

대칭 및 비대칭 불평형 전압에 의한 유도전동기의 동작특성 해석

김종겸*, 박영진*, 이은웅**, 손홍관***
 원주대학*, 충남대학교**, 전기연구원***

Analysis for Operation Characteristics of Induction Motor at Symmetrical & Asymmetric Unbalanced Voltages

Jong-Gyeum Kim · Young-Jin Park · Eun-Woong Lee, Hong-Kwan Sohn
 Wonju National College · Wonju National College · Chungnam Univ · KERI

Abstract - 3상 4선식 수용가 설비에서는 부하와 임피던스의 불평형에 의해 전압불평형이 발생한다. 전압불평형은 전압의 크기뿐만 아니라 위상각에 따라 달라진다. 약간의 전압불평형은 높은 전류 불평형으로 이어지는데 단상 부하와 3상 부하가 공유되고 있는 저압배전 설비에서 전압불평형이 발생할 경우 유도전동기는 전류불평형의 증가로 손실 및 소음 증가와 토크 맥동을 발생시킨다. 본 논문에서는 대칭 및 비대칭 전압불평형의 크기에 따라 유도전동기에 나타나는 현상을 해석하고자 한다.

1. 서 론

퍼스널컴퓨터, 가변속 드라이브와 같은 전압품질에 민감한 비선형 부하기기의 사용증가는 전압품질을 더욱 악화시키고 있어 전력품질에 대한 관심이 증가되고 있다. 효율적인 전력사용을 위해 적용하고 있는 비선형부하인 전력전자기기나 전동기의 경우 약간의 전압변동에도 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]. 동력 및 전동·전열을 동시에 사용할 수 있는 저압 3상 4선식 배전방식의 경우 부하의 운전패턴에 따라 전압불평형이 발생한다. 약간의 전압불평형은 높은 전류불평형을 발생시킬 수 있으며, 특히 비선형부하의 경우는 받는 영향이 매우 크다. 안정적인 토크 및 출력을 요구하는 유도전동기의 경우 공급되는 전압의 크기와 위상각에 따른 전압불평형은 높은 역상분 전류의 발생으로 심각한 문제를 발생한다. 일반적으로 3상 3선식의 경우 전압 위상각은 120°를 유지한 3상 4선식의 경우 부하의 불평형에 의해 중성선에 흐르는 전류로 인해 120° 위상각을 유지하는 경우가 어렵다. 따라서 대칭외에 비대칭 전압 불평형에 의한 기기의 특성변화도 고려되어야 한다. 본 연구에서는 산업현장에서 전력사용의 상당한 부분을 차지하고 있는 유도전동기에 인가되는 대칭 및 비대칭 전압불평형에 의한 동작특성을 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 부하형태나 3상 전원을 사용하는 수용가와 관련이 있다[1].

전압불평형(VUF)은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로 정의한다.

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

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.

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

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

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 4선식 전압·전류 벡터를 나타낸 것으로서 중성선의 존재로 2상 비대칭을 나타내고 있다.

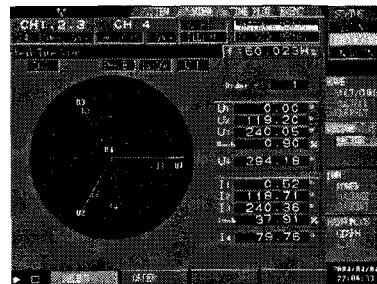


그림 1 전압 및 전류 벡터도
 Fig. 1 Voltage & Current Vector Diagram

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

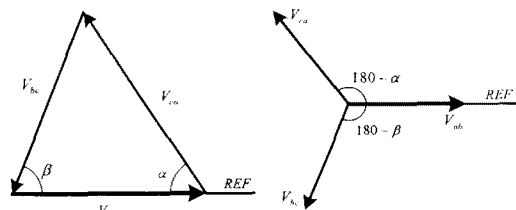


그림 2 불평형 3상 시스템
 Fig. 2 Unbalanced 3-phase system

따라서 그림 2와 같은 경우 정상분 및 역상분은 식 (3)과 같다.

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{3}(V_{a0} \angle 0^\circ + V_{1c} \angle (-60^\circ + \beta) + V_{2c} \angle (60^\circ - \alpha)) \\ V_2 = \frac{1}{3}(V_{a0} \angle 0^\circ + V_{1c} \angle (60^\circ + \beta) + V_{2c} \angle -(60^\circ + \alpha)) \end{cases} \quad (3)$$

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.

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

식 (4)에서 β 는 식 (5)로 계산한 것이다.

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

2.2 전압불평형의 영향

산업현장에서 가장 많은 전력을 사용하는 유도전동기는 전압불평형에 많은 영향을 받는다. 불평형된 전압이 인가될 경우 정상분 전류에 대해 역상분의 비율증가로 유도전동기의 경우 역방향 토크의 존재로 출력이 저감되므로, 원하는 출력값을 확보하기 위해서는 전동기의 용량을 증가시켜야 하고, 비선형 부하기기의 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.

불평형전압이 전동기에 인가될 경우 3상 순시전력 p_{im} 을 식 (6)과 같이 임의의 직교 기준축 qdo 로 나타낼 수 있다.

$$p_{im} = \frac{3}{2}(V_{qs}i_{qs} + V_{ds}i_{ds} + 2V_{os}i_{os} + v_{qr}i_{qr} + v_{dr}i_{dr} + 2v_{or}i_{or}) \quad (6)$$

d-q축에서의 고정자 전압방정식은 식 (7)이고, 전류방정식은 식 (8)이다.

$$\begin{aligned} V_{qs} &= \frac{1}{3}(2V_{as} - V_{bs} - V_{cs}) \\ V_{ds} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(V_{cs} - V_{bs}) \\ V_{os} &= \frac{1}{3}(V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} i_{qs} &= \frac{1}{3}(2i_{as} - i_{bs} - i_{cs}) \\ i_{ds} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{cs} - i_{bs}) \\ i_{os} &= \frac{1}{3}(i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) \end{aligned} \quad (8)$$

임의의 직교 qd 기준 프레임에서 유도전동기의 고정자와 회전자의 전압방정식은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \\ V_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\ V_{os} &= r_s i_{os} + p \lambda_{os} \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 식 (8) 및 (9)에서 토크방정식은 식 (10)이 된다.

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} [\omega(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r)(\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr})] \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qr} i_{qs} - i_{dr} i_{ds}) \end{aligned} \quad (10)$$

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 ²]
Friction coefficient, B	0.0089[Nm · %]

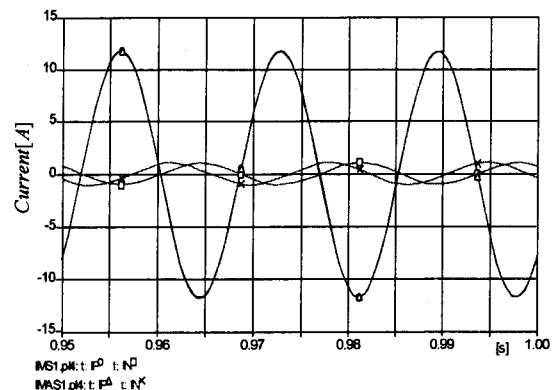
전압 불평형의 비율은 각 상전압의 크기와 위상각에 의해 달라지므로 해석은 평형(balanced) 및 1, 2, 3[%] 불평형에 따라 모의하였다.

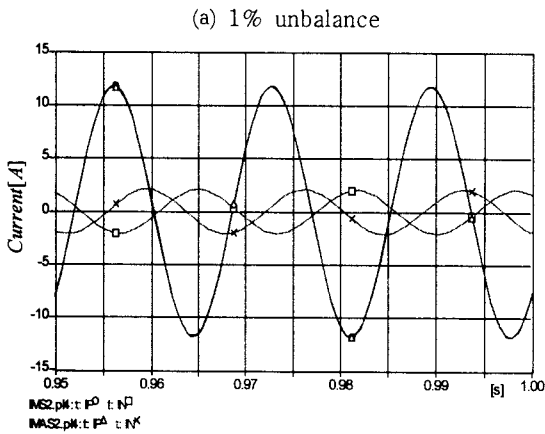
3상 전압의 변동에 따른 유도전동기의 고정자 전압, 전류, 자속, 각속도 및 토크의 동작특성은 그림 3~7과 같다. 해석에 사용된 전압불평형율은 표 2와 같이 A상은 기준상으로 하고 나머지 두상의 위상각에 따라 2상 비대칭 및 3상 대칭으로 전압의 크기가 다른 경우로 구분하였다.

표 2 대칭 및 비대칭에 따른 불평형율의 비교
Table.2 Comparison of unbalance ratio due to symmetrical & asymmetrical

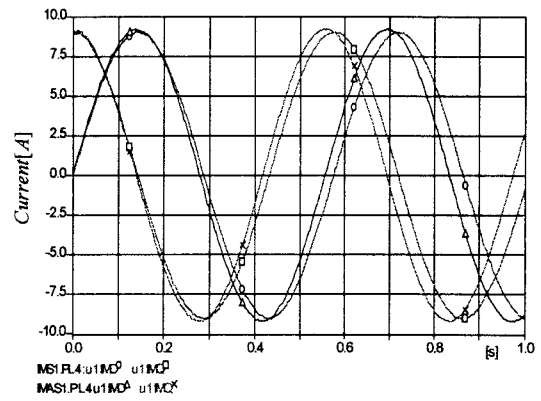
구분	V_a	V_b	V_c	VUF[%]
Balanced(IMB1)	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	0
2ph-asm1(IMAS1)	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 241.78°	127.0 ∠ 121.648°	1
3ph-sym1(IMS1)	122.0 ∠ 0°	125.0 ∠ 240°	126.2 ∠ 120°	
2ph-asm2(IMAS2)	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 241.78°	127.0 ∠ 124.0°	2
3ph-sym2(IMS2)	119.92 ∠ 0°	126.80 ∠ 240°	127.90 ∠ 120°	
2ph-asm3(IMAS3)	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 243.2°	129.5 ∠ 117.16°	3
3ph-sym3(IMS3)	117.0 ∠ 0°	129.09 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	

전압 불평형율의 크기에 따라 3[%]의 슬립으로 운전하는 3마력 유도전동기를 대상으로 모의 및 측정을 실시하였다. 그림에서 토크값이 마이너스로 나타낸 것은 프로그램에서 발전기는 정(+), 토크는 부(-)로 나타내기 때문이다.

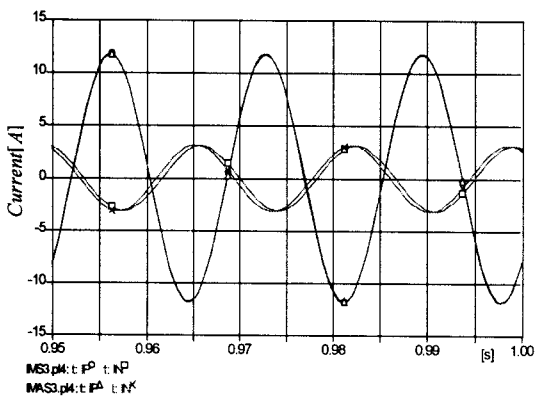




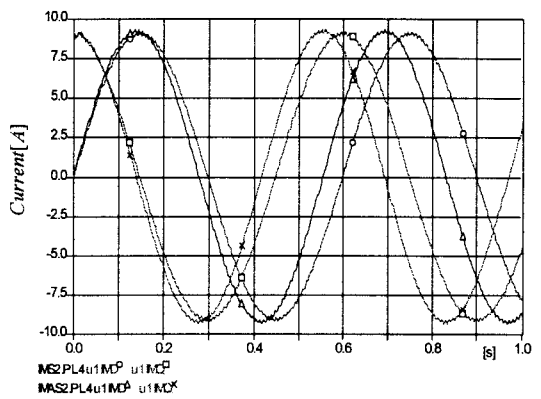
(a) 1% unbalance



(b) 1% unbalance



(c) 2% unbalance

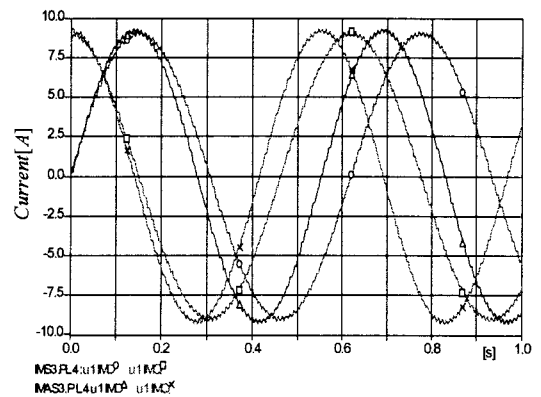


(c) 2% unbalance

그림 3 불평형율에 따른 정상분 및 역상분 전류
Fig. 3 Positive & Negative Sequence Current by VUF

그림 3에서 정상분(IP)에 대한 역상분 전류(IN)의 크기는 불평형율의 증가에 따라 커지지만, 대칭 및 비대칭에 대한 크기의 차이는 나타내지 않는다. 그러나 전압의 위상차에 따른 차이만 존재한다. 전압불평형율의 증가는 정상분 전류를 줄이고, 역상분 전류를 증가시켜 권선 손실 증가 및 역상분 토크의 발생으로 출력 토크값이 줄어들 수 있다.

그림 3에서 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 4는 대칭 및 비대칭 전압불평형 운전시 유도전동기의 d, q 축 자화전류(IMD, IMQ)를 나타낸 것이다.

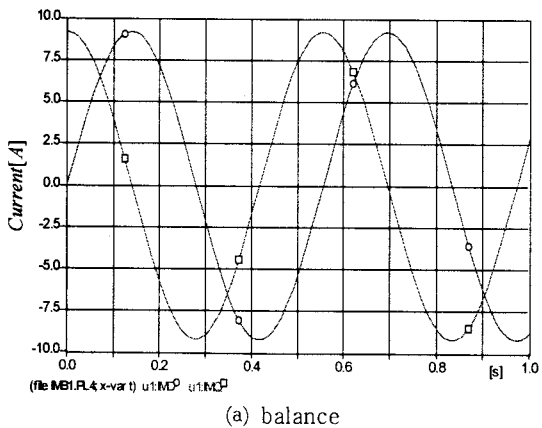


(d) 3% unbalance

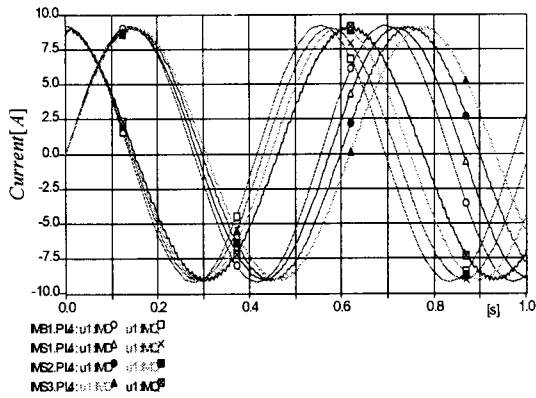
그림 4 불평형율에 따른 d, q 축 자화 전류
Fig. 4 d, q-axis curve by VUF

그림 4에서와 같이 전압 불평형율이 증가함에 따라 자화전류는 리플성분이 점차 커진다.

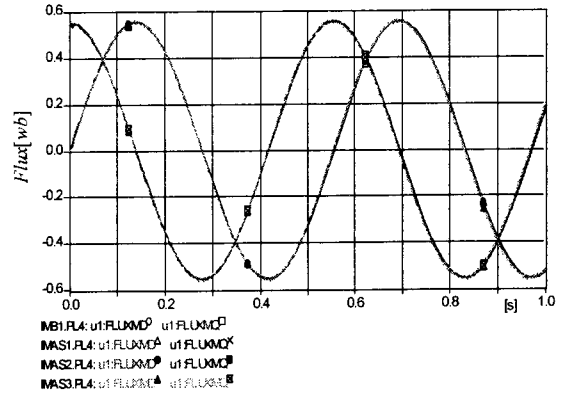
그림 5 (a)는 대칭시 불평형율에 따른 d, q축 자화전류를 비교한 것으로서 정확하게 90°위상차를 가지지만 불평형율의 증가로 주기가 짧아짐을 알 수 있다. 그림 5(b)는 비대칭 불평형시 d, q축 자화전류를 비교한 것이다. 정확하게 90°위상차를 가지지만, 불평형율의 증가로 리플성분이 높아진다.



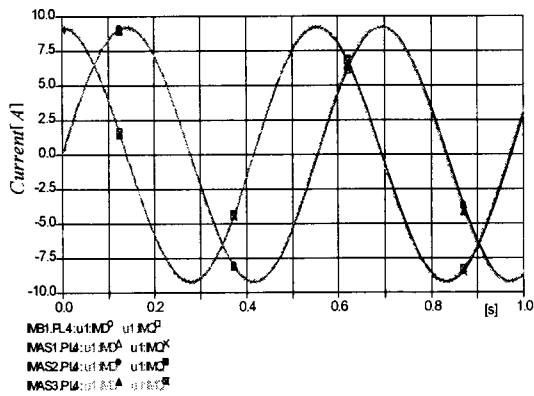
(a) balance



(a) 대칭시 d, q 축 자화전류



(b) 비대칭시



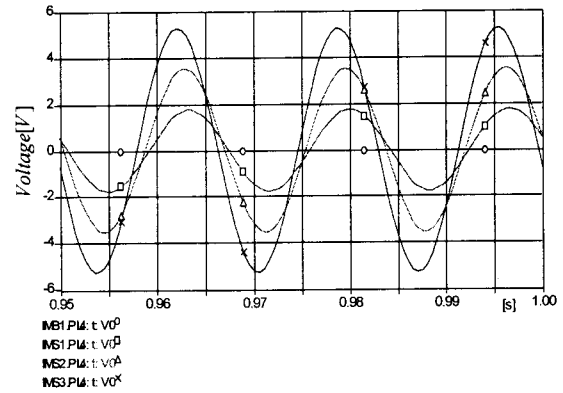
(b) 비대칭시 d, q축 자화전류

그림 5 불평형에 따른 d, q 축 자화전류 비교 곡선
Fig. 5 d, q-axis current comparison curve by VUF

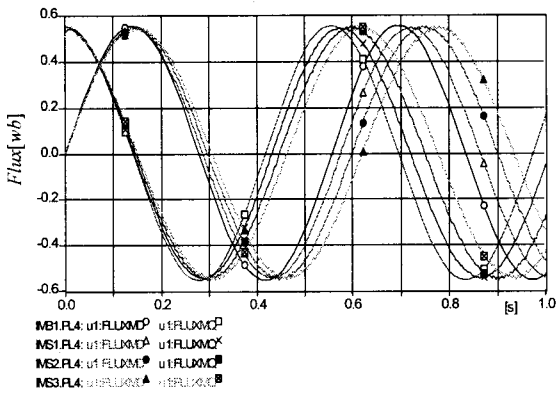
대칭 및 비대칭 전압불평형 운전시 고정자 자속의 변화는 그림 6과 같다.

그림 6 불평형에 따른 자속곡선
Fig. 6 Flux curve by VUF

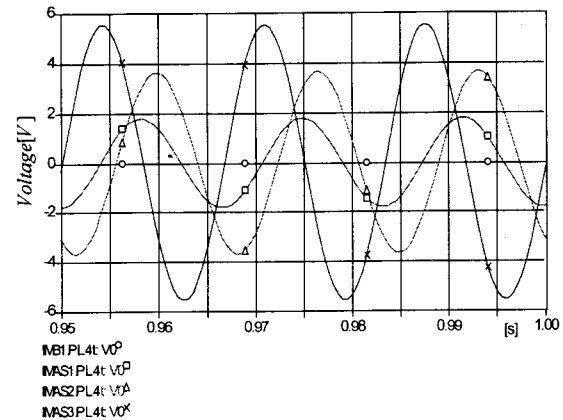
그림 6에서와 같이 비대칭시 d, q 축 자속의 크기와 주기는 일정하지만, 대칭시는 크기는 일정한 반면 불평형을 증가에 따라 주기는 감소한다. 그림 7은 전압불평형시 영상분 전압의 크기를 나타낸 것이다.



(a) 대칭시



(a) 대칭시



(b) 비대칭시

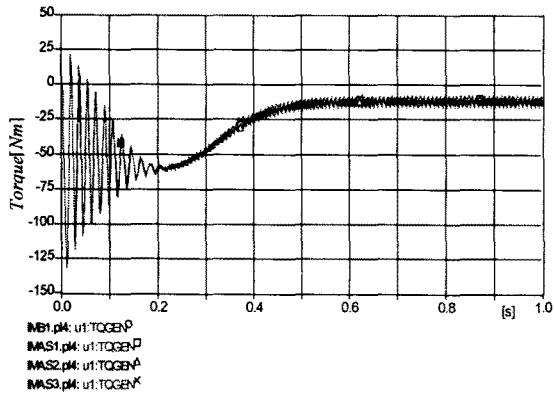
그림 7 영상분 전압
Fig. 7 Zero-sequence voltage

평형시 존재하지 않는 영상분 전압은 대칭 및 비대칭 전압불평형의 비율에 따라 거의 비슷한 크기로 존재한다.

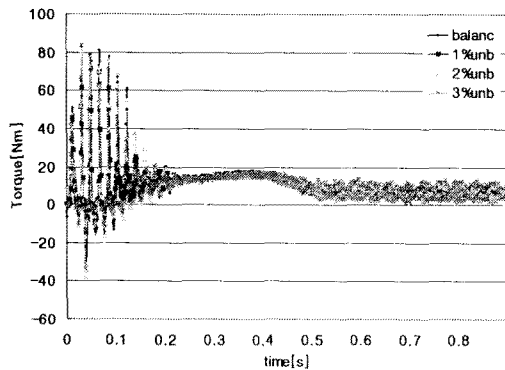
다음 그림 8은 3마력 유도전동기를 전압불평형에 따라 출력 토크값을 모의 및 측정한 결과이다. 비대칭 전압불평형에 의한 영향을 확인하기 위해 불평형율의 범위

는 현장 측정에서 일반적으로 나타날 수 있는 3%범위 이내로 제한하였다.

모의시는 대칭 및 비대칭의 전압인가가 가능하나 측정시는 구분이 불가하지만, 거의 같은 결과값을 나타내므로 측정에서는 전압불평형율에 따라 기동에서 정상속도에 도달하기까지만 측정하였다.

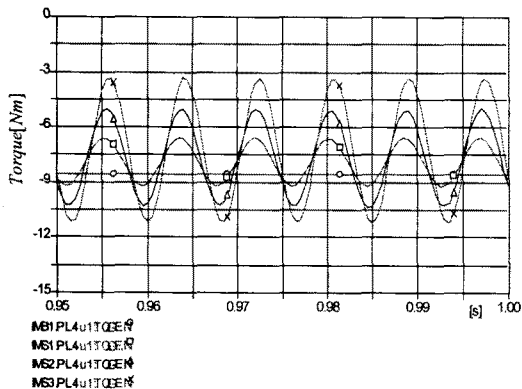


(a) 모의결과

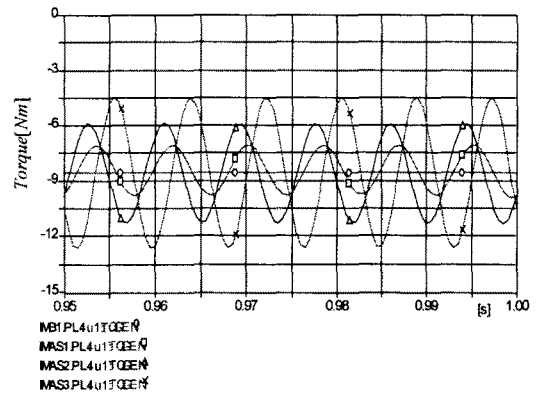


(b) 측정결과

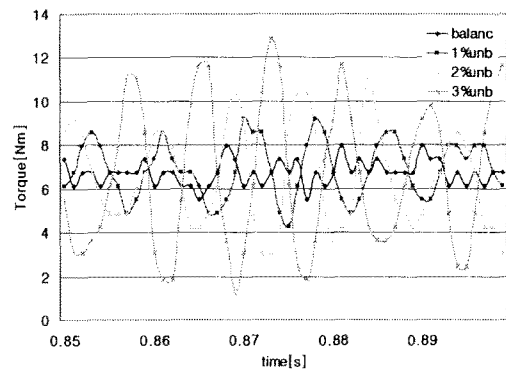
그림 8 전압불평형율에 따른 특성곡선
Fig. 8 Torque characteristic curve by VUF



(a) 대칭시



(b) 비대칭시

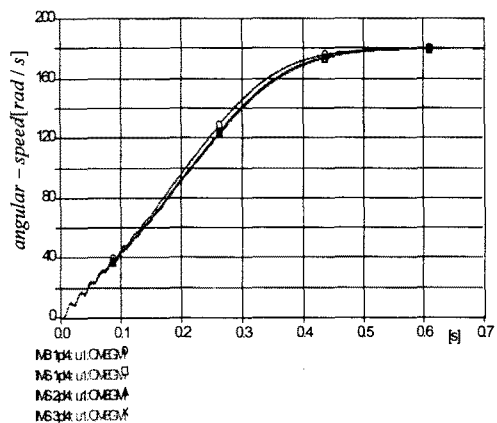


(c) 측정결과

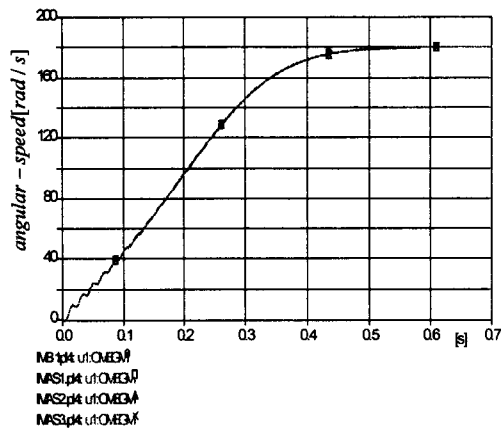
그림 9 정상상태에서 토크곡선
Fig. 9 Torque curve at steady state

비대칭시 토크값이 대칭시에 비해 약간 낮은 값을 나타낸다.

그림 10은 기동에서 정상속도에 도달하기까지의 대칭 및 비대칭 전압불평형율에 따른 각속도 변화를 나타낸 것이다. 각속도 변화에서 전압불평에 따라 큰 변화를 나타내지 않지만 대칭전압불평형의 경우 약간의 맥동성분은 존재한다.



(a) 대칭 불평형시



(b) 비대칭 불평형시

그림 10 전압불평형에 따른 각속도
Fig. 10 Angular speed by VUF

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 변화는 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] 김종겸, 이은용, 정종호, "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] 김종겸, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [5] 김종겸, "전기품질 변화에 따른 유도전동기의 동작특성 해석", 전기학회 논문지, 제 49P권, 2호, pp.15-21, 2000. 10
- [6] 김종겸, 박영진, 정종호, 이은용, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석", 대한전기학회 논문지(B), 제 53권, 6호, pp. ?-?, 2004.6
- [7] 김종겸, 손홍관, 정종호, 이은용, "비대칭 불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지(P), 제 51권, 6호, pp. ?-?, 2004.6