

## Variance of Harmonics Element due to Linear & Non-linear Load Quantity

金宗謙\* · 孫洪寬\*\* · 李殷雄\*\*\*

(Jong-Gyeum Kim · Hong-Kwan Sohn · Eun-Woong Lee)

**Abstract** - Harmonics studies have been an important aspect of power conversion system analysis and design in recent years. Harmonics using power conversion device, have a harmful effect on power quality. Nonlinear load such as converter causes harmonic and effects self & other system. There are linear and nonlinear loads in the end-user application. For filter design to reduce harmonics, it is important to understand how loads interact with each other. In this paper, effects on the power conversion system at the low voltage local bus are discussed.

**Key Words** : Harmonics, DFT, FFT, ASD, Nonlinear load, Converter, Inverter, THD, TDD

### 1. 서 론

수용가측 전원시스템에 연결되어 있는 전기설비의 종류에는 백열등과 같은 선형부하와 컨버터 및 인버터와 같은 비선형부하가 있다. 선형부하는 고조파를 발생하지 않지만, 비선형부하는 고조파가 발생하여 자체 및 연결된 시스템에 좋지 않은 결과를 발생시킨다.

그런데 최근 기존 전기시스템의 성능개선과 효율적인 관리를 위해 반도체 소자를 응용한 전력변환장치가 널리 보급되어 있다. 이들 전력변환장치의 사용증가는 에너지 변환과정에서 고조파가 발생하여 전력품질을 나쁘게 할 수 있다 [1-9].

대표적 비선형(non-linear)부하인 전력변환장치 AC/DC 컨버터는 고조파원으로서 전원 및 부하측에 나쁜 영향을 끼친다. 이 비선형부하인 AC/DC 컨버터는 주로 전원측에서보다는 수용가측에서 많이 사용하고 있으며, 발생하는 고조파가 부하측뿐만 아니라 수전용 설비를 통해 전원측 계통에도 영향을 준다[4,6-8].

특히 산업현장에서 전력에너지 소비의 상당한 몫을 차지하고 있는 전동력 부하를 보다 효율적으로 운전하기 위해 가변속 제어설비가 많이 채택되고 있는데 이 가변속 드라이브(adjustable speed drive:ASD)시스템이 비선형 부하인 전력변환시스템이다.

최근 ASD로 구성된 단독 시스템에 발생하는 고조파의 영향을 최소화하려는 연구가 이루어져 지고 있다. 그러나

실제로는 선형 및 비선형부하 설비가 전원시스템에 함께 연결되어 사용되기 때문에 비선형부하에서 발생한 고조파가 다른 곳에 미치는 영향을 최소화하려는 노력도 중요하다.

그래서 비선형 부하에 의해 발생한 고조파를 줄이기 위해 비선형 부하의 전·후단에 필터를 연결하거나 간선에 특정 고조파를 줄이기 위한 리액터의 설치 및 능동필터의 채택과 같은 여러가지 방법이 적용되고 있다[6-9]. 이와 같은 방법은 공간의 확보와 투자비용이 필요하다. 그리고 비선형 부하는 무부하 운전전류와 정격부하의 운전전류에 따라 고조파 패턴이 달라질 수 있기 때문에 단순한 기능의 필터로는 고조파를 줄이는 것이 어렵다[9]. 실제 저압 시스템에 연결된 부하 중에는 유도전동기와 같은 인덕턴스성분의 부하가 함께 운전될 수 있기 때문에 이들 부하의 운전에 고조파가 미치는 영향을 최소화할 수 있는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 선형 및 비선형 부하의 혼합운전 시스템에서 발생하는 고조파의 영향을 해석하기 위해 선형부하에 비선형부하인 ASD를 첨부한 장치의 운전패턴에 따라 발생하는 고조파의 특성을 분석하고자 한다.

### 2. 선형 및 비선형 부하

#### 2.1 선형부하

이상적인 전력시스템의 전류와 전압 파형은 순수한 정현파이지만, 실제 부하에 흐르는 전류와 인가된 정현파 전압이 선형적 관계가 아닐때는 고조파가 포함되는 비선형적인 부하패턴을 형성한다.

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

\* 正 會 員 : 國 立 原 州 大 電 氣 科 副 教 授 · 工 博

\*\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院, 忠 南 大 工 大 博 士 課 程 修 了

\*\*\* 終 身 會 員 : 忠 南 大 工 大 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002年 1月 29日

最 終 完 了 : 2002年 6月 12日

화하는 것을 말한다[6].

그림 1은 저압측 3상 220[V] 전원 시스템에 선형 및 비선형 부하의 연결도이다. 비선형 부하는 ASD와 전자식 형광등이며, 선형부하는 백열전구와 유도전동기 등으로 단상 및 3상 부하가 있다.

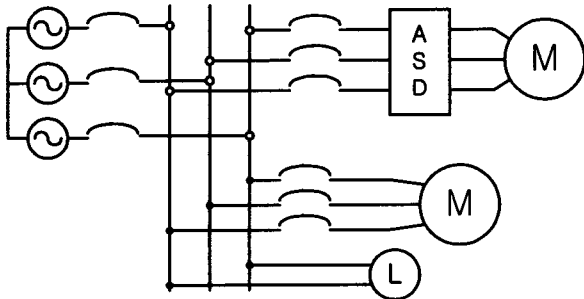


그림 1 저압설비 시스템  
Fig. 1 Low voltage system

그리고 비선형 부하로는 단연 유도전동기의 속도제어용 가변속 구동장치로 전력품질에 큰 영향을 미친다.

표 1은 부하설비의 종류에 따른 선형 및 비선형 부하에 대한 전기적인 특성을 나타낸 것이다.

표 1 선형 및 비선형 부하의 분류  
Table 1 Classification of linear & non-linear load

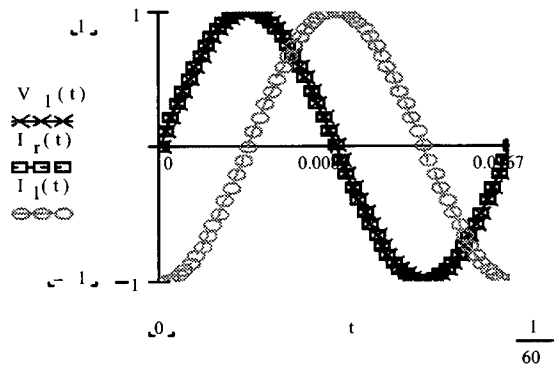
Type of Load	Electrical Characteristics
Incandescent Lamp	Passive Resistive
Resistive Heater	Passive Resistive
Air Conditioner	Passive Inductive
Small Motors	Non-linear
Computer	Non-linear(*)
Fluorescent(Electronics)	Non-linear(*)
Arc Furnace	Non-linear(*)
ASDs	Non-linear(*)

표 1에서(\*)는 주로 고조파를 발생하는 설비를 의미한다.

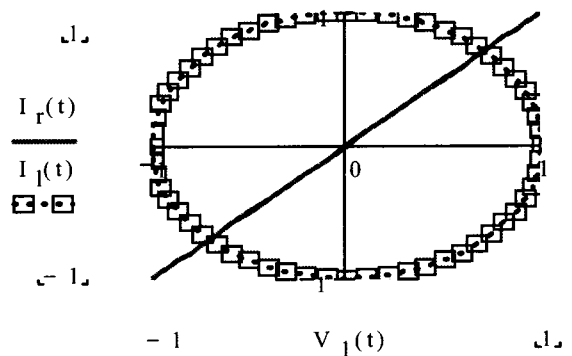
선형 및 비선형부하의 전류에 함유하고 있는 고조파 성분의 크기를 부하의 형태에 따라 시뮬레이션한 결과는 그림 2~4와 같다.

그림 2는 그림 1에 연결된 저항 및 유도성 부하에 대한 1 사이클 동안의 전압 및 전류파형과 궤적을 나타낸 것으로서 전압과 전류의 크기는 1[pu]를 기준으로 정하였다.

저항부하는 그림 2(a)와 같이 전압( $V_1$ )과 전류( $I_r$ )가 저항의 경우 동상이므로 시간의 변화가 같은 형태를 나타내지만, 유도성부하( $I_l$ )의 경우는 90°위상차를 나타낸다. 전압 기본파에 대한 전류의 변화를 나타내면 저항부하는 그림 2(b)와 같이 직선에 가까운 궤적을 나타내고, 유도성 부하는 전류가 전압보다 거의 90°뒤지는 경우로 전압이 영일때 전류는 거의 최대값을 나타내며 리사주파형은 그림 2(b)에서와 같이 타원 또는 원형의 궤적을 나타낸다. 이처럼 선형부하는 위상차에 따라 직선, 타원 또는 원형형태를 나타낸다.



(a) 저항 및 유도성 부하의 전압·전류 파형



(b) 저항 및 유도성부하의 전압기본파에 대한 전류변화

그림 2 선형부하에 대한 특성곡선 및 궤적

Fig. 2 Characteristic curve & locus by linear load

선형부하는 기준 전압파형에 대해 전류 파형의 변화가 위상차는 있지만, 구배의 변화점 발생 없이 선형적이고 전체 고조파 왜형율(Total Harmonic Distortion:THD)은 0이다. 따라서 선형부하에 대한 고조파의 영향은 고려할 필요가 없다.

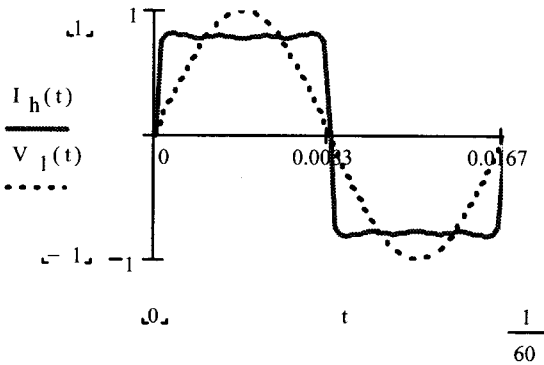
## 2.2 비선형 부하

전력변환장치와 같은 비선형부하의 사용증가는 자체 및 다른 설비에 좋지못한 전력품질을 낳을 수 있다.

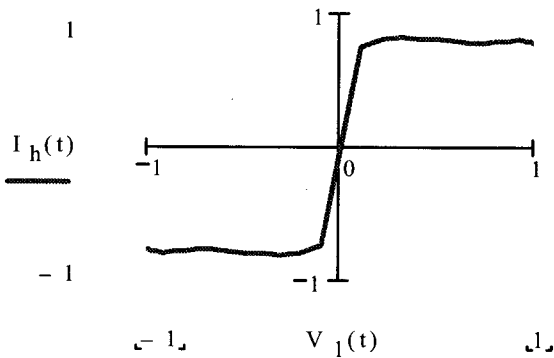
그림 3(a)에서는 1사이클 동안에 1[pu] 크기의 정현파 전압( $V_1$ )이 인가되었을 때 전류( $I_h$ )는 기본파 성분의 31차까지의 홀수차 성분의 고조파를 포함한 거의 구형파에 가까운 파형을 나타낸 것이다. 이 전류파형에 기본파 이외의 포함된 고조파의 기본파에 대한 비율을 나타낸 궤적이 그림 3(b)이다.

그림 3(b)의 x 축은 전압기본파( $V_1$ )를, y 축은 전류고조파 성분( $I_h$ )을 나타낸 것으로 일정구간까지의 선형 변화후 구배 변화가 발생하는 것처럼 고조파 성분이 포함되면 선형적인 변화를 하지 않는다. 그림 3과 같이 고조파를 함유한 전류파형에서 발생하는 전체 전류 고조파 왜형율(THD)은

36[%]이다. 이 값은 저압시스템의 고조파 제한 발생량 20[%]를 초과하는 크기다[8,9].



(a) 시간에 따른 전압·전류 파형

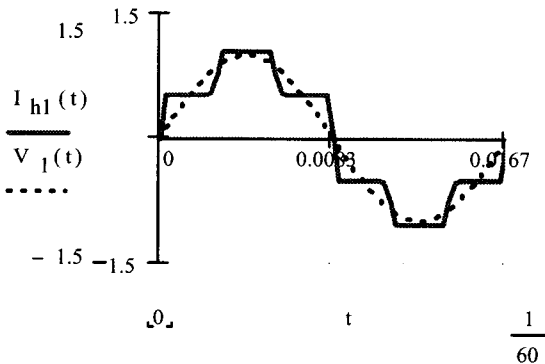


(b) 전압 기본파에 대한 고조파 전류계적

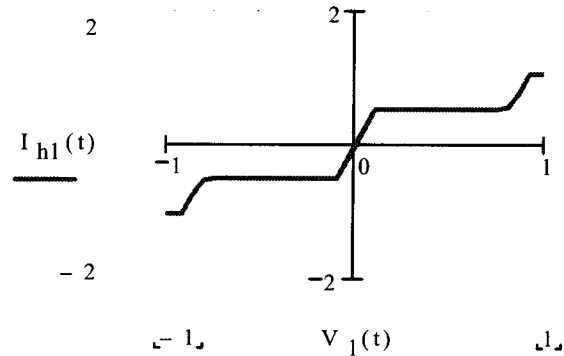
그림 3 비선형 부하의 특성곡선 및 궤적(1)

Fig. 3 Characteristic curve & locus by non-linear load(1)

그림 4는 6 스텝 구형파 인버터의 정현파 전압에 대한 고조파 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 4(a)에서 정현파 전압의 기본파 성분에 대해 전류 파형이 선형적인 변화가 아닌 구배 변화의 계단형상인 것은 고조파가 함유되어 있기 때문이다.



(a) 시간에 따른 전압·전류 파형



(b) 전압 기본파에 대한 고조파 전류계적

그림 4 비선형 부하의 특성곡선 및 궤적(II)

Fig. 4 Characteristic curve & locus by non-linear load(II)

그림 4(b)에서 계단형상 전류파형의 전체 고조파 왜형율은 21.7[%]로서 그림3(b)의 구형파에 비해 정현적인 형태에 가까운 변화를 하여 왜형율이 약간 줄어들음을 알 수 있다.

이상에서 선형 및 비선형부하의 정현파 전압의 기본파에 대한 전류 고조파 성분의 궤적을 분석한 결과 구배의 변화로 고조파의 함유량을 알 수 있다.

### 2.3 컨버터

유도전동기의 속도제어를 위한 ASD에서 발생하는 고조파의 발생정도는 컨버터뿐만 아니라 인버터 및 직류 링크부에 좌우된다[1,8-11].

ASD는 컨버터, 직류 링크, 제어부 및 인버터로 구성되는데 컨버터부가 전원측에 전압과도, 라인노칭(line notching), 고조파 발생 및 역률에 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 인버터에서 발생된 고조파는 직류 링크 커패시터로 구성된 고조파 전류 통로 때문에 컨버터 교류측에서는 무시할 수 있다[7]. 따라서 컨버터는 PWM형 ASD에서 고조파 전류가 전원측으로 주입하는 유일한 부분으로 모델화가 가능하여 ASD 회로를 나타낸 것이 그림 5에서 인버터와 전동기 부하는 직류전류원으로 모델화하였다.

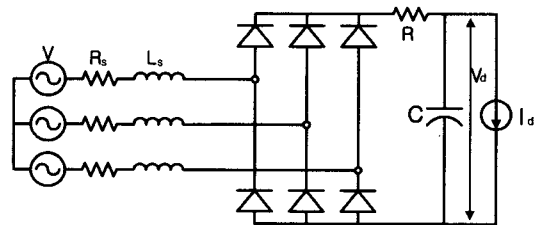


그림 5 PWM ASD의 컨버터 회로모델

Fig. 5 Converter circuit model of the PWM ASD

그리고 ASD는 고조파 전류원으로 설명할 수 있기 때문에 부하의 가변속 운전에 따라 인버터로 흐르는 전류값은 식(1)과 같이 전동기 손실을 포함한 부하값(P)에서 구할 수 있다.

$$I_d = \frac{P}{2.34 V_g \cos \alpha} [A] \quad (1)$$

여기서  $V_g$  는 전원 측 선간 대지전압이고,  $\alpha$  는 컨버터 사이리스터 점화각을 나타내지만 다이오드를 사용하는 경우는 0 이 된다.

### 3. 고조파 특성해석

#### 3.1 고조파의 발생 및 영향

기본 주파수의 정수배가 되는 성분을 가진 고조파 전압 및 전류 파형은 비선형 부하에 의해 발생하는데 일반적으로 고조파의 차수는 40 또는 50차 이하를 말하며 그 이상일 경우는 노이즈로 취급한다[9].

그림 6과 같이 비선형 부하에 의해 발생한 고조파는 자체 뿐만 아니라 인접부하 및 상위계통에 전달되어 시스템의 전력품질을 저하시킬 수 있다.

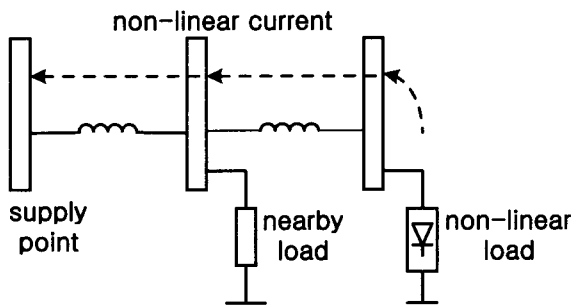


그림 6 고조파 전류의 전달경로  
Fig. 6 Path root of harmonics current

고조파에 의한 영향으로서는 부품의 고장이나 성능저하가 발생할 수 있고, 고조파 전류의 유입으로 기기의 과열이나 소손 또는 오동작을 일으킬 수 있다. 특히 산업설비의 자동화에 따라 제어시스템에서 고조파와 관련된 기기의 동작불량은 큰 문제를 발생한다[8,9,10].

#### 3.2 고조파 표현(지수)

비선형 부하에 의해 전류파형은 식(2)와 같이 기본파와 고조파 성분을 발생한다.

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

여기서  $I_1$  는 기본파 성분의 전류값이고,  $I_h$  는 각 고조파 성분의 전류값이다.

시간간격을 지닌 고조파 전류파형의 주기함수는 기본 및 기본 성분의 정수배인 차수의 고조파로서 식(3)의 Fourier 급수로 전개할 수 있다.

$$f(t) = c_o + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(hw_o t + \phi_h) \quad (3)$$

여기서  $c_o$  는 직류성분의 크기,  $hw_o$  는 주기함수의  $h$ -차수 고조파,  $w_o = 2\pi/T$ ,  $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$  와  $\phi_h = \tan^{-1}(a_h/b_h)$  로서 각각  $h$ -차수 고조파의 크기와 위상각이다.

시간영역의 주기함수 식(3)이 주기당  $N$ 개의 샘플을 가진 주기성 함수일 때는 이산 푸리에 변환(Discrtet Fourier Transformation:DFT)하면 식(4)로 된다.

$$f(n\Delta T) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k\Delta\Omega) e^{j2\pi kn/N} \quad (4)$$

여기서  $\Delta\Omega = 2\pi/\Delta T$ ,  $\Delta T = T/N$  이다.

DFT는 측정된 데이터가 샘플링된 시간함수의 형태로 항상 이용할 수 있기 때문에 고조파 측정에 사용되며, 샘플링된 시간함수는 제한 기간내 고정된 시간간격으로 분리된 기지의 크기를 시간 포인트로 나타내진다[7].

일정구간의 Fourier 시간함수는 DFT로 해석가능하며, DFT는 fast 푸리에변환(FFT) 알고리즘을 사용하여 많은 수의 평가가 가능한 DFT 계산을 가장 빨리 수행하게 하였다.

고조파 왜형 레벨은 각 개별 고조파 성분의 크기와 위상각을 가진 전체 고조파 스펙트럼으로 설명되며, 고조파 왜형의 유효값으로 하나의 양인 THD를 사용한다. 이 표현법은 정현파로 부터 고조파를 포함하는 주기적인 파형의 편이(deviation)를 측정하기 위해서 사용된다.

전류 왜형 레벨은 식(5)의 THD값으로 나타낼 수 있지만 유도전동기를 ASD로 경부하 운전할 때 입력전류에 비해 높은 THD를 나타내어 고조파의 상대적인 왜형이 높지만 고조파 전류의 실제 크기는 작기 때문에 중요한 관심사가 되지 못한다[5].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad (5)$$

따라서 운전상태에 관계없이 고조파 전류의 표현지수로 전체 요구 왜형(total demand distortion:TDD) 식(6)을 사용한다.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_L} \quad (6)$$

여기서  $I_L$  은 공통 결합점에서 기본 주파수의 최대 수요 부하전류이다.

#### 3.3 고조파 저감기준

전력변환시스템에서 비선형 부하 및 장비의 전압 및 전류의 고조파 왜형은 시스템 임피던스와 이들 고조파전류의 상호작용으로 발생하기 때문에 전력시스템에서의 고조파 레벨을 저감하기 위해 수용가는 시스템에 유입된 고조파전류를 줄이고, 전원공급자는 고조파 레벨의 지나친 확대가 일어나지 않도록 확실한 시스템 공진조건을 만들어 고조파 전압왜형을 제어하도록 IEEE 519-1992로 권고하고 있다[6].

표 3은 배전설비에서 부하가 연결된 전력시스템의 사이즈에 대해 부하의 사이즈에 기준을 둔 고조파 전류 제한을 나

타낸 것으로서 전원측뿐만 아니라 같은 간선(feeder)에 연결된 다른 사용자를 보호하기 위한 것이다.

저압 시스템의 고조파 전압왜형율은 설비의 종류 및 중요도를 감안하여 표 4와 같이 고조파 함유량에 차이를 두고 있다. 전용설비의 경우에는 특수설비에 비해 고조파 함유량이 다소 높게 규정하고 있다.

표 3 IEEE의 개별 수용가에 대한 고조파 전류제한규정  
Table 3 Harmonic current limits for individual end users from IEEE 519-1992

V ≤ 69kV (Harmonic current distortion limits in % of I <sub>L</sub> )						
Individual harmonic order (odd harmonics)						
I <sub>sc</sub> < I <sub>L</sub>	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ 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

I<sub>sc</sub>: Maximum short-circuit current at PCC  
I<sub>L</sub>: Maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

표 4 저압시스템 분류 및 왜형 제한  
Table 4 Low-Voltage system classification and distortion limits

	Specification applications	General systems	Dedicated system
THD(V)	3%	5%	10%
Specific application included hospitals and airport A dedicated systems is exclusively dedicated to the convert load			

#### 4. 고조파 전압·전류 측정 및 결과 분석

##### 4.1 측정시스템의 구성

가변속 드라이브와 같은 비선형 부하의 사용으로 발생한 고조파 전류가 자체 및 인근 그리고 상위계통에 미치는 영향을 조사하기 위해 그림 7과 같은 저압설비간선에 선형 및 비선형부하를 함께 연결하였다. 부하로 사용된 유도전동기는 220[V] 3마력으로 부하의 운전에 따른 특성변화를 측정하기 위해 전동기 출력에 발전기를 연결하고 발전기 출력단에는 전동부하를 사용하였다. 비선형 부하인 ASD는 스위칭 소자로 IGBT가 사용된 전압형 인버터(VSI)이다. 또한 간선에는 선형부하로 유도전동기를 연결하였다.

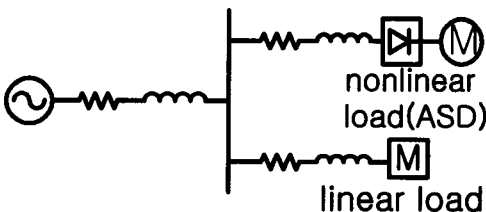


그림 7 측정시스템 구성도  
Fig. 7 Measurement systems

비선형부하에 의한 영향이 자체, 인근 및 다른 시스템에 미치는 정도를 알기 위해 측정포인트는 ASD의 전단 및 상위 전원측에서 실시하였다.

##### 4.2 비선형 부하만의 운전

ASD에서 부하의 크기에 따라 고조파 전류의 왜형은 일정하지 않다[5]. 전류 파형은 서로 다른 토크 값에서 상당히 다르게 변화한다. 따라서 부하의 운전패턴에 따른 비선형부하에 의한 영향이 어떤 결과가 일어나는가를 확인할 필요가 있다.

비선형 부하인 ASD만으로 3마력의 유도전동기를 운전한 경우로 컨버터의 입구단과 저압측 간선과는 동일한 전원이기 때문에 컨버터의 저압측에서 측정한 전압 및 전류 파형을 그림 8에 나타냈다. 부하의 운전범위는 무부하에서 정격 부하까지이다.

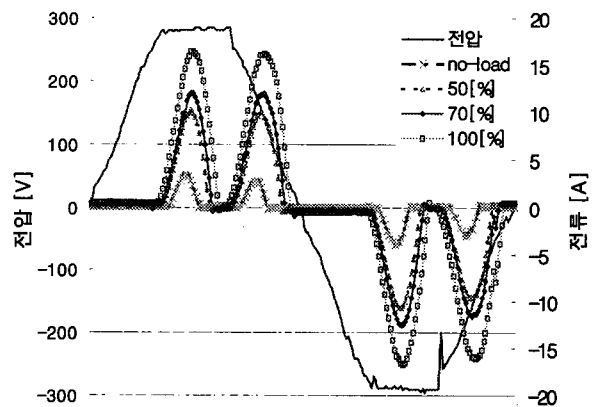


그림 8 비선형부하 운전시 전압·전류파형  
Fig. 8 Voltage current waveform using nonlinear load

그림 8에서 6펄스 부하에 대한 듀티 사이클은 선형부하에 비해 꽤 짧지만 불연속형태로서, 두개의 전도각은 인가전압의 반 사이클 동안 존재한다.

그리고 비선형부하 단독으로 운전할 경우에 컨버터 입구단에서 발생한 전류 고조파성분은 컨버터의 커패시터와 인덕턴스 성분에 의해 매우 짧은 펄스 형태로 되며, 저압측 간선에 같은 결과가 전달되기 때문에 비선형 부하에 의해 발생한 고조파성분이 여과 없이 바로 상위 또는 같은 간선에 연결된 다른 부하에 영향을 미칠 수 있다. 부하의 크기에 따라 전류값이 변화하고, 정격부하에서는 상당히 큰 고조파 전류가 다른 시스템에 주입하게 된다.

3마력 유도전동기의 부하 전류가 증가할 경우 ASD의 컨버터동작에 의해 두 펄스 파형의 간격이 짧아짐에 따라 고조파 전류값은 무부하시 145[%]에서 전부하시 74.6[%]로 점차 줄어들지만 권고기준 20[%]를 훨씬 상회한다. 이때 전압 파형에 대한 전체 전압 고조파 성분은 5.5[%]로서 기준에 가깝다.

3마력 유도전동기의 ASD와 같은 비선형 부하를 100[%] 정격 운전시 발생하는 고조파 성분을 전압성분에 대한 전류 성분을 벡터적으로 나타내면 그림 9와 같다.

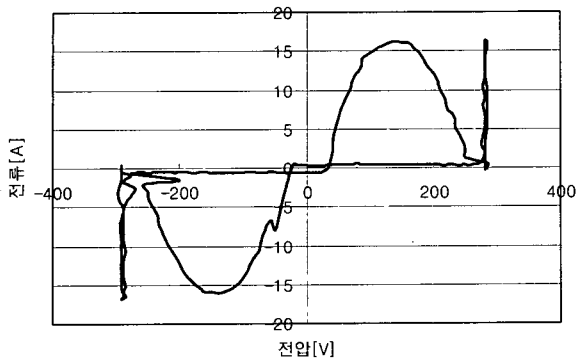


그림 9 비선형부하에서 전압·전류 벡터궤적  
Fig. 9 Voltage current vector locus at nonlinear load

선형부하인 경우 전압에 대한 전류의 벡터궤적은 그림 2처럼 선형 또는 구배변화가 적은 원 또는 타원의 궤적으로 나타나는데 비해 비선형 부하에서는 그림 9처럼 고조파 성분이 함유된 전압에 대한 전류의 벡터궤적이 복잡한 형태를 나타낸다.

그림 10은 비선형부하만의 운전시 부하의 크기에 따른 전류 파형변화를 FFT 변환하여 고조파 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 무부하 운전에서 고조파의 크기가 두드러지고, 무부하 및 경부하에서 5 및 7차 외 11과 13차 고조파가 크게 나타나지만, 부하의 증가에 따라 5차와 7차 고조파 성분이 점차적으로 감소하고 11과 13차 고조파 성분은 급격히 줄어든다.

그러므로 5차와 7차 고조파의 영향이 다른 차수에 비해 시스템에 크게 미칠 수 있기 때문에 시스템의 설계시 이를 반영할 필요가 있다.

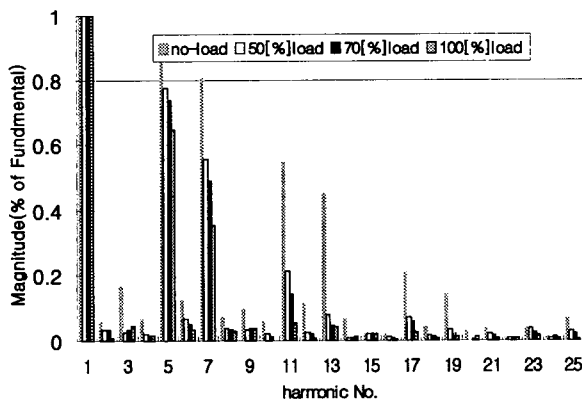


그림 10 전류 고조파 스펙트럼  
Fig. 10 Current harmonic spectrum

그리고 실제 계통에는 선형과 비선형 부하가 한 간선에 연결되어 운전하게 되므로 비선형부하로 인해 정격 운전할 경우 어떤 변화가 일어나는지 확인할 필요가 있다.

### 4.3 비선형과 선형부하의 병렬운전

선형부하와 비선형부하가 함께 사용되는 그림 1과 같은 저압용 전력사용 설비에서 비선형부하에서 발생하는 고조파가 이 설비에 어떠한 영향을 미치는가 조사할 필요가 있다.

전압 및 전류 측정은 저압측 간선과 ASD의 입구측에서 실시하여야 하나 ASD의 입구측 측정결과는 비선형의 단독 운전과 같기 때문에 비선형과 선형이 공유하는 저압측 간선에서 측정하여 결과를 분석하였다.

그림 11은 3마력 유도전동기 선형부하를 정격운전하고, 비선형 부하를 ASD로 3마력 유도전동기의 부하 크기를 변화시키면서 함께 운전할 때 부하의 크기에 따라 저압측 간선에서 측정된 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다.

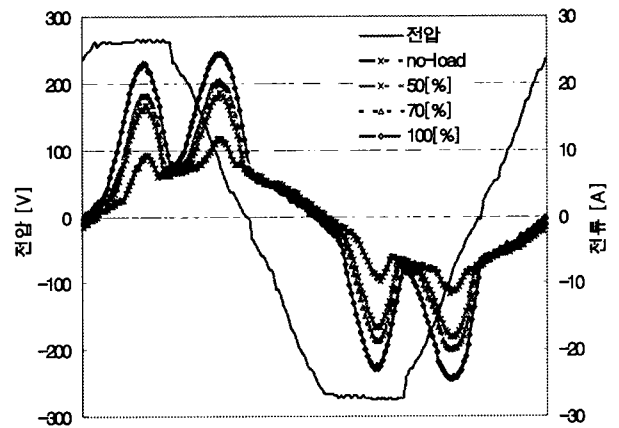


그림 11 선형 및 비선형 부하 운전시 전압·전류 파형  
Fig. 11 Voltage current waveform using linear & nonlinear load

그림 11에서 일정 선형 부하와 비선형 부하를 변화시킨면서 운전할 때 간선전류는 선형부하의 정현적인 파형에 비선형 부하전류를 합한 만큼으로 나타나며, 비선형 부하의 증가에 따라 반 주기당 두개의 혹 모양으로 파형 굴곡이 심하게 나타난다.

전압 파형에 대한 전체 고조파의 값은 3.5[%]로서 비선형 부하만의 운전에 비해 다소 줄어 권고 기준을 만족하며, 고조파 전류값에 대해서는 부하의 변화에 따라 전류 피크값이 증가하고, 이로 인해 고조파의 발생정도의 차이가 발생한다.

비선형 부하와 선형부하를 함께 사용할 경우 발생하는 고조파의 크기를 전압성분에 대한 전류성분의 벡터궤적으로 나타낸 것이 그림 12이다.

그림 9의 비선형 부하만의 전압에 대한 전류의 벡터궤적에 비해 그림 12의 선형 및 비선형 부하를 함께 운전할 때 전압에 대한 전류의 벡터궤적이 덜 복잡한 형태로 되지만, 선형, 타원 또는 원형과 같지 않은 것은 상당한 고조파가 포함되어 있기 때문이다.

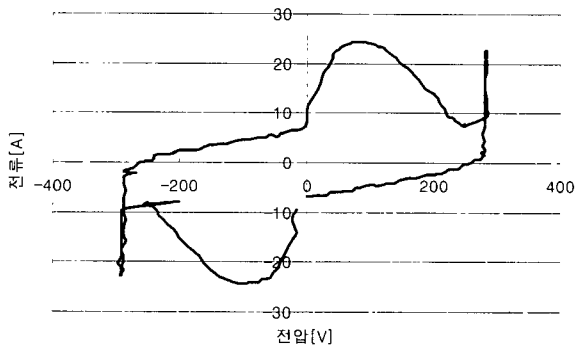


그림 12 선형+비선형부하에서 전압·전류 벡터궤적  
 Fig. 12 Voltage current vector locus at linear & nonlinear load

그림 13은 선형부하를 정격부하로 사용하고 비선형 부하의 부하크기에 대한 전류 파형을 FFT 변환하여 고조파 스펙트럼으로 나타낸 것으로 비선형 부하의 증가에 따라 저차인 5 및 7 고조파의 크기가 증가하지만, 11차와 13차 고조파에 대해서는 거의 변화하지 않는다. 그림 9의 비선형 부하의 단독운전할 때 부하 크기에 대해 각 고조파의 크기는 모두 감소하는데, 그림 13의 선형 비선형 부하가 함께 운전할 때는 저차인 5, 7 고조파의 크기는 상대적으로 증가한다.

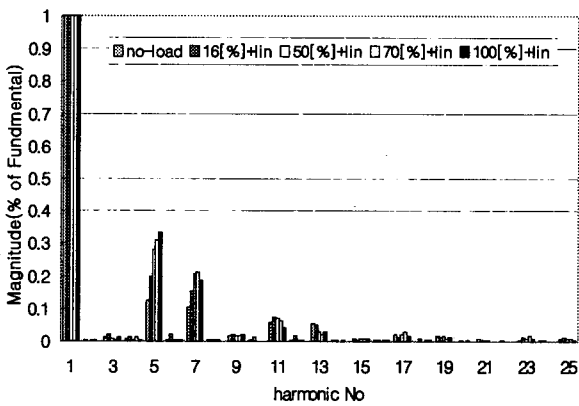


그림 13 전류 고조파 스펙트럼  
 Fig. 13 Current harmonic spectrum

따라서 선형 및 비선형 부하를 함께 운전하는 설비에서는 부하의 증가에 따라 크게 작용하는 저차인 5 고조파를 줄여야만 고조파의 발생을 최소화할 수 있다.

표 5는 PWM 인버터를 이용한 비선형부하와 선형운전부하인 유도전동기를 함께 운전할 때 발생한 전체 고조파 크기를 측정하여 FFT로 변환한 크기를 비교한 것이다.

표 5 선형 및 비선형 부하의 운전에 따른 고조파  
 Table 5 Harmonics by using linear & nonlinear load

구분	$I_{THD}[\%]$						
	무부하	16[%]	33[%]	50[%]	70[%]	83[%]	100[%]
비선형	145.2	123.9	111.3	99.2	90.7	82.1	74.6
선형+비선형	18.7	27.1	32.6	36.1	38.3	39.4	39.0

비선형만의 단독운전에서 부하의 증가에 따라 전체 전류 고조파의 값은 감소하고, 선형부하와 가변속 유도전동기 부하를 함께 운전할 때 경부하에서는 고조파의 값이 감소하지만, 중부하에서 정격부하에 이르기까지는 거의 변화가 없다.

따라서 비선형과 선형부하를 함께 운전하는 설비에서는 고조파의 발생이 기준 범위내에 들어가도록 하기 위해서는 별도의 대책을 수립하되 운전특성에 맞추어 설계할 필요가 있다.

### 5. 결 론

최근 전력사용설비의 효율적 이용을 위해 사용하는 전력 변환장치는 변환과정에서 고조파의 발생으로 자체는 물론 인근 및 연결된 상하위 계통에 영향을 미쳐 시스템의 신뢰도를 떨어뜨림에 대한 대책이 필요함을 제시했다.

우리주위의 많은 비선형성을 지닌 전력변환설비의 고조파 발생원을 줄이는 여러 대책이 마련되고 있으나, 실제 부하에서는 선형부하와 비선형부하가 함께 공존할뿐 아니라 비선형 부하의 운전패턴에 따라 발생 고조파의 특성에 차이가 있기 때문에 고조파의 발생원과 발생 후 영향을 최소화시킬 수 있는 대책 마련이 필요한 해석을 하였다.

실험으로 PWM 인버터를 이용한 유도전동기의 가변속 제어를 위한 비선형 부하만의 운전에서 부하의 증가에 따라 고조파의 발생이 점차 줄어들었지만, 왜형 기준을 상당히 초과함을 확인했다. 또한 선형부하와 비선형 부하의 연계운전에서는 비선형 부하가 무부하에 가까울 때 고조파의 발생이 감소하지만, 부하의 증가에 따라 고조파의 발생량이 거의 변화가 없이 일정한 값을 지닌다는 것을 확인하였다. 부하의 운전에 따라 고조파 특성이 달라지기 때문에 고조파를 줄이기 위해서는 고정된 필터보다는 능동형 필터가 필요함을 확인하였다.

앞으로 본 연구결과를 토대로 인버터의 전원측에 설치하여 전원협조 및 역률개선훈용으로 사용되고 있는 교류리액터에 대한 정확한 설계파라미터 값을 도출할 예정이다.

**감사의 글**

본 연구는 2001년도 과학재단의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

**참고 문헌**

- [1] W. Edward Reid, "Power Quality Issues-Standards & Guidelines," IEEE Trans. on IAS, pp. 625-632, May/June. 1996
- [2] Math H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems, chastic Processes, 3rd Edition, New York: IEEE Press, 1991.
- [3] J. Arrillaga et al., Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 1985
- [4] Derek A. Paice, Power Electronic Converter Harmonics, IEEE IAS Press, 1995
- [5] Roger C. Dugan et al., Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, 1999.
- [6] IEEE Standard 519-1992 limits
- [7] Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation, IEEE Power Engineering Society, 1998
- [8] 김종겸, 이은웅, "유도전동기의 가변속 구동장치의 인버터 종류에 따른 고조파 발생과 그 영향", 대한전기학회 논문지 제 47권, 2호, pp.906-913, 1998.7
- [9] 김종겸, 이은웅, "저압시스템에서 비선형 부하의 사용에 따른 전류 고조파 해석 및 측정", 대한전기학회 논문지 (B), 제 50권, 12호, pp. 601-608, 2001.12
- [10] Edward Y.Y. HO and Paresh C. Sen, "Digital Simulation of PWM Induction Motor Drives for Transient and Steady-State Performance", IEEE Trans on IE, vol.33, no.1, pp.66-77, Feb. 1986
- [11] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.

**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



**손홍관(孫洪寬)**

1962년 3월 21일생. 1985년 충남대 전기공학과 졸업. 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 충남대 대학원 박사과정, 1987년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경·송전연구그룹 선임연구원.  
Tel: 0551-280-1341  
E-mail: hksohn@keri.re.kr



**이은웅(李殷雄)**

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평의원. 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