

비대칭 전압 불평형에 의한 유도전동기의 동작특성 해석

김중겸, 박영진, 이은웅, 김일중, 손홍관, 정종호, 이동주  
 원주대학, 원주대학, 충남대학, 주성대학, 전기연구원, 경기기계공고, ETI

Analysis for Operation Characteristics of Induction Motor at Asymmetric Voltage Unbalance

Jong-Gyeum Kim, Young-Jin Park, Eun-Woong Lee, Il-Jung Kim, Hong-Kwan Sohn, Jong-Ho Jeong, Dong-Ju Lee

Abstract - Voltage unbalance is generated by the load and impedance mismatching at the 3-phase 4-wire system of customer load. Voltage unbalance factor can be changed by the voltage amplitude or phase angle, and both. A small voltage unbalance is connected to high current unbalance. If the voltage unbalance is generated at the joint system of 1-phase and 3-phase load, Induction motor due to the current unbalance increase is generated loss, noise and torque ripple. In order to analyze the effect by voltage unbalance, it is necessary to the consideration of amplitude and phase angle. In this paper, We analyzed the effects that induction motor is affected by asymmetric voltage unbalance

$$V_1 = \frac{V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}}{3} \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2V_{bc} + aV_{ca}}{3}$$

여기서  $a = e^{j120deg}$  이다.

식 (2)는 3상 위상차가 일정한 경우에 적용 가능하지만 실제 현장에서 측정할 경우 시스템에 따라 정확한 120° 위상차를 나타내지 않으므로 기기의 영향을 분석하기 위해서는 3상 비대칭을 고려한 전압불평형을 해석이 필요하다. 그림 1은 3상 4선식의 전압-전류 벡터를 나타낸 것으로서 전압부하이므로 거의 동상이지만 2상 비대칭을 나타낸다.

1. 서 론

전력품질에 대한 관심의 증가는 전압에 대해 발생하는 문제로부터 기기의 안정적인 운전특성을 요구하고 있다. 그러나 부하의 효율적인 사용을 위해 적용하고 있는 비선형부하인 전력전자기기나 전동기의 경우 약간의 전압 변동에도 큰 영향을 받을 수 있다. 전력품질에 관련된 현상중 새그나 스웰 등과 같은 일시적인 전압변동현상과는 달리 운전중에 지속적으로 발생하는 고조파나 전압불평형은 부하기에 스트레스로 작용하여 손실증가, 출력저하 등과 같은 부작용을 낳을 수 있다[1-5].

최근 동력 및 전동-전열을 동시에 사용할 수 있는 저압 3상 4선식 배전방식의 경우 부하의 운전패턴에 따라 전압불평형이 발생한다. 약간의 전압불평형은 높은 전류불평형을 발생할 수 있으며, 특히 비선형부하의 경우에는 받는 영향이 매우 크다. 안정적인 토크 및 출력을 요구하는 유도전동기의 경우 전압불평형에 의한 영향이 매우 높는데 전압은 공급되는 전압은 크기와 위상각에 따라 다르게 나타나는데 본 연구에서는 비대칭 전압불평형에 의한 영향을 해석하고자 한다.

2. 전압 불평형의 발생 및 영향

2.1 전압불평형의 정의 및 발생원인

전압불평형은 전력공급 시스템이나 부하분배가 일정하지 않을 경우 발생할 수 있다. 이 전압불평형은 부하형 태나 3상 전원을 사용하는 수용가와 관련이 있다[1].

전압불평형에 의한 영향을 해석하기 위한 식은 다음과 같다. 식 (1)은 정상분( $V_1$ )에 대해 역상분( $V_2$ )의 비율로서 정의하는 전압 불평형율(VUF)이다.

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100(\%) \quad (1)$$

3상 불평형 선간전압  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$ 를 식 (2)와 같이 정상분  $V_1$ 과 역상분  $V_2$ 의 대칭성분으로 변환하면 불평형 조건하에서 유도전동기의 동작을 해석할 때 편리하다.

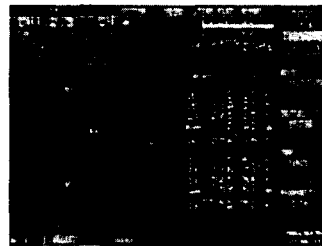


그림 1 전압전류 벡터도  
 Fig 1. Voltage & Current Vector Diagram

그림 2는 3상 비대칭 불평형 전압 시스템의 벡터도를 나타낸 것이다. 그림 2에서 선간전압의 크기가 다를 경우 각  $\alpha$  및  $\beta$ 는 정확하게 60°를 유지하지 않으므로 기준축(REF)에 대한 벡터의 분해시 그림 2의 오른쪽과 같이 120° 위상차를 가지지 않는다.

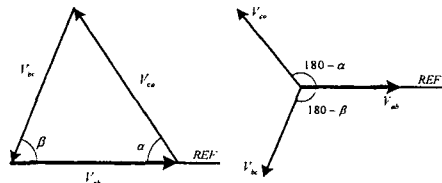


그림2 불평형 3상 시스템  
 Fig 2. Unbalanced 3-phase system

그림 2의 경우 정상분 및 역상분은 식 (3)과 같다.

$$V_1 = \frac{1}{3} \{ V_{ab} \angle 0^\circ + V_{bc} \angle (-60^\circ + \beta) + V_{ca} \angle (60^\circ - \alpha) \}$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \{ V_{ab} \angle 0^\circ + V_{bc} \angle (60^\circ + \beta) + V_{ca} \angle -(60^\circ + \alpha) \} \quad (3)$$

식 (2)에서의와 같이 각 선간전압은 크기만 다를 경우 불평형을 구하기가 쉽지만 위상이 비대칭일 경우 정확한

불평형을 구하기가 어렵고 또한 식 (3)과 같이 선간전압의 크기에 따라 위상각을 분리하는 것이 쉽지 않다. 따라서 현장 측정시 선간 전압크기만을 고려해도 정확한 전압불평형을 구할 수 있는 식 (4)와 같은 방법을 사용한다.

$$LVUR_{BC} = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \times 100[\%] \quad (4)$$

식 (4)에서  $\beta$ 는 식 (5)로 계산한 것이다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (5)$$

## 2.2 전압불평형의 영향

전압불평형이 존재할 경우 역상분의 비율증가로 유도전동기의 경우 역방향 토크의 존재로 출력이 저감되므로, 원하는 출력값을 확보하기 위해서는 전동기의 용량을 증가시켜야 하고, 비선형 부하기의 경우 고조파성분이 증가하므로 손실증가와 함께 고조파에 대한 별도의 대책을 수립해야 한다. 또한 약간의 전압불평형에서도 높은 전류불평형을 낳을 수 있으므로 과열에 의한 부작용도 초래할 수 있다.

## 3. 특성해석 및 결과분석

최근 수용가의 3상 4선식 380/220[V] 저압 배전 시스템의 구성과 비선형 부하의 사용증가는 전압불평형을 높이고 있다. 전압불평형의 증가시 유도전동기가 받는 영향의 해석은 안정적인 동작으로 제품생산이나 손실감소를 위해 매우 중요하다.

해석에 이용된 프로그램은 과도해석 전용 프로그램인 EMTF를 이용하였으며, 비대칭 전압불평형에 의한 특성 해석에 사용한 유도전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 샘플 유도전동기 사양

Table 1 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 <sup>2</sup> ]
Friction coefficient, $B$	0.0089[Nm·%]

전압 불평형의 비율은 각 상전압의 크기와 위상각에 따라 달라지지만 해석은 평형(balanced)의 경우와 불평형을 1, 2, 3[%]의 크기에 따라 모의하였다.

3상 전압조건에 따른 유도전동기의 전압, 전류, 각속도 및 토크의 동작특성은 그림 3과 같다. 해석에 사용된 전압불평형율은 표 2와 같이 전압의 크기를 일정하게 하고 위상각에 따라 2상 비대칭 전압불평형을 계산하였다.

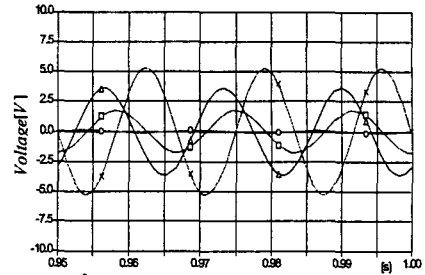
표 2 전압 위상각에 따른 불평형율의 비교

Table 2 Comparison of unbalance ratio due to voltage phase angle displacement

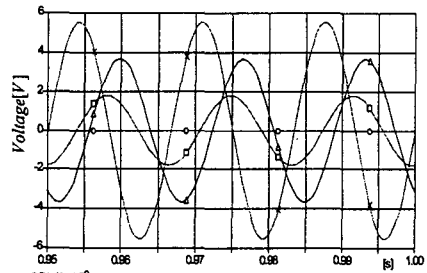
구분	$V_a$	$V_b$	$V_c$	VUF[%]
Balanced	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	0
2ph-asym1	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 241.78°	127.0 ∠ 121.648°	1
2ph-asym2	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 241.78°	127.0 ∠ 124.0°	2
2ph-asym3	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 243.2°	127.0 ∠ 117.16°	3

전압 불평형율의 크기에 따라 역상분, 영상분이 차지하는 부분을 알기위해 역상분 및 영상분의 전압 전류변화

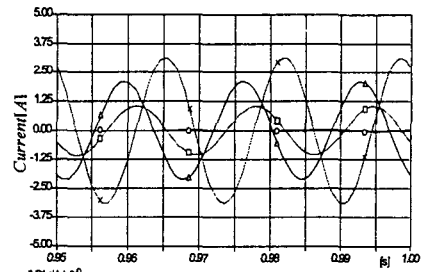
와 나타내었으며, 역상분에 의한 각속도의 변화와 토크의 크기도 모의 하였다. 또한 전압조정기를 이용하여 전압불평형에 따른 토크의 크기변화를 3마력 유도전동기를 이용하여 측정하였다.



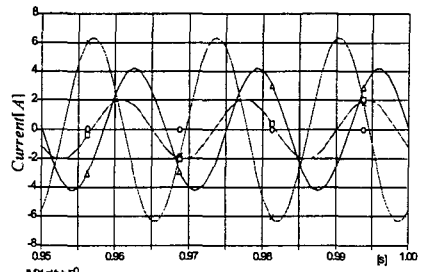
(a) 역상분 전압



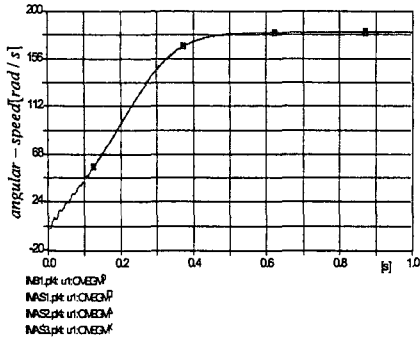
(b) 영상분 전압



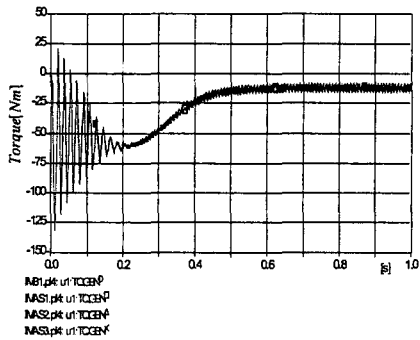
(c) 역상분 전류



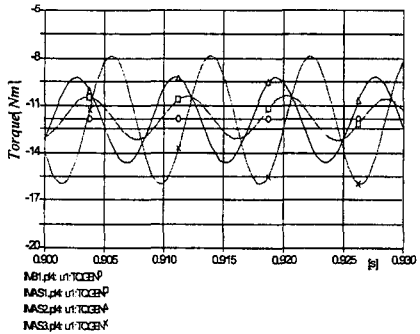
(d) 영상분 전류



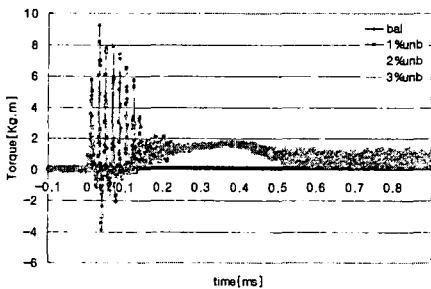
(e) 각속도



(f) 토크



(g) 토크 확대도



(h) 측정 토크곡선

그림 3. 비대칭 전압 불평형에 따른 특성곡선  
Fig 3. Characteristic curve by asymmetric voltage unbalance

비대칭 전압불평형에 의한 영향을 확인하기 위해 불평형율의 범위는 현장 측정에서 일반적으로 나타날 수 있는 3% 범위 이내로 제한하였다.

그림 3의 (a)-(d)에서 알 수 있듯이 3상 평형된 전압이 전동기에 인가될 경우 역상분 및 영상분 전압이나 전류를 존재하지 않는다. 그러나 전압 불평형이 존재하여 그 비율이 증가함에 따라 역상분이나 영상분의 크기는 높아진다. 그림 3(e)의 각속도의 변화에서 전압불평형에 따른 변화를 나타내지 않지만 약간의 맥동성분은 존재한다.

그림 3에서 토크값이 마이너스로 나타낸 것은 프로그램에서 발전기는 정(+), 토크는 부(-)로 나타내기 때문이다. 그림 3(f)에서와 같이 비대칭 전압불평형율에 따른 토크 특성곡선의 변화에서 기동시에는 거의 변화가 없지만 정격속도 이후에서는 맥동성분이 점차 증가함을 알 수 있다. 같은 정격을 측정된 그림 3(h)에서도 동일한 결과를 확인할 수 있다. 정격속도에 도달한 이후 토크의 변화를 나타낸 그림 3(g)에서와 같이 불평형율의 증가시 높은 맥동성분으로 정밀한 속도제어나 균일한 제품가공을 위한 곳에서는 부적당함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

3상 4선식 설비에 일반적으로 많이 나타나는 전압불평형에 대해 동력원으로 널리 이용되고 있는 유도전동기의 운전특성에 대해 모의 및 측정을 실시하였다.

완전한 평형일 경우 기기의 출력을 떨어뜨리거나 손실증가를 초래할 수 있는 역상분 성분이 존재하지 않으나 비대칭 전압불평형율이 증가할 경우에는 역상분의 비율이 높아 토크맥동 성분이 증가하였다. 전압불평형율에 따라 각속도의 변화에서 기동에서 정격속도에 도달하기까지 거의 변화를 나타내지 않지만, 정격속도에서는 약간의 변화만을 나타내었다.

이와 같이 전압불평형에 따른 영향을 최소화하기 위해 3상 4선식과 같은 저압 배전시스템에서는 단상 및 3상 부하를 별도로 관리하여 전압불평형율을 일정 범위 이내로 제한하거나 전압불평형시 자동적으로 일정 범위로 조정이 가능한 시스템의 도입이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 2003년도 산업자원부 및 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김종경, 이은용, 정중호, "비대칭 전압불평형에 의한 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 추계학술대회논문집, pp.110-112, 2003, 11
- [2] NEMA MG-1-2003, "Motors and Generators"
- [3] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001
- [4] 김종경, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [5] 김종경, "전기품질 변화에 따른 유도전동기의 동작특성 해석", 전기학회 논문지, 제 49P권, 2호, pp.15-21, 2000, 10