

비선형 부하의 증감에 따른 고조파 특성 분석

°김종겸*, 이은웅**, 김일중***, 김성현****
원주대학, 충남대학교**, 주성대학***, 천안공업대학****

Analysis on the Harmonics Characteristics due to increase & decrease of Nonlinear load

Jong-Gyeum Kim*, Eun-Woong Lee**, Il-Jung Kim***, Seong-hdein Kim****

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.

1. 서 론

전력량의 사용증가에 따라 부하에 대한 안정적인 전력 공급에 대한 관심의 증가는 전력품질에 대한 연구분야를 더욱 확대시키고 있다.

최근 산업현장에 사용되고 있는 전력기기는 전력품질의 변화에 민감하게 반응하기 때문에 안정적인 전력의 공급은 부하에 매우 중요하다. 또한 전력변환장치의 하나인 비선형 부하에서 발생하는 고조파는 전원측 및 연결된 다른 부하에 나쁜 영향을 주므로 이를 줄이기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

최근 저압 수용가 전원 시스템에서는 동력 및 전동 전열부하를 함께 공급할 수 있는 3상 4선식 방식이 널리 적용되고 있다. 이 방식의 적용은 한 대의 변압기를 사용하는 점에서 경제적이지만, 3상 및 단상 부하에 전압을 공급하기 때문에 설비 및 전압 불평형이 발생한다. 특히 부하측에 비선형 부하의 적용시 고조파에 따른 영향으로 손실이 증가하여 효율이 낮아질 수 있다[1-4]. 따라서 전압 불평형에 따른 영향을 줄여 시스템의 신뢰도를 높이는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 불평형 전압의 공급시 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파를 저감하기 위해 PCC에 설치하는 수동형 필터의 설치에 따라 운전부하의 증감에 따라 발생한 고조파의 크기를 측정 분석하였다.

2. 전압불평형과 고조파

2.1 전압불평형의 정의

수용가 배전시스템은 전동 및 전열의 단상부하와 전동력부하인 3상 부하로 구성된다. 전력부하 설계시 단상과 3상을 분리하는 경우도 있지만, 하나의 변압기로 공용으로 사용하는 경우가 많다. 공용으로 사용시 부하의 운전에 따라 불평형은 존재한다.

전압 불평형율(VUF:Voltage Unbalance Factor)은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대한 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다.

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

3상 불평형 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 식 (2), (3)과 같이 정상분 V_1 과 역상분 V_2 의 대칭성분으로 변환하면 불평형 조건하에서 기기의 특성을 해석할 때 편리하다.

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

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

여기서 $a = 1 \angle 120^\circ$, $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ 이다. 선간전압 불평형율(LVUR:Line voltage unbalance rate)은 식 (4)와 같다.

$$LVUR = \frac{\text{평균 선간전압 크기에서 최대전압편차}}{\text{평균선간전압}(V_{avg})} \times 100[\%] \quad (4)$$

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

그러나 식 (4)는 전압 불평형을 표현하는데 계산의 편리함을 가지는 반면 기기의 특성을 해석하는데 약간의 편차를 가지고 있다[4]. 따라서 계산의 편리함을 가지는 동시에 전압불평형을 쉽게 표현할 수 있는 근사 계산식은 식 (5)와 같이 선간전압에 대한 근사 불평형율($LVUR_a$)로 표현할 수 있다.

$$LVUR_a = \frac{82 \cdot \sqrt{V_{abc}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{V_{avg}} \quad (5)$$

식 (5)에서 V_{abc} , V_{bce} 와 V_{cae} 는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{abc} &= |V_{ab}| - V_{avg} \\ V_{bce} &= |V_{bc}| - V_{avg} \\ V_{cae} &= |V_{ca}| - V_{avg} \end{aligned} \quad (6)$$

전압 불평형율의 허용범위는 시스템에 따라 약간의 차이가 있지만 표 2에서 것처럼 1~3[%] 정도이다[4].

표 1 전압 불평형율의 허용범위
Table 1 Allowable limits of voltage unbalance rate

규격	허용범위	비고
NEMA MG-14.33-1993	1[%]이하	
IEC 61000-2-2	2[%]	
IEEE 1159-1995	0.2~2[%]	
ANSI C84.1-1995	3[%]	무부하시

2.2 고조파의 발생과 영향

선형부하(linear load)란 본래 정상적인 동작상태에서 인가전압의 주기내내 전력원에 일정한 부하 임피던스를 나타내는 전기적인 부하장치를 말하고, 비선형 부하(nonlinear load)란 불연속적으로 전류를 흘리는 전기적인 부하 또는 부하의 임피던스가 정현적인 전압원의 주기동안 내내 변화하는 것을 말한다.

비선형 부하인 전력변환의 사용증가는 변환과정에서 발생한 고조파 성분의 증가로 자체 손실 증가는 물론 연결된 시스템에 좋지 못한 결과를 낳을 수 있다. 특히 발

생된 고조파 전류는 임피던스 성분이 낮은 성분으로 흐르기 때문에 취약한 시스템의 경우 치명적인 손상을 입을 수 있다. 따라서 고조파로부터 영향을 최소화하기 위해서는 발생 원인과 크기 그리고 이를 줄이기 위한 대책이 필요하다.

전압불평형으로 비선형부하에 의해 발생하는 전류파형은 기본파 I_1 의 고조파 성분 I_k 를 포함하는 식 (7)과 같다.

$$I = I_1 + \sum_{k=2}^n I_k \quad (7)$$

I_{THD} 는 기본파 실효치에 대한 고조파 실효치의 합으로 나타낸 식 (8)과 같다.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}{I_1} \quad (8)$$

THD와 왜형율(DF:Distortion factor)의 관계는 식 (9)에서와 같이 비선형 부하에 의한 고조파의 함유량이 높을수록 DF가 낮아져 THD가 100[%]일 때 70[%]가 된다.

$$DF = \frac{1}{\sqrt{1+(THD)^2}} \quad (9)$$

변압기 2차측에 연결된 부하는 운전시간대에 따라 변화하므로 항상 일정하지 않기 때문에 발생하는 고조파의 발생량도 부하의 운전상태에 따라 달리 표현할 필요가 있다. 따라서 부하의 운전조건에 따라 고조파의 발생량을 표현하는 방법으로 일정기간(15 또는 30분)동안 최대 부하전류의 퍼센트로서 전체 수용 왜형과 전류 I_{TDD} 는 식 (10)과 같이 표현한다.

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}{I_L} \quad (10)$$

여기서 I_L 은 기본파 주파수에서 최대 수용 부하전류값이다.

수용가 개별 부하에 대한 전압 및 전류 고조파는 PCC(Point of common coupling)에서 계산한다. PCC는 개별 부하가 전원측과 연결되는 장소로서 전원전압 왜형이 심해 많은 고조파 전류를 부하에 유입되지 않도록 규정하고 있는 곳이다.

표 2는 배전시스템의 PCC에서 최대 수요 부하전류 I_L 에 대한 최대 단락회로 전류 I_{sc} 의 비율에 따라 기수차의 전류왜형에 대한 한계를 개별 부하가 아닌 전체 부하에 대한 전류 고조파의 크기를 제한하고, 우수차의 고조파 전류를 기수차의 25[%]로 권고한다[5].

표 2 일반 배전 시스템용 전류 왜형 한계

Table 2 Current Distortion Limits for General Distortion Systems

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

불평형 전압운전시 비특정 고조파가 발생하고, 전체 고조파 발생량의 증가는 역률 감소로 이어질 수 있다.

3. 시스템의 구성과 측정분석

부하의 증감에 따라 발생하는 고조파의 발생량에 차이

가 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 Δ 로 그리고 2차측은 동력 및 전동·전열부하에 동시에 공급 가능한 방식의 Y결선방식을 적용하였다. 사용된 변압기의 %임피던스값은 2.47[%]이고, X/R의 비는 1.47이다.

PCC에서는 3상 동력 및 단상 부하를 공급할 수 있다. 3상 시스템에서 불평형 운전 특성을 해석하기 위해 단상 부하 결합 대신에 3상 AVR를 사용하였다. 가변속 드라이브(ASD)는 전압형 PWM인버터로 정류부는 다이오드 소자를 이용한 것이기 때문에 발생하는 고조파는 $6n \pm 1$ 차수가 크게 나타난다. ASD의 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 [μ F]과 0.56[mH]를 사용하였다.

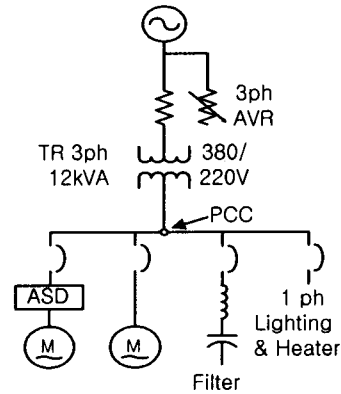
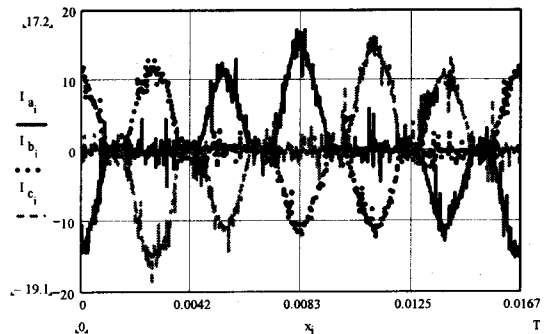


그림 1. 측정시스템 구성도

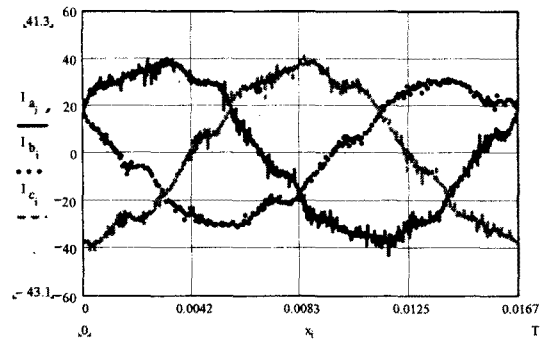
Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

3.1 평형전압공급시 비선형부하 증감에 따른 영향

크기가 거의 일정하고 120도의 위상차를 가진 3상 전원이 부하에 공급하는 것이 가장 이상적이지만 실제로 설비 조건에 따라 완전한 평형을 갖추기가 매우 어렵다. 그림 1과 같은 조건에서 3상 AVR를 사용하여 평형에 가까운 조건으로 설정하여 비선형 부하의 증감에 따라 필터부착전후 PCC에서 측정된 전류값은 그림 2 및 3과 같다. 전압 불평형율은 0.6[%]의 조건에서 부하의 변동에 따른 고조파의 특성변화를 확인하기 위해 전부하와 1부하 두 가지의 운전패턴으로 구분하였다.

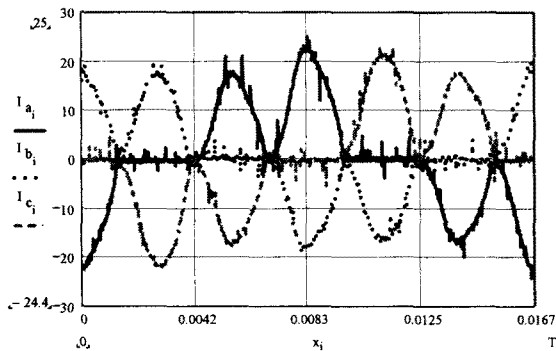


(a) 50[%] 부하 운전시(필터 미부착시)

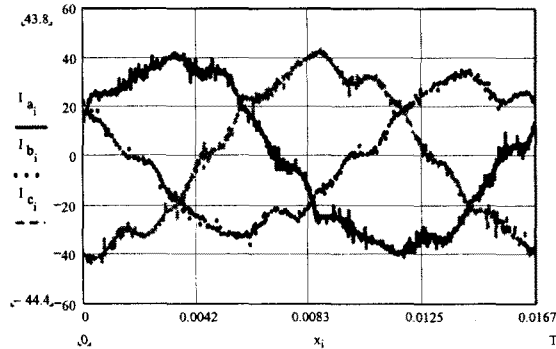


(b) 50[%] 부하 운전시(필터 부착시)

그림 2. 50[%] 부하의 전류파형
Fig. 2 Current waveform at 50[%] load



(a) 100[%] 부하 운전시(필터 미부착시)



(b) 100[%] 부하 운전시(필터 부착시)

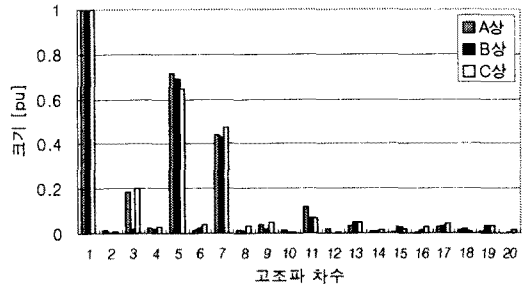
그림 3. 100[%] 부하의 전류파형
Fig. 3 Current waveform at 100[%] load

그림 2와 3은 ASD를 이용하여 유도전동기로 3마력 부하를 운전하는 경우 각각 50[%]와 100[%]의 부하운전에 따라 고조파를 발생하는 ASD의 전단에 필터의 설치 전후 PCC에서 측정된 전류 파형이다. 필터 부착전에는 비선형 소자의 전력변환과정에서 발생하는 고조파의 영향으로 두 개의 펄스형태 전류 파형을 나타내지만, 5차 고조파 저감을 위한 필터의 운전시 정현파에 가까운 전류 파형을 나타내고 있다. 50[%]에 비해 100[%]의 부하를 운전하는 경우 전류값은 2배정도 차이가 발생하지만, 필터 부착시에는 거의 차이가 없으며, 부하 증가시 펄스 파형 사이의 간격도 점차 줄어들음을 알 수 있다.

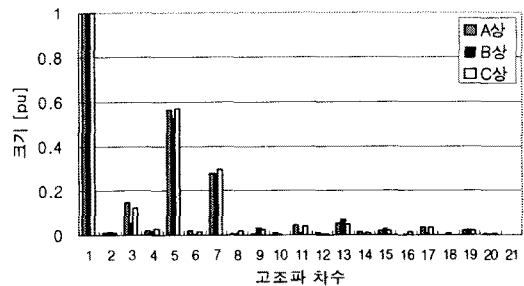
그림 2(a)와 3(a)는 각 상별로 2개의 펄스형태의 전류 파형으로 비선형 기기의 입력단에는 플래탑(flat top)의 왜형된 전압 파형을 발생시킨다.

비선형 부하의 사용으로 발생한 고조파 전류는 임피던

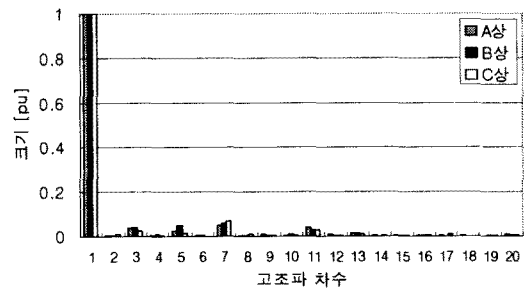
스 값이 낮은 전원측 또는 커패시턴스로 흘러 공진현상을 발생할 수 있다. 이와 같이 고조파전류로부터 영향을 줄이기 위해서는 각 고조파 전류 파형의 개별 크기를 분석해야 한다. 그림 2와 3의 PCC에 흐르는 고조파 전류의 측정결과를 FFT로 분석한 고조파 스펙트럼 결과는 그림 4와 같다.



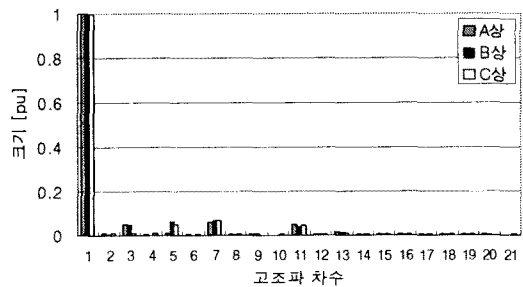
(a) 50[%] 부하 운전시(평형)



(b) 100[%] 부하 운전시(평형)



(c) 50[%] 부하 운전시(평형)-필터부착



(d) 100[%] 부하 운전시(평형)-필터부착

그림 4. 전류 고조파 스펙트럼
Fig. 4 Current harmonics spectrum

그림 4에서 (a)와 (b)는 평형에 가까운 전원공급시

50[%]와 100[%]의 부하를 운전한 경우이고, (c)와 (d)는 각각 동일조건에서 필터를 부착한 후의 전류 고조파 스펙트럼을 나타낸 것이다. 3상이 평형된 전원공급조건에서 나타나지 않는 3조파 성분이 약간 나타나고 있으며, 부하를 증가함에 따라 각 조파의 크기는 줄어들게 된다. 그러나 그림 4 (c)와 (d)에서처럼 5조파 저감용 필터를 비선형 기기의 앞단에 부착한 후 부하를 각각 50[%]와 100[%]로 운전한 측정결과에서는 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

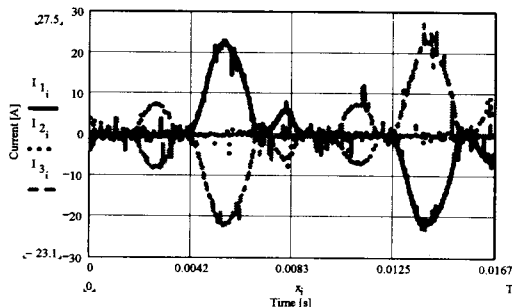
표 3 은 평형에 가까운 전원으로 운전시 각상의 고조파를 필터 부착전후에 따라 분석한 결과이다. 필터 부착전에 부하의 증가에 따라 각 상 전류의 전체 고조파 왜형(THD)의 성분은 감소하지만, 필터 부착 후에는 약간 감소함을 알 수 있다.

표 3 전압평형시 부하의 운전에 따른 전체 고조파 왜형을
Table 3 THD by load pattern at voltage balance

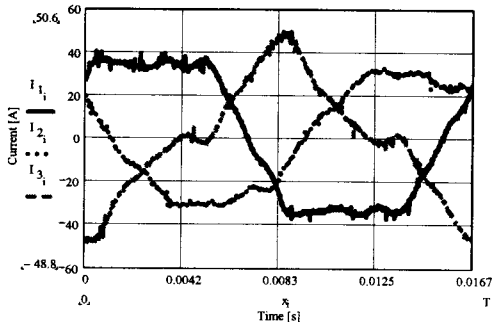
구분	50[%]운전시 각상 고조파				100[%]운전시 각상 고조파			
	A	B	C	AVG	A	B	C	AVG
미부착	87.6	82.8	84.5	84.97	65.6	60.8	66.3	64.23
부착	8.7	9.6	8.5	8.93	9.6	11.5	9.8	10.3

3.2 불평형전압공급시 비선형부하 증가에 따른 영향

저압 시스템에 평형된 3상 전원을 인가하는 것이 가장 바람직하지만, 전원측 및 PCC에 연결된 단상 및 3상 부하의 영향으로 전압불평형은 존재한다. 여기서는 그림 1 과 같은 조건에서 AVR를 이용하여 임의의 전압불평형은 설정하였다. 식 (1), (4) 및 (5)에 정의한대로 전압 불평형율은 3.4[%]로 전원을 공급할 경우 전부하 및 1부하로 운전하는 경우 비선형부하에 의한 전류 파형의 측정 결과는 그림 5 및 6과 같다.



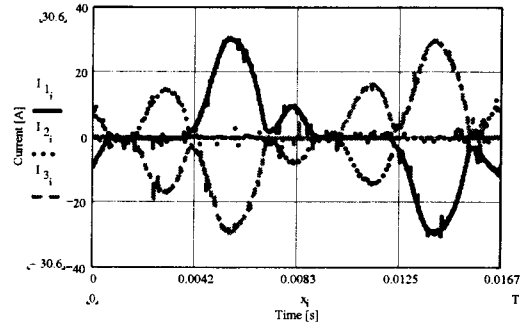
(a) 50[%] 부하 운전시(필터 미부착시)



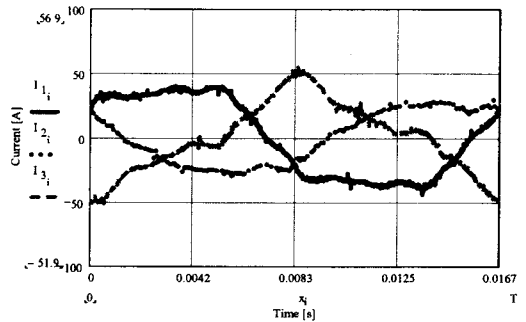
(b) 50[%] 부하 운전시(필터 부착시)

그림 5. 50[%]부하의 전류파형

Fig. 5 Current waveform at 50[%] load



(a) 100[%] 부하 운전시(필터미부착시)



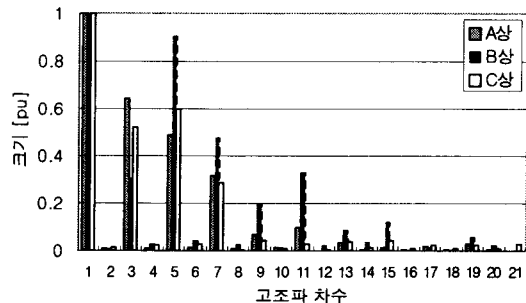
(b) 100[%] 부하 운전시(필터 부착시)

그림 6. 100[%]부하의 전류파형

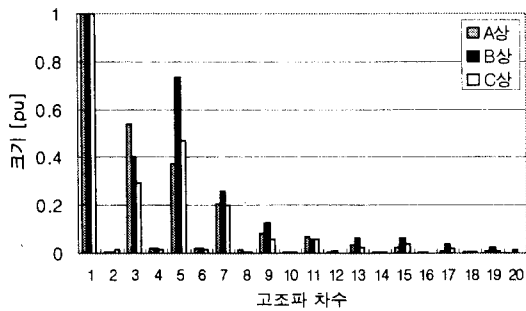
Fig. 6 Current waveform at 100[%] load

그림 5 및 6에서는 전압 불평형의 영향으로 각 상전류는 그림 2와 3에서처럼 평형에 가까운 전원으로 운전할 때 발생하는 전류 파형과는 달리 두 개의 펄스파가 아닌 서로 크기가 다른 형태를 나타낸다. 또한 필터의 부착시 전류 파형은 약간 왜형된 정현파 형태를 지니고 있다.

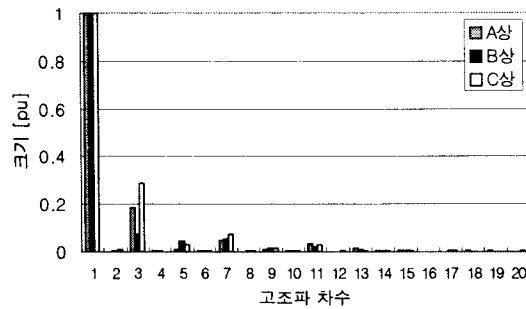
전압 불평형으로 운전하는 부하의 전류 파형이 상당히 왜형된 형태를 나타내기 때문에 이들 전류 파형에는 높은 고조파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이들 고조파 전류성분은 자체는 물론 다른 시스템에 손실증가를 초래할 수 있으므로 줄이기 위해서는 개별 차수의 크기 분석이 필요하다. 그림 7 은 그림 5와 6의 전류 파형을 FFT로 분석한 전류 고조파 스펙트럼이다.



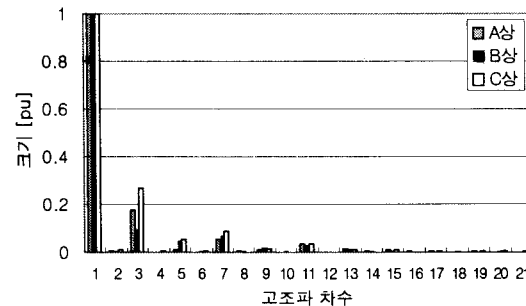
(a) 50[%] 부하 운전시(불평형)



(b) 100[%] 부하 운전시(불평형)



(c) 50[%] 부하 운전시(불평형) 필터부착시



(d) 100[%] 부하 운전시(불평형) 필터부착시

그림 7. 전류 고조파 스펙트럼

Fig. 7 Current harmonics spectrum

그림 7에서 알 수 있듯이 불평형의 증가로 비선형 소자에서 발생하는 차수 외 3배수 고조파가 나타난다. 부하의 증가에 따라 개별 차수의 크기는 다소 줄어들지만, 전체 전류 고조파의 크기는 높은 상태이다.

비선형 소자에서 발생하는 특정차수의 고조파를 줄이기 위해 필터를 인버터의 정류부 앞단에 연결 운전한 다음 측정된 전류 파형은 그림 7 (c)와 (d)와 같다. 필터 부착 후 비선형 기기에서 발생하는 고조파 성분은 거의 제거되지만, 전압 불평형으로 인해 3조파 성분은 평형에 가까운 전원으로 부하의 운전에 비해 약간의 감소만 있을 뿐 아직도 높은 크기를 유지하고 있다.

표 4는 3.4[%]의 전압불평형으로 부하의 운전시 각상의 고조파를 필터 부착전후에 따라 분석한 결과이다. 필터 부착 전에 부하의 증가에 따라 각 상 전류의 전체 고조파 왜형(THD)의 성분은 약간 감소하지만, 필터 부착 후에는 부하의 증가에 따라 THD의 값은 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

표 4 전압불평형시 부하의 운전에 따른 전체 고조파 왜형률

Table 4 THD by load pattern at voltage unbalance

구분	50[%]운전시				100[%]운전시			
	각상 고조파				각상 고조파			
필터	A	B	C	AVG	A	B	C	AVG
미부착	88.2	115.9	85.4	96.5	69.6	89.7	60.1	73.1
부착	19.5	10.9	30.4	20.2	18.8	13.2	29.1	20.37

표 3과 4에서 알 수 있듯이 3[%]의 전압불평형 운전시 필터의 미부착시에 비해 부착시는 약 10[%]의 전류 THD가 증가함을 알 수 있다. 따라서 식 (9)에서 정의한 대로 THD의 증가로 DF는 상대적으로 낮아진다.

또한 불평형 전압의 운전으로 인해 3상 평형전압 운전 상태에서 나타나지 않는 3조파 성분의 존재로 3상 4선식의 수용가 부하의 중성선에 높은 고조파 전류가 흘러 시스템의 오동작을 일으킬 수 있다.

이와 같이 높은 왜형률을 보상하기 위해 커패시터의 설치와 공진과 높은 고조파를 발생할 가능성이 높기 때문에 고조파 발생량이 적은 제품의 사용이나 필터를 설치하는 것이 도움이 된다.

측정점에 따라 전압의 크기도 달라진다. 변압기의 2차 측 단자에서 멀어질수록 임피던스 성분에 의해 전압강하는 존재하지만 고조파 성분에 의해 크기는 더욱 증가하여 전체 전압고조파 성분은 높아진다.

4. 결 론

수용가에 설치된 부하에서 발생하는 고조파는 자체 손실의 증가는 물론 연결된 시스템에 나쁜 영향을 주고 있다. 이들 고조파의 영향을 줄이기 위해서는 고조파 발생량이 적은 제품의 개발과 함께 발생된 고조파를 줄이기 위한 대책의 마련이 필요하다.

본 연구에서는 전압불평형 조건에서 전압형 PWM 인버터를 이용한 ASD의 정류부에서 발생하는 고조파의 발생정도를 부하증가에 따라 PCC측 전류 파형을 필터의 설치전후에 따라 분석하였다. 분석결과 부하의 증가에 따라 발생하는 고조파의 발생량에 차이가 있음을 알 수 있었다. 그러나 전압불평형 운전시 발생한 고조파의 크기를 줄이기 위해 필터 설치시 부하의 증가에 따라 거의 변화가 없음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pragasen Pillay et al., "Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages", IEEE Trans on EC, Vol. 17, No. 4, pp.485-491, Dec, 2002
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 김종겸, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [5] IEEE Std., 519-1992