

# 전압 고조파를 고려한 역률보상용 콘덴서의 특성 분석

논문

59P-2-2

## Characteristic Analysis of Power Compensation Condenser Considering Voltage Harmonics

김종겸<sup>†</sup> · 이동주<sup>\*</sup>  
(Jong-Gyeum Kim · Dong-Ju Lee)

**Abstract** - Most of the industrial loads includes the non-linear load as well as the linear load because there are many kinds of power conversion equipments at the input stage of the load in distribution network. The non-linear load causes the distortion of voltage waveform at PCC because the non-linear load generates the harmonic current. As a result, various voltage harmonics are existed at PCC depending on the current harmonics from the non-linear load. And, a series reactor is generally connected to the power capacitor in series to attenuate the distortion of voltage waveform and to reduce an inrush current of power capacitor. Also, harmonic current of power capacitor is highly dependent on the series reactor because it is operated with the power capacitor as a passive filter against nonlinear loads. Then, these capacitors might be damaged by the excessive voltage and current harmonic components.

In this paper, we presented how to select the capacitor and series reactor to meet the requirement of the voltage distortion at PCC and analyzed the voltage, current and capacity rating of the power capacitor by the computer simulation to ensure the safe operation of power capacitor when the voltage harmonics at PCC are existed. Also, the analysis data were compared with the experimental measurements for the verification.

**Key Words** : Condenser, Non-Linear Load, Harmonics, Power Factor, Filter, THD.

### 1. 서 론

전력용 콘덴서는 배전계통에서 선형부하(linear load)의 역률을 보상하기 위해서 개별 부하단에는 물론이고 변압기의 2차측에도 설치하여 널리 사용되고 있다. 하지만 배전계통에 존재하는 6펄스 정류기, 모터 구동용 가변속 구동장치(ASD)와 같은 전력전자기기는 전원측으로 많은 양의 고조파를 반송하는 비선형 부하(non-linear load)이다. 비선형 부하의 사용시 발생하는 고조파에 의해 전압파형이 매우 찌그러진다. 이 때문에 시스템의 전기품질 신뢰도를 높이기 위해 전압 고조파 왜형률을 일정한 비율 이하로 제한하고 있다[1]. 이와 같은 고조파는 전원측에 위치한 역률보상용 콘덴서에 유입되어 그 수명을 낮추는 요인으로 작용한다[1~5].

직렬 리액터는 역률보상용 콘덴서에 직렬로 연결하여 전압파형의 왜형을 경감시키고 콘덴서 투입시의 돌입전류를 억제하는 목적으로 설치하는데 콘덴서와 조합되어 1차 수동필터로 계통으로 부하의 고조파를 흡수하는 역할도 한다. 이때 직렬 리액터 용량에 따라서 콘덴서에 인가되는 전압 및 전류 파형이 변화하게 되고 이는 콘덴서의 수명을 낮추는 주요한 원인으로 작용한다[2,3,4].

최근 수용가에서 역률 보상 또는 고조파 저감을 위해 사용한 콘덴서 설비에서 정상적인 운전에서도 사고가 자주 발생하고 있다. 이들 설비에서 발생하는 사고는 시스템 공진에 의한 전압 전류의 확대와 고조파가 그 원인으로 알려져 있다[3].

그래서 본 연구에서는 비선형 부하의 종류에 따라 적합한 직렬 리액터의 선정 예를 제시하고 시뮬레이션 소프트웨어를 이용해서 콘덴서의 전압 및 전류 특성을 해석하여 결과를 실측한 결과와 비교 분석하였다. 분석결과 콘덴서와 리액터 설계시 전압 고조파에 대한 영향 고려가 필요함을 확인할 수 있었다.

### 2. 시스템 구성 및 등가회로

#### 2.1 시스템 구성

수용가 부하에는 저항성 및 유도성 부하와 같은 선형부하 외에도 직류나 가변전압 가변 주파수 제어를 통해 기기의 효율적인 운전을 위해 사용되는 전력변환장치를 이용하는 경우가 많은 편이다. 선형부하의 경우 낮은 역률을 보상하기 위해 부하측 단자에 역률 보상 콘덴서를 설치하면 되지만, 전력변환과정에서 발생하는 고조파 성분을 줄이기 위해서는 변환기 앞단에 리액터와 콘덴서를 함께 사용하는 경우가 많다.

그림 1은 일반 수용가에서 널리 사용되고 있는 선형부하와 비선형 부하의 혼합 구성 시스템을 나타낸 것이다.

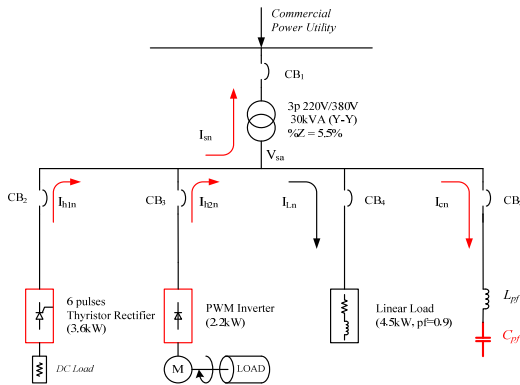
그림 1(a)는 6펄스 사이리스터 정류기, PWM 인버터, 선형 부하, 역률보상용 콘덴서 및 직렬리액터로 구성된 전형적인 전원 시스템의 구성 예이고 그림 1(b)는 그림 1(a)의 고조파 발생원인 6펄스 사이리스터 정류기와 PWM 인버터의 입력측에 각각 라인 리액터( $L_{ac}$ )와 5 고조파 필터( $L_h$  및  $C_h$ ) 및 인버터 필터 리액터( $L_{inv}$ )를 각각 설치한 경우의 전원 시스템 구성 예이다.

수용가의 역률 보상을 위해 콘덴서를 부하마다 설치하는 경우와 변압기 2차측에 변압기의 용량에 일정 비율로 설치하는 경우가 있다. 500[kVA] 이하의 경우 5[%] 정도를 설치

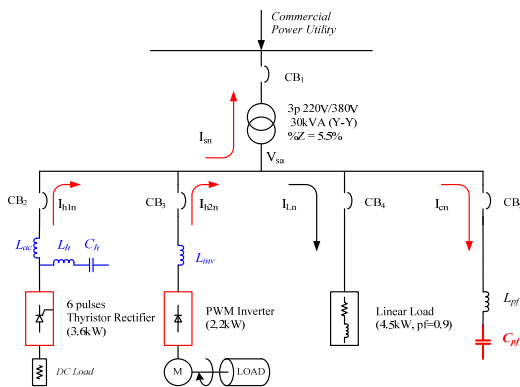
<sup>†</sup> 교신저자, 시니어회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박  
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

<sup>\*</sup> 정 회원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정수료  
접수일자 : 2010년 3월 2일  
최종완료 : 2010년 3월 26일

하면 되지만, 선형과 비선형 부하를 함께 사용하는 경우 상황은 달라지므로 정확한 해석과 측정을 통한 적정 용량의 선정이 필요하다.



(a) 고조파 발생원에 필터를 설치하지 않은 경우



(b) 고조파 발생원에 필터를 설치한 경우

그림 1 고조파원에 필터 설치에 따른 시스템 구성

Fig. 1 System configuration for harmonics sources with/without filter

2.2 등가 회로 및 콘덴서 유입전류

비선형 부하에서 발생하는 고조파에 의해 콘덴서와 리액터가 어떤 동작을 하는지 해석하기 위해서는 등가회로 구성이 필요하다. 그림 2는 그림 1(a) 및 1(b)의 등가회로를 나타낸 것으로서 그림 2에서  $Z_{Ln}$ 은 선형부하의 n차 고조파 임피던스,  $Z_{cn}$ 은 전력용 콘덴서( $C_{pf}$ )와 직렬리액터( $L_{pf}$ )의 n차 합성 고조파 임피던스,  $Z_{tn}$ 은 입력측 변압기의 n차 고조파 임피던스,  $Z_{sn}$ 은 전원측 n차 고조파 임피던스이다. 일반적으로 전원측 단락용량이 매우 크므로  $Z_{sn}$ 은  $Z_{tn}$ 에 비해서 충분히 작은 값이기 때문에 해석상에서 무시할 수 있고, 선형부하의

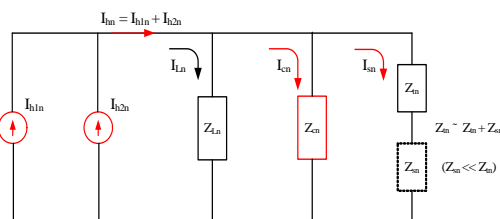


그림 2 그림 1의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of Fig.1

n차 고조파 임피던스는 상대적으로 크기 때문에 비선형 부하로부터의 고조파 성분의 대부분은  $Z_{sn}$ 과  $Z_{cn}$  축으로 분류되어 전달된다.

따라서 두 종류의 비선형 부하로부터 발생하는 합성 고조파 전류( $I_{hn}$ )는 식 (1)과 같이 나타내지고 이 고조파 전류( $I_{hn}$ )중에서 전원측 변압기로 흐르는 전류는  $I_{sn}$ 이고, 전력용 콘덴서축으로 유입되는 전류( $I_{cn}$ )는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{hn} = I_{h1n} + I_{h2n} \tag{1}$$

$$I_{cn} = I_{hn} \times \frac{Z_{pm}}{(Z_{pm} + Z_{cn})} \tag{2}$$

(여기서,  $Z_{pm}$  :  $Z_{Ln}$ 과  $Z_{tn}$ 의 병렬 합성 임피던스 [ $\Omega$ ])

3. 역률보상용 콘덴서와 직렬 리액터의 선정

수용가에서 비선형 부하의 사용시 역률 보상과 공진에 의한 영향을 감안한 콘덴서와 리액터의 계산은 다음과 같은 절차에 따라 실시할 경우 적절한 파라미터를 구할 수 있다. 우선 유효전력과 역률을 계산하고서 역률 보상을 위한 콘덴서를 선정한다. 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 고려하여 줄여야 할 고조파의 차수와 공진주파수를 선택한다. 다음으로 콘덴서에 부착해야 할 리액터를 계산한다. 콘덴서와 리액터를 결정한 다음 PCC에서 전압 고조파를 계산한다. 이때 계산된 전압 고조파가 허용되는 범위 이내 인지의 여부에 따라 여러 번 반복 계산하여 적절한 리액터와 콘덴서 값을 산정하면 된다.

역률보상용 콘덴서( $C_{pf}$ )와 직렬 리액터( $L_{pf}$ )의 선정 방법은 그림 3과 같다. 컴퓨터 시뮬레이션 소프트웨어를 이용해서 비선형

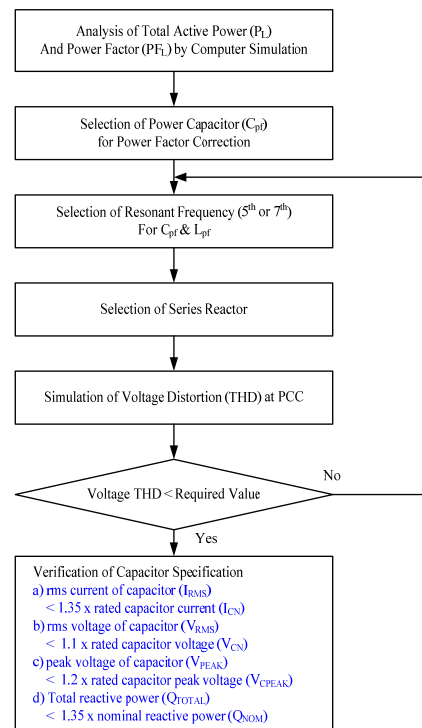


그림 3 선정 방법

Fig. 3 Selection method

부하와 선형부하 운전시, 유효전력( $P_L$ )과 역률( $PF_L$ )을 구하고 일정한 역률을 유지하기 위해 보상되어야 할 콘덴서 값을 선정할 후, 전압 파형의 왜형을 최소화할 수 있는 고조파 차수에 적합한 직렬 리액터를 선정하였다.

그림 1과 같은 부하의 운전시 콘덴서에 유입되는 고조파 전류를 각 차수별로 구한 다음 PCC(Point of Common Coupling)에서 고조파 전압을 계산하고서 역률 보상과 함께 저감되어야 할 차수의 고조파를 줄이기 위해 콘덴서와 리액터 파라미터를 구한다. 계산한 파라미터는 국제규격에서 제시하고 있는 허용범위내인지의 파악이 매우 중요하다.

커패시터에 고조파 성분의 유입은 추가적인 열의 발생과 높은 유전체 스트레스를 주기 때문에 표 1과 같이 전압, 전류, 용량에 대해 동작시간과 연속적인 사용조건에 따라 제한을 두고 있다[6].

표 1 커패시터 허용 전압, 전류 및 용량

Table 1 Admissible voltage, current and reactive power

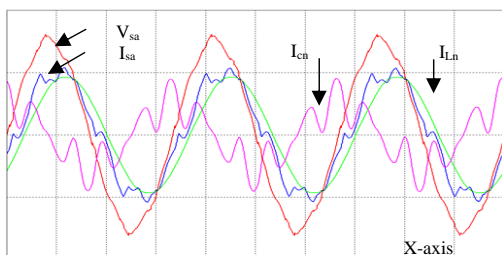
구분	배수	동작시간
전압	110%	24시간 중 12시간 이내
	110%	24시간 중 30분 이내
	120%	5분 이내
	130%	1분 이내
용량	135%	정격 무효전력
전류	135%	실효치
	130%	실효값(고조파 제외)

#### 4. 시뮬레이션 및 측정 결과 비교

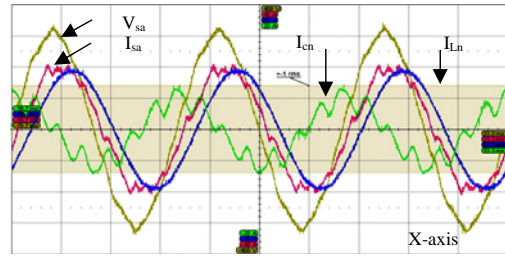
##### 4.1 고조파 발생원에 필터를 설치하지 않은 경우

그림 4는 그림 1(a)의 전원 시스템에서 전원전압( $V_{sa}$ ), 전원전류( $I_{sa}$ ), 부하전류( $I_{Ln}$ ) 및 역률보상용 콘덴서에 유입되는 전류( $I_{cn}$ )를 시뮬레이션 소프트웨어(PSIM)로 해석한 결과와 실측한 파형을 나타낸 것이다. 콘덴서에 흐르는 전류는 진상성분으로서 시뮬레이션과 측정결과는 매우 일치함을 알 수 있다.

그림 4에서 전압 파형은 비선형 부하의 영향으로 고조파 성분이 포함되어 있으므로 약간 찌그러진 형태가 되어 각 전압 고조파 차수에 따라 콘덴서에도 차수별로 고조파 전류성분이 달라진다. 그림 4에서 선형 부하의 전류( $I_{Ln}$ )는 고조파 성분이 거의 나타나지 않지만, 전원측 및 콘덴서에 유입되는 전류( $I_{cn}$ )에는 고조파 성분이 포함되어, 그 중에서도 콘덴서의 전류파형이 가장 찌그러진 것을 알 수 있다. 따라서 비선형 부하의 운전으로 고조파 전류에 의한 영향을 가장 많이 받는 것은 역시 콘덴서 설비라는 것을 알 수 있다.



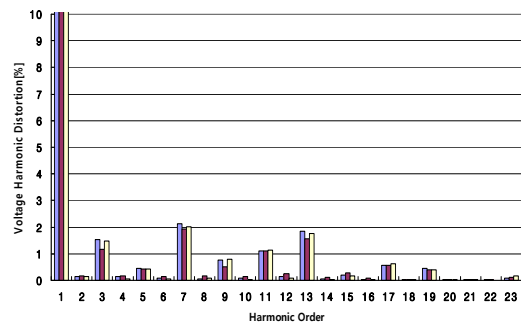
(a) 시뮬레이션 결과



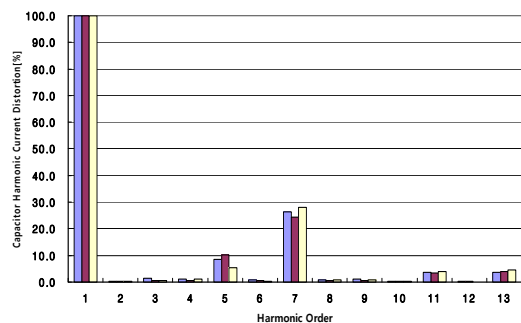
(b) 실측 결과

그림 4 고조파 발생원에 필터를 설치하지 않은 경우  
Fig. 4 Without any filter at the harmonic source

그림 5(a)는 그림 4의 전압에 대한 고조파성분의 차수별 크기를 나타낸 것이다. 기본파 성분 이외에 3, 7, 11, 13차와 같은 홀수차 성분의 고조파가 존재함을 알 수 있다. 그래서 전압 고조파 왜형률은 증가하게 된다. 그림 5(b)는 그림 4에서 콘덴서로 유입되는 고조파 전류의 차수별 크기를 나타낸 것으로서 고조파 발생원에 필터를 설치하지 않고 역률 보상 콘덴서와 리액터만으로 운전하는 경우에 7차 고조파가 5차 고조파 성분보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 경우에는 콘덴서와 리액터를 7차에 맞추어 선정할 필요가 있다.



(a) 전압 고조파



(b) 콘덴서 고조파

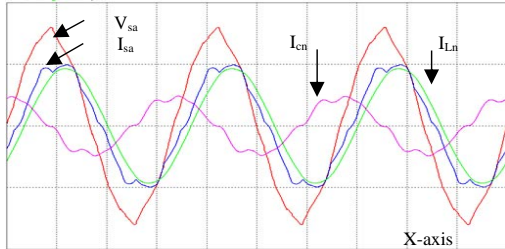
그림 5 전압 및 콘덴서 전류 고조파(1)  
Fig. 5 Voltage & condenser current harmonics(1)

##### 4.2 고조파 발생원에 필터를 설치한 경우

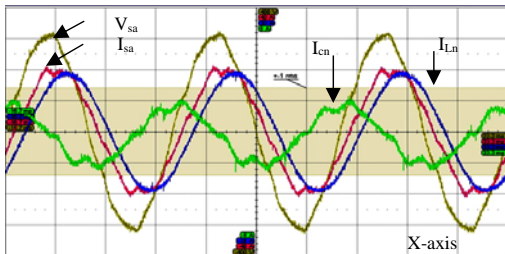
비선형 부하에서 발생하는 고조파가 임피던스가 낮은 쪽으로 흘러 영향을 주기 때문에 발생원에 가장 가까운 쪽에 저감용 필터를 설치하는 경우가 많다.

그림 6은 그림 1(b)의 전원 시스템에서 전원전압 ( $V_{sa}$ ), 전원전류 ( $I_{sa}$ ), 부하전류( $I_{Ln}$ ) 및 역률보상용 콘덴서에 유입되는 전류( $I_{cn}$ )를 시뮬레이션 소프트웨어로 해석한 결과와 실측한 파형이다.

그림 6에서 보는 바와 같이 고조파 발생원에 필터를 설치한 경우는 그림 4와 같이 필터를 설치하지 않은 경우에 비해서 현저하게 고조파 전류가 역률보상용 콘덴서에 유입되고 있는 것을 확인

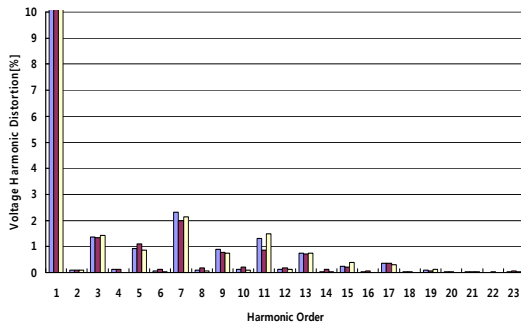


(a) 시뮬레이션 결과

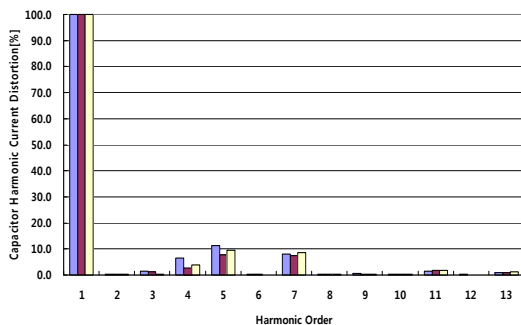


(b) 실측 결과

그림 6 고조파 발생원에 필터를 설치한 경우  
Fig. 6 With some filter at the harmonic source



(a) 전압 고조파



(b) 콘덴서 고조파

그림 7 전압 및 콘덴서 전류 고조파(2)  
Fig. 7 Voltage & condenser current harmonics(2)

할 수 있다. 또한 전원측에 흐르는 전류도 그림 4와 달리 고조파 성분이 저감된 것을 알 수 있다.

그림 7은 그림 6과 같은 운전조건에서 PCC에서의 전압고조파와 콘덴서에 흐르는 전류에 대한 고조파 전류 스펙트럼 분석결과이다. 비선형 부하의 사용으로 기본과 외 홀수차 고조파 성분이 포함되어 그림 6에서와 같이 전압 파형이 약간 찌그러진 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 콘덴서에 흐르는 전류에 대해 차수별 고조파를 분석한 것으로서 비선형 부하에 필터를 설치하여 필터를 설치하지 않는 그림 5(b)와 달리 고조파 전류가 저감됨을 알 수 있다.

### 4.3 결과 분석

부하의 역률 보상과 고조파를 저감하기 위해서는 콘덴서와 리액터를 함께 사용해야 한다. 그러나 리액터와 필터의 사용에서도 PCC에서 전압 고조파 왜형률의 범위를 벗어나지 않도록 고려할 필요가 있다. 일반 수용가의 경우 전압 고조파 왜형률은 대개 5%이하가 되도록 권고하고 있다[6].

표 2는 비선형 부하 및 선형 부하의 운전에서 고조파 발생원에 필터를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우 역률을 95% 이상 유지하기 위해 주 변압기 2차측에 설치하는 역률보상용 콘덴서와 직렬리액터의 파라미터를 그림 3의 방식으로 구한 결과이다.

표 2 선정 결과

Table 2 Selection result

시스템 구성	그림 1(a)	그림 1(b)
총 유효전력 ( $P_L$ )	10.3kW	10.3kW
역률 ( $PF_L$ )	0.88→0.95	0.93→0.95
역률보상용 콘덴서 ( $C_{pf}$ )	45 $\mu$ F	15 $\mu$ F
직렬 리액터 ( $L_{pf}$ )	3.191mH	18.763mH

계산결과 그림 1(a)의 경우 7차 고조파를 저감하기 위한 파라미터가 산출되었으며, 고조파 발생원에 필터를 설치한 그림 1(b)의 경우에는 5차 고조파에 해당되는 파라미터가 산출되었다. 그러나 실체는 이 고조파에서는 공진에 의한 영향 때문에 실제로 약간 낮은 차수를 선정하여 설계한다. 여기서는 5차의 경우 4.7차, 7차의 경우에 6.6차에서도 콘덴서의 특성을 분석하였다.

그림 3에 따라 그림 4와 6의 경우 콘덴서에서의 전압, 전류 및 용량에 대한 정격을 계산할 경우 그 값은 다음 표 3 및 4와 같다.

표 3에서 알 수 있듯이 비선형 부하의 고조파 발생원에 필터를 부착하지 않고 운전한 경우 역률 보상 콘덴서(PFC)만 부착하고도 콘덴서가 정한 규정범위 이내에 들어가지만, 전압 고조파는 6.65%로서 규정범위를 초과하게 된다. 그러나 역률 보상과 함께 전류 고조파 성분을 저감하기 위해 콘덴서에 리액터를 7차와 6.7차에 해당되도록 설계할 경우 전압 고조파 왜형률은 물론이고, 콘덴서의 정격용량은 허용범위 이내에 들어감을 알 수 있다.

다음 표 4는 고조파 발생원에 필터를 설치하고 운전할 경우 역률 보상을 위해 콘덴서만 설치한 경우와 리액터를 추가한 경우의 전압 고조파 왜형률과 콘덴서에 대한 특성값 변화를 해석한 것이다.

표 4에서와 같이 비선형 부하의 발생원에 필터를 부착하고서 콘덴서만 부착한 경우, 콘덴서와 리액터를 직렬로 부착한 경우에 대한 콘덴서의 허용범위를 계산한 결과 PFC만으로도 전압 고조파

표 3 계산 결과(1)

Table 3 Calculation result(1)

구분	허용 기준	PFC만 설치	PFC+리액터추가	
			7차 공진	6.7차 공진
$V_{THD}(\%)$	5% 이하	6.65%	3.31%	3.6%
정격전류 ( $I_{rms}=2.15A$ )	2.90A (정격전류의 135%)	2.41A	2.62A	2.48A
정격전압 ( $V_{rms}=380V$ )	418.0V (정격전압의 110%)	306.5V	309.83	309.93
피크전압 ( $V_{peak}=537.4V$ )	644.88V (피크전압의 1.2배)	540.45V	583.0V	570.82V
정격용량 ( $Q_{total}=813.3VA$ )	1098VA (정격용량의 135%)	738.67VA	811.75VA	768.62VA

표 4 계산 결과(2)

Table 4 Calculation result(2)

구분	허용기준	PFC만 설치	PFC+리액터추가	
			5차 공진	4.7차공진
$V_{THD}(\%)$	5% 이하	4.47%	2.43%	2.44%
정격전류 ( $I_{rms}=0.717A$ )	0.968A (정격전류의 135%)	0.865A	1.22A	0.79A
정격전압 ( $V_{rms}=380V$ )	418.0V (정격전압의 110%)	304.2V	397.7V	387.2V
피크전압 ( $V_{peak}=537.4V$ )	644.88V (피크전압의 1.2배)	572.7V	690.5V	597.8V
정격용량 ( $Q_{total}=272.2VA$ )	367.5VA (정격용량의 135%)	263.1VA	485.2VA	305.9VA

왜형률은 허용범위 바로 아래 접근하지만 리액터를 부착하여 고조파를 더 저감하기 위해 5차에 조정된 경우에는 전압 피크와 용량이 표 1에서 제시한 허용범위를 초과하지만, 약간 낮은 4.7차로 조정할 경우 허용범위 안에 들어감을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 비선형 부하와 선형부하로 구성되는 전원 시스템에 적합한 역률보상용 콘덴서 및 직렬 리액터의 선정 예를 제시하였고, 전압 고조파 왜형률을 고려하여 비선형 부하로부터 발생한 고조파 전류가 직렬 리액터와 연결된 역률보상용 콘덴서에 주는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션으로 분석하였으며, 그 결과를 실측한

과형과 비교 분석하였다. 분석결과 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 저감하는 동시에 역률 보상을 겸용하는 콘덴서와 리액터의 선정은 전압 고조파 왜형률을 포함해야 콘덴서의 안정적인 사용에 도움이 된다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors, Talyor & Francis, 2005.
- [2] 이동주, 김종겸, 이은용, 조연찬, "비선형부하에 의한 역률 보상용 전력 콘덴서의 고조파 문제", 2008년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2008. 7
- [3] Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Jul/Aug, pp.1013~1026, 2008
- [4] 김종겸 외 3인, "전압 및 전류 고조파에 의한 콘덴서 동작 특성", 대한전기학회 논문지, Vol.58P, No.3, pp.257~262, 2009. 9
- [5] C. Boonseng et al., "Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors Due to Related Harmonic Resonance Effects", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Volume 3, 28 Jan~Feb. pp.1003-1008, 2001
- [6] IEEE Std 18-2002, "IEEE Std for Shunt Power Capacitor"

저 자 소 개



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



**이동주 (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