

## 비선형 부하의 운전시 유도전동기의 특성 해석

김종겸\*, 박영진\*, 이은웅\*\*  
 원주대학\*, 충남대학\*\*

### Characteristics Analysis of Induction Motor by Operation of Non-linear Loads

Kim Jong-Gyeum, Pa가 Young-Jeen, Lee Eun-Woong  
 Wonju National College, Chungnam Univ

**Abstract** - Voltage unbalance will be generated by the load unbalance operation such as combination operation of single & three phase load and current unbalance will be more severe by the deteriorated voltage quality. Under the these unbalance conditions, all power electronic converters used in different types of electronic systems can increase harmonic disturbances by injecting harmonic currents directly into the feeder grid of three phase 4-wire. Harmonic current may cause torque to decrease. it may also overheat or become noisy and torque oscillation in the rotor can lead to mechanical resonance and vibration. This paper presents a scheme on the characteristics of induction motor under the combination of linear & non-linear loads at the three phase 4-wire power distribution system by the unbalance and harmonic components. It was able to confirm that the number of torque pulsation decreased and torque ripple values increased by the harmonics that reduction was difficult by five harmonics filters at additional driving time of single-phase non-linear load,

를 함께 사용하는 1뱅크 구성이 주류를 이루고 있다. 3상 4선식 설비에서 사용되는 부하 중에는 전동 전열과 같은 단상 및 3상 유도전동기와 같은 선형부하(linear load)도 많지만 정류회로와 속도제어로 사용되는 인버터와 같은 비선형 부하(non-linear load)도 있다. 비선형 부하는 운전 중에 발생하는 고조파 전류가 낮은 임피던스를 가진 부하 또는 전원측 시스템에 흘러 여러 가지 부작용을 초래하고 있다[1-3].

3상 4선식 전원공급방식에서 각상에 일정한 부하가 배분되도록 설계하지만 운전시 각상에 분담되는 전류값은 달라지고, 각상에 연결된 부하에서도 선형 및 비선형 부하의 운전 패턴에 따라 부하 불평형율이 달라지므로 전압품질에 나쁜 영향을 미치고 있다. 전압 불평형은 전류의 불평형을 발생시켜 손실의 증가는 물론 출력저하와 전기품질의 저하로 전체 시스템에 미치는 영향을 매우 높은 편이다.

본 논문에서는 3상 4선식 저압 수용가에서 비선형 부하 장치인 단상 컨버터와 인버터의 사용시 전기품질의 변동으로 3상 유도전동기에 미치는 영향의 정도 분석하고 저감을 위한 방안을 찾고자 한다.

## 1. 서 론

전기품질은 대부분 전압에 관련된 것으로 시스템에 일시적인 영향을 주는 sag 나 swell, 서지와 장기적으로 영향을 주는 정전현상과 그리고 시스템을 운전하는 동안 부하기에 지속적으로 영향을 미치는 불평형과 고조파가 있다[1-3].

우리나라 저압 수용가의 전압공급방식은 단상 및 3상 부하를 동시에 사용할 수 있는 3상 4선식 배전방식이다. 이 배전방식은 1뱅크의 변압기 구성으로도 단상 및 3상 부하에 필요한 전력을 공급할 수 있지만, 부하의 불평형 및 선형과 비선형 부하의 혼합 운전시 전압 불평형에 의한 기기의 손실 증가와 유도전동기의 경우 맥동 토크를 발생시킨다[3,4].

부하의 안정적인 운전을 위해서는 동력용 3상변압기와 단상 부하용 변압기를 별도로 구성하는 것이 바람직하지만, 3상 4선식 배전방식의 보편적인 사용으로 3상 부하인 동력용과 단상 부하인 전등 또는 전열 부하용 변압기

## 2. 시스템의 구성 및 토크 특성 해석

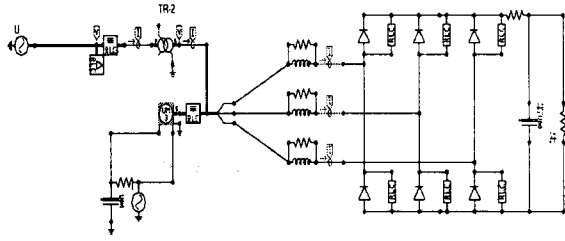
### 2.1 비선형 부하 운전시 전압 불평형율과 고조파

배전시스템에서 많은 부하는 3상 및 단상의 결합으로 이루어져 있다. 혼용부하의 공급을 위해서는 비대칭 변압기 뱅크 구성이 이루어지고 있다. 이와 같은 부하공급 시스템에서 단상 변압기 연결, 선택된 변압기의 임피던스와 불평형 부하의 운전은 뱅크 구성에 따라 2차측 3상 전압 불평형을 발생시킬 수 있다.

저압 수용가에 설치된 부하에는 선형뿐만 아니라 비선형부하도 설치 운전되고 있다. 비선형 부하에는 전력변환과정에서 발생한 고조파는 임피던스가 낮은 연결된 다른 부하에 영향을 주게 된다.

그림 1은 자가용 수전설비 저압배전시스템의 구성도를 나타낸 것으로서 변압기 1차측은  $\Delta$  결선, 2차측은 Y결선으로 선간에는 3상 유도전동기의 3상 컨버터가 연결 사용되는 경우가

많다. 3상 4선식에는 단상 부하도 연결되는데 특히 SMPS와 같은 단상 비선형 부하가 많이 사용되고 있다.



<그림 1> 선형 및 비선형 부하 혼합 구성 시스템

그림 1의 오른쪽 부분은 비선형 부하인 3상 컨버터로서 이로부터 발생하는 고조파는 식 (1)과 같이 기본파 전류  $I_1$ 과 고조파 성분 전류  $I_h$ 가 발생된다. 발생된 고조파 중에서 5고조파가 매우 높게 나타나는 것은 3상 전파정류회로를 사용하기 때문이다. 그러나 단상 SMPS와 같은 전력변환장치의 사용시 고조파는 3상 전파회로와 달리 홀수 고조파가 많이 나타난다.

$$I = I_1 + \sum_{h=2}^n I_h \quad (1)$$

전압 불평형에 의해 영향을 받는 부하로서는 선형과 비선형 부하가 있다. 선형부하는 전압에 대한 전류의 변화가 연속적인 변화를 하는 것이지만, 비선형 부하는 전력변환 장치와 같은 부하는 전압의 인가에 대해 전류가 불연속적인 변화를 하는 것이다. 이와 같은 비선형 부하기기의 사용시 전압 불평형에 의한 영향의 진단이 필요하다.

전압 불평형은 대칭좌표법에 의해 구하거나 도식적으로 나타낼 수 있다. 그러나 현장에서 측정할 경우 대개 실효값으로 나타내지므로 간단하게 간략화한 방법도 사용하고 있다.

전압 불평형율(VUF: Voltage Unbalance Factor)은 식 (2)와 같이 정상분( $V_1$ )에 대해 역상분( $V_2$ )의 비율로서 정의한다.

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

식 (2)에서 정상분  $V_1$ 과 역상분  $V_2$ 은 3상 불평형 선간전압  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$ 를 식 (3)과 같은 대칭성분으로서 불평형 조건하에서 유도전동기의 동작을 해석할 때 편리하다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 \cdot V_{ca}}{3} \\ V_2 &= \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a \cdot V_{ca}}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

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

현장에서 측정한 3상 선간전압으로 전압불평형을 산출할 경우 식 (4)를 이용하면 쉽게 식 (2)와 같이 정확한 값을 구할 수 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4)$$

식 (4)에서  $\beta$ 는 다음으로 구한 것이다.

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

## 2.2 유도전동기 토크

부하가 안정된 동작을 하기 위해서는 전압품질이 양호해야 하지만, 사용되는 부하가 선형이 아닌 비선형 부하가 사용되는 경우가 매우 높기 때문에 전압에는 품질변화가 존재한다. 이와 같은 전압에 고조파성분의 포함시 전압 불평형율이 높아지고 사용되는 기기에 토크 맥동이나 소음 그리고 기계적인 손상을 발생할 수 있다[1]. 따라서 선형부하와 비선형 부하의 혼합 운전시 가장 사용빈도가 높은 유도전동기의 특성변화를 해석하고자 한다.

3상 유도전동기의 전압방정식은 식 (5)와 같다[5].

$$[v] = [v_s] + R_s [i] + L_s \frac{d}{dt} [i] \quad (5)$$

여기서  $[v]$  단자전압 벡터

$[v_s]$  연결 버스 전압 벡터

$R_s, L_s$  는 임피던스 파라미터 소스

$[i]$  는 상전류 벡터

동작시스템의 전기적인 부분의 동작을 나타내는 방정식은 식 (6)과 같은 변환행렬을 사용하여 구할 수 있다.

$$[X_{dqo}] = [T][X_{abc}] \quad (6)$$

식 (6)에서 변환행렬  $[T]$ 은 식 (7)과 같다.

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \left( \beta - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \beta \sin \left( \beta - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left( \beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (6)으로 설명한 변환행렬에서 X는 고정자 쇄교자속, 전압 또는 전류를 나타낸 것이고, T는 Park의 변환행렬이다. 변환된 양을 사용하여 기기의 전기적인 부분으로 변환할 경우 전류와 자속의 방정식은 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_D \\ \lambda_q \\ \lambda_Q \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d M_d 0 0 0 \\ M_d L_D 0 0 0 \\ 0 0 L_q M_q 0 \\ 0 0 M_q L_Q 0 \\ 0 0 0 0 L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \\ i_o \end{bmatrix} \quad (8)$$

3상 유도전동기는 비돌극기(non-salient pole)이므로 식 (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L_d = L_q = L_o = L_s; L_D = L_Q = L_r; M_d = M_q = L_m$$

여기서  $a$  와  $r$ 는 각자 고정자와 회전자를 의미한다. 따라서 유도전동기의 전압방정식은 식 (9)와 같이  $d, q$  축으로 변환된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ 0 \\ v_q \\ 0 \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & & & \\ & R_r & & & \\ & & R_s & & \\ & & & R_r & \\ & & & & R_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \\ i_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_D \\ \lambda_q \\ \lambda_Q \\ \lambda_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \lambda_q \\ 0 \\ \omega \lambda_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

따라서 유도전동기의 토크 방정식은 식 (8) 및 (9)를 이용하

여 식 (10)과 같이 자속과 전류의 관계로 나타낼 수 있다.

$$T_{em} = \frac{P}{2} (\lambda_{d'q} - \lambda_q i_d) \quad (10)$$

### 3. 시뮬레이션 및 결과 분석

3상 4선식 설비에서 비선형 부하의 사용에 따른 유도전동기의 특성변화를 확인하기 위해 선형부하인 유도전동기만을 운전한 경우와 단상 및 3상 비선형 부하를 추가하여 운전한 경우에 대하여 운전특성을 비교하였다. 또한 사용되는 비선형 부하는 3상 부하 단독 또는 단상 부하와 혼합시 선형부하 측에 미치는 고조파의 특성도 함께 분석하였다.

선형부하로 사용되는 3상 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 유도전동기 파라미터

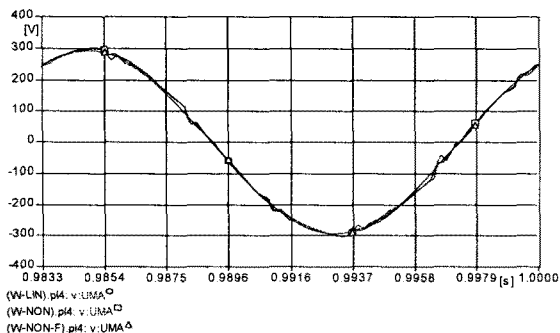
parameter	220V, 4p, 3HP 60%
stator resistance, $R_s$	0.435[Ω]
rotor resistance, $R_r$	0.816[Ω]
stator leakage inductance, $L_{sl}$	0.002[H]
rotor leakage inductance, $L_{rl}$	0.002[H]
mutual inductance, $L_m$	0.0693[H]
Inertia moment, J	0.089[kg·m <sup>2</sup> ]
Friction coefficient, B	0.0089[Nm·%]

본 연구에서는 저압 계통에서 비선형 부하의 사용에 따라 유도전동기의 동작특성이 어떻게 변화하는가를 분석하기 위해 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 이용하였다.

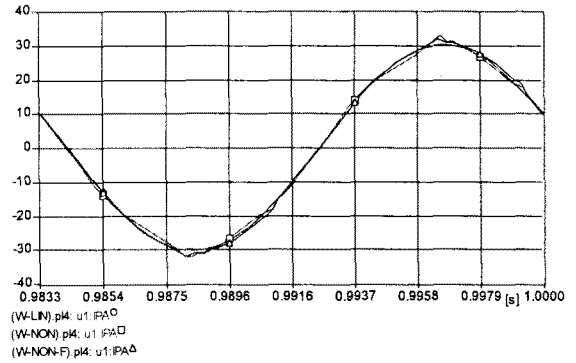
#### 3.1 3상 비선형 부하 단독 운전시의 동작특성

그림 2는 그림 1과 같은 회로에서 선형부하 단독(○), 선형에 비선형 부하인 컨버터 사용(□) 그리고 5고조파 필터를 부착한 경우(△)에 전동기에 인가되는 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다.

그림 2(a)에서 알 수 있듯이 비선형 부하 사용시 전압파형에서 약간의 왜형과 순간적인 sag가 발생함을 알 수 있다.



(a) A 상 전압 파형



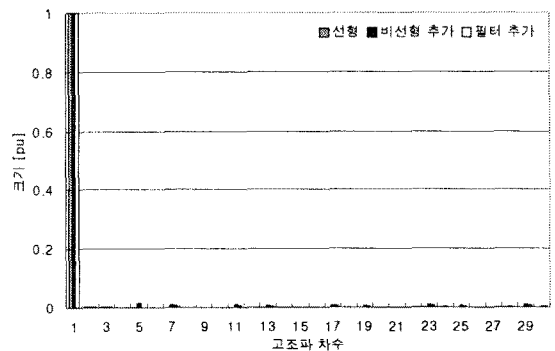
(b) 고정자 A상의 전류파형

<그림 2> 전압 및 전류파형

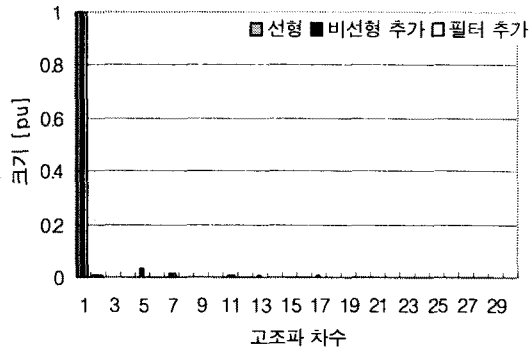
그림 2(b)에서와 같이 3상 4선식 전원공급 변압기의 2차측에 선형부하인 유도전동기만을 사용할 경우 고정자에 흐르는 전류값(○)은 고조파성분이 포함되지 않은 정현파이지만, 비선형 부하의 사용시 고정자에 흐르는 전류(□)는 고조파성분이 포함된 왜형된 전류 파형을 나타내며 고조파를 줄이기 위해 설치하는 5고조파 필터 설치시 전류파형(△)은 정현파에 가깝지만 필터용 콘덴서의 영향으로 전류값이 약간 증가함을 알 수 있다. 고조파 제거용 필터의 설치시 커패시터의 영향으로 증가된 전류값은 전동기 토크값을 증가시킬 수 있다.

그림 3은 그림 2의 전압 및 전류파형에 대한 고조파 성분의 크기를 차수별로 분석한 스펙트럼이다. 선형부하만의 운전시 고조파는 존재하지 않지만, 3상 컨버터의 사용시  $6n \pm 1$ 차수의 고조파인 5와 7차 고조파가 존재하지만, 5차 고조파 저감 필터의 사용시 대부분이 저감됨을 알 수 있다.

그림 3에서 전압 고조파 전체 왜형율(THD)은 거의 선형일 때 0.46%에서 3상 비선형 부하를 사용할 경우 2.79%로 증가하였으나, 5고조파 저감용 필터를 부착할 경우 1.70%로 감소하였다. 그림 3와 같은 전류 파형에 대한 고조파 분석결과에서도 비선형 부하의 사용시 THD는 4.15%에서 1.73%로 감소함을 확인하였다.



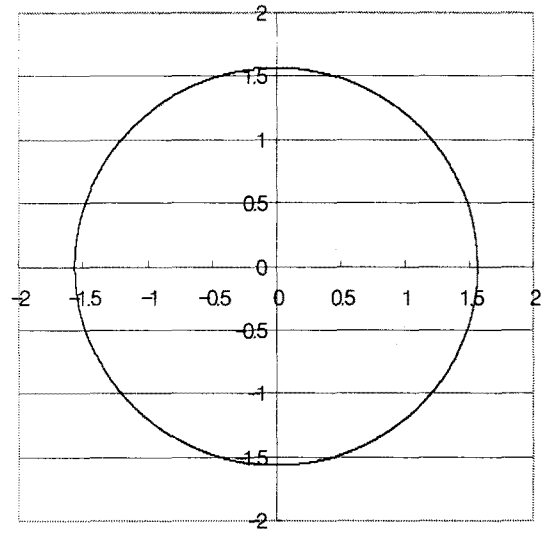
(a) 전압 파형 고조파 스펙트럼



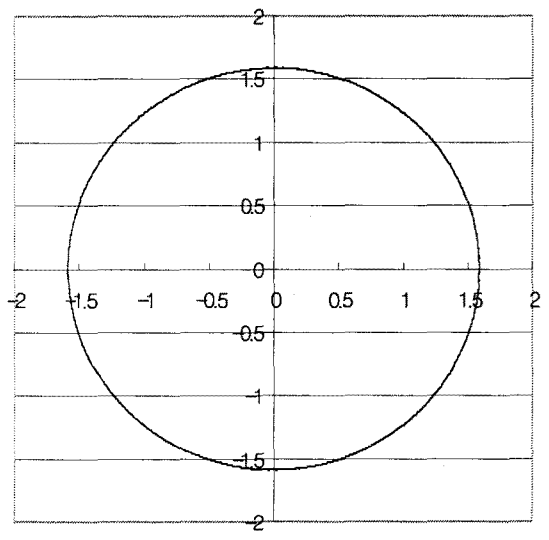
(b) 전류 파형 고조파 스펙트럼  
**<그림 3> 전압 및 전류파형에 대한 고조파 분석**

비선형부하의 사용으로 전압 및 전류파형이 왜형될 경우 유도전동기의 토크 특성에 변화가 발생된다. 토크는 전류 및 자속의 곱으로 표현되기 때문에 비선형 부하의 사용으로 발생하는 불평형 및 왜형에 의해 토크가 어떻게 변화하는지 알기 위해서는 자속궤적에 대한 변화해석이 필요하다.

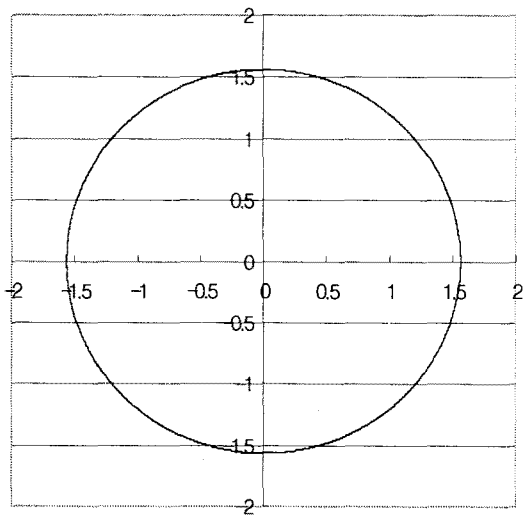
그림 4는 그림 2와 같은 전류가 전동기에 인가될 경우의 전동기의 고정자에서의 d-q축 자속궤적변화를 나타낸 것이다. 그림에서 x축과 y축의 단위는 [T]이다.



(b) 비선형 부하 추가시 자속궤적



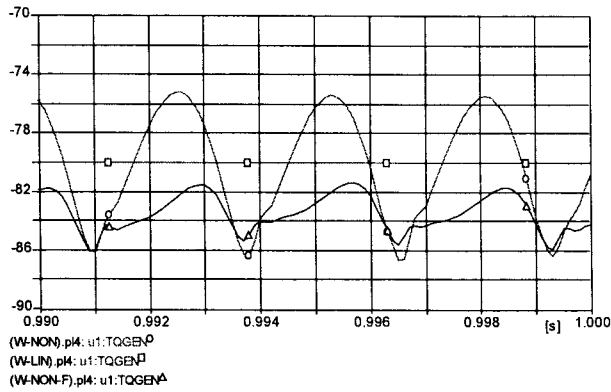
(c) 필터 추가시 자속궤적  
**<그림 4> d-q 축 자속궤적(1)**



(a) 선형 부하의 자속궤적

그림 4에서와 같이 선형부하 단독 운전시는 고조파 성분이 전혀 포함되어 있지 않기 때문에 깨끗한 원 형태 궤적을 그리지만, 그림 4에서와 같이 비선형 부하의 추가 운전시는 궤적에서 미소의 리플성분을 포함되며, 고조파 저감을 위한 필터의 추가시 자속궤적은 그림 4와 같이 리플이 거의 제거된 형태의 궤적을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 이와 같은 성질은 토크 특성에 그대로 반영된다.

그림 5는 그림 2 및 4와 같은 조건에서의 유도전동기 토크 특성 변화를 나타낸 것이다. 그림 5에서 Y축의 단위는 [Nm]이고 부호가 (-)로 나타나는 것은 프로그램에서 전동기는 부(-)이고 발전기는 정(+)으로 나타내기 때문이다.



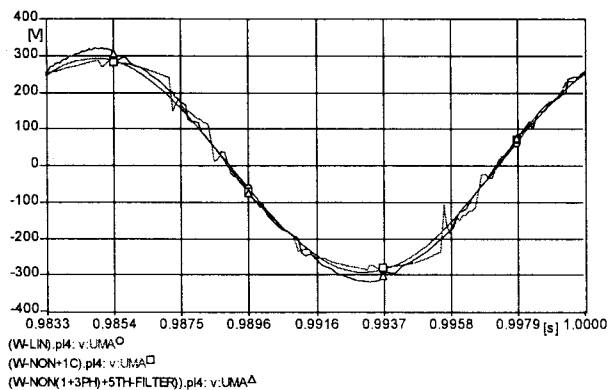
〈그림 5〉 선형 및 비선형 부하 운전시 토크 (1)

그림 5에서 3상 평형 전압인가의 인가시로 선형부하만을 운전한 경우 토크(□)는 80[Nm]로 일정하지만, 비선형 부하를 사용한 경우 고조파의 영향으로 토크 맥동이 발생하게 된다. 이때 발생하는 토크(○)값은 75~86[Nm]의 범위로 선형부하만을 사용한 경우에 비해 평균 토크값은 같지만 맥동성분은 대략  $\pm 5.5$ [Nm]정도 발생함을 알 수 있다.

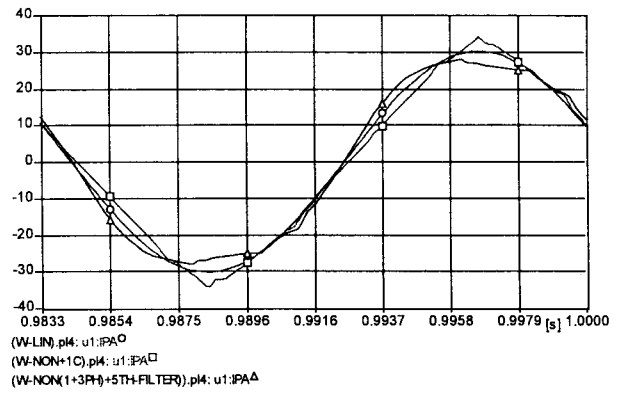
비선형 부하에서 발생하는 고조파의 영향을 저감하기 위해 대부분의 경우 필터를 설치하고 있다. 3상 컨버터의 경우 가장 높게 나타나는 5고조파를 줄이기 위해 해당필터의 파라미터를 적용할 경우 토크(Δ) 변화는 그림 5에서 81.5~85[Nm]의 범위로 동작함을 알 수 있다. 그림 5에서와 같이 고조파를 완전하게 저감하지는 맥동성분을 매우 감소시키며 출력 토크를 안정시킨 결과이다.

**3.2 3상 및 단상 비선형 부하 혼합 운전시의 동작특성**  
3상 4선식에서는 3상 부하 외 단상부하가 운전되는 경우가 높은 편이다. 이 단상부하 중에는 SMPS와 같은 비선형부하가 많이 사용되고 있다. 이와 같은 조건을 대상으로 유도전동기에 나타나는 현상을 분석하였다.

그림 6은 그림 1과 같은 조건에 단상 비선형 부하를 추가한 경우의 유도전동기에 인가되는 전압 및 전류파형을 나타낸 것이다.



(a) a상 전압파형

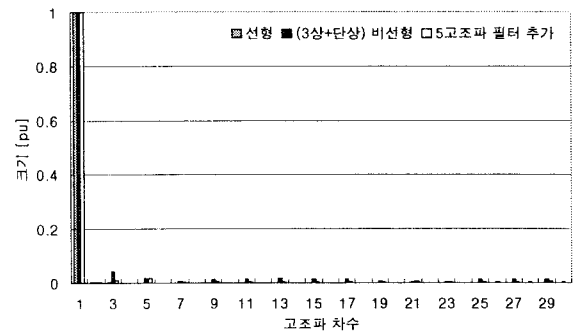


(b) A상 전류파형

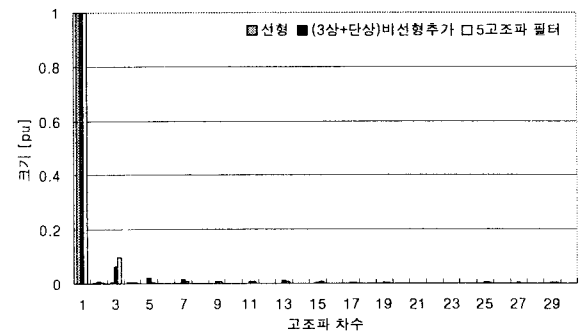
〈그림 6〉 전압 전류 파형

그림 6에서의 전압 및 전류 파형은 3상 비선형 부하만을 사용하는 경우에 비해 전압 및 전류 불평형이 높아 왜형의 정도가 더욱 높아진 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 그림 6과 같은 전압 전류 파형에 대한 각 차수별 고조파 스펙트럼을 분석한 결과이다. 그림 7(a)의 전압 고조파 성분에서는 단상 및 3상 비선형 부하를 사용할 경우 5고조파 성분 외 3고조파 성분이 약간 높게 나타남을 알 수 있다. 전체적으로 홀수 차수의 성분이 주류를 이루고 있음을 알 수 있다.



(a) 전압 파형 고조파 스펙트럼



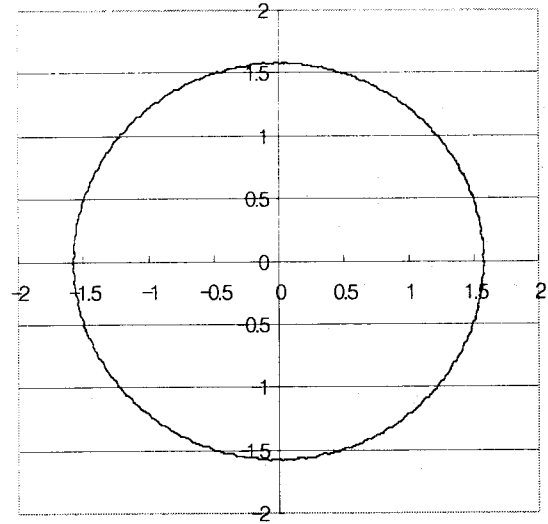
(b) 전류 파형 고조파 스펙트럼

〈그림 7〉 전압 전류 고조파 스펙트럼

그림 7(a)에서는 전류 고조파 성분을 분석할 결과로서 홀수 차수 중에서 3고조파 성분이 5고조파 필터의 설치 후에도 높게 존재함을 확인할 수 있다. 이는 3상 4선식에서 중성선에 높은 고조파 전류성분이 존재함을 의미한다.

그림 7(b)에서 전압 고조파 전체 왜형율(THD)은 거의 선형일 때 0.70%에서 3상 비선형 부하를 사용할 경우 4.15%로 증가하였으나, 5고조파 저감용 필터를 부착할 경우 1.73%로 감소하였다. 그림 7(a)와 같은 전류 파형에 대한 고조파 분석결과에서도 비선형 부하의 사용시 THD는 6.99%에서 9.89%로 오히려 증가함을 확인하였다. 이는 단상 비선형 부하의 추가로 인해 5고조파로 저감되지 않은 성분의 영향 때문이다.

그림 8은 그림 6의 전류파형에 대한 d, q축의 자속궤적을 나타낸 것이다.

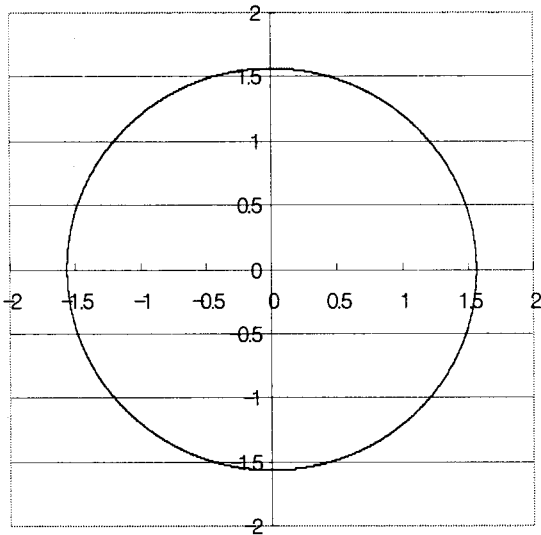


(c) 5고조파 필터 설치후의 자속궤적

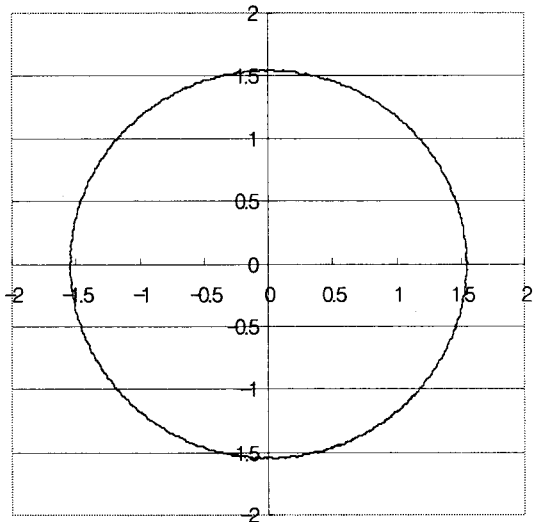
<그림 8> d-q 축 자속 궤적(II)

그림 8(a)의 자속궤적에서 알 수 있듯이 선형부하에 단상 및 3상 비선형 부하 사용시 자속궤적에는 약간의 리플성분이 존재하고 그림 8(c)에서와 같이 필터의 추가시 궤적의 둘레가 약간 증가함을 확인할 수 있다.

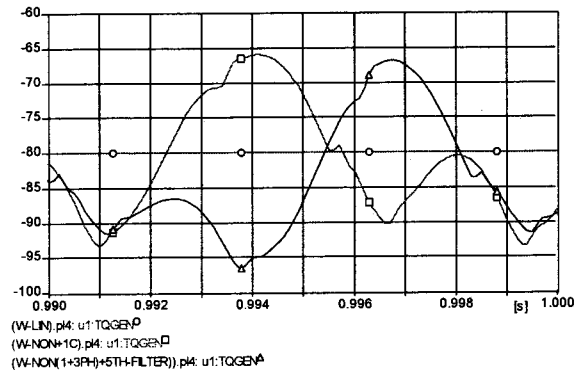
그림 9는 그림 6 및 8와 같은 결과를 가지고 식 III을 이용하여 구한 토크 곡선이다. 비선형 부하를 사용하지 않은 상태에서 운전할 경우 토크값은 80[Nm]로 일정한 값을 나타내지만, 고조파를 저감하기 위한 5고조파 필터 부착전(□)에 토크값은 66-90[Nm]값이지만, 5고조파 저감 필터 부착시(Δ)에는 토크 값이 67-97[Nm]의 범위로 부착 전에 비해 약간 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 토크의 맥동범위가 커질 경우 진동에 의한 소음증가와 베어링 마모의 원인을 제공할 수 있고, 제품의 균일한 가공을 매우 어렵게 할 수 있다.



(a) 선형 부하의 자속궤적



(b) (3상+단상)비선형 부하 추가시 자속궤적



<그림 9> 선형 및 비선형 부하 운전시 토크(II)

## 4. 결 론

본 연구에서는 3상 및 단상 부하의 전원공급이 가능한 220/380[V]시스템과 같은 3상 4선식 배전방식에서 단상 및 3상 비선형 부하의 운전시에 유도전동기가 받을 수 있는 특성변화를 해석한 것이다.

각상에 흐르는 전류값의 변화나 고조파 성분의 존재는 전압 불평형율의 값과 크기를 변화시킨다. 또한 이들 값의 변화는 자속의 변화로 토크값에 영향을 주게 됨을 확인하였다.

3상 비선형 부하만 단독 운전할 경우 토크 값은 일정한 패턴으로 변하기 때문에 고조파 필터의 설치로 토크 값을 안정화시키는 것이 가능하지만, 단상 비선형 부하의 추가 운전시 5 고조파 필터로 저감이 어려운 차수의 고조파 존재로 인해 토크 맥동 회수는 감소하지만 리플값이 더욱 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서 안정적인 토크값의 보장과 고조파 성분의 저감을 위해서는 각상에 흐르는 전류값의 일정 및 비선형 부하에 의한 각 차수별 고조파 저감이 더욱 절실함을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 및 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김종겸, 박영진, 정종호, 이은용, “불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석” 대한전기학회 논문지(B), 제 53권, 6호, pp.372-379, 2004.6
- [2] 김종겸, 손홍관, 이은용, “선형 및 비선형 부하량에 따른 고조파 성분의 변화”, 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 8호, pp.441-448, 2002.8
- [3] 김종겸, 박영진, “3상 4선식 저압 수용가의 전압불평형율 측정 분석”, 한국조명전기설비학회 논문지, 제 18권, 6호, pp.91-99, 2004. 11
- [4] P. Pillay and M. Manyange, “Definitions of voltage unbalance”, IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [5] Juan A. Martinez, “Educational use of EMTP MODELS for the study of rotating machine transients”, IEEE Trans on PAS, vol.8, no. 4, pp.1392-1399, Nov 1993