

A Study on the Characteristic of Capacitor by Voltage and Current Harmonics

김종겸[†] · 박영진* · 이동주** · 이은웅***
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Dong-Ju Lee · Eun-Woong Lee)

Abstract - Capacitor is basically used for the power-factor compensation and sometimes as the passive filter to reduce harmonics of nonlinear load. Since the impedance of capacitor is inversely proportional to the frequency. The harmonic current may result in the problems of voltage distortion and resonance. Capacitor has easily fall under by two harmonic components, a nonlinear load and a distorted utility voltage. The amplified harmonic current and voltage may damage power capacitor. Hence the pre-investigation of harmonic is needed before designing and application the power factor for reducing fault rate.

In this paper, we analyzed that voltage and current with harmonics components act on the capacitor under the resonance condition. we concluded that both voltage and current harmonics have an bad effect on the capacitor and current harmonics is a bitter rather than effect by voltage harmonics.

Key Words : Voltage Harmonics, Current Harmonics, Capacitor, Non-Linear Load, Resonance Frequency

1. 서 론

전력용 커패시터는 부하에 필요한 무효전력을 전원측을 대신하여 제공할 수 있고, 생산된 전력 중에서 유효전력 비율을 높이는 것뿐만 아니라 전압안정도에도 기여하고 있어 수용가에서 많이 사용하고 있다[1-5].

커패시터는 사용하는 동안 순간적인 사고보다는 지속적인 전압 및 전류 스트레스로 고장이 일어나는 경우가 많다 [1-4]. 이에 따라 국제 기준에서는 전압 및 전류에 대해 엄격하게 기준을 정하여 그 범위 이내에서 사용하도록 권고하고 있다. 특히 비선형 부하의 사용증가로 고조파 전류에 의한 사고빈도가 높아지고 있어 전류의 범위를 낮추었다[1,3].

최근 전력 전자에 기반으로 한 에너지변환장치가 수용가에 널리 보급되어 있다. 이 장비는 비선형부하로서 높은 고조파 전류를 발생시켜 전압 파형의 왜형과 공진 문제를 일으키고 있다[4-6].

전력 커패시터의 임피던스는 주파수에 반비례하기 때문에 고조파 문제는 공진현상 발생시 더욱 문제가 될 수 있다. 이 경우에는 전력 커패시터의 고조파 전류와 고조파 전압을 증가시키게 되고, 이 증가한 고조파 전류와 전압은 전력 커패시터를 손상시키거나 주변에 위치한 장비의 동작에 방해 줄 수 있다[1,4,5]. 그러므로 설계단계에서 전력 커패시터

부착위치의 선택은 역률 보상뿐만 아니라 고조파와도 연계가 필요하다. 그러나 비선형 부하의 크기와 회로 조건 그리고 전압 고조파 등에 따라 값이 달라지기 때문에 정확한 해석을 하기 위해서는 공진주파수를 찾아 특정 차수에서 전압 및 전류의 확대 등에 대한 해석이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 전력용 커패시터가 설치된 회로에서 전압 및 전류 고조파 성분이 포함된 경우 각각에 대한 영향을 분석하기 위해 등가회로를 구성하고 공진이 발생하는 주파수를 구하였고, 계산과 측정으로 전압 및 전류 파형도 분석하였다.

2. 전압, 전류 고조파와 커패시터

2.1 전압 및 전류 고조파

그림 1은 실제 수용가에서 사용되고 있는 설비로서 선형 부하와 비선형 부하가 함께 연결되어 있다. 이와 같은 수용가 설비에는 가변속 제어장치와 같은 비선형부하와 유도전동기와 같은 선형 부하 등이 설치되어 있으며 유도성부하의 낮은 역률을 보상하기 위해 커패시터를 설치하는 경우가 대부분이다.

그림 1에서 변압기는 3상 30[kVA], 선형부하는 3.6[kW], 비선형 부하는 3상 2.2[kW] 가변속 유도전동기를 45[Hz]로 운전한 경우에 전력용 커패시터는 30[μF]를 이용하였다.

그림 1(a)에 대한 등가회로는 그림 1(b)와 같이 고조파 성분이 포함된 전압원과 비선형 부하에 의해 고조파 전류 성분이 각각 커패시터에 작용하게 된다.

해석을 간략화하기 위해 비선형 부하는 고조파 전류원 I_h 으로 간략화하고 왜형된 전압 전압은 고조파 전압원 V_h 로 고려하였다. 비선형 부하의 영향을 고려하기 위해 고조파

[†] 교신저자, 시니어회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : jgkim@nukw.ac.kr

* 정회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

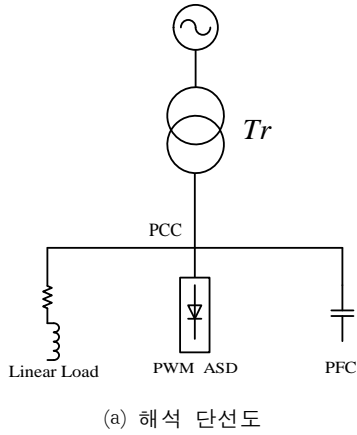
** 정회원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정수료

*** 펠로우회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박

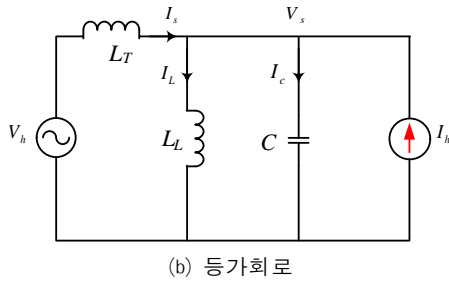
접수일자 : 2009년 6월 8일

최종완료 : 2009년 7월 17일

전압원은 단락회로로 한다. 왜형된 전압이 포함된 영향을 고려하기 위해서 고조파 전류원은 개방회로로 한다.



(a) 해석 단선도



(b) 등가 회로

그림 1 해석 단선도 및 등가 회로

Fig. 1 Analysis single line and equivalent circuit diagram

이 두 가지에 조건에서 전류원을 개방한 경우의 등가임피던스를 Z_1 그리고 전압원을 단락시킨 경우 임피던스를 Z_2 라고 하고 복소수 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$Z_1(s) = \frac{sL_T + sL_L + s^3L_TL_LC}{1 + s^2L_LC} \quad (1)$$

$$Z_2(s) = \frac{sL_TL_L}{s^2L_TL_LC + (L_T + L_L)} \quad (2)$$

여기서 L_T 과 L_L 은 각각 는 변압기와 선형부하의 리액턴스이다.

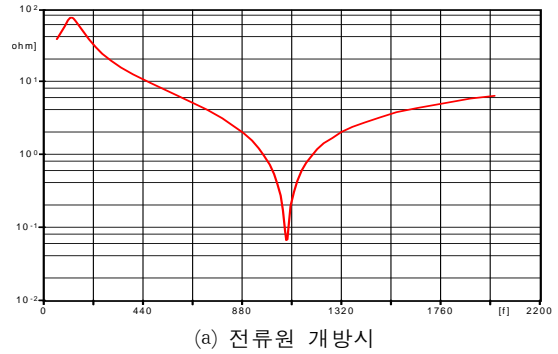
식 (1)에서는 직렬 및 병렬공진에 해당되는 주파수를 찾을 수 있고, 식 (2)에서는 병렬공진 주파수를 구할 수 있다.

그림 2는 그림 1과 같은 회로에서 전압원을 단락하거나 고조파 전류원을 개방할 경우에 식 (1), (2)로부터 주파수 스캔에 의한 임피던스 특성을 나타낸 것이다.

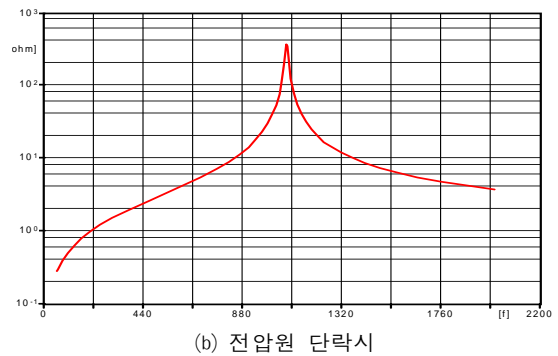
그림 2(a)에서는 전원측에 고조파 성분이 포함된 경우 리액터와 커패시터에 의한 공진현상을 분석한 것으로서 127.8 [Hz]에서는 병렬공진이 발생하고, 1,077[Hz]에서 직렬공진이 발생한다. 병렬 공진시는 전압으로, 직렬 공진시는 전류에 의해 커패시터가 영향을 받을 수 있다. 그림 2(b)는 비선형 부하에 의한 영향을 분석하기 위해 전압원을 단락시키고서 주파수 스캔한 것으로서 그림 2(a)와는 달리 1,077[Hz]에서

병렬공진이 발생한다. 즉 전압원과 전류원의 해석에 따라 같은 주파수에서 직렬과 병렬공진이 발생하고 있다.

그림 2(a)에서 병렬공진이 발생하는 주파수에서 임피던스에 비해 그림 2(b)에서 병렬공진이 발생하는 주파수에서의 임피던스가 더 높은 편이다.



(a) 전류원 개방시



(b) 전압원 단락시

그림 2 주파수 스캔

Fig. 2 Frequency scan

2.2 커패시터

커패시터는 고조파에 의해 손상이 우려되는 과부하 운전이 될 수 있다. 특히 공진조건하에서는 손상을 입을 수 있다. 고조파로부터 전력용 커패시터를 안전하게 운전하기 위한 전압, 전류, 용량에 대한 제한은 다음과 같이 정하고 있다[2].

① 유효당 kvar(기본 및 고조파 전류와 전압을 기본으로 계산하여)은 1.35[pu]를 초과하지 않아야 한다.

$$kvar_{pu} \leq 1.35 = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (V_h I_h) \quad (3)$$

② 모든 고조파를 포함한 실효치 전류는 1.8[pu]를 초과하지 않아야 한다. 만일 하나의 고조파가 존재한다면 그 크기는 기본파의 150[%]를 초과하지 않아야 한다.

$$I_{rms} \leq 1.8 = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

③ 실효치 전압은 다음과 같이 정하고 있다.

$$V_{rms} \leq 1.1 = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{max}} V_h^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

④ 랜덤하게 발생하는 전압의 합 V_s 는 다음을 초과하지 않아야 한다.

$$V_s \leq \sqrt{2} \times 1.2 \sum_{h=1}^{h=h_{max}} V_h \quad (6)$$

고조파 전류의 유입에 의해 콘덴서의 실효 kvar 용량은 기본파에 고조파 성분이 더해진다. 기본파 전류만의 경우 kvar의 용량을 Q_1 이라고 하면, 고조파 전류 유입시의 실효 kvar 용량은 다음 식과 같고, 고조파 전류가 클수록 그리고 고조파 차수가 낮을수록 실효용량의 증대는 커지게 된다.

$$Q = Q_1 \left\{ 1 + \sum \frac{1}{n} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

이 실효용량의 증대에 의해 발열량이 많아지고, 온도상승에 의해 열적열화를 초래할 수 있다.

3. 고조파에 의한 동작 해석

그림 1에서와 같이 선형 및 비선형 부하가 운전하는 경우 PCC에서 전원전압에 고조파가 포함되는 경우와 비선형 부하에 의해 전류 고조파가 발생할 경우 이 두 가지 고조파 성분에 대해 전력용 커패시터에 어떤 영향을 나타내는지 분석하였다.

전원전압에 고조파 성분이 포함된 경우에 선형부하만 운전할 경우 그림 2에서와 같이 직렬공진에 의한 영향을 고려하지 않아도 되지만, 비선형 부하에서 고조파 전류의 경우 병렬공진현상으로 임피던스가 확대된다.

본 해석에서 시뮬레이션에는 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 이용하였다[7].

3.1 전압 고조파에 의한 영향

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

표 1은 그림 1의 3상 380[V] 3.6[kW]의 선형부하 회로에서 30[μ F]의 커패시터를 설치하여 역률 보상할 경우 상전압 고조파 성분을 각 차수별로 분리하고 이를 고조파 성분에 대한 상전류를 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 대해서 전류 고조파 왜형율은 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 3은 그림 1과 같은 회로에서 전원전압에 고조파 성분이 포함된 경우 3.6[kW], 역률 0.8인 선형부하에 30[μ F]의 커패시터를 설치하여 역률을 0.95로 높인 경우 전압 및 전류 파형을 시뮬레이션 및 측정된 것이다.

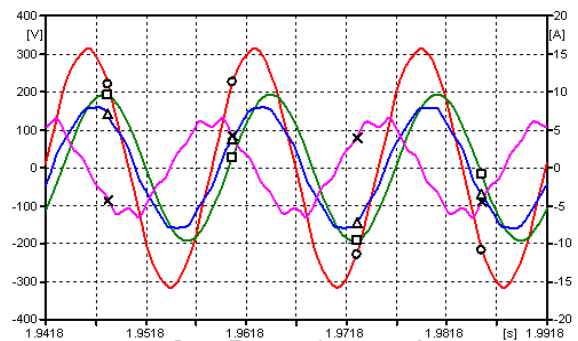
그림 3은 실제 시스템에 적용되는 커패시터 값은 제작사 명판에 따라 경우 30[μ F]의 것을 사용해야 한다. 그림 3(a)에서 고조파 성분이 포함된 전원전압(○)에 대해 부하측 전류(□)는 거의 정현적인 파형에 가깝지만, 전원측 전류성분(△)에는 낮은 차수에 아주 작은 크기에 해당하는 고조파 성분이 포함

되어 있고, 역률을 보상하기 위해 설치한 커패시터에 흐르는 전류(X)에도 고조파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이는 전압 고조파에 대해 커패시터의 주파수가 높아질수록 낮은 전압이라도 전류성분은 높게 나타나기 때문에 고조파 전류 성분이 존재하여 왜형된 형태를 나타낸다. 그림 3(b)에서 X축과 Y축의 전압 및 전류값의 범위는 그림 3(a)와 같다.

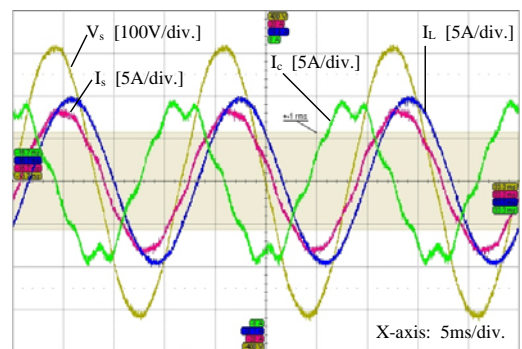
표 1 차수별 전압, 전류 및 THD

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



(a) 시뮬레이션



(b) 측정

그림 3 선형부하+PFC

Fig. 3 Linear load with power factor capacitor

그림 3(a)에서 전압파형에서는 표 1에서와 같이 고조파 성분이 아주 약간 포함된 것으로서 선형부하만의 운전시 커패시터에도 이 고조파 전압에 의해 약간의 고조파 성분이 존재한다. 이 성분을 푸리에 급수로 전개하여 고조파 스펙트럼으로 분석한 것이 그림 4이다.

그림 3에서 커패시터에 유입되는 전류에는 낮은 차수의 고조파만 포함하고 있어 그림 2(a)에서 직렬 공진에 해당되는 18차 고조파는 존재하지 않음을 알 수 있다.

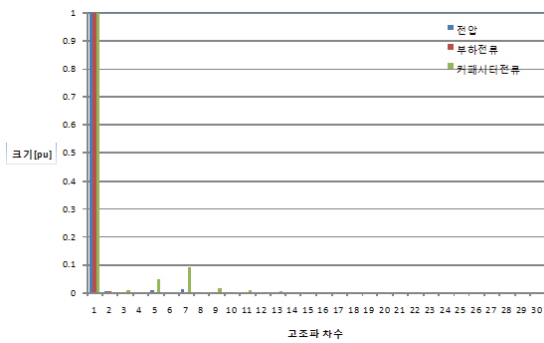


그림 4 그림 3(a)에 대한 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 4 Harmonics spectrum analysis for Fig 3(a)

3.2 전류 고조파에 의한 영향

3.1 절에서와 같은 조건하에서 순수하게 부하측 고조파 전류만에 의해 전원 및 부하측 그리고 커패시터에 미치는 영향을 분석하기 위해 PWM 인버터 장치를 사용한 경우에 대해 시뮬레이션만 하였다.

그림 5는 PWM 인버터로 2.2[kW]의 유도전동기를 45[Hz]로 운전한 경우 전원전압(○), 전원측 전류(□), 인버터측 전류(△) 및 역률 보상 커패시터 전류(X)를 시뮬레이션 것이다. 비선형 부하인 PWM 인버터의 컨버터부하에 발생하는 전류에 의해 전원파형에도 약간의 고조파 성분이 포함되어 있는 알 수 있다.

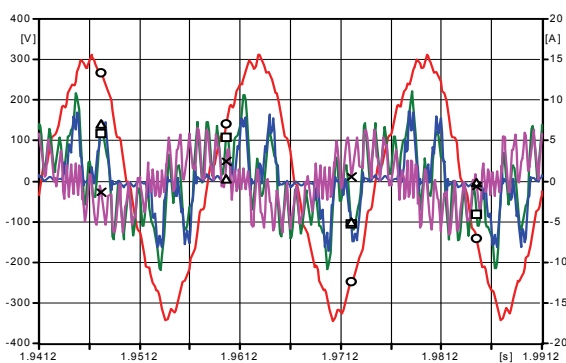


그림 5 고조파 전류에 의한 모의
Fig. 5 Simulation result by harmonics current

그림 6은 그림 5에 대한 전원전압, 부하전류 그리고 커패시터에 유입되는 전류에 대한 고조파 스펙트럼 분석결과로서 PWM 인버터에 의해 발생하는 고조파 전류의 영향으로 전원전압은 고조파 성분이 포함하지 않은 순수한 정현파를 인가하였음에도 전압 고조파 왜형을 9.2[%] 정도가 되었으

며, 커패시터 전류는 17차가 가장 높고, 그 다음으로는 19차와 13차가 높게 나타났다. 따라서 이 고조파에 해당되는 곳에서 그림 2에서와 같이 공진이 발생할 경우 커패시터는 고조파 전류에 해당되는 열이 발생하게 되어 전기적인 스트레스로 작용할 수 있다.

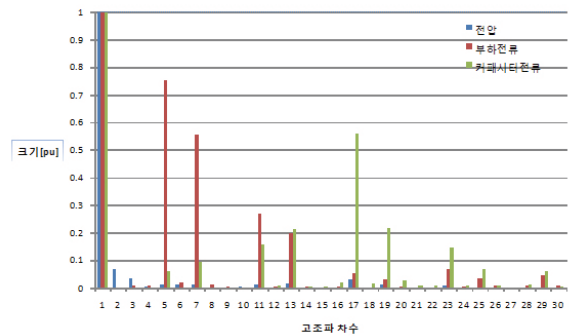


그림 6 그림 5에 대한 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 6 Harmonics spectrum analysis for Fig 5

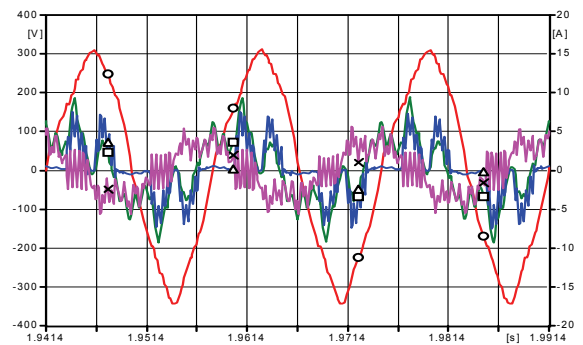
상기와 같은 고조파 전류의 유입에 의한 과전류 때문에 콘덴서 수명을 단축하지 않도록 특히 고조파 발생 부하가 있는 장소에 진상 콘덴서를 설치하는 경우 신중하게 검토해서 고조파 전류에 의한 수명단축을 일으키지 않도록 해야 한다.

3.3 전압 및 전류 고조파에 의한 영향

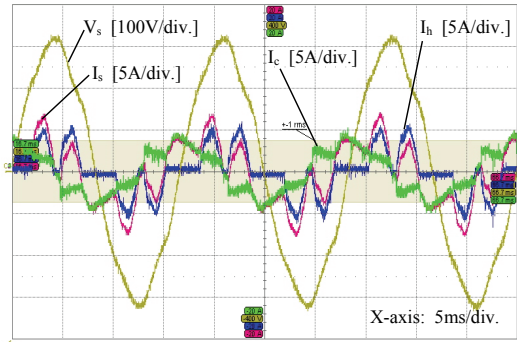
그림 1과 같은 회로에서는 전압 고조파와 전류 고조파가 함께 존재할 수 있다. 특히 PWM 인버터와 같은 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류는 전원전압에 영향을 줄 수 있다.

그림 7은 PWM 인버터에 의해 3상 2.2[kW]의 유도전동기를 45[Hz]로 운전한 경우 역률을 보상하기 위해 전력용 커패시터를 3.2절에서와 같은 조건으로 운전할 경우 전원전압(○), 전원측 전류(□), 인버터측 전류(△) 및 역률 보상 커패시터 전류(X)를 시뮬레이션 및 측정 한 것이다.

그림 7(a)에서 커패시터에서 공진현상을 상세하게 볼 수 있지만 그림 7(b)에서 측정시에 커패시터에 흐르는 전류에는 고차 연결케이블 등의 파라미터를 정확하게 고려하지 못해 고조파 성분이 나타나지 않았다. 그러나 시뮬레이션에는 18차와 같은 고조파 성분이 존재함을 알 수 있다. 이 주파수 대역에서는 병렬공진 현상이 발생하므로 전압 확대를 이어질 수 있다.



(a) 시뮬레이션



(b) 측정

그림 7 PWM+PFC
Fig. 7 PWM device with power factor capacitor

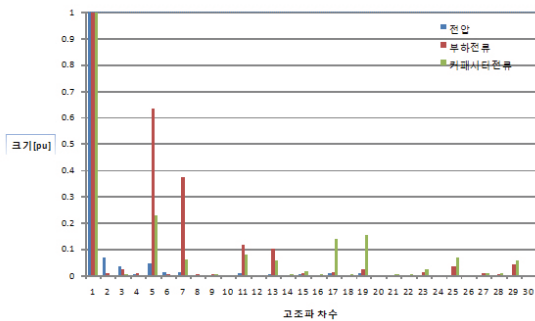


그림 8 그림 7(a)에 대한 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 8 Harmonics spectrum analysis for Fig 7(a)

그림 8에서 알 수 있듯이 전압 및 전류 고조파가 함께 존재하는 경우 부하전류에 의한 고조파의 크기와 차수는 그림 6과 같지만, 커패시터에 흐르는 전류의 크기는 병렬공진시의 임피던스로 인해 그림 6에 비해 매우 낮아졌다. 그림 5에서 커패시터에 흐르는 전류는 17차가 가장 컸지만, 여기서는 5차가 가장 크고 그 다음으로 19차, 17차, 11차, 13차 순이었다.

전압 및 전류 성분에 고조파가 포함될 경우 커패시터에서의 전압 및 전류는 실효치를 기준으로 허용범위 이내지만, 고조파 성분에 의해 해당되는 직렬 및 병렬공진 차수 근처에서는 전류가 확대되는 것을 알 수 있다.

고조파 전류의 유입으로 커패시터 용량은 식 (7)에서와 같이 고조파 성분이 포함되지 않는 경우에 비해 108[%]로 용량이 증가하였다.

4. 결 론

일반 수용가에서는 전력변환장치와 같은 비선형 부하를 함께 사용할 경우 전원전압에 고조파의 전달은 물론이고 부하측에서 발생하는 고조파 전류에 의해 커패시터와 같은 기기에 고조파에 의한 전기적인 스트레스를 가할 수 있다.

본 연구에서는 전원전압에 고조파 성분이 포함된 경우, 부하측 고조파 전류에 의한 경우 그리고 전원전압 및 부하측 전류 양쪽 모두에 고조파 성분이 포함된 경우에 대해 전력용 커패시터가 받을 수 있는 스트레스를 주파수 스캔을 통해 직·병렬 공진시에 전압 및 전류의 확대현상을 분석하

였고, 시뮬레이션 및 측정으로도 확인하였다.

전압 및 전류 고조파 성분에 대해 분석한 결과 순수한 선형부하에서 전압고조파만 고려한 경우 공진에 대한 우려는 적지만, 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파 전류에 의해서는 공진으로 전압은 물론이고 전류 고조파 성분이 높아 공진에 의한 스트레스 정도가 매우 높아짐을 확인할 수 있었다. 전압 및 전류 고조파가 함께 존재할 경우 전류고조파만 존재하는 경우에 비해 고조파 성분이 줄어들어 고조파에 의한 용량의 증가는 다소 감소함을 확인하였다.

본 연구결과를 향후 고조파 성분이 존재하는 설비에서 커패시터 등을 사용하여 역률 보상이나 고조파 저감을 위해 필터 등을 구성하는 경우에 받을 수 있는 스트레스 정도를 이해하는데 많은 도움이 될 것으로 생각한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 김종겸외 2인, “전압 고조파에 의한 커패시터 전류 특성 해석”, 대한전기학회 논문지, 제 59(P)권, No.1, pp.36-40, 2009. 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] H.W. Dommel, “Electromagnetic Transients Program. Reference Manual(EMTP Theory Book)”, BPA 1986.

저 자 소 개



김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기정보통신공학부 교수. 당학회 평의원, B부문 총무이사
Tel : 033-760-8785
E-mail : jgkim@nukw.ac.kr

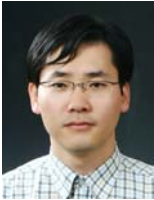


박 영 진 (朴 永 鎭)

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

Tel : 033-760-8784

E-mail : popspark@nukw.ac.kr



이 동 주 (李 東 周)

1973년 7월 31일생. 1996년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 박사수료. 1999년~현재 이화전기 기술연구소 재직중

Tel: 031-760-1232

E-mail : david.lee@eti21.com



이 은 응 (李 殷 雄)

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평위원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~97), 1997년~2000년 당 학회 부회장. 2004년도 당학회 회장, 현재 충남대 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr