

고조파 성분이 포함된 전원에 의한 유도전동기의 동작특성 해석

김종겸*, 박영진*, 이은웅**, 이종한**, 이동주**
원주대학*, 충남대학**

Analysis on the Operation Characteristics of Induction Motor Operated by Voltage with Harmonics Components

Kim Jong-Gyeum, Park Young-Jeen, Lee Eun-Woong, Jong-Han Lee, Dong-Ju Lee
Wonju National College, Chungnam Univ

Abstract - 전원을 공급받아 동작하는 전기기기는 안정된 품질의 전원이 필수적이지만, 실제 부하에 인가되는 전압품질은 이상적인 성질이 아닌 약간의 왜형된 파형을 가지고 있다. 특히 단상과 3상을 함께 이용하는 3상 4선식 설비의 경우 부하 임피던스에 의해 전압의 크기가 변동하는 경우가 있으며, 또한 선형 및 비선형 부하를 함께 사용하는 경우에 전압품질의 변화가 높은 편이다. 이와 같은 조건하에서 가장 많은 에너지를 이용하는 유도전동기가 고조파 성분이 포함된 전압불평형조건에서 어떤 동작특성을 나타내는가를 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

평형 배분과 운전 및 불평형된 3상 부하 임피던스 연결 때문이다. 또한 평형된 3상 부하라도 불평형 전원에 연결되면 유입 전류는 불평형이 된다. 따라서 3상의 각상에 서로 다른 전압강하로 전압불평형이 발생한다.

전압불평형은 대칭좌표법에 의해 구하거나 도식적으로 나타낼 수 있다. 그러나 현장에서 측정할 경우 대개 실효값으로 나타내지므로 간단하게 간략화한 방법도 사용하고 있다[4].

전압불평형율은 식 1과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2) 또는 영상분(V_0)의 비율로서 정의하고 있다. 역상분 전압은 대개 회로내 흐르는 불평형된 부하의 역상분 전류에 의해 주로 발생한다. 영상분을 전압불평형율 산정에 고려할 경우에는 반드시 3상이 대칭이어야 한다.

1. 서 론

우리나라 저압 배전시스템에 채택되고 있는 3상 4선식 배전방식은 간선 및 분기선에 단상과 3상, 선형 및 비선형 부하를 평형에 가깝게 배분하여 설계한 다음 운영하고 있지만, 부하의 설비 증설 또는 각 상의 부하분담이 다르거나 운전상황에 따라 부하 전류가 달라질 경우 임피던스 값의 변화로 각 상전압의 변화가 발생하게 된다. 또한 전기에너지를 효율적으로 사용하기 위해 이용되고 있는 전력변환장치인 비선형 부하의 경우에도 약간의 전압 불평형은 큰 전류 불평형을 일으키고 고조파의 발생으로 기기손실이 증가와 출력 감소를 발생하는 경우가 많다[1-7].

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_0}{V_1} \text{ (3상 대칭시만 적용 가능)} \quad (1)$$

일정기간동안의 전압불평형율을 찾아내기 위해서는 각 상의 선간전압의 크기만으로 계산이 가능한 식 2와 같은 관계식을 이용한다. 식 2는 각 상의 선간전압만 알 경우 전압불평형율을 쉽게 구할 수 있으므로 가장 널리 이용하고 있다[1,2,4].

전압불평형율의 변화는 전압의 크기와 위상각에 따라 많은 차이를 발생하는데 전압 크기는 부하전류의 크기에 의해 많은 영향을 받고, 위상각은 부하 임피던스에 크게 좌우된다.

$$VUF = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\gamma}}{1+\sqrt{3-6\gamma}}} \quad (2)$$

전압불평형은 사용하는 부하의 종류와 운전특성에 큰 영향을 받는데 실제 부하의 운전 중에는 항상 일정한 것이 아니라 변동하는 성질을 가지고 있다. 부하에 공급되는 전압의 크기가 일정하지 않을 경우 기기의 동작에는 많은 변화가 발생할 수 있다. 특히 유도전동기의 경우 인가되는 전압의 변화로 토크 맥동이 발생할 경우 소음 증가는 물론 부하의 특성을 변화시킬 수 있다[7].

식 3에서 γ 는 다음과 같다.

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

우리나라에서 주로 사용하고 있는 3상 4선식 시스템에서의 전압불평형율의 변화시에 유도전동기의 토크 특성이 어떻게 변화하는가를 실제 현장에서 측정된 전압파형 데이터를 이용하여 유도전동기에 인가할 경우 발생하는 변화를 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

식 4은 측정된 전압값을 대칭좌표법에 의한 해석이 필요하지만 식 3의 경우 측정된 값을 현장에서 바로 결과를 알 수 있기 때문에 편리하며, 식 5과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서도 측정된 결과의 분석에는 식 4와 같은 방법으로 진행하였다.

2. 전압불평형율

2.1 전압불평형율 계산

그림 1은 3상 4선식 설비에서 현장한 선간 전압과형을 나타낸 것이고, 표 1은 이 값을 이용하여 상전압의 크기와 위상각을 구한 것이다. 계산의 편의를 위해 기본파와 기수차의 일부값만을 시뮬레이션의 자료로 활용하였다.

전압불평형의 발생원인은 3상 전원에서 단상부하의 불

3. 동작 특성 분석

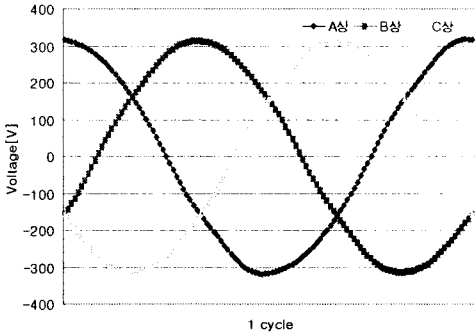


그림 1 기수와 전압에 의한 파형

표 1 전압의 크기와 위상각

Table 1 Magnitude and phase-angle of voltage

차수	U1상		U2상		U3상	
	크기	위상(°)	크기	위상(°)	크기	위상(°)
1	223.39	0	221.85	-119.0	220.48	120.37
2	0.03	100.84	0.06	121.19	0.09	92.95
3	0.53	89.60	0.86	131.10	0.62	91.98
4	0.05	-30.69	0.02	-65.93	0.03	-136.9
5	3.10	50.25	2.36	154.64	3.11	-77.88
6	0.04	-39.55	0.03	-125.9	0.05	64.79
7	1.95	137.10	1.78	82.39	2.23	-56.51

그림 2는 표 1의 전압데이터를 식 ⑩를 사용하여 분석한 전압불평형율의 변동을 나타낸 것이다. 전압불평형율은 약 0.8~1.8%의 범위내로 일정한 값이 아닌 주기적인 변화값을 나타내고 있다.

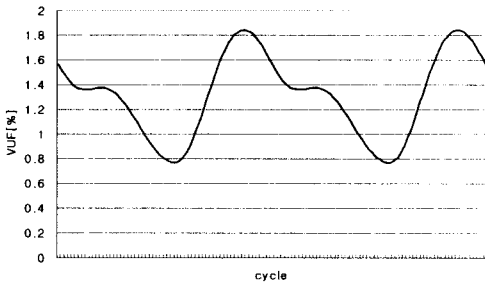


그림 2 전압불평형율

표 2는 그림 2와 같은 변동하는 전압불평형율에 대한 유도전동기의 동작특성 해석에 적용되는 파라미터를 나타낸 것이다.

표 2 샘플 유도전동기 사양

Table 2 Specification of sample induction motor

parameter	220[V], 4p, 3HP 60Hz
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 ⁻²]

유도전동기에 공급되는 전압의 이상적인 크기와 대칭 성분의 위상각을 가진 것이 필요하지만 실제로는 약간의 고조파 성분이 포함된 불평형된 전압이 인가되는 경우가 많다. 따라서 이와 같은 조건하에서 발생할 수 있는 유도전동기의 동작변화를 확인할 필요가 있다.

그림 3은 고조파 성분이 전혀 포함되지 않는 이상적인 전압이 인가된 것(○)과 표 1과 같은 조건의 전압이 유도전동기에 인가된 경우(□) 고정자 a상 전류파형을 나타낸 것이다. 이상적인 전압의 경우에 대한 전류파형은 고조파 성분이 포함되지 않은 깨끗한 형상을 하고 있지만, 불평형 전압이 인가된 경우에는 왜곡된 형태를 지니고 있다.

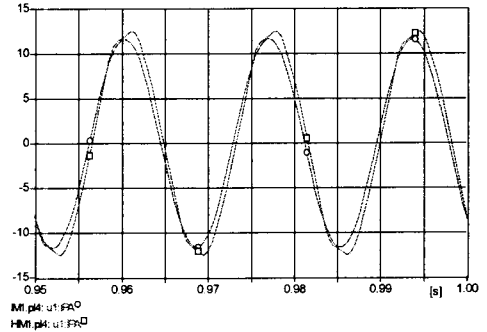
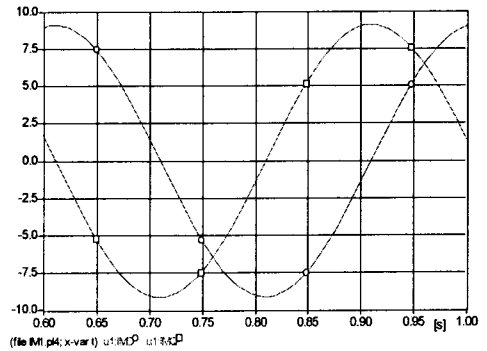
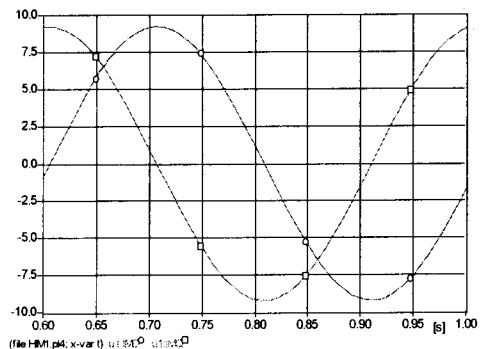


그림 3 고정자 전류



(a) 평형시 d, q축 전류

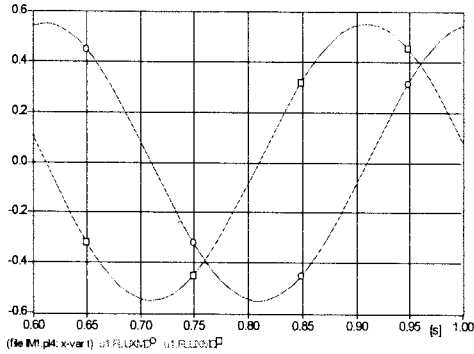


불평형시 d, q축 전류

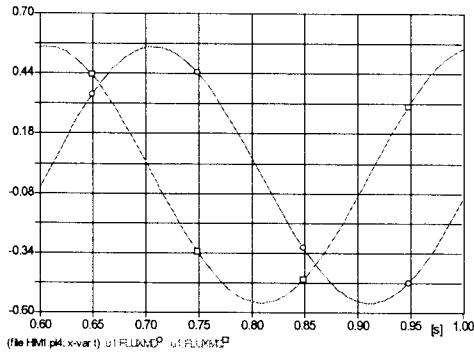
그림 4 d, q축 전류

그림 4는 평형 및 불평형 정상운전시의 d, q축 전류곡선을 나타낸 것이다. 평형시에 비해 불평형시 약간의 파형왜곡이 나타난다.

그림 5도 역시 평형 및 불평형 운전시의 d, q축 자속 변화곡선을 나타낸 것이다. 마찬가지로 불평형시 약간의 고조파가 포함되어 있음을 알 수 있다.



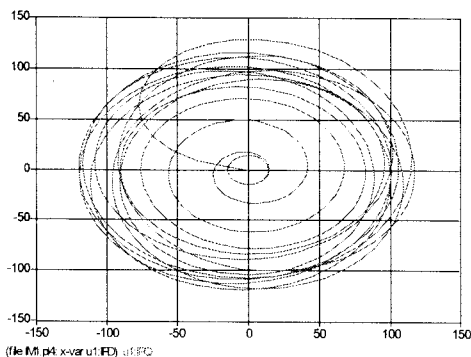
평형시 d, q축 자속



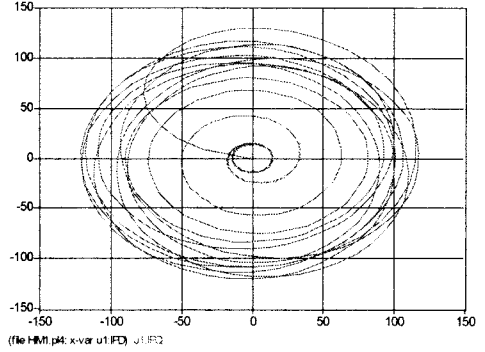
불평형시 d, q축 자속

그림 5 d, q축 자속

그림 6은 평형 및 불평형 운전시의 d, q축 전류궤적을 나타낸 것으로서 토크 특성의 변화를 알 수 있다. 그림에서 동작의 시작점은 원의 중앙점에서 시작하여 시계방향으로 동작하여 마지막점인 정상운전 상태에서는 다시 원의 중앙으로 일정한 궤적을 그리게 된다.



고조파 성분 제외한 평형조건



고조파 성분 포함한 조건

그림 6 평형 및 불평형시 d, q축 전류궤적

그림 6는 평형 및 불평형 조건하에서의 자속분포를 나타낸 것이다. 그림 6a에서와 같이 기동에서 정상속도까지의 변화는 맥동성분이 없는 매우 일정한 형태의 변화를 나타내지만, 그림 6b는 기동시에는 그림 6a와 큰 차이가 없지만 정상속도 부근(그림 중앙부분)에서는 리플 성분이 존재함을 알 수 있다.

유도전동기의 토크는 그림 4와 같은 d, q축 성분전류와 그림 5의 자속성분을 이용할 경우 구할 수 있다.

그림 7은 고조파 성분이 포함되지 않은 기본과 성분의 전압(IM1)과 표 1과 같은 전압불평형(HIM1)이 인가된 경우 기동상태에서 정상적인 속도에 이를 때까지의 토크 특성변화를 나타낸 것이다. 정상적인 속도에 도달한 경우 약간의 맥동성분이 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.

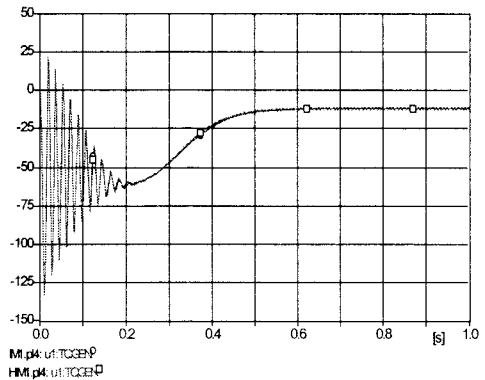


그림 7 토크 특성

그림 8은 그림 7의 정상시 운전에 대한 토크 변화를 확대한 것이다. 고조파 성분이 포함되지 않은 일정한 전압의 크기를 가진 경우(IM1)의 토크는 일정하지만, 약간의 고조파 성분이 포함된 경우(HIM1)에는 토크 맥동이 매우 많아짐을 알 수 있다. 이와 같은 맥동토크는 소음 증가는 물론 기기 가공시에 상당한 손실을 발생시킬 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Pillay and M. Manayange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [2] 김종겸, 박영진, 이은웅, "3상 4선식 수용가의 전압불평형율 측정 분석", 한국조명·전기설비학회 춘계학술대회, pp.43-47, 2004. 5
- [3] 김종겸, 이은웅, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [4] 김종겸, 박영진, 이은웅, "3상 4선식 부하설비의 전압 불평형율 허용기준(안)제정" 중간보고서 2004. 9
- [5] 김종겸, 박영진, 이은웅, "전압불평형율의 비교분석", 대한전기학회 전기설비전문위원회 발표논문, 2004. 11
- [6] 김종겸, 박영진, 이은웅, "고조파 성분이 포함된 전압 불평형 운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지(P), 제54권, 3호, pp. 134-139, 2005, 09
- [7] 김종겸, 박영진, 정종호, 이은웅, "불평형 전압운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지 (B), 제53권, 6호, pp. 372-379, 2004, 06

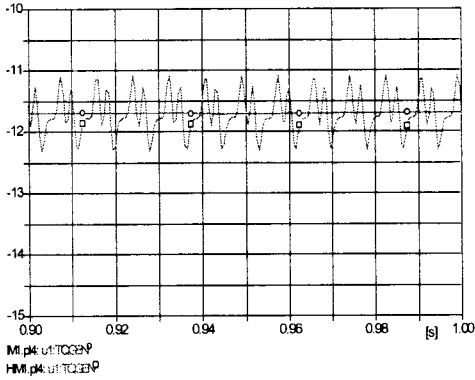


그림 8 정상상태에서의 토크

그림 9는 두 가지 운전조건하에서의 각속도 변화를 나타낸 것이다. 고조파 성분이 포함된 불평형 전압운전에 정상운전에 도달하는 각속도의 크기가 약간 빠르게 상승함을 알 수 있다.

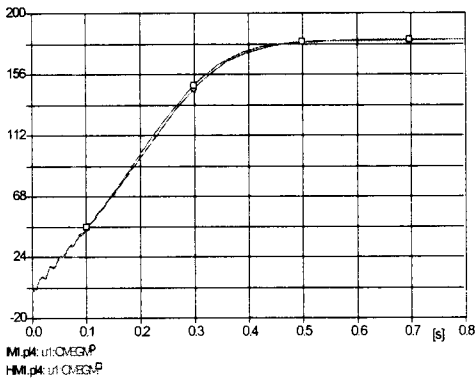


그림 9 각속도 변화

3. 결 론

전압불평형율의 일정한 값이 아닌 주기적인 변화를 지니고 있기 때문에 이와 같은 조건하에서 전압불평형율의 변화에 따른 유도전동기의 토크 특성을 해석하였다. 해석결과 고조파 성분이 포함된 경우 유도전동기의 토크는 맥동하는 성질을 가졌기 때문에 정밀한 가공을 위한 설비에는 일정한 전압을 부하에 공급할 필요가 있음을 확인하였다.

감사의 글

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