

전압 불평형에 의한 유도전동기의 토크 측정

김 종 겹, 박 영 진, 이 은 웅
원주대학, 원주대학, 충남대학

Torque Measurement of Induction Motor caused by Voltage Unbalance

Kim Jong-Gyeum · Park Young-Jin · Lee Eun-Woong

Wonju National College · Wonju National College · Chungnam National Univ

Abstract - 동력 및 전동 전열용으로 사용하는 3상 4선식 저압배전시스템에서는 전원측 및 부하측에 연결된 전력사용기기의 영향으로 전압불평형이 발생한다. 전압불평형을 줄이기 위해 설계 및 사용시 부하의 분배를 최적화시키고 있지만, 사용조건과 운전패턴에 따라 완전한 전압평형을 유지하기는 매우 어렵다. 이와 같이 3상 4선식 배전시스템에서 전압불평형은 몇 배의 전류불평형으로 이어져 유도전동기의 경우에 기기의 손실 및 소음증가, 토크 및 속도의 감소와 더불어 비선형 기기의 경우에 고조파의 증가에도 영향을 미칠 수 있다. 전압불평형의 변화에 따라 토크 및 속도의 변동이 발생할 경우 정밀제어나 일정한 속도를 요구하는 설비에서는 심각한 문제를 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전압불평형율에 따라 유도전동기의 토크 및 각속도 특성변화를 측정 분석하였다.

간전압 차이를 전압불평형이라고 한다. 이들 전압불평형은 대개 부하의 형태 및 3상 전원을 사용하는 수송기와 관련 있다.

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.

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%]$$

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.

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3}$$

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

1. 서 론

전력품질은 예전에 비해 최근 많이 개선되어 안정적인 전압을 부하에 공급하고 있다. 전력품질에는 대부분이 전압에 관련된 것이 주류를 이루고 있는데 전압의 변화 지속기간에 따라 다르게 분류하고 있다. 매우 짧은 지속기간의 과도현상, 새그나 스웰 및 일시적인 정전과 같이 0.5사이클에서 수분에 이르는 것과 정상상태에서도 지속적으로 나타내는 전압불평형, 과형왜형 및 전압변동 등은 전력품질을 결정짓는 중요한 파라미터들이다.

여기서 $a = e^{j120deg}$ 이다.

식 (2)는 3상 위상차가 일정한 경우에 적용 가능하지만 실제 현장에서 측정할 경우 시스템에 따라 정확한 120도 위상차를 나타내지 않으므로 기기의 영향을 분석하기 위해서는 3상 비대칭을 고려한 전압불평형율 해석이 필요하다.

대부분의 저압수송가나 특고압으로 수전하여 저압으로 변성시켜 기기를 구동하는 경우 단상 및 3상 부하를 함께 사용하는 방식을 많이 채택하고 있다. 저압 배전시스템에서 3상만을 단독으로 사용하는 경우도 있지만 대부분 단상부하와 혼합하여 사용할 경우 부하운전패턴에 따라 전압불평형이 발생한다.

그림 1은 3상 비대칭 불평형 전압 시스템의 벡터도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 선간전압의 크기가 다를 경우 각 α 및 β 는 정확하게 60° 를 유지하지 않으므로 기준축(REF)에 대한 벡터의 분해시 그림 1의 오른쪽과 같이 120° 의 위상차를 가지지 않는다.

전압불평형이 발생할 경우 전류불평형으로 이어져 유도전동기와 같은 부하의 경우 손실증가, 토크감소, 소음증가로 이어지고, 최근 컴퓨터 및 가변속 드라이브와 같은 비선형부하의 경우에는 전압불평형이 고조파의 증가로 전력품질에 나쁜 영향을 미치고 있다[1-3].

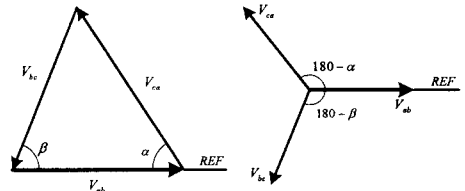


그림1 불평형 3상 시스템
Fig 1. Unbalanced 3-phase system

전압불평형에 따른 영향을 분석하기 위해 전압불평형의 현장측정과 관련규격의 검토를 기준으로 부하에 불평형된 전압이 인가될 경우 부하에 나타내는 토크 및 각속도의 변화를 측정·분석하고자 한다.

위와 같은 경우 전압불평형율은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

2. 전압 불평형

2.1 전압불평형의 발생원인 및 정의

전압불평형은 전력공급 시스템에서 불균형의 부하분배나 고르지 못한 임피던스에 의해 3상 시스템에서 각상에 서로 다른 전압강하를 발생시킨다. 이와 같이 각 선

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{3} (V_{ab} \angle 0^\circ + V_{bc} \angle (-60^\circ + \beta) + V_{ca} \angle (60^\circ - \alpha)) \\ V_2 = \frac{1}{3} (V_{ab} \angle 0^\circ + V_{bc} \angle (60^\circ + \beta) + V_{ca} \angle -(60^\circ + \alpha)) \end{cases}$$

식 (2)에서와 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.

$$LVUR_{IEC} = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \times 100[\%]$$

식 (4)에서 β 는 식 (5)로 계산한 것이다.

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

전압불평형에 의한 영향을 최소화하기 위해 표 1과 같은 규격에서는 그 허용범위를 대개 0~3[%]범위 이내로 설정하고 있다. 전압 불평형을 적용할 때 부하의 형태에 따라 그 범위를 달리하고 있음을 주시해야 한다.

표 1 전압불평형을 허용범위

Table 1 Voltage unbalance rate allowable limits

관련규격	허용범위[%]	비고
NEMA	1.0	at the motor terminals
IEC-3000-3-x, EN 50160	<2.0(LV,MV)	measured as 10-minute values, with instantaneous maximum of 4%
	<1 (HV)	
IEEE	0.5~2.0	steady state
ANSI	0~3	no-load conditions
EN50178	2	V_0/V_1 (비대칭시)
AS1359	1.0	same as NEMA
일본전기공업회	2.8	정상운전시, 장기간 수명보장을 위해서는 1[%]이하

2.2 전압불평형에 의한 유도전동기의 영향

3상 유도전동기는 정상적인 동작을 위해서는 장기간에 걸쳐 정상분에 비해 1%를 초과하지 않는 역상분 및 영상분을 가지는 범위에서 동작해야 하지만, 몇 분 동안의 짧은 경우에는 1.5%까지도 허용한다[4].

전압불평형이 증가할 경우 소음의 증가는 물론, 속도 감소외에 전류불평형의 증가로 과열에 의한 손실증가로 출력이 떨어질 수 있다. 또한 정밀한 속도제어와 균일한 제품생산을 위한 일정토크 확보시에 전압불평형의 존재는 부적절한 토크를 발생할 수 있다.

유도전동기의 토크는 식 (6)과 같이 불평형율이 증가할 경우에도 정격 토크값은 감소 폭이 낮지만 토크 맥동분은 매우 높다[1,5].

$$T_u = T_b \times K \times \left[1 - \left(\frac{\%VUF}{100} \right)^2 \right]$$

여기서 T_u 와 T_b 는 각각 불평형 및 평형상태에서의 토크이고, K 는 상수로서 구속회전자 토크는 1이며 정동 토크는 2이다.

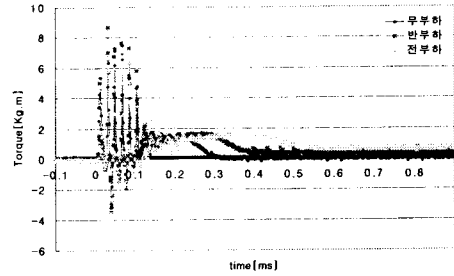
불평형 전압으로 정상적인 운전을 할 경우 발생하는 토크리플은 정격부하 토크의 퍼센트로서 순시 최대 및 최소토크의 차이로 정의할 수 있다.

$$\text{Torque ripple} = \frac{T_{\text{inst(max)}} - T_{\text{inst(min)}}}{T_{\text{rated}}}$$

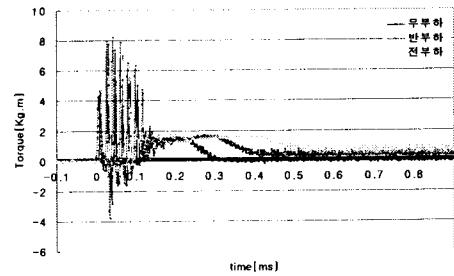
3. 측정 및 분석

전압불평형은 대개 3% 이하이므로 유도전동기의 특성 변화를 평형 및 1, 2, 3%로 구분하여 측정하였다.

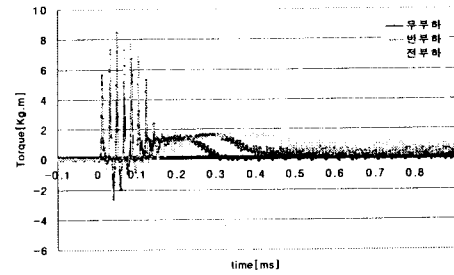
전압불평형의 비율에 따른 토크 및 속도변화를 그림 2,3에 나타내었다. 측정에 사용된 전동기는 3상 220[V] 3마력 및 발전기로서 전동부하를 사용하였다.



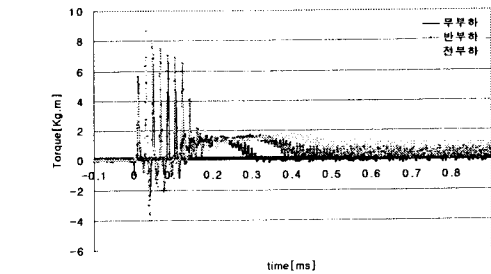
평형시



1 불평형시



2 불평형시



3 불평형시

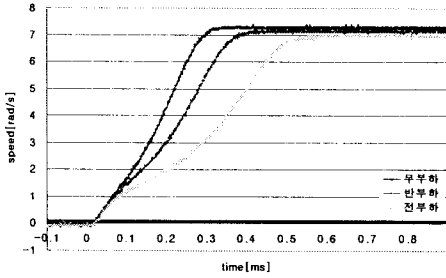
그림 2 전압불평형에 따른 토크 변화

Fig 2. Torque due to Voltage Unbalance

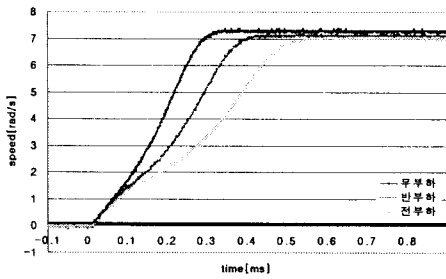
그림 2는 3마력 유도전동기를 무부하, 반부하 및 전부

하로 연결한 상태에서 토크특성변화를 측정한 것으로서 기동시 토크의 크기변화에는 차이가 별로 없지만, 최대 토크에 도달하는 시간에서 부하의 크기에 따라 차이가 발생함을 알 수 있다. 또한 전압불평형율이 증가함에 따라 토크 맥동성분은 점차 증가한다.

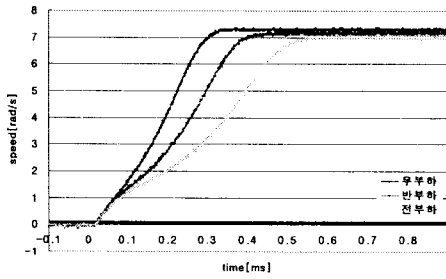
다음은 전압불평형율에 따른 각속도의 변화를 측정된 결과이다.



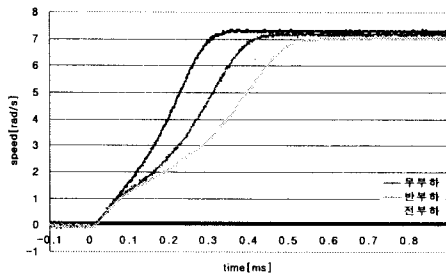
평형시



1 불평형시



2 불평형시

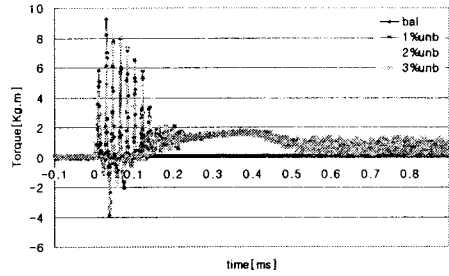


3 불평형시

그림 3 전압불평형에 따른 각속도변화
Fig 3. Angular Speed Variance due to Voltage Unbalance

그림 3은 3마력 유도전동기를 전압이 평형에 가까울 때 무부하, 반부하 및 전부하 운전시 각속도의 변화를 나타낸 것이다. 부하의 증가에 따라 정상속도에 도달하는 시간이 길어지고, 각속도도 약간 감소함을 알 수 있다. 그러나 전압불평형율에 따른 각속도의 변화는 거의 차이가 없음을 할 수 있다.

다음 그림 4는 전부하 조건하에서 전압불평형율의 변화에 따른 토크 및 각속도 변화상태를 분석한 결과이다.



불평형율에 따른 토크변화

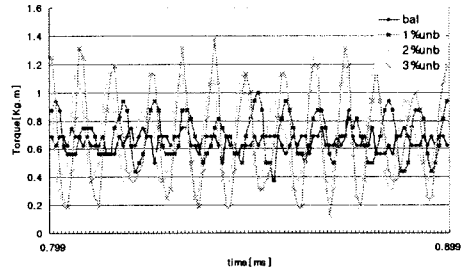
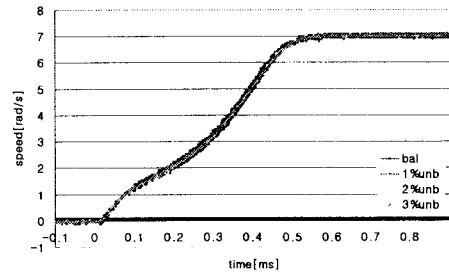


그림 의 확대부분



불평형율에 따른 각속도

그림 4 전압불평형율에 따른 토크 및 각속도 변화
Fig 4. Torque & Angular variation due to VUF

그림 4 (a)에서와 같이 전압불평형율이 증가함에 따라 기동에서 정상운전시까지 기동토크, 정동토크의 크기에는 변화를 찾기 어렵지만, 정격 속도점 이후에서는 매우 높은 토크 맥동이 발생한다. 이와 같은 현상을 구체적으로 나타낸 그림 4 (b)에서는 평형에 가깝게 운전할때와 비교해서 불평형율의 증가에 따라 맥동성분의 진폭이 매우 커짐을 알 수 있다.

그림 4 (c)는 불평형율에 따른 각속도의 변화를 나타낸 것으로서 전부하 기동시 크기에 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

단상 및 3상 부하에 동시에 전원 공급 가능한 3상 4선식 전압공급 시스템에서는 각 상간에 부하의 정확한 배분이 이루어지지 않을 경우 전압불평형이 발생한다. 전압불평형은 전류불평형으로 이어지는데 약간의 변화에도 높은 변화를 발생하므로 비선형 부하는 물론 정밀한 속도제어나 안정적인 동작확보가 필요한 경우 제품의 균일한 생산에도 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구에서는 수용가 저압 배전시스템에서 단상 및 3상 전원공급이 가능한 간선설비의 2차측에서 발생할 수 있는 전압불평형 조건시 3상 유도전동기의 토크 및 각속도의 변화를 실제 전압불평형의 크기에 따라 측정 분석하였다.

전압이 평형에 가깝게 전동기에 전달될 경우 유도전동기의 출력 토크곡선은 매우 안정적이지만, 불평형율의 증가에 따라 맥동성분의 크기는 증가하여 연결된 부하를 불안정하게 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 전압불평형율의 증가에 따라 나타날 수 있는 각속도의 변화는 실제 큰 변화가 없었다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] 김종겸, 이은용, 정종호, "비대칭 전압불평형에 의한 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환시스템학회 추계학술대회는문집, pp.110-112, 2003. 11
- [2] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001
- [3] 김종겸, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [4] IEC 610034
- [5] NEMA MG-1-2003