

선형 및 비선형 부하 혼합 운전시 유도전동기의 동작 분석

김종겸^{*}, 박영진^{*}, 이동주^{**}, 김준호^{**}, 이종한^{**}, 정종호^{**}, 이은웅^{**}
 원주대학^{*}, 충남대학^{**}

Operation Analysis of Induction Motor under the Combination of Linear & Non-linear Loads

Kim Jong-Gyeum, Park Young-Jeen, Lee Dong-Ju, Kim Jun-Ho, Lee Jong-Han, Jeong Jong-Ho, Lee Eun-Woong
 Won Ju National College^{*}, Chung Nam National Univ^{**}

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

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.

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 단상 부하 중에는 전동 전열 그리고 3상 유도전동기와 같은 선형부하도 많지만 정류회로와 전동기 속도제어로 사용되는 인버터와 같은 비선형 부하도 있는데 이들 비선형 부하는 운전중에 발생하는 고조파 전류가 낮은 임피던스를 가진 부하 시스템에 나쁜 영향을 미치고 있다[1,2].

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 부하 장치인 단상 컨버터와 인버터의 사용시 전기품질의 변동으로 3상 유도전동기에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 시스템의 구성 및 토크 특성 해석

2.1 비선형 부하 운전시 고조파

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 Δ 결선, 2차측은 Y결선으로 선간에는 3상 유도전동기와 3상 컨버터가 연결되어 있다. 3상 4선식에는 단상 부하도 연결되는데 특히 SMPS와 같은 단상 비선형 부하가 많이 사용되고 있다.

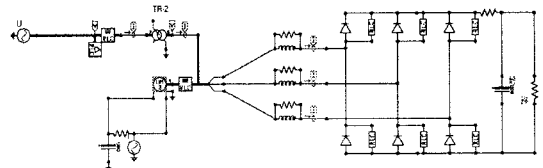


그림 1. 선형 및 비선형 부하 혼합 구성 시스템

그림 1의 오른쪽 부분은 비선형 부하인 3상 컨버터로서 이로부터 발생하는 고조파는 식 Ⅲ과 같이 기본파의 고조파 성분이 발생하게 된다. 발생된 고조파 중에서 5고조파가 매우 높게 나타나는 것은 3상 전과정류회로를 사용하기 때문이다. 그러나 단상 SMPS와 같은 전력변환장치의 사용시 고조파는 3상 전과회로와 달리 홀수조파가 많이 나타난다.

$$I = I_1 + \sum_{h=2}^n I_h \quad \text{Ⅲ}$$

회로우리나라 배전용 변압기의 결선은 Y-Y방식을 채택하고 있다. 이 방식은 단상 및 3상 부하에 동시에 전원을 공급할 수 있는 장점도 있지만 각 상에 걸리는 부하가 불평형일 경우 변압기 단자에 심한 전압불평형을 발생할 수 있다.

배전시스템에서 많은 부하는 3상 및 단상부하의 결합으

로 이루어져 있다. 혼용부하의 공급을 위해서는 비대칭 변압기 뱅크 구성이 이루어지고 있다. 우리나라의 배전 시스템은 저압부하의 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.

2.2 유도전동기 토크

그림 1은 단상 및 3상 부하에 전원을 공급할 수 있는 3상 4선식 전원공급 시스템의 구성도로서 전원측은 항상 일정한 전원을 공급할 수 있도록 정전압 공급장치를 이용하였고, 부하측은 단상부하는 각 상과 중성선에 각각 연결하였으며, 3상 전원도 부착하였다.

유도전동기의 토크방정식은 식 (2)로 구해진다.

$$\begin{aligned}
 T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} [\omega(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r)(\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr})] \\
 &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\
 &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qr} i_{qs} - i_{dr} i_{ds})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

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 비선형 부하의 사용시 선형부하 측에 미치는 고조파의 특성도 함께 분석하였다. 사용되는 비선형 부하는 3상 부하 단독 또는 단상 부하와 혼합시 나타나는 영향을 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 ²]
Friction coefficient, B	0.0089[Nm·s]

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

그림 2는 선형 및 비선형 부하의 사용시 유도전동기의 고정자 한상에 흐르는 전류값을 나타낸 것이다.

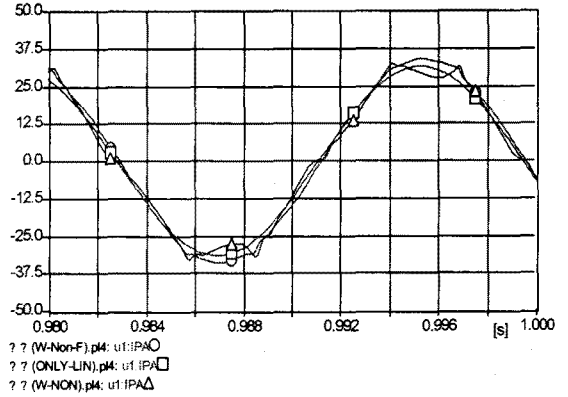


그림 2. 고정자 한상의 전류

그림 2에서와 같이 3상 4선식 전원공급 변압기의 2차측에 선형부하인 유도전동기만을 사용할 경우 고정자에 흐르는 전류값(Δ)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 3은 그림 2의 전류파형에 대한 고조파 스펙트럼 분석을 실시한 경우 결과이다.

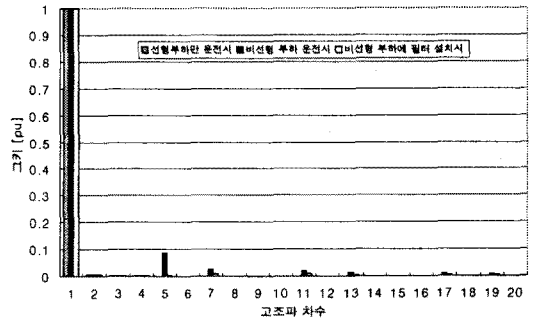


그림 3. 전류 고조파 스펙트럼

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

그림 4는 그림 2 및 3과 같은 상태에서의 전동기 토크 특성을 나타낸 것이다.

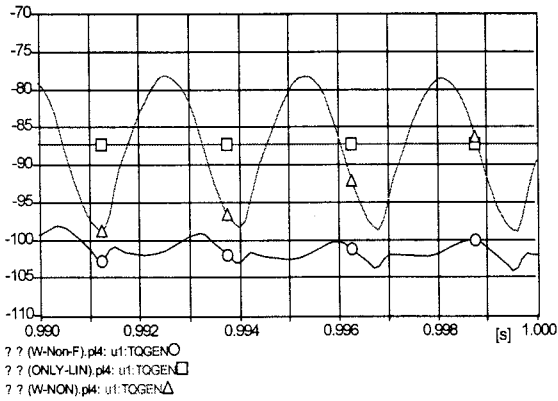


그림 4. 선형 및 비선형 부하 운전시 토크(1)

그림 4에서 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(Δ)는 78~98[Nm]의 범위로 선형부하만을 사용한 경우에 비해 평균 토크값은 같지만 약 맥동성분은 대략 ±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 4에 나타내었다. 그림 3에서와 같이 고조파를 완전하게 저감하지는 맥동성분을 매우 감소시키며 출력 토크를 증가시키는 결과를 얻을 수 있다.

3상 4선식에서는 3상 부하 외 단상부하가 운전되는 경우가 높은 편이다. 이 단상부하에는 SMPS와 같은 비선형부하가 많은 편이다. 이와 같은 조건을 대상으로 유도전동기에 나타나는 현상을 분석하였다. 그림 5는 3상 유도전동기를 운전할 때 단상 및 3상 비선형부하도 함께 사용하는 경우 5고조파 필터의 설치전후 고정자 한상에 흐르는 전류파형을 나타낸 것이다.

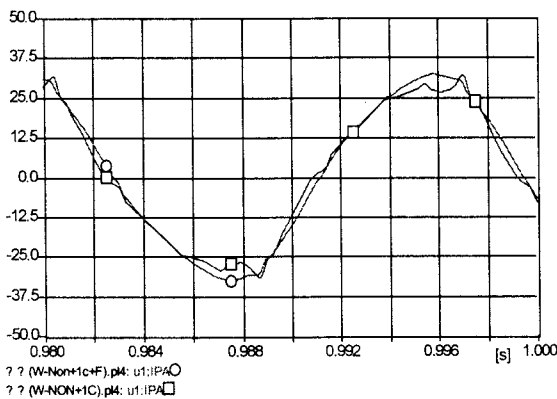


그림 5. 고정자 한상의 전류

그림 5에서 5고조파 필터를 사용한 경우가 왜형이 줄어들

어음을 알 수 있다. 그림 6은 그림 5 파형의 고조파 스펙트럼 분석결과이다.

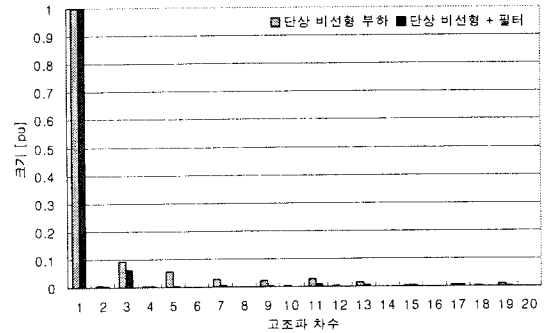


그림 6. 전류 고조파 스펙트럼

그림 6에서와 같이 3상부하 외 단상 비선형 부하의 추가시 홀수 조파의 성분이 발생한다. 비선형 부하의 성분 중에 가장 높은 차수를 차지하는 5고조파 저감 필터의 부착후 고조파는 많은 성분이 저감되지만 그래도 3고조파 성분만은 높은 값을 가지고 있다. 이는 3상 4선식에서 중성선에 높은 고조파 전류성분이 존재함을 의미한다. 그림 7은 그림 5 및 6과 같은 결과에서의 토크 곡선을 나타낸 것이다.

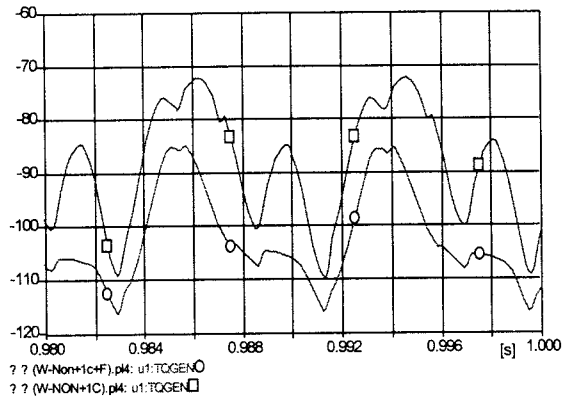


그림 7. 선형 및 비선형 부하 운전시 토크(2)

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.

[참 고 문 헌]

- [1] 김중겸, 이은웅, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, p. 285-291, 2002.6
- [2] 김중겸 외 3인, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지(B), 제 53권, 제 6호, pp.372-379, 2004. 6