

# 불평형 전압으로 운전하는 비선형 부하의 고조파 특성분석

論 文  
52B-10-3

## Analysis on the Harmonic Characteristics of Nonlinear Load Operated by Unbalance Voltage

金宗謙\* · 李殷雄\*\* · 李東周\*\*\*  
(Jong-Gyeum Kim · Eun-Woong Lee · Dong-Ju Lee)

**Abstract** - Most of the loads in industrial power distribution systems are balanced and connected to three wires power systems. However, in the user power distribution systems, most of the loads are single & three phase and unbalanced, generating a large amount of non-characteristic harmonics. With the advent of power electronics and proliferation of non-linear loads in industrial power applications, power harmonics and their effects on power quality are a topic of concern. Harmonics by the unbalance voltage and non-linear loads, cause the increase of machine loss and heating. In order to allow current harmonic compensation, a filter must be installed.

This paper describes the performance of passive filter under the voltage unbalance and non-linear load.

**Key Words** : Unbalance Voltage, Harmonics, Non-linear load, Resonance

### 1. 서 론

전력에너지의 효율적 관리에 사용되는 비선형 반도체 소자와 단상부하의 사용증가는 전압불평형이란 새로운 문제를 발생시켜 전력품질을 나쁘게 하고 있다[1-4].

3상 전력시스템에서의 전압은 120°위상차를 갖는 평형 정현파형을 기본적으로 유지한다. 그러나 3상 시스템에서 사용시간에 따라 연속적으로 변동하는 단상 부하는 지속적인 불평형 전압문제를 일으킬 수 있다. 전압불평형이 부하와 전원측에 미치는 영향이 전력품질 전문가들의 주요 관심사가 되는 이유는 기기의 출력저하와 기기의 절연 손상을 초래하고 전력변환장치에서 발생하는 고조파에 큰 영향을 미치기 때문이다[1,4,5,6].

최근 수용가의 전원공급 방식 중에는 3상 동력과 단상 전동·전열부하를 함께 전원공급이 가능한 3상 4선식이 널리 사용되고 있다. 이 방식은 한 대의 변압기로 두가지 방식의 전력공급이 가능하지만 불평형운전과 비선형기기의 사용에 따른 전력품질변화에는 바람직하지 않다. 또한 시스템이 전압 불평형으로 운전할 때 비선형부하에 의한 잔류 고조파(residual harmonics)의 발생은 통신 및 제어시스템에 영향을 주는 영상분 전압과 전류로 작용한다[2].

이와 같이 비선형부하나 불평형 운전의 영향을 줄여 전력 품질을 개선하기 위해 능동형 및 수동형 필터 등을 설치한

다. 현장에서는 능동형 필터의 비싼 가격 때문에 아직도 특정 고조파 제거가 가능한 수동형 필터를 많이 사용하고 있다. 그리고 부하의 역률 개선을 위한 커패시터의 사용과 비선형부하에 의한 고조파 저감을 위한 필터의 사용은 전압평형을 전제로 한다. 그렇지만 본 논문에서는 불평형 전압으로 비선형부하를 사용할 때 수동형 필터의 설치위치에 따라 고조파의 특성변화를 해석하고자 한다.

### 2. 전압 불평형 및 고조파

#### 2.1 전압불평형의 정의

저압 배전계통에서 3상의 동력부하와 전동·전열의 단상 부하를 각상별로 평형분포 되도록 설계하지만, 실제 운전에서는 평형을 유지하기가 매우 어렵다.

전압 불평형이 발생하게 되는 원인으로는 역률 보상장비의 오동작, 불평형 또는 불안정한 전원공급, 큰 3상부하를 공급하는 불평형된 변압기 탭크와 균일하지 않은 변압기 탭 절환, 용접기와 같은 큰 단상부하 등에서 발생한다[4,7].

불평형 부하의 운전에 의해 발생된 전압불평형은 전력시스템과 장비에 부작용을 일으킬 수 있으며, 약간의 상전압 불평형에서도 큰 상전류 불평형을 일으킬 수 있다[5,6].

3상전압의 크기가 다르거나 120도의 위상차를 갖지 못하는 전압불평형은 다음과 같이 정의한다[5,6,8].

1) 상전압 불평형률(PVUR:Phase voltage unbalance rate)은 식(1)과 같다.

$$PVUR = \frac{\text{평균 상전압 크기에서 최대전압편차}}{\text{평균상전압}(V_{avg})} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$\text{여기서 } V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$

\* 正會員 : 國立原州大 電氣科 副教授 · 工博

\*\* 終身會員 : 忠南大 工大 教授 · 工博

\*\*\* 正會員 : 忠南大 工大 博士課程

接受日字 : 2003年 4月 30日

最終完了 : 2003年 8月 29日

II) 정상분( $V_1$ )에 대해 역상분( $V_2$ )의 비율로서 정의하는 전압 불평형율(VUF:Voltage Unbalance Factor)

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%] \quad (2)$$

3상 불평형 선간전압  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$ 를 식(3), (4)와 같이 정상분  $V_1$ 과 역상분  $V_2$ 의 대칭성분으로 변환하면 불평형 조건하에서 유도전동기의 동작을 해석할 때 편리하다.

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

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a V_{ca}}{3} \quad (4)$$

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

III) 선간전압 불평형율(LVUR:Line voltage unbalance rate).

$$LVUR = \frac{\text{평균 선간전압 크기에서 최대전압편차}}{\text{평균선간전압}(V_{avg})} \times 100[\%] \quad (5)$$

여기서  $V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}$

IV) 순시 선간전압의 불평형율( $LVUR_i$ )

$$LVUR_i = \left| \frac{V_{ab} - a \cdot V_{bc}}{V_{ab} - a^2 \cdot V_{bc}} \right| \times 100[\%] \quad (6)$$

V) 선간전압에 대한 근사 불평형율( $LVUR_a$ )

$$LVUR_a = \frac{82 \cdot \sqrt{V_{abe}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{V_{avg}} \quad (7)$$

식(7)에서  $V_{abe}$ ,  $V_{bce}$  와  $V_{cae}$  는 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{abe} &= |V_{ab}| - V_{avg} \\ V_{bce} &= |V_{bc}| - V_{avg} \\ V_{cae} &= |V_{ca}| - V_{avg} \end{aligned} \quad (8)$$

VI) IEC의 선간전압에 대한 불평형률

$$LVUR_{IEC} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100[\%] \quad (9)$$

식(9)에서  $\beta$ 는 식(10)에서 계산한 것이다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (10)$$

표 1 은 저압 220[V] 3상 전원전압의 평형, 식(1), (2) 및 (5)~(7), (9) 상별 불평형율을 나타낸 것으로서 표현방식에 따라 다소 차이가 있지만, 식(2)의 정상분에 대한 역상분의 불평형율 VUF와 순시 선간전압의 불평형율  $LVUR_i$  과 근사 계산법에 의한 불평형율  $LVUR_a$  는 매우 근사값을 가진다.

상전압 불평형율 PVUR은 선간전압 및 대칭좌표법으로 구한 값에 거의 2배에 가깝고, 비대칭이 존재할 경우 위상각을 포함한 불평형율을 표현할 수 없어 거의 사용하지 않는다. 또한 식(1) 및 (5)와 같이 상전압과 선간전압의 평균값을 기준으로 평균값에서 최대전압편차로 구한 순시전압 불평형율

은 오차의 범위가 커지므로 전압불평형을 평가하기에 부적합하다.

저압 수용가는 동력전용으로 3상 3선식을 사용하거나 동력과 전등 및 전열부하를 함께 사용할 수 있는 3상 4선식 결선방식을 사용한다. 3상 3선식은 선간전압에 대한 불평형만 고려하고 3상 4선식은 선간전압과 상전압을 함께 고려해야하므로 부하 운전에 따른 불평형율을 계산할 때 선간전압과 상전압을 함께 적용할 수 있는 계산방법이 필요하다. 따라서 불평형율을 계산하기 위해서는 식(2), (6), (7)과 (9)가 적용 가능하다.

표 1 전압 불평형율의 비교

Table 1 Comparison of voltage unbalance ratio

구분	$V_a$	$V_b$	$V_c$	Unbalance ratio[%]				
				PVUR	VUF	LVUR	$LVUR_i$	$LVUR_a$
balanced	127.0 $\angle 0^\circ$	127.0 $\angle 240^\circ$	127.0 $\angle 120^\circ$	0	0	0	0	0
1ph-uv	117.0 $\angle 0^\circ$	127.0 $\angle 240^\circ$	127.0 $\angle 120^\circ$	5.39	2.69	2.67	2.69	2.69
2ph-uv	117.0 $\angle 0^\circ$	122.0 $\angle 240^\circ$	127.0 $\angle 120^\circ$	4.1	2.37	2.04	2.37	2.38
3ph-uv	117 $\angle 0^\circ$	121 $\angle 240^\circ$	125 $\angle 120^\circ$	3.3	1.91	1.65	1.91	1.92
1ph-asym	127 $\angle 0^\circ$	127 $\angle 240^\circ$	127 $\angle 115^\circ$	0	2.9	2.49	2.91	2.92
2ph-asym	127 $\angle 0^\circ$	127 $\angle 238^\circ$	127 $\angle 118^\circ$	0	1.16	1.0	1.16	1.17

전압 불평형을 허용범위는 1~3[%]정도이다. 부하를 효율적으로 운전하기 위해서는 무부하상태에서 전압 불평형율이 3[%]이하로 제한하고, 전동기와 전력전자장비 제작사는 1[%]보다 적은 전압불평형을 원하지만, 국제규격으로 2[%] 정도까지 허용하고 있다[7].

## 2.2 불평형전압의 영향

3상과 단상부하가 걸려있는 간선에 전압불평형이 최소화 되도록 부하 분배하지만 부하의 증감과 운전형태에 따라 전압불평형이 발생한다.

불평형전압 운전은 아주 높은 전류불평형을 일으킬 수 있는데 유도전동기의 경우 전류불평형의 크기가 전압불평형의 5~10배 정도이고[6,7], 특히 ASD로 운전하는 유도전동기의 경우 15배를 초과할 수 있어 전동기 과열 등의 문제를 일으킬 수 있다. 전압불평형시 유도전동기의 토크는 식 (11)과 같다[8].

$$T_u = T_b \times K \times \left[ 1 - \left( \frac{\%VUF}{100} \right)^2 \right] \quad (11)$$

여기서  $T_u$  와  $T_b$  는 각각 불평형 및 평형상태에서의 토크 이고,  $K$  는 상수로서 구속회전자 토크는 1이며 정동 토크는 2이다.

상전압 불평형시 유도전동기의 권선 온도상승의 실험식은 식 (12)와 같이 퍼센트 전압불평형의 제곱에 비례하는 영향을 미친다[8].

$$\theta_u = \theta_b \times \left[ 1 + 2 \left( \frac{\%VUF^2}{100} \right) \right] \quad (12)$$

여기서  $\theta_u$  와  $\theta_b$  는 각각 불평형 및 평형 시스템에서 온도상승 값이다.

불평형전압 운전과 비선형부하인 전력전자설비의 사용증가는 전원설비회로에서 고조파 전류와 전압불평형을 증가시키고 있다. 이 고조파는 열을 발생시켜 기기의 동작수명을 짧게하고 민감하게 반응하는 전자설비에 오동작을 일으켜 자동화설비의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다.

### 2.3 고조파 지수

대부분의 전기장비는 주로 전압 고조파에 매우 민감하며, 전압고조파의 레벨은 전원 시스템 안정성과 부하전류 고조파에 좌우된다. 전류고조파는 배전회로에 손실증가와 자계방해를 일으키며 부하에 영향을 받는다. 일반적으로 전압고조파의 양은 전류고조파의 양보다 적다.

전압불평형으로 비선형부하에 의해 발생하는 전류파형은 기본과  $I_1$  의 정수배가 되는 주파수를 포함한 왜형된 파형으로 식 (13)과 같다.

$$I = I_1 + \sum_{h=2}^n I_h \quad (13)$$

기본과 실효치에 대한 고조파 실효치의 합으로 나타낸  $I_{THD}$  는 식 (14)과 같다.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad (14)$$

## 3. 불평형 전압으로 운전되는 비선형부하의 동작특성

### 3.1 전압불평형 운전 및 측정 시스템

일반 수용가의 대부분은 특고압 또는 고압에서 3상 3선식 또는 3상 4선식의 저압으로 변환하여 부하에 전력을 공급하고, 3상과 단상을 분리해서 사용하는 설비보다 혼합하여 사용하는 경우가 많다. 즉 전압변동의 영향을 줄이기 위해 동력용과 전동·전열용 변압기를 독립적으로 사용하는 것이 합리적이지만 변압기 한 대로 단상과 3상 부하를 2차 전압이 208/120[V] 또는 380/220[V]가 되도록 Y 결선방식을 사용하는 경우가 많다. 최근 산업 및 상업용에는 208/120[V] 전압방식은 3상 동력용 전압으로 문제점이 있어 거의 사용하지 않고, 전압강하에 따른 문제점이 적은 380/220[V] 전압방식이 널리 적용되고 있다.

일반 수용가의 수변전방식에는 3단계의 특고압/고압/저압 또는 2단계의 특고압/저압이 있다. 3상 4선식 Y 선로에서도 수용가의 사용부하에 따라 변압기의 결선방식은 Y 또는  $\Delta$  로 변환해서 사용하지만, 단상 또는 3상부하를 한 대의 변압기로 공급하기 위해서는  $\Delta/Y$  또는 Y/Y 방법을 사용한다.

그림 1은 수용가의 전원설비에 3상 부하와 단상 부하가

함께 연결되어 있는 저압설비의 측정시스템 구성도이다. 고압 또는 특고압에서 직접 저압으로 변성하는 대신 근사화된 시스템으로 구성하였다. 1차측은 380[V]를 사용하여 고압 또는 특고압의 1차측과 동일한 방식으로  $\Delta$ 로 그리고 2차측은 동력 및 전동·전열부하에 동시에 공급 가능한 방식의 Y결선방식을 적용하였다. 사용된 변압기의 퍼센트 임피던스값은 2.47[%]이고, X/R의 비는 1.47이다.

PCC(Point of common coupling)에서는 3상 동력 및 단상 부하를 공급할 수 있다. 3상 시스템에서 불평형 운전 특성을 해석하기 위해 단상부하 결합 대신에 3상 AVR를 사용하였다. 가변속 드라이브(ASD)의 앞단에 설치한 초크코일은 민감한 부하를 노이즈로와 고조파로부터 보호 가능한 전류제한 장치로서 부하의 2[%]가 되는 0.88[mH]를 설치하였으며, 부하에서 발생하는 5차 고조파의 발생량을 줄이기 위한 필터의 리액턴스와 커패시턴스는 각각 500[ $\mu$ F]과 0.55[mH]를 사용하였다.

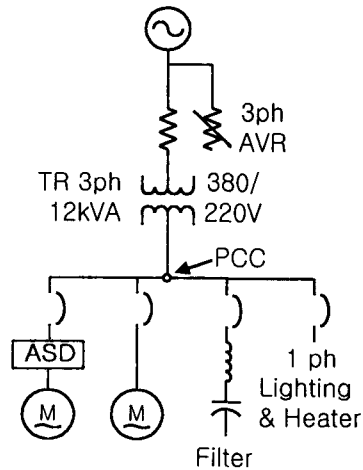


그림 1 측정시스템 구성도

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

### 3.2 고조파 공진

변압기 또는 선로의 리액턴스와 역률 보상용 커패시턴스의 직렬 결합은 직렬공진으로 작용한다. 직렬공진시 임피던스는 저항성분으로 고조파전류에는 낮은 임피던스 통로를 제공하고, 동조시킬 경우 특정 고조파전류를 줄일 수 있다. 만일 공진주파수가 비선형부하에서 발생하는 고조파 주파수와 일치할 경우 L 과 C 회로는 고조파 전류의 상당한 양을 끌어들이는다[4]. 따라서 비선형 부하의 사용 없이 역률 보상 커패시터를 붙인 저압 설비에서 이웃 고조파원으로 인한 높은 전압왜형을 경험하게된다.

산업용 설비에서 역률보상 커패시터는 부하 인덕턴스와 병렬공진회로를 형성한다. 병렬공진시 임피던스의 증가는 부하측에서 발생한 고조파의 전원측 흐름을 막을 수 있다. 병렬 LC 회로는 자체적으로 높은 전압의 발생과 LC 회로의 루프내 높은 순환전류가 흘러 전기시스템의 전체 저압 시스템을 손상시킬 수 있다.

병렬공진은 시간에 따라 변동하는 부하로 공진주파수가

변화하기 때문에 직렬공진 보다도 분리하기가 비교적 어렵다. 역률보상 커패시터와 변압기 등의 리액턴스에 의한 병렬공진시 주파수  $f_p$  는 식 (15)와 같다.

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C}} \quad (15)$$

여기서,  $L_{eq}$ 는 변압기와 리액터의 인덕턴스이고,  $C$ 는 커패시터의 커패시턴스값이다.

공진주파수에서 고조파 전류원에 의해 등가 인덕턴스와 커패시턴스의 병렬결합에 의한 임피던스는 식 (16)과 같다.

$$Z_p \approx \frac{X_{Leq}^2}{R} = \frac{X_c^2}{R} = QX_{Leq} = QX_c \quad (16)$$

여기서  $Q$ 는 공진회로의 quality factor로서 공진시 소비되는 전력이 절반이 되는 밴드폭 주파수  $\Delta\omega$ 에 대한 공진 주파수  $\omega_o$ 의 비율로 식 (17)과 같다.

$$Q = \frac{\omega_o}{\Delta\omega} = \frac{R}{\omega_o L_{Leq}} = \omega_o CR = R \sqrt{\frac{C}{L_{Leq}}}$$

고주파회로에서 공진의 예리함을 나타내는  $Q$  값이 클수록 대역폭은 좁고, 손실은 줄어든다. 그러나 병렬공진시 식 (18)과 같이 커패시터 뱅크나 전원으로 흐르는 전류와 전압은 매우 확대되고 심하게 왜곡된다[4].

$$I_{resonance} = \frac{V_p}{X_c} = \frac{V_p}{X_{Leq}} = QI_h \quad (18)$$

공진이 발생할 가능성을 줄이는 방법으로 커패시터에 직렬리액터를 추가하여 전원측의 임피던스에 관계없이 고조파에 의해 발생된 에너지를 강제적으로 공진주파수 이하로 유시시키는 것이다.

그림 1에서와 같이 ASD에서 발생한 고조파전류는 임피던스가 가장 낮은 쪽으로 흐른다. 일반적으로 임피던스는 전원측이 각 분기회로의 부하보다 낮으며, 부하기기의 역률보상을 위해 설치된 커패시터로 고조파 차수의 증가에 의해 임피던스 값이 감소하게 되어 높은 고조파전류가 흘러들어 오면 고장발생이 증가할 수 있다.

그림 2는 그림 1의 회로에서 ASD, 수동형 필터 및 변압기로 구성되는 시스템의 간략화한 등가회로로서 고조파발생원에 대해 전원측과 필터측이 병렬공진회로를 이룬다.

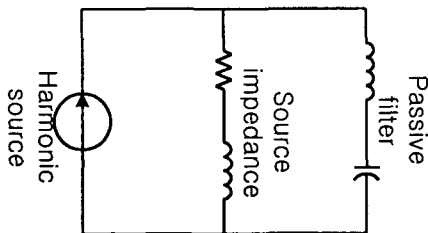
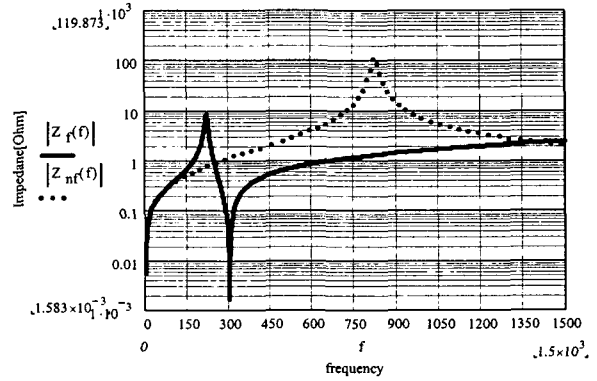


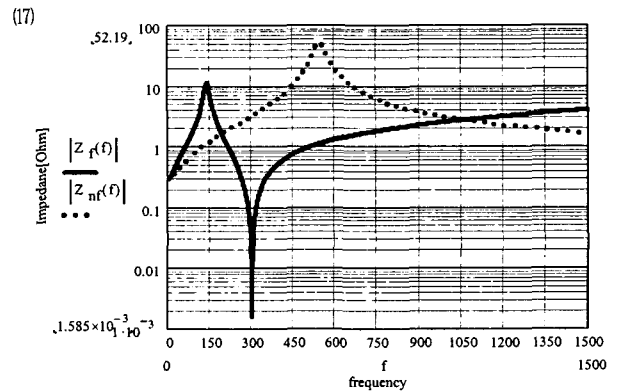
그림 2 수동형 고조파 필터에 대한 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit for passive harmonic filtering

임피던스 스캔(scan)은 장래 확장 또는 정상 및 비정상적

인 동작에 확인할 수 있는 것으로서 고조파 전류원에서 공진 조건이 존재하는가를 시스템의 임피던스를 주파수로 표시한다.



(a) PCC측 설치시



(b) 초크코일 2차측 설치시

그림 3 임피던스 스캔

Fig. 3 Impedance scan

그림 3(a)는 PCC에서의 역률보상용 커패시터와 고조파저감용 필터 그리고 3(b)는 초크코일의 후단부에 필터설치에 따른 임피던스의 변화를 나타낸 스캔도다.

그림 3(a)에서 부하의 역률만을 보상하기 위해 설치한 커패시터( $Z_{nr}$ )의 경우 병렬공진현상은 13.7조파에서 발생하므로 비선형 부하인 가변속 제어장치에서 발생하는 저차의 고조파 성분을 저감하기 위해서는 차수와 임피던스값의 저감이 필요하다. 비선형부하에서 발생하는 5차 고조파성분을 저감하기 위한 필터( $Z_r$ )를 PCC측에 설치시의 임피던스 변화는 3.6조파에서는 병렬, 5조파 성분에서 직렬공진의 발생으로 임피던스 값은 매우 낮다. 역률보상용 커패시터만 설치시 병렬공진에 의한 120[Ω]의 임피던스는 필터 부하후에 8.6[Ω]으로 14배정도 줄어들게 되므로 고조파에 의한 전압스트레스는 감소한다. 병렬공진시  $Q$  값은 커패시터만 설치한 경우 45.67에서 필터 설치시에는 27.0으로 줄어들게 되어 고조파 공진에 의한 전압스트레스는 다소 줄어든다.

본 연구에 사용된 인버터의 정류부는 6개 다이오드 정류

소자로  $6n\pm 1$  차수 고조파가 발생하지만 실제 5차 고조파가 가장 높게 나타난다. 따라서 5차 고조파 저감을 위한 필터의 구성과 위치선정이 필요하다.

그림 3(b)는 비선형부하에서 발생하는 특정 고조파성분을 효과적으로 제거하기 위해 초크코일의 후단부에 필터를 설치한 경우 임피던스 변화를 나타낸 것이다. 역률보상 커패시터만의 단독 설치시 9조파에서 병렬공진이 일어나는데 PCC측에 설치시보다 임피던스값은  $52[\Omega]$ 으로서 절반이하가 된다. PCC측에 필터를 설치한 경우에 비해 병렬공진 임피던스는 약간 증가하고 주파수도 낮은 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 직렬공진은  $300[\text{Hz}]$ 로 5조파에서 발생한다. 따라서 필터에 의한 5차 직렬공진과 비선형부하의 5차 고조파의 상호작용으로 고조파 전류가 흡수되기 때문에 임피던스가 낮은 쪽으로의 흐름은 상당히 줄일 수 있다. 병렬공진시 Q 값은 커패시터만 설치한 경우 13.27에서 필터 설치시에는 7.78로 PCC측에 설치한 경우에 비해 크게 줄어들게 되어 고조파 공진에 의한 전압스트레스는 더욱 감소된다.

병렬공진시 임피던스는 수동형 필터보다 역률 보상 단독 운전시 8배 정도가 되므로 단자에 전압 스트레스로 작용하여 기기의 절연고장을 일으킬 수 있다.

또한 역률보상용 커패시터 용량 증가는 공진에 따른 임피던스값 감소와 함께 병렬공진이 저차로 이동하므로 저차 고조파의 저감을 위해 커패시터 용량을 증가시키므로 무효전력성분은 오히려 증가시킨다[4].

### 3.3 운전형태에 따른 특성변화

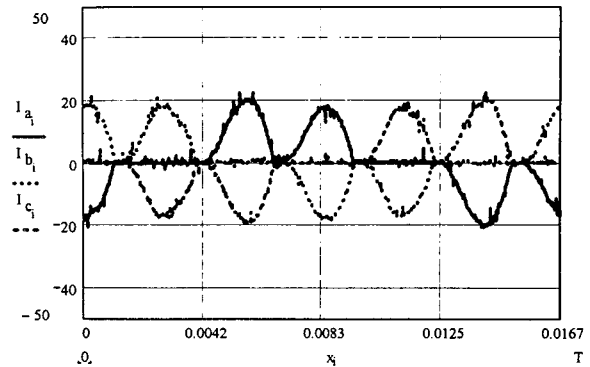
불평형 전압에 의한 영향을 측정하기 위해 그림 1의 전원측에 자동전압조정기(AVR)를 연결하여 전압을 조정하였다. 비선형 부하인 ASD로 3마력 유도전동기의 속도를 조정하였으며, 유도전동기의 부하(L)로 전동부하의 전력공급용 DC 발전기를 사용하였다. 발전기 출력단에 연결된 전동 부하는  $2[\text{kW}]$ 이고, 인버터의 스위칭 주파수  $12[\text{kHz}]$ 에서 부하의 운전 주파수  $60[\text{Hz}]$ 로 전부하 운전할 때 비선형부하인 컨버터에서 발생하는 고조파 전류를 측정하였다.

공급 전원은 1차측  $380[\text{V}]$  2차측  $220[\text{V}]$  용량  $12[\text{kVA}]$ 인 TR을 사용하였다. 출력전압의 변화에 따른 특성변화를 알기 위해 AVR의 전압값을 조정하였다. 불평형 전압이 비선형부하의 운전에 미치는 영향을 측정하기 위해 애질런트사의 10440B 전압프로브와 1146A 전류프로브를 사용하였다.

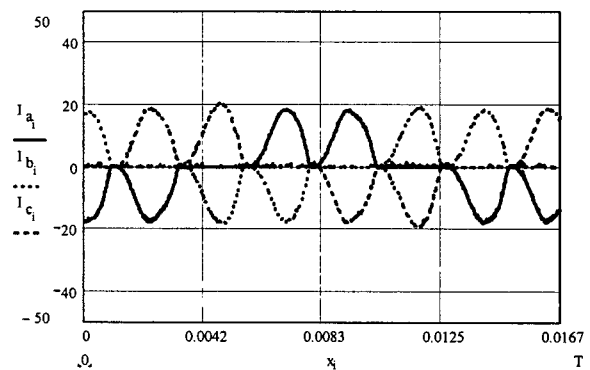
비선형 부하의 사용으로 발생하는 고조파의 성분을 분석하기 위해 측정 결과 값을 엑셀로 읽어 Mathcad 프로그램으로 FFT 변환하였다.

#### 1) 평형전압 운전시

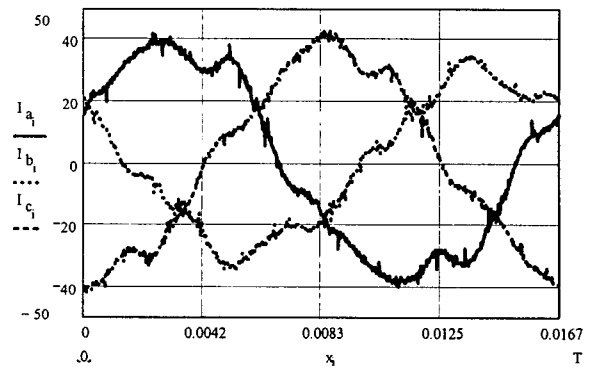
그림 4는 AVR를 이용하여 3상 평형에 가까운 전압으로 100[%] 정격 비선형부하를 운전할 경우 필터부착 전후 변압기 2차측, 초크코일 2차측 각 상의 전류파형과 필터전류를 측정하여 나타낸 것이다.



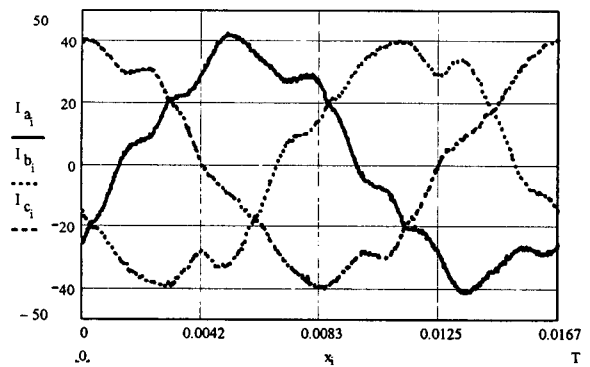
(a) 필터 부착전 변압기 2차측 전류



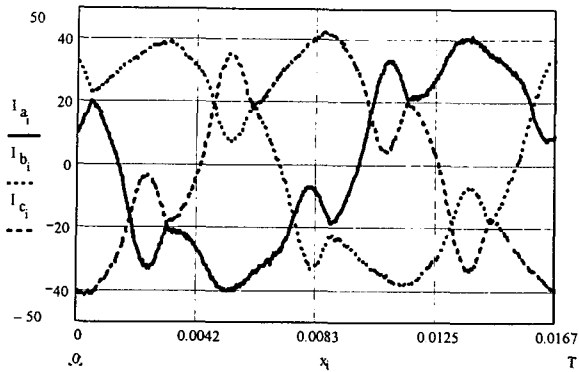
(b) 필터 부착전 초크코일 2차측 전류



(c) 필터 부착시 변압기 2차측 전류



(d) 필터 부착시 초크코일 2차측 전류



(e) 필터 전류

그림 4 전류파형  
Fig. 4 Current Waveform

그림 4(a), (b) 는 각각 필터 미부착시 변압기의 2차측과 초크코일의 2차측 전류파형을 나타낸 것이다. 인버터의 정류부 전력변환장치에 의해 발생하는 전류고조파 왜형율은 73[%]로 매우 높게 나타난다.

그림 4(c)와 (d) 는 비선형부하에 의해 발생하는 특정고조파를 줄이기 위해 그림 1에 나타난 위치에 부착한 수동형 필터를 초크코일의 2차측에 부착한 다음 변압기와 초크코일의 2차측에서 측정된 전류파형이다. 필터의 부착전에 비선형부하에 의해 발생하는 고조파 중 5차분이 가장 높아 필터는 5고조파 저감용으로 설계하였다. 필터의 적용후 완전한 정현파는 아니지만 고조파 왜형율은 12.5[%]로 매우 완화되지만 고조파 전류제거를 위한 필터의 적용시 전류값은 적용전에 비해 높게 나타난다.

그림 4(e) 는 필터 사용시 필터로 흐르는 전류파형을 나타낸 것이다. 필터로서 동작하는 전류값이 콘덴서의 정격전류보다 약간 높으며, 전류고조파 왜형율의 값도 28[%]로 약간 높았다. 필터 사용시 전압상승 영향을 줄이기 위해 콘덴서의 경우 정격전압의 110[%]가 되도록 규정하고 있는데 필터측 입구단에서 약 10[V]의 전압상승이 발생하는 것은 허용범위에 근접하는 것이다.

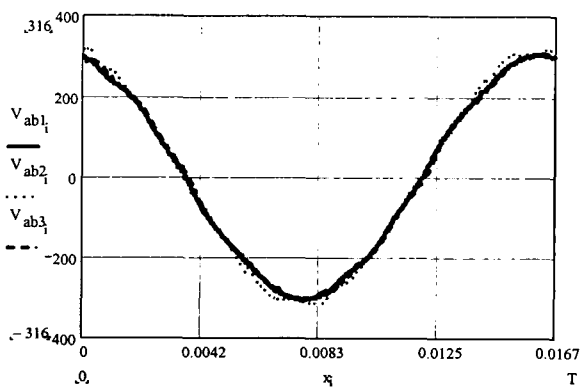
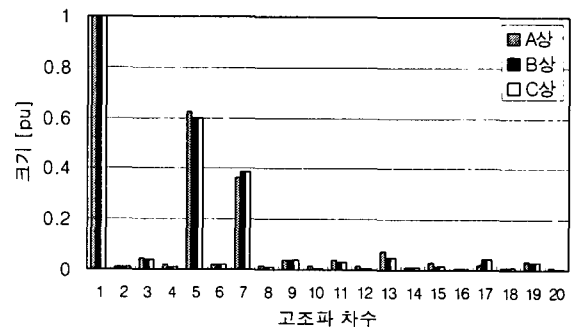


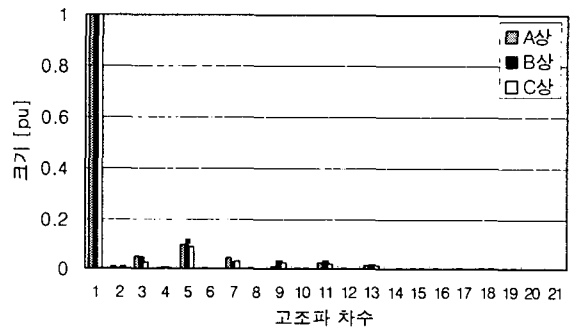
그림 5 전압파형  
Fig. 5 Voltage waveform

그림 5 는 필터의 부착전후 변압기 2차측, 초크 코일 2차측의 전압파형을 나타낸 것이다. 필터의 사용전 변압기 2차측 전압파형  $V_{ab3}$  에 비해 사용후 전압파형  $V_{ab1}$  이 거의 정현파에 가깝지만, 필터의 사용시 리액터의 2차측 전압파형  $V_{ab2}$  이 flap top현상을 발생한다. 전체 전압 고조파 왜형율은 변압기 2차측에 필터의 부착전 2.8, 부착후에 2.4이고, 비선형 부하에서 가까운 리액터의 후단부에서는 2.3[%]로서 매우 낮은 값을 유지하고 있다.

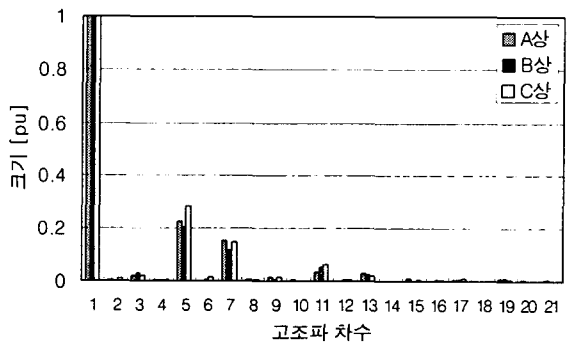
그림 4 의 각 상 전류 파형을 식 (14) 로 구하면 그림 6 과 같다.



(a) 필터 미부착시 변압기 2차측 전류고조파



(b) 필터 미부착시 변압기 2차측 전류고조파



(c) 필터 전류 고조파

그림 6 상별 전류 고조파  
Fig. 6 Phase current harmonics

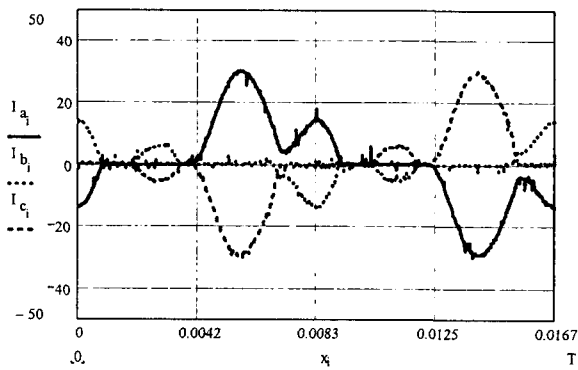
수동형 필터의 부착전에는 그림 6(a)와 같이 고조파성분은 5차와 7차가 높게 나타나지만 부착후에는 그림 6(b)와 같이 각 고조파는 매우 낮게 나타난다. 이것은 비선형 소자에 의해 발생한 고조파 성분이 필터에 의해 저감되기 때문이다.

2) 불평형전압 운전시

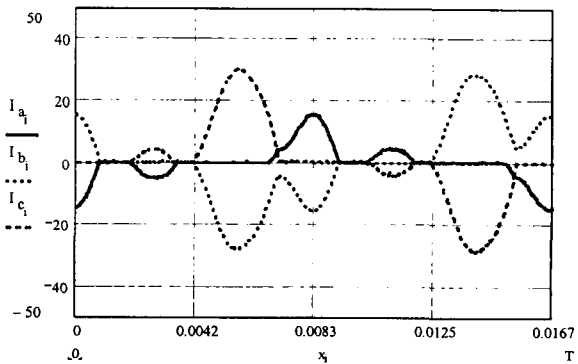
3상 부하측에 공급되는 3상 평형전압을 단상부하와 함께 사용하면 불평형이 발생할 수 있다. 전압불평형의 조건하에서 비선형 부하를 사용할 때 전류 특성변화를 확인하기 위해 그림 1 시스템에서 3상 AVR을 이용하여 2.6%의 전압 불평형이 되도록 변환하여 이 3상 전원으로 비선형부하를 운전하면서 전류 고조파 특성변화를 해석하였다. 그림 3에서 수동필터 부착으로 그림 3과 같은 임피던스 변화가 발생할 때 전압 불평형전원에 어떤 특성을 나타내는지 확인하였다. 필터의 설치위치는 비선형부하에 가장 가까운 초크코일의 2차측과 PCC로 선정하였다.

그림 7은 불평형전압 공급시 변압기 2차측과 초크코일 2차측 필터 부착전후의 전류 파형을 나타낸 것이다.

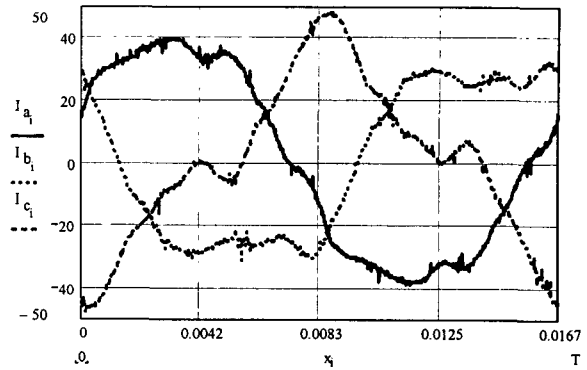
그림 7(a), (b)는 그림 1에서 필터 부착전 변압기의 2차측과 초크코일의 2차측의 전류파형을 측정해 나타낸 것으로서 초크코일 2차측이 고조파 함유가 적은 전류파형의 변화는 거의 차이가 없다. 인버터의 정류부 전력변환장치에 의해 발생하는 전류고조파 왜형율은 2.6%의 전압불평형에 따라 각각 62, 95, 82[%]로 일정하지 않음을 확인하였다.



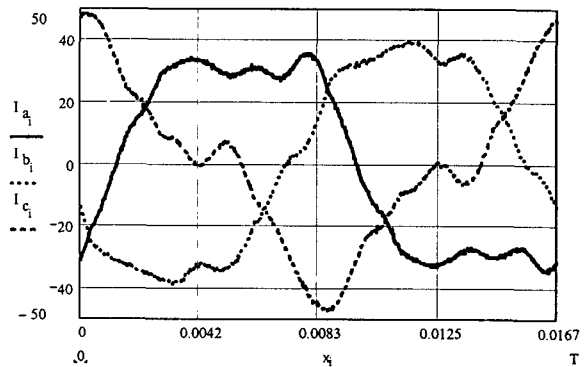
(a) 변압기 2차측 전류



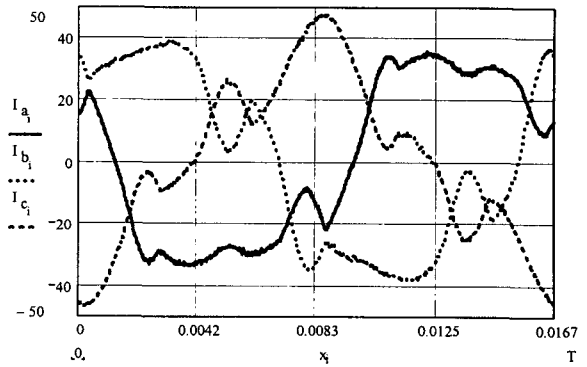
(b) 초크 코일 2차측 전류



(c) 필터 부착후 변압기 2차측 전류



(d) 필터 부착후 초크 코일 2차측 전류



(e) 필터 유입 전류

그림 7 전류파형

Fig. 7 Current waveform

그림 7(c)와 (d)는 초크코일 2차측에 필터 부착후 PCC 2차측과 초크코일 2차측의 전류 파형을 측정해 나타낸 것이다. 전압불평형으로 각 상별 전류 파형이 다르지만, 필터의 부착 전에 비해 정현파에 가까웠다.

그림 8은 2.6%의 불평형전압 운전시 필터 부착전후 변압기 2차측과 초크코일 2차측 전압파형을 나타낸 것이다. 필터 부착전 변압기 2차측 전압파형( $V_{ab}$ )보다는 부착후 전압파형은( $V_{ab1}$ )은 거의 정현파에 가깝지만, 필터의 사용시 초크코일의 2차측 전압파형( $V_{ab2}$ )은 flap top 현상이 발생함을 알 수 있다. 전체 전압 고조파 왜형율은 변압기 2차

측에 필터의 부착전에 2.0, 부착후 2.4이고, 비선형 부하에서 가까운 초크코일 2차측에서는 2.9[%]로서 매우 낮은 값을 유지하고 있다.

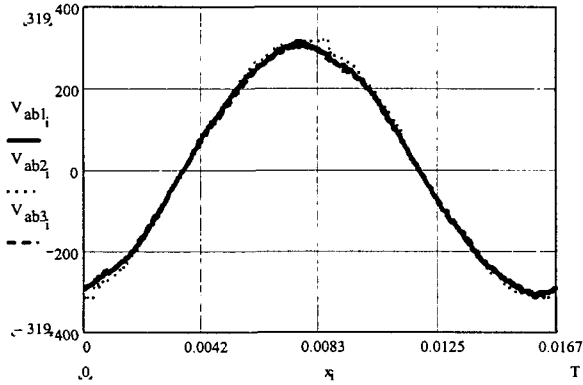
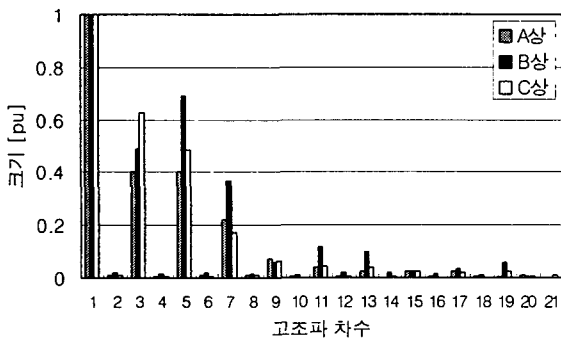
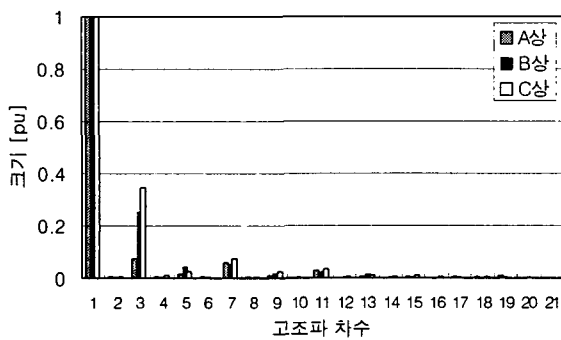


그림 8 전압파형  
Fig. 8 Voltage waveform



(a) 필터 미부착시 변압기 2차측 전류고조파



(b) 필터 부착시 변압기 2차측 전류고조파

그림 9 상 전류 고조파  
Fig. 9 Phase current harmonics

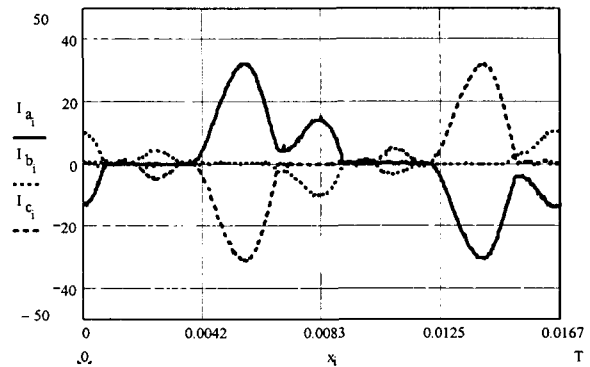
그림 9 (a) (b)는 2.6[%] 3상 불평형 전압으로 운전시 필터의 부착 전후 각각 변압기 2차측에서 각상의 전류고조파를 FFT로 분석한 결과를 나타낸 것이다.

그림 9(a)에서 알 수 있듯이 불평형 전압원으로 인가하면 3, 5, 7 고조파 성분이 매우 크게 나타난다. 그러나 초크코일의 2차측에 부착한 후 불평형 전압원으로 비선형에서 인가

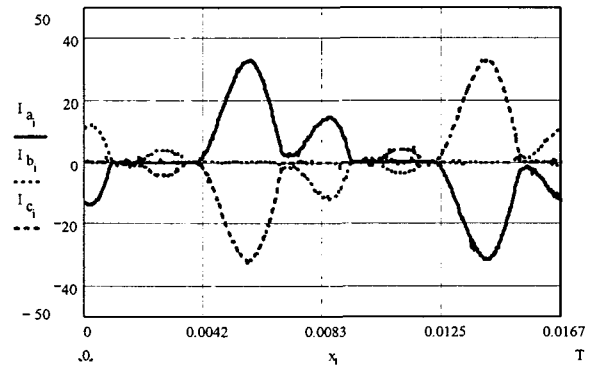
하면 5고조파 전류는 감소하고 3, 7 고조파도 많이 감소함을 그림 9(b)에서 알 수 있다. 필터의 부착전 전체 전류 왜형 고조파가 각각 62, 95, 82[%]이던 것이 필터 부착후는 10, 26, 36[%]로 줄어들었다.

그림 10은 PCC에 필터 설치전후 변압기와 초크코일의 2차측 전류 파형을 측정한 결과이다.

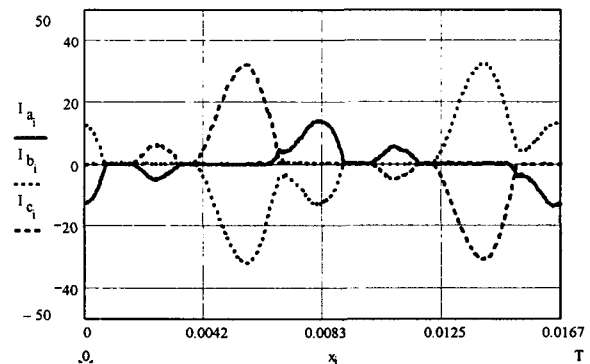
그림 10의 전류파형은 그림 1의 PCC에 수동필터를 부착하여 2.6[%]의 전압불평형으로 비선형부하의 운전할 때 변압기 2차측과 초크코일 2차측 전류로서 초크코일 2차측에 수동필터를 설치하여 운전한 그림 4와는 달리 부착전후에 거의 변화가 없다.



(a) 필터 미부착시 변압기 2차측 전류

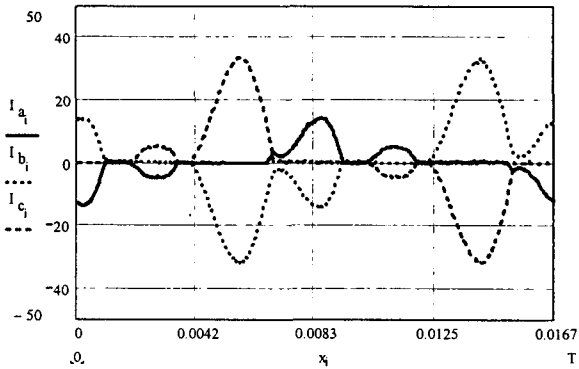


(b) 필터 부착시 변압기 2차측 전류



(c) 필터 미부착시 초크코일 2차측 전류





(d) 필터 부착시 초크 코일 2차측 전류

그림 10 전류파형

Fig. 10 Current waveform

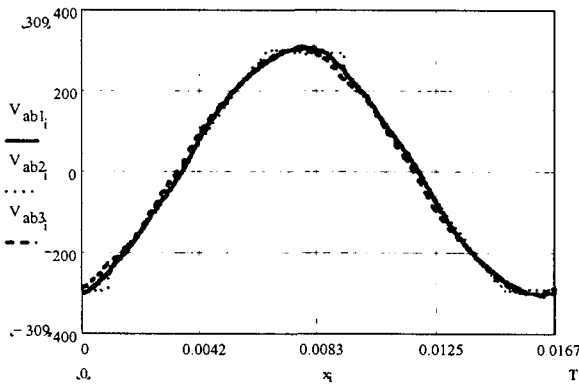


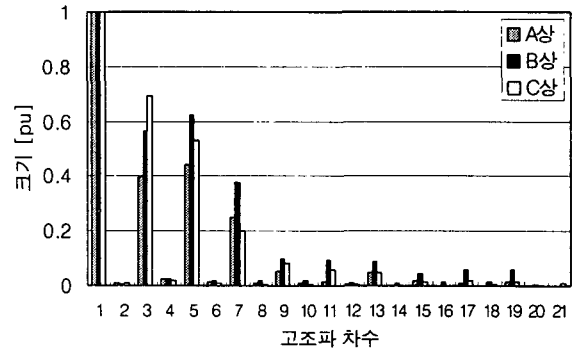
그림 11 전압파형

Fig. 11 Voltage waveform

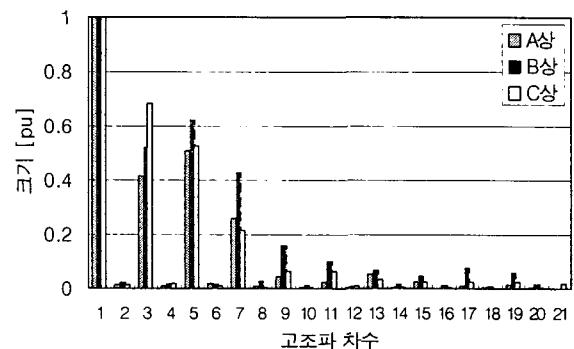
그림 11은 2.6[%]의 불평형전압 운전시 필터의 부착전후 변압기와 초크코일의 2차측 전압 파형을 나타낸 것이다. 필터부착전 변압기 2차측 전압파형( $V_{ab3}$ )에 비해 부착후 전압파형이( $V_{ab1}$ ) 정현파에 가깝지만, 필터부착시 초크코일 2차측 전압파형( $V_{ab2}$ )은 flap top현상이 발생한다. 필터부착 전후 변압기 2차측에서의 전체 전압 고조파 왜형율은 약 2.3[%]로서 매우 낮은 값을 유지하고 있지만, 초크코일 2차측에서는 비선형 부하에 의한 flap top의 영향으로 5.1[%]로 변압기 2차측에 비해서는 높게 나타난다.

그림 12는 전압 불평형 전원으로 필터를 PCC에 부착하여 운전한 경우 그림 10의 (a), (b) 전류파형의 고조파 스펙트럼 분석 결과이다.

그림 12에서 전체 전류 고조파 왜형율은 필터 미부착시의 65.1, 94.6, 90.2[%]에서 부착후 70.8, 95.3, 89.4[%]로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파를 줄이기 위해 필터를 설계 적용할 때 발생부에 가장 가까운 곳에 설치하여 발생하는 흐름을 제한시키고 있음을 알 수 있다.



(a) 필터 미부착시 전류



(b) 필터 부착시 전류

그림 12. 상 전류 고조파

Fig. 12 Phase current waveform

#### 4. 결 론

3상 동력과 단상 전동·전열 부하에 저압전원공급방식으로 널리 적용되는 380/220[V]용 3상 4선식에서 단상부하의 사용은 전압불평형을 발생시키고, 고조파 전류를 증가시켜 시스템에 나쁜 영향의 미침을 실험으로 확인하였다. 그래서 전압불평형에 의한 영향을 분석하기 위해 상전압 및 선간전압에 대한 불평형과 비대칭에 대한 공식을 전개하였다.

본 논문은 비선형부하에서 발생하는 고조파의 영향을 줄이기 위해 필터를 부착하는 것이 설치위치에 따라 변하는 임피던스의 변화를 증가회로를 구성하여 분석하고, 평형 및 불평형에 따른 전류고조파 성분을 측정 분석하였다.

전동기의 역률개선을 위하여 설치하는 커패시터와 변압기의 유도성 리액턴스에 의한 공진임피던스 스캔결과는 비선형부하에서 발생하는 저차의 고조파를 저감할 수 없어 필터의 적용이 필요하지만, 설치 위치에 따라 고조파 저감의 영향이 다를 것을 실험으로 확인하였다.

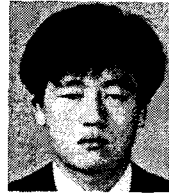
#### 감사의 글

본 연구는 2003년도 과학재단의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Vijay B. Bhavaraju & Prasad N. Enjeti, "An Active Line Conditioner to Balance Voltages in a Three-Phase System", IEEE Trans on IAS, vol.32, no.2, pp.287-292, Mar/Apr. 1996
- [2] Lance G. Grainger & Roy C. Spencer, "Residual Harmonics in Voltage Unbalanced Power Systems", IEEE Trans on IAS, vol.30, no.5, pp.1398-1405, Sep/Oct. 1994
- [3] 김종겸, 손홍관, 이은웅, "선형 및 비선형 부하량에 따른 고조파 성분의 변화", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 8호, pp. 441-448, 2002.8
- [4] Roger C. Dugan et al., Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, 2002.
- [5] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001
- [6] Ching-Yui Lee, "Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor", IEEE Trans on EC, Vol.14, No.2, pp.202-208, Jun.1999
- [7] 김종겸, 이은웅, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [8] Motors and Generators, ANSI/NEMA Std MG1-1993

저 자 소 개



김종겸(金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1991년 충남대학교 대학원 졸업. 1996.2 동대학원 졸업 공학박사 1996년~현재 국립원주대학 전기과 부교수. 현재 당학회 편집위원  
 Tel : 033-760-8423  
 E-mail : jgkim@sky.wonju.ac.kr



이은웅(李殷雄)

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 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 당학회 부회장. 현재 충남대 전기공학과 교수  
 Tel : 042-821-5652  
 E-mail : ewlee@cnu.ac.kr



이동주(李東周)

1973년 7월 31일생. 1996년 충남대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1999년~현재 (주)이타아이 기술연구소 근무  
 Tel : 016-433-3606  
 E-mail : dave@eti21.com