

# 3상 4선식에서 비선형 부하의 운전시 유도전동기의 특성 해석

(Characteristics Analysis of Induction Motor by Operation of Non-linear Loads under the 3-phase 4-wire grid system)

김 종 경 · 박 영 진 · 이 은 웅

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Eun-Wong Lee)

## Abstract

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. Under the combination operation of single & three phase load, voltage unbalance will be generated and current unbalance will be more severe by the dropped voltage quality. 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. Motors may also overheat or become noisy and torque oscillation in the rotor can lead to mechanical resonance and vibration.

## 1. 서 론

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

우리나라 일반 저압 수용가에 공급되는 전압방식은 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 발생한다[4].

부하의 안정적인 운전을 위해서는 동력용 3상변압기와 단상 부하용 변압기를 별도로 구성하는 것이 바람직하지만, 3상 4선식 배전방식의 보편적인 사용으로 동력용과 전동 전열 부하용 변압기를 함께 사용하는 1뱅크 구성이 주류를 이루고 있다.

3상 4선식 설비에서 사용되는 부하 중에는 전동 전열과 같은 단상 및 3상 유도전동기와 같은 선형부하도 많지만 정류회로와 전동기 속도제어로 사용되는 인버터와 같은 비선형 부하도 있다. 이 중에서 비선형 부하는 운전 중에 발생하는 고조파 전류가 낮은 임피던스를 가진 부하 시스템에 나쁜 영향을 미치고 있다[1-3].

3상 4선식 방식에서 각상에 일정한 부하가 배분되도록 설계하지만 운전시 각상에 분담되는 전류값은 달라지고, 각상에 연결된 부하에서도 선형 및 비선형부하의 운전 패턴에 따라 부하 불평형율이 달라지므로 전압품질에 나쁜 영향을 미치고 있다. 전압 불평형시 나쁜 전기품질의 영향으로 기기의 손실이 증가할 수 있다.

본 논문에서는 3상 4선식 저압 수용가에서 비선형 부하장치인 단상 컨버터와 인버터의 사용시 전기품질의 변동으로 3상 유도전동기에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 시스템의 구성 및 토크 특성 해석

### 2.1 비선형 부하 운전시 전압불평형율과 고조파

배전시스템에서 많은 부하는 3상 및 단상부하의 결합으로 이루어져 있다. 혼용부하의 공급을 위해서는 비대칭 변압기뱅크 구성이 이루어지고 있다. 우리나라의 배전시스템은 저압 부하의 공급을 위해 Y-Y 결선의 접지방식을 이용하고 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 유도전동기와 3상 컨버터가 연결되어 있다. 3상 4선식에는 단상 부하도 연결되는데 특히 SMPS와 같은 단상 비선형 부하가 많이 사용되고 있다.

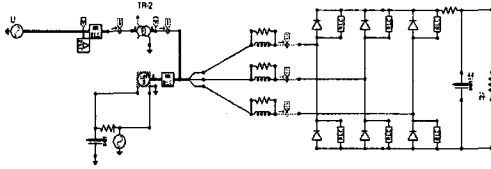


그림 1 선형 및 비선형 부하 혼합 구성 시스템

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

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

전압불평형에 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 전압불평형에 의한 영향의 진단이 필요하다.

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

전압 불평형률(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.

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

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 양호하여야 하지만, 사용되는 부하가 선형이 아닌 비선형 부하가 사용되는 경우가 매우 빈번하기 때문에 전압에는 품질변화가 존재한다. 이와 같은 전압에 고조파성분의 포함시 전압불평형율이 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].

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

여기서  $[i]$  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.

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

식 (6)에서 변환행렬  $[T]$ 은 식 (7)과 같다.

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

식 (7)에서 전기가  $\beta$ 는 극수에 의한 기계적인 변위를 나타낸 것으로서 식 (8)과 같고, 실제 회전자의 회전속도는  $\omega$ 이다.

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{p}{2} \beta_{mech} \\ \omega &= \frac{d\beta_{mech}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

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 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_d & 0 & 0 & 0 \\ M_d & L_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & M_q & 0 \\ 0 & 0 & M_q & L_Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} \quad (9)$$

3상 유도전동기는 비돌극기(non-salient pole)이므로 식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서  $a$ 와  $r$ 는 각자 고정자와 회전자를 의미한다.

따라서 유도전동기의 전압방정식은 식 (10) 같이  $d, q$  축으로 변환된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ 0 \\ v_q \\ 0 \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & & & & \\ & R_r & & & \\ & & R_a & & \\ & & & R_r & \\ & & & & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \\ i_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_D \\ \lambda_q \\ \lambda_Q \\ \lambda_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \lambda_q \\ 0 \\ \omega \lambda_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

따라서 유도전동기의 토크방정식은 식 (11)로 구해진다.

$$T_{em} = \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (11)$$

### 3. 시뮬레이션 및 결과 분석

3상 4선식 설비에서 비선형 부하의 사용에 따른 유도전동기의 특성변화를 확인하기 위해 유도전동기만을 운전한 경우와 비선형 부하를 추가하여 운전한 경우를 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 샘플 유도전동기 사양  
Table 1 Specification of sample induction motor

parameter	380[V],4p 60Hz
slip	3[%]
stator resistance, $r_s$	0.435[Ω]
rotor resistance, $r_r$	0.816[Ω]
stator leakage inductance, $L_{ls}$	0.002[H]
rotor leakage inductance, $L_{lr}$	0.002[H]
mutual inductance, $L_m$	0.0603[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.

그림 2는 선형부하 단독, 선형에 비선형 부하인 컨버터 사용 그리고 5고조파 필터의 부착시 전동기에 인가되는 한상의 전압파형을 나타낸 것이다.

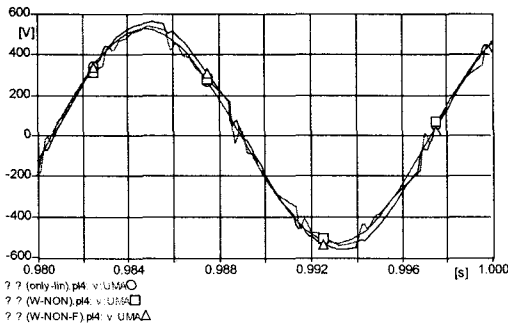


그림 2 a상 전압파형

그림 2에서 알 수 있듯이 비선형 부하 사용시 전압파형에서 약간의 왜형과 순간적인 dip가 발생함을 볼 수 있다.

그림 2와 같은 전압파형이 인가될 경우 1사이클 동안 전압 불평형율은 그림 3과 같다.

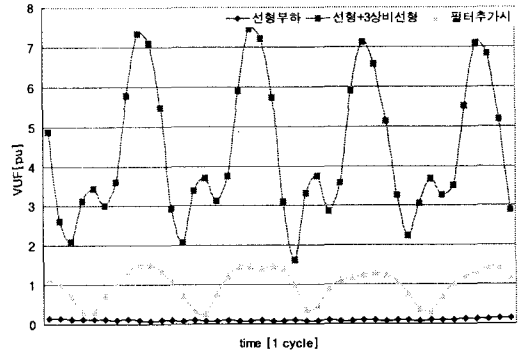


그림 3 전압 불평형율

그림 3에서와 같이 변압기 2차측에 선형부하인 유도전동기만을 운전할 경우 전압 불평형율(◇)은 거의 존재하지 않지만, 3상 비선형 부하의 사용시 전압 불평형율(□)은 최대 7[pu]만큼이나 높게 나타나고, 고조파 성분을 제거하기 위한 필터의 추가시 전압 불평형율(△)은 매우 낮아짐을 확인할 수 있다. 비선형부하 사용시 전압 불평형율은 일정하지 않은 리플형태를 나타낸다.

그림 4는 선형 및 비선형 부하의 사용 그리고 필터 추가시 유도전동기의 고정자 한상에 흐르는 전류값을 나타낸 것이다.

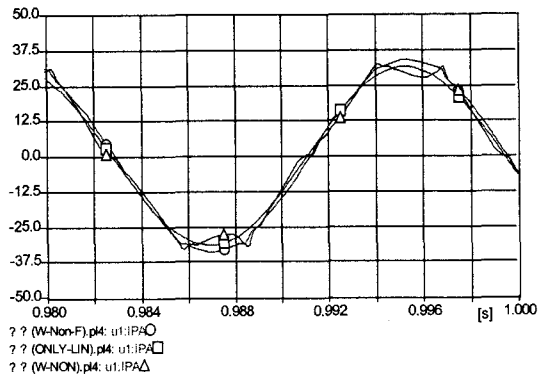


그림 4 고정자 한상의 전류

그림 4에서와 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 전류파형을 나타내며 고조파를 줄이기 위해 설치하는 5고조파 필터의 설치시에 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 5는 그림 4의 전류파형에 대한 고조파 스펙트럼 분석을 실시한 경우 결과이다.

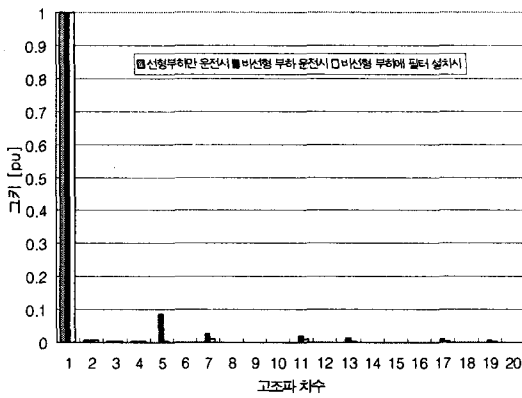
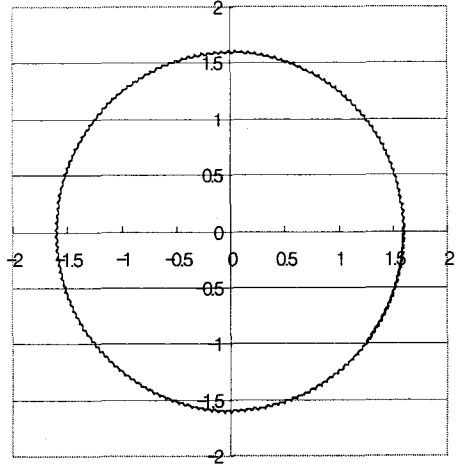


그림 5 전류 고조파 스펙트럼

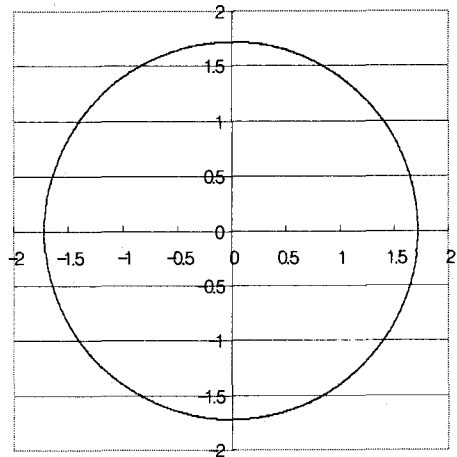
그림 5는 3상 4선식 전압공급 변압기 2차측에 선형 부하와 비선형 부하의 사용시 전류 고조파 스펙트럼을 분석한 결과이다. 선형부하만의 운전시 고조파는 존재하지 않지만, 3상 컨버터의 사용시  $6n \pm 1$  차수의 고조파가 존재하고, 5차 고조파 저감 필터의 사용시 대부분이 저감됨을 알 수 있다.

비선형부하의 사용으로 전압 및 전류파형이 왜형될 경우 유도전동기의 토크 특성에 변화가 발생된다. 토크는 전류 및 자속의 곱에 의한 경우 자속궤적에 대한 변화 해석이 필요하다.

그림 6은 그림 4와 같은 전류가 전동기에 인가될 경우의 전동기의 고정자에서의 d, q축 자속궤적변화를 나타낸 것이다.

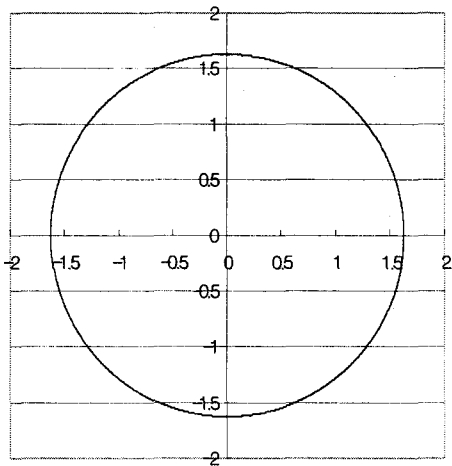


(b) 비선형 부하 추가시 자속궤적



(c) 필터 추가시 자속궤적

그림 6. 자속궤적



(a) 선형 부하운전시 자속궤적

그림 6(a)에서와 같이 선형부하 단독 운전시는 고조파 성분이 전혀 포함되어 있지 않기 때문에 깨끗한 원 형태 궤적을 그리지만, 그림 6(b)에서와 같이 비선형 부하의 추가 운전시는 궤적에서 약간의 리플성분을 포함되며, 고조파 저감을 위한 필터의 추가시 자속궤적은 그림 6(c)와 같이 리플이 거의 제거된 형태의 궤적을 나타낼 수 있다.

그림 7은 그림 4 및 6과 같은 조건에서의 전동기 토크 특성을 나타낸 것이다.

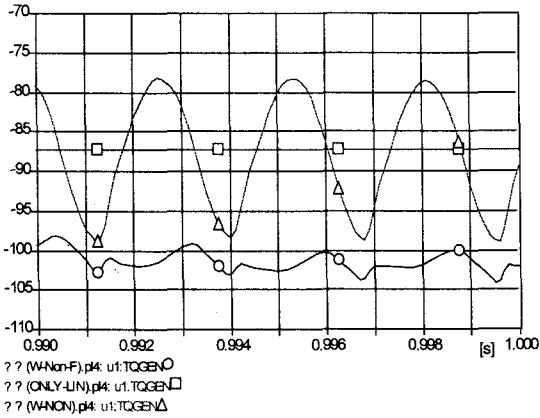


그림 7 선형 및 비선형 부하 운전시 토크(1)

그림 7에서 선형부하만을 운전한 경우 토크(□)는 3상 평형의 전압인가로 토크는 87[Nm]로 일정하지만, 비선형 부하를 사용한 경우 고조파의 영향으로 토크 맥동이 발생하게 된다. 이때 발생하는 토크(△)는 78~98[Nm]의 범위로 선형부하만을 사용한 경우에 비해 평균 토크값은 같지만 약 맥동성분은 대략  $\pm 10$ [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(○) 변화는 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서와 같이 고조파를 완전하게 저감하지는 맥동성분을 매우 감소시키며 출력 토크를 증가시키는 결과를 얻을 수 있다. 이는 그림 6에서와 같이 자속궤적의 둘레가 약간 증가하였기 때문이다. 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 8은 그림 4와 같은 조건에 단상 비선형 부하를 추가한 경우의 유도전동기에 인가되는 전압파형을 나타낸 것이다.

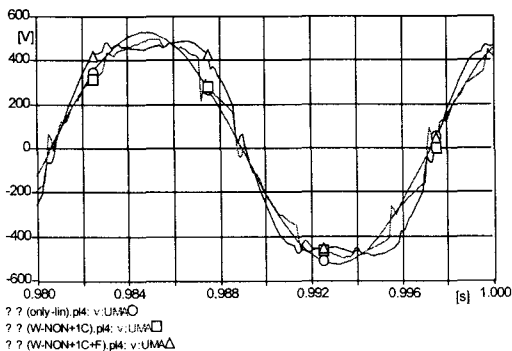


그림 8 전압파형

그림 8에서의 파형은 3상 비선형 부하 사용시에 비해 왜형의 정도가 높아진 것으로 이 전압파형에서의 전압 불평형율은 그림 9와 같다.

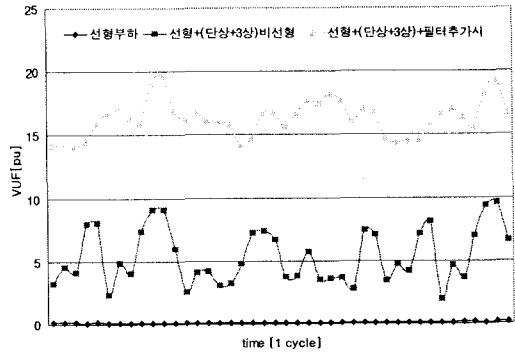


그림 9 전압 불평형률

그림 9는 3상 비선형 부하의 사용시 전압 불평형율을 해석한 그림 3에 비해 상당히 높은 값을 나타내는 이유는 3상 중 어느 한상에만 비선형 부하를 사용하였기 때문에 상당 임피던스의 변화로 인해 전압 불평형율의 크기 증가 때문이다.

그림 10은 3상 유도전동기를 운전할 때 단상 및 3상 비선형부하도 함께 사용하는 경우 5고조파 필터의 설치 전후 고정자 한상에 흐르는 전류파형을 나타낸 것이다.

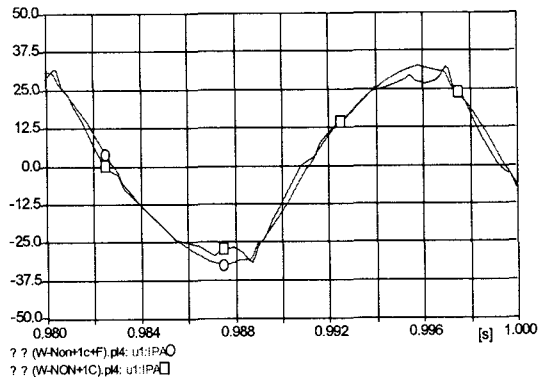


그림 10 고정자 한상의 전류

그림 10에서 5고조파 필터를 사용한 경우(○)가 사용하지 않은 경우(□)에 비해 왜형이 줄어들음을 알 수 있다. 그림 11은 그림 10과 같은 전류 파형의 고조파 스펙트럼 분석 결과이다.

그림 11에서와 같이 3상 부하 외 단상 비선형 부하의 추가시 홀수 조파의 성분이 발생한다. 비선형 부하의 성분 중에 가장 높은 차수를 차지하는 5고조파 저감 필터의 부착 후 고조파는 많은 성분이 저감되지만 그래도 3고조파 성분만은 높은 값을 가지고 있다. 이는 3상 4선식에서 중성선에 높은 고조파 전류성분이 존재함을 의미한다.

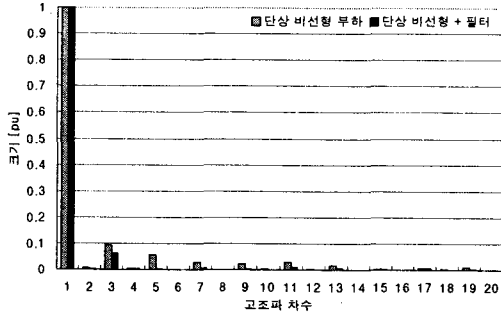
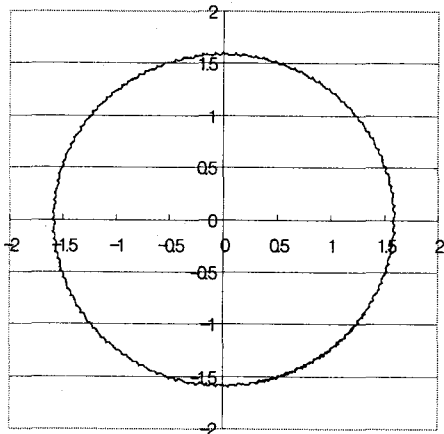
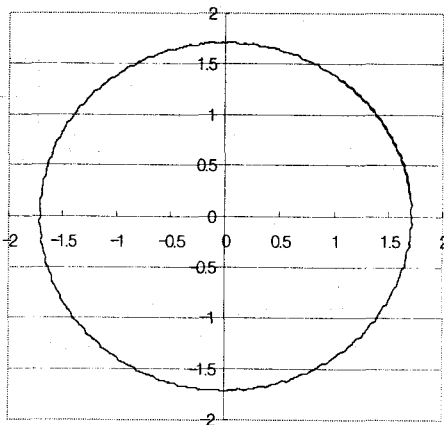


그림 11 전류 고조파 스펙트럼

그림 12는 그림 10의 전류파형에 대한 d, q축의 자속 궤적을 나타낸 것이다.



(a) 단상, 3상 비선형 부하 운전시 자속궤적



(b) 5고조파 필터 설치후의 자속궤적

그림 12. 자속궤적

그림 12(a)의 자속궤적에서 알 수 있듯이 선형부하에 단상 및 3상 비선형 부하 사용시 자속궤적에는 높은 리플성분이 존재하고 그림 12(b)에서와 같이 필터의 추가

시 궤적의 돌레가 약간 커짐에 확인할 수 있다.

그림 13은 그림 10 및 12와 같은 결과에서의 토크 곡선을 나타낸 것이다.

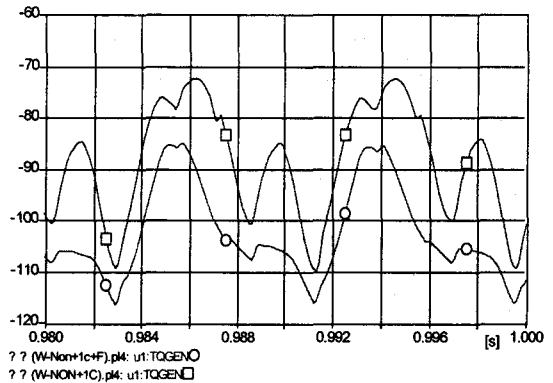


그림 13 선형 및 비선형 부하 운전시 토크(2)

필터 부착전(□)에 토크값은 72~109[Nm]값이지만, 5고조파 저감 필터의 부착시(○)에는 85~116[Nm]의 값을 약간 증가하고 있음을 알 수 있다.

비선형 부하의 사용으로 발생하는 고조파의 영향으로 정상적인 운전시 발생하는 토크 맥동성분의 존재는 진동에 의한 소음증가와 베어링 마모의 원인을 제공할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 및 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] 김종겸, 박영진, 정중호, 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 전압불평형을 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