by the harmonic component of non-linear load. Small voltage of low-order acts on quite a few at the capacitor by the current increase.

In this paper, we measured the magnitude and angle of voltage at the PCC and calculated under the same condition. we checked out that lower voltage of higher order produces current magnification.

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

1. 서 론

에너지를 효율적으로 사용하기 위해 생산된 전력중에서 유효전력을 높일 수 있도록 전력용 커패시터를 많이 사용하고 있다. 전력용 커패시터는 부하에 필요한 무효전력을 전원측을 대신하여 제공할 수 있고, 전압안정도에도 기여하고 있어 수용가에서 많이 사용하고 있다.

커패시터는 주파수 증가에 따라 임피던스 값이 줄어들기 때문에 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 흡수할 수 있는 능력이 있어 최근에는 리액터와 결합하여 사용하여 경우가 점차 증가하고 있다. 커패시터에 리액터를 연결할 경우 커패시터 단자에서는 전압이 상승한다[1-3].

커패시터는 사용하는 동안 전압 및 전류에 의해 영향을 받지만, 순간적인 사고보다는 지속적인 전압 및 전류 스트레스로 고장이 일어나는 경우가 많다. 이에 따라 국제 기준에서는 전압 및 전류에 대해 엄격하게 기준을 정하여 그 범위 이내에서 사용하도록 권고하고 있다. 특히 비선형 부하의 사용증가로 고조파 전류에 대한 사고빈도가 높아지고 있어 전류의 범위를 낮추었다[3].

수용가에서 사용하고 있는 설비는 전동 및 전열과 같은 선형부하 외에 기기의 효율적인 사용을 위해 비선형 부하인 전력변환장치를 사용하는 경우가 점점 증가하고 있다. 비선형 부하의 사용으로 전력변환과정에서 고조파 전류가 발생하는 경우 이를 줄이기 위한 필터와 같은 다양한 연구가 진행되어 왔다[3]. 실제 비선형 부하가 존재할 경우 간선에는 전압고조

파가 발생하여 부하나 커패시터와 같은 기기에 영향을 줄 수 있다. 전압고조파는 커패시터와 같은 용량성 부하에서는 높은 고조파 전류의 발생으로 이어질 수 있다. 그러나 비선형 부하의 사용시 전압고조파에 대한 연구는 적은 편이다.

본 논문에서는 간선에서 비선형 부하가 사용될 경우 발생하는 전압 고조파 성분에 의해 선형부하의 낮은 역률을 보상하기 위해 설치한 커패시터가 받는 전류 고조파 성분에 대해 해석 및 측정을 통해 차수별로 얼마만큼 발생하는지를 분석하였다.

2. 전압고조파와 커패시터

2.1 전압고조파와 왜형률

전압 파형이 찌그러지는 주요 원인은 비선형부하인 경우가 대부분이다. 수용가에서 사용되는 대부분의 부하는 비정현적인 전류를 끌어들이는 전력전자 컨버터를 통해 이루어지고 있다. 고조파 전류 성분들이 고조파 전압 성분을 발생시켜 수용가 간선 등의 시스템에 비정현적인 전압을 나타낸다. 전압 고조파 왜형률의 허용범위는 설비의 중요도[2]와 고조파 차수별[4]로 허용범위를 두고 있다.

전압고조파 왜형률(V_{THD})는 다음 식 (1)과 같이 기본파에 대한 고조파 각 성분의 합으로 정하고 있다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

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

[†] 교신저자, 정회원: 강릉원주대학교 전기정보통신공학부 교수 · 공박

E-mail : jgkim@nukw.ac.kr

* 정 회원 : 공주대학교 전기전자제어공학부 교수 · 공박

** 정 회원 : 호서대학교 기계공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 4월 20일

최종완료 : 2009년 5월 20일

커패시터는 고조파 차수가 증가할수록 임피던스 값이 줄어들기 때문에 고조파 전류를 잘 흡수할 수 있는 조건을 가지고 있으므로 특정 고조파를 흡수하기 위해 리액터와 직렬로 연결하여 수동형 필터로도 사용하거나 선형 및 비선형 부하와 함께 사용하는 경우에도 역률 향상과 고조파를 함께 저감하기 위해서도 리액터와 함께 사용한다.

그림 1과 같은 부하 운전조건에서 전원측 및 부하측에 비선형부하기기가 사용될 경우 PCC(Point of Common Coupling)에서는 전압 고조파가 존재한다. 이 고조파 전압 성분은 낮은 값이라도 차수가 높아질수록 역률 보상용 커패시터에는 큰 영향을 줄 수 있다.

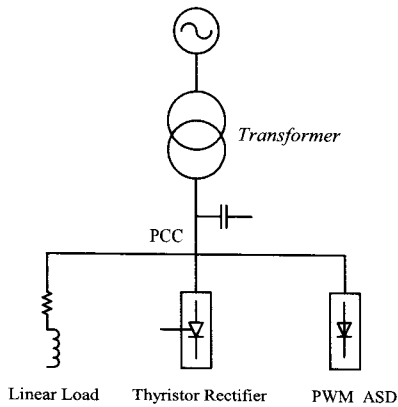


그림 1 해석 회로도
Fig. 1 Analysis circuit diagram

2.2 커패시터 전압 및 전류

커패시터는 부하에 필요한 무효전력을 제공할 수 있는 비선형 부하에서 발생하는 고조파 성분을 흡수할 수 있는 기능을 가지고 있다. 따라서 역률 보상에 사용하는 경우에는 단독으로 고조파를 흡수하기 위한 필터로 사용하는 경우에는 리액터와 함께 사용되는 경우도 있다. 최근에는 비선형 부하의 사용이 증가함에 따라 역률 보상에도 커패시터 단독 보다는 리액터를 포함시켜 사용하기도 한다.

역률 보상 또는 고조파 저감을 위해 커패시터에 리액터(L)를 연결할 경우 커패시터 전압(V_C)은 다음과 같이 상승한다[1,2,5].

$$V_C = \frac{V}{1 - \frac{L(\%)}{100}} [V] \tag{2}$$

커패시터에 직렬로 리액터를 설치할 경우에는 증가한 전압은 필터로 제거되어야 할 고조파의 차수 h 에 의해 식 (3)과 같이 구할 경우 식 (2)와 같은 결과를 얻을 수 있다[1,5].

$$V_C = \frac{h^2}{h^2 - 1} \times V [V] \tag{3}$$

전압성분에 고조파가 존재할 경우에는 그 값이 작아도 주파수에 비례하여 임피던스가 줄어들기 때문에 커패시터에 전달되는 전류는 다음 식 (4)와 같이 고조파 차수에 비례하여 확대될 수 있다.

$$i_h = \frac{V_h}{Z_h} [A] \tag{4}$$

즉 고조파 차수가 높아짐에 따라 전압의 크기는 작아도 전류 고조파 성분은 무시할 수 없을 정도가 됨을 알 수 있다. 이에 따라 국제 규격에서는 차수별 또는 사용의 중요성에 따라 전압 고조파 왜형율을 제한하고 있다.

커패시터 선정시 유의해야 할 점은 정격전압, 전류 및 결선방식에 신중해야 한다. 저압은 대개 Δ 결선이지만, 명판에 기재된 값을 그대로 적용할 경우 대개 실수를 하는 경우가 많다. 실제 커패시터 명판에 30[μ F]라고 표시한 경우 LCR미터계로 커패시터 2단자에 리드를 연결하여 측정하면 15[μ F]임을 알게 된다. 이는 Δ 결선시 두 개의 직렬 커패시터 터미널과 하나의 커패시터 터미널 단자가 병렬로 연결되기 때문에 나타나는 값이지만, 명판에 기재된 값의 1/2에 해당되는 10[μ F] 값으로 직병렬 회로를 계산하면 측정값과 정확하게 일치함을 알 수 있다. 따라서 해석 또는 실제 필요한 커패시터 값을 사용하고자 할 경우 명판에 기재된 값의 1/2에 해당되는 값을 해석이나 측정에 이용하면 정확한 특성값을 얻을 수 있다.

3. 해석 및 측정 결과 분석

전압 고조파 성분이 존재할 경우 커패시터에 어떤 전류 형태로 전달되는지를 알기 위해 선형부하만 운전한 경우(O), 선형부하에 역률보상 커패시터를 사용한 경우(\square) 그리고 역률 보상 커패시터만을 사용한 경우(Δ)에 대해 Power Analyzer를 사용하여 각 전압 차수별로 크기와 위상각을 측정하여 이를 그래프로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에서 부하가 연결되지 않고 커패시터에만 고조파 성분이 포함된 전압(Δ)이 인가될 경우가 가장 정현파에 가까운 형태를 나타내지만 선형부하에 역률 보상 커패시터를 사용할 경우 전압에는 고조파 성분이 약간 존재함을 알 수 있었다.

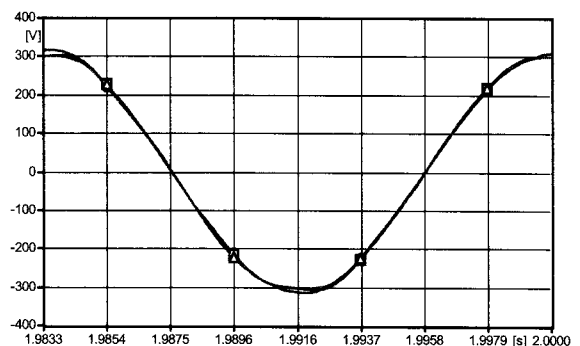


그림 2 전압 파형
Fig. 2 Voltage waveform

전압파형에 약간의 고조파 성분이 포함된 경우 역률보상을 위해 커패시터를 설치할 경우 커패시터에서의 전류가 어떻게 변화하는지 확인이 필요하다.

표 1은 그림 1의 회로에서 3.6[kW]의 선형부하에 3상 380[V], 10[μ F]의 커패시터를 설치하여 운전한 경우 전압 고조파 성분을 각 차수별로 측정하고 이를 고조파 성분에 대한

전류값을 식 (4)를 사용하여 각 차수별로 각각 구한 것이다. 기본파 전류값은 커패시터 정격전류에 해당되는 값이고, 3, 5, 7차 전압의 경우 기본파에 대해 1[%]에 가깝지만 전류의 5차와 7차의 경우 기본파에 대해 10[%]가 될 정도로 매우 높게 분포함을 알 수 있다. 또한 낮은 전압 고조파 왜형율에 대해 전류 고조파 왜형율이 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 1 차수별 전압, 전류 및 THD

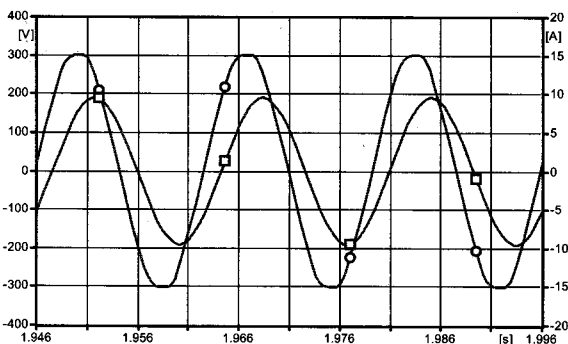
Table 1 Nth voltage, current & total harmonic distortion

구분 차수	선형부하+PFC					
	U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
1	222.5	223.2	222.5	1.453	1.457	1.453
2	0.35	0.42	0.36	0.008	0.0095	0.008
3	2.68	2.32	2.94	0.091	0.079	0.1
4	0.42	0.52	0.22	0.019	0.024	0.01
5	2.39	2.51	2.94	0.135	0.142	0.166
6	0.19	0.26	0.21	0.013	0.018	0.014
7	2.13	2.56	1.77	0.169	0.203	0.140
8	0.21	0.40	0.40	0.019	0.036	0.036
9	0.81	0.31	0.88	0.082	0.032	0.09
10	0.10	0.16	0.03	0.011	0.018	0.0034
11	0.17	0.28	0.10	0.021	0.035	0.012
12	0.03	0.05	0.03	0.004	0.0068	0.004
13	0.09	0.12	0.05	0.013	0.018	0.007
THD [%]	1.94	1.96	2.09	17.37	18.52	17.82

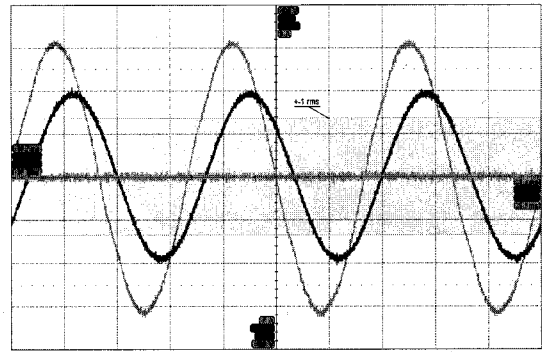
전압 고조파에 대한 영향을 고려하기 위해서는 시뮬레이션시 각 차수의 크기와 위상각으로 포함시켜야 정확한 결과를 얻을 수 있다.

그림 3은 3.6[kW], 역률 0.8인 선형부하의 PCC에서 전압(○) 및 전원측 전류(□) 및 부하측 전류(△)에 대해 시뮬레이션 및 측정된 결과이다. 그림 3(a)에 대한 파형은 표 1의 측정값을 가지고 나타낸 것이고 그림 3(b)는 그림 1의 회로에서 측정된 것이다.

그림 3에서 전원측에 약간의 전압 고조파가 존재하더라도 선형부하의 리액턴스 성분으로 인해 전압 및 전류파형은 거의 정현적인 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다.



(a) Simulation



(b) 측정

그림 3 전압 및 전류

Fig. 3 Voltage & current of linear load

그림 3에서 알 수 있듯이 전압 성분에는 약간의 고조파가 포함되어 있더라도 리액터가 포함된 선형부하에서 전류 고조파 성분은 매우 줄어 전압파형과 거의 동일한 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

전압성분에 약간의 고조파가 포함된 경우라도 부하에 흐르는 전류에 고조파 성분이 포함되어 있는지 전압에 대해 전류의 리사쥬 파형분석을 통해 확인할 수 있다. 그림 4는 그림 3(a)에 대한 전압에 대한 부하전류의 리사쥬 파형을 나타낸 것으로서 역률 0.8에 해당하는 각도만큼 전압 및 전류 파형이 고조파 성분이 포함되지 않는 타원형 형태를 나타낼 수 있다.

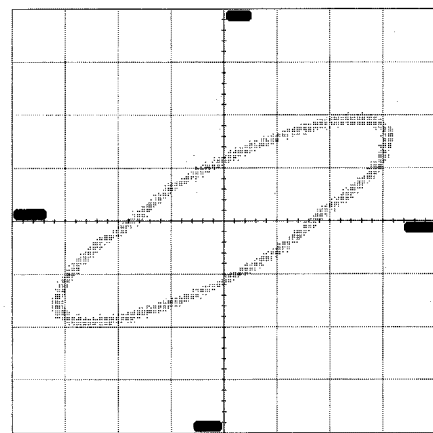
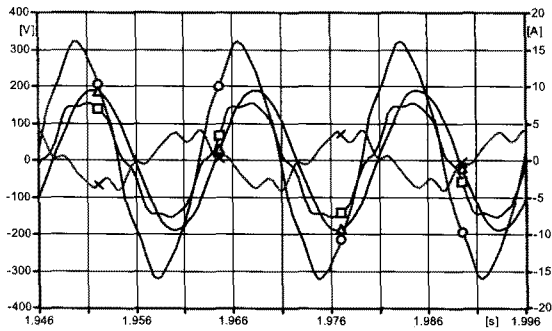


그림 4 전압 전류 리사쥬 파형

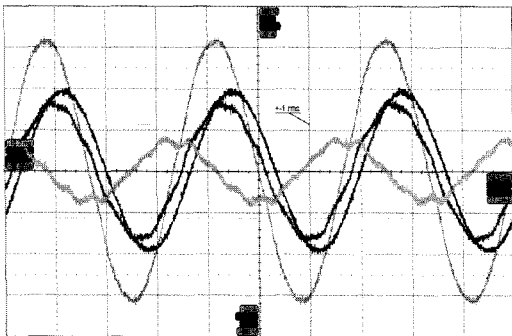
Fig. 4 Lissajous figure for voltage and current

다음 그림 5는 3.6[kW], 역률 0.8인 선형부하에 10[μF]의 커패시터를 설치하여 역률을 0.95로 높인 경우 전압 및 전류 파형을 해석 및 측정된 것이다. 실제 시스템에 적용되는 커패시터 값은 제작사 명판에 따를 경우 30[μF]의 것을 사용해야 한다. 그림 5(a)에서 고조파 성분이 포함된 전압(○)에 대해 부하측 전류(△)는 그림 3에서와 같은 형태를 가지지만, 전원측 전류성분(□)에는 고조파 성분이 포함되어 있고, 역률을 보상하기 위해 설치한 커패시터에 흐르는 전류(X)에도 고조파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이는 전

압 고조파에 의해 식 (2)에서와 같이 전압 고조파에 대해 커패시터의 주파수가 높아질수록 낮은 전압이라도 전류성분은 높게 나타나기 때문에 고조파 전류 성분이 존재하여 왜형파를 나타내고 있다.



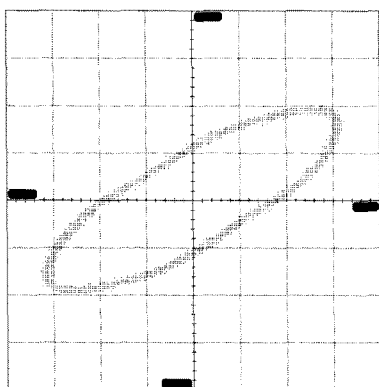
(a) Simulation



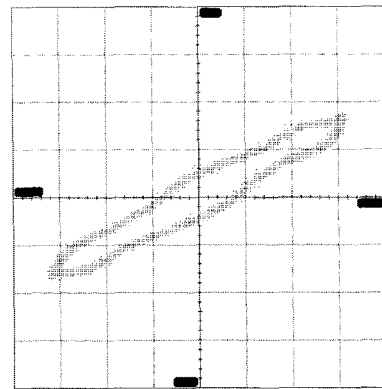
(b) 측정

그림 5 역률 보상 후의 전압 및 전류
Fig. 5 Voltage & Current with power capacitor

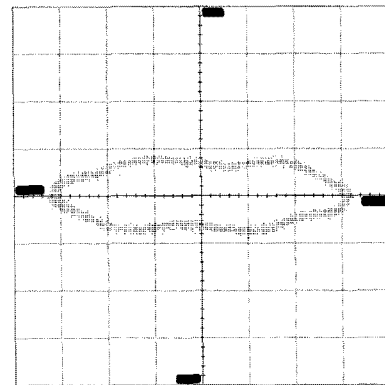
그림 6은 그림 5(b)에 대해 전원측 전압에 대해 부하측, 전원측 그리고 커패시터 전류의 리사주 파형을 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 그림 4와 같은 형태로서 전압 고조파 성분이 존재할 경우 부하전류에 대한 리사주 파형으로서 같은 위상각을 가지며 고조파 전류 성분이 거의 포함되지 않은 타원형 형태로서 역률이 지상임을 알 수 있다. 그림 6(b)는 그림 6(a)에 비해 역률이 좀더 앞선 진상의 타원형 궤적을 그리고 전원 전압에 대해 역률이 향상되었다는 것과 전압에



(a) 전압 vs 부하전류



(b) 전압 vs 전원전류



(c) 전압 vs 커패시터 전류

그림 6 역률 보상의 리사주 파형
Fig. 6 Lissajous figures at power compensation

대한 전류성분에는 요철형태의 궤적을 그리고 있어 약간의 고조파 성분이 포함되어 있다는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)는 역률 보상을 위한 커패시터의 전류를 전원전압에 대해 리사주 파형을 분석한 것으로서 그림 6(a), (b)와 달리 위상이 앞서 진상의 형태를 가지고 있고 내부 안정된 영역에서도 요철형태의 궤적을 그리고 있어 파형에는 고조파 성분이 포함되어 있다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 그림 5와 같은 운전조건하에서 커패시터가 부착된 곳에서의 전류 고조파 스펙트럼을 나타낸 것으로서 주파수가 증가함에 따라 전류의 크기가 점차 높아짐을 확인할 수 있다.

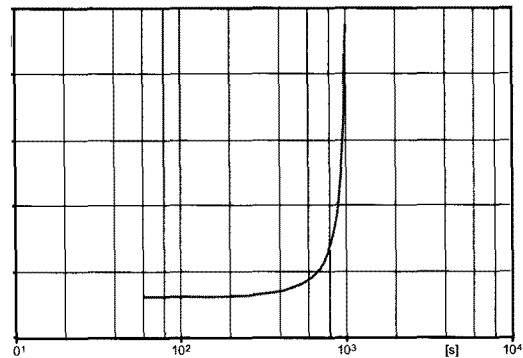
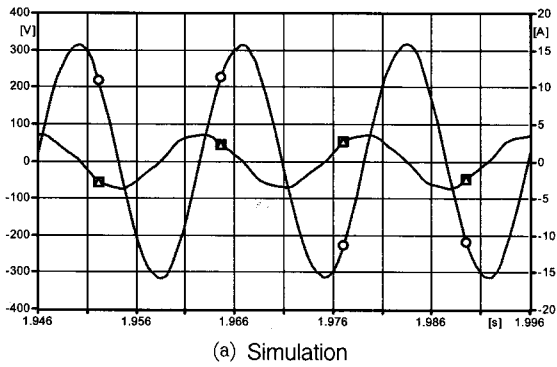
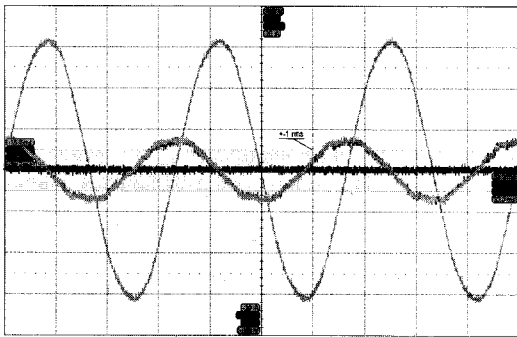


그림 7 전류 고조파 스펙트럼
Fig. 7 Current harmonics spectrum

그림 8은 전압 고조파가 존재할 경우 커패시터에 흐르는 전류에서 고조파가 어떤 변화를 나타내는지 계산 및 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 실제 전압에 고조파 성분이 포함되지 않은 경우 커패시터의 전류는 선형적인 변화를 나타내지만 그림 8(a)에서와 같이 전압성분에 약간의 고조파 성분이 포함될 경우 커패시터에 흐르는 전류에는 고조파 성분이 포함되어 왜곡된 형태를 나타낸다.



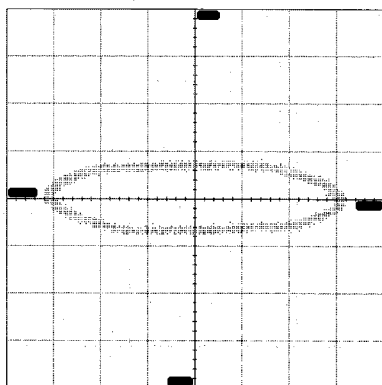
(a) Simulation



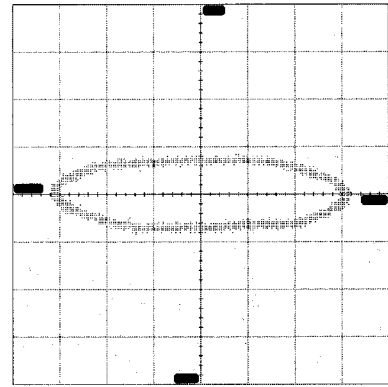
(b) 측정

그림 8 콘덴서 단독 운전시의 전압 및 전류
Fig. 8 Voltage & current at capacitor

그림 9는 전압에 고조파 성분이 포함된 경우 콘덴서만 동작할 경우 그림 8(b)에 대한 전압 및 전류 파형을 리사주 파형으로 변환한 것으로서 그림 6(c)와 같은 위상각을 가지지만, 고조파 성분은 적게 포함된 형태의 타원형 궤적을 그리고 있으며 위상은 전압보다 앞선 진상을 나타내고 있다.



(a) 전압 vs 커패시터 단자



(b) 전압 vs 커패시터 전원측

그림 9 커패시터 리사주 파형
Fig. 9 Lissajous figures at capacitor

4. 결 론

본 논문에서 저압 설비에서 선형 및 비선형 부하가 함께 사용될 경우 이 전압 고조파에 의해 커패시터가 어떤 동작 특성을 가지는지를 시뮬레이션 및 측정하였다.

저압 설비가 함께 연결되어 있는 PCC에서는 비선형 부하인 컨버터와 같은 전력변환장치가 사용될 경우 고조파 전류로 전압 고조파가 발생하게 된다.

선형 부하의 경우 낮은 역률을 높이기 위해 커패시터를 사용하므로 전압고조파가 존재할 경우 이에 대한 영향을 받는데 커패시터는 주파수 증가에 따라 임피던스가 감소하기 때문에 낮은 전압이라도 높은 전류가 흐르게 된다는 것을 계산과 측정을 비교 분석하였다.

실험에 사용된 설비에서 발생되는 전압 고조파 왜형율은 국제 기준에 정하고 있는 범위 이내이지만 각 전압 차수에 따라 전류 성분이 높게 분포한다는 것을 확인할 수 있었다.

전압성분에 고조파가 포함될 경우에 커패시터를 사용하지 않은 경우에는 전류성분에 고조파의 영향이 적어 리사주 파형 분석에도 그대로 안정된 궤적을 그리지만 커패시터를 사용할 경우에는 전압 성분에서의 고조파가 부하측 전류보다는 전원측 및 커패시터에 전류 고조파성분이 포함되어 리사주 파형 분석에서 왜곡된 궤적을 그리고 있음을 분석할 수 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 김종겸, 박영진, 이은웅, “고조파 필터용 커패시터와 리액터의 특성 해석” 대한전기학회 논문지(P) 제 58권 1호, No. 1, pp.1-8, 2009. 3
- [2] IEEE Std 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical

Power Systems”

- [3] IEEE Std 18-2002, "IEEE Std for Shunt Power Capacitor"
- [4] 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"
- [5] JIS C-4902, "고압 및 특별고압 진상 콘덴서 및 부속기기", 1998
- [6] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual(EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개



김 종 겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기정보통신공학부 교수. 현재 당학회 평의원, B부문 총무이사

Tel : 033-760-8785

E-mail : jgkim@nukw.ac.kr



김 성 헌 (金成憲)

1954년 9월 10일생. 1981년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 숭실대학교 전기공학과 졸업(석사). 1999년 충남대학교 전기공학과 졸업(공학박). 1986년 ~ 현재 공주대학교 전기전자제어공학부 교수

Tel : 041-521-9166

E-mail : shkim3456@kongju.ac.kr



김 일 중 (金一中)

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

Tel : 041-540-9633

E-mail : ilkim@hoseo.edu