

비대칭 불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석

論 文

53P-2-3

Analysis on the Operation Characteristics of Induction Motor Operated by Asymmetric Unbalanced Voltage

金宗謙* · 孫洪寬** · 鄭鍾浩*** · 李殷雄§

(Jong-Gyeum Kim · Hong-Kwan Sohn · Jong-Ho Jeong · Eun-Woong Lee)

Abstract - Most of the loads in industrial power distribution systems are balanced and connected to three power systems. However, in the user power distribution systems, most of the loads are single & three phase and unbalanced, generating voltage unbalance. Voltage unbalance is a condition in a polyphase system in which the rms values of the line-to-line voltages or the phase angles between consecutive line-to-line voltages, are not all equal. Slight voltage unbalance generates a disproportionately high current unbalance at the motor stator winding.

This paper presents a scheme on operation states of a three-phase induction motor under unbalanced voltages. The three-phase voltages applied to the stator winding of the studied induction motor are controlled by respectively adjusting the magnitude and phase angle of each phase. The voltage unbalanced factor(VUF) of the three-phase source voltages can then be varied to examine the different values of VUF on machine's operation characteristics.

Key Words : Unbalanced Voltages, Induction Motor, Torque, Power Quality

1. 서 론

전기품질은 대부분 전압에 관련된 것으로 전압새그나 스웰, 서지, 과도와 같은 시스템에 일시적으로 영향을 주는 것과 정전 등과 같이 지속적으로 영향을 주는 것이 있다[1-4]. 일시적인 사고에 대한 문제해결도 중요하지만, 지속적인 스트레스의 증가로 발생하는 문제에 대한 대책수립도 시스템의 신뢰성제고를 위해 매우 중요하다.

동력용으로 3상, 전등전열용으로 단상전원을 부하에 공급하는 것이 가장 이상적이지만, 최근 대부분의 저압 수용가는 단상 및 3상 부하에 전력을 공급할 수 있는 3상 4선식 전원 공급방식을 많이 채택하고 있다. 이 방식은 수용가 간선 및 분기선에 연결된 부하를 평형에 가깝게 설계하지만, 운전 및 설비 증설 등에 의한 전압불평형이 기기에 나쁜 영향을 미친다[1,5]. 3상회로에서 불평형된 전압이 공급될 경우 시스템의 오동작 및 기기의 과열을 방지하기 위해 평형된 전압공급이 필요하다. 특히 유도전동기의 경우는 약간의 전압불평형에도 높은 전류불평형을 초래하여 권선의 온도상승, 수명저하 및 효율감소로 시스템에 심각한 문제를 발생시킨다 [1,2].

같은 분전반 또는 배전반에 연결된 설비에서 운전 조건

및 상황에 따라 전압불평형은 전압의 크기뿐만 아니라 위상각에 의한 영향도 고려해야 한다. 이와 같이 전압불평형에 의해 구동되는 유도전동기의 동작특성을 분석하기 위해서는 전압의 크기와 위상각에 따른 특성 해석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 저압 3상 4선식 설비에서 전압의 크기 및 위상각을 고려한 전압불평형율이 3상 유도전동기의 출력 및 토크특성에 미치는 영향을 해석하고자 한다.

2. 전압불평형과 유도전동기의 동작특성

2.1 전압불평형의 정의

전압불평형은 전력공급 시스템에서 불균형의 부하분배나 고르지 못한 임피던스에 의해 3상 시스템에서 각상에 서로 다른 전압강하를 발생시킨다. 이와 같이 각 선간전압 차이를 전압불평형이라고 한다. 이들 전압불평형은 대개 부하의 형태 및 3상 전원을 사용하는 수용가와 관련 있다.

전압불평형에 의한 영향을 해석하기 위한 불평형율 산출식은 다음과 같다[3-5]. 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 , 역상분 V_2 및 영상분 V_0 의 대칭성분으로 변환하면 불평형 조건하에서 유도전동기의 동작을 해석할 때 편리하다.

* 正 會 員 : 國 立 原 州 大 電 氣 科 副 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : 電 氣 研 究 院 先 任 研 究 員 · 工 博

*** 正 會 員 : 忠 南 大 工 大 博 士 課 程 修 了

§ 正 會 員 : 忠 南 大 工 大 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2004年 3月 4日

最 終 完 了 : 2004年 5月 4日

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3} \\ V_2 &= \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a V_{ca}}{3} \\ V_o &= \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $a = 1 \angle 120^\circ$, $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ 이다.

불평형율은 정상분에 대한 역상분의 영상분으로 분석하는 경우도 있다.

$$VUF = \frac{V_o}{V_1} \times 100[\%] \quad (3)$$

식 (4)는 IEC의 선간전압에 대한 불평형율이다. 이 식은 현장측정시 위상을 고려하지 않고 실효치 전압의 크기만으로도 불평형율을 쉽게 산정할 수 있다.

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

식 (4)에서 β 는 식 (5)와 같다.

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

선간전압 불평형율(LVUR:Line voltage unbalance rate)은 식 (6)과 같다.

$$LVUR = \frac{\text{평균 선간전압 크기에서 최대전압편차}}{\text{평균선간전압}(V_{avg})} \times 100[\%] \quad (6)$$

여기서 $V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}$

그림 1은 3상 4선식 저압반에서의 전압 및 전류벡터도를 측정된 예로서 전압은 각상 거의 120°에 가까운 위상차를 유지하지만, 부하 불평형에 의한 중성선 전류의 영향으로 전류는 위상차가 많이 발생하고 있다. 따라서 전압불평형율을 결정하기 위해서는 전압의 크기뿐만 아니라 위상각은 고려해야 한다. 전압의 기준축 U_1 일 경우 대부분이 2상 비대칭이 많으므로 본 해석에서는 2상 비대칭의 경우에 대한 불평형율의 발생조건시 유도전동기의 특성을 해석하였다.

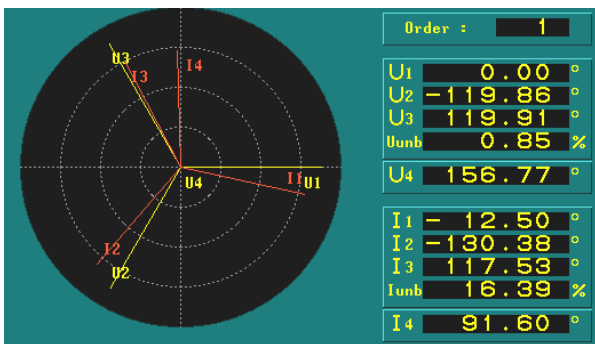


그림 1 전압·전류 벡터도
Fig. 1 Voltage · current vector diagram

식 (1), (4) 및 (5)에 의해 전압의 크기 및 위상각의 변화에 따라 계산한 전압 불평형율은 표 1과 같다.

표 1 전압 불평형율의 비교

Table 1 Comparison of voltage unbalance ratio

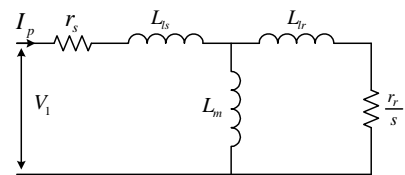
구분	V_a	V_b	V_c	VUF[%]
balanced	127.0 \angle 0°	127.0 \angle 240°	127.0 \angle 120°	0
2ph-auv1(I)	127.0 \angle 0°	126.7 \angle 239°	127.54 \angle 121°	1
2ph-auv1(II)	121.3 \angle 0°	126.1 \angle 239°	129.3 \angle 121°	
2ph-auv2(I)	127.0 \angle 0°	123 \angle 239°	130.0 \angle 121°	2
2ph-auv2(II)	118.49 \angle 0°	126.0 \angle 239°	131.0 \angle 121°	
2ph-auv3(I)	127.0 \angle 0°	120.18 \angle 239°	132.0 \angle 121°	3
2ph-auv3(II)	116.0 \angle 0°	123.0 \angle 239°	132.18 \angle 121°	
2ph-auv4(I)	127.0 \angle 0°	117.65 \angle 239°	134.0 \angle 121°	4
2ph-auv4(II)	112.17 \angle 0°	123.5 \angle 239°	133.0 \angle 121°	
2ph-auv5(I)	127.0 \angle 0°	115.61 \angle 239°	136.6 \angle 121°	5
2ph-auv5(II)	110.0 \angle 0°	122.85 \angle 239°	135.0 \angle 121°	

전압불평형에 대한 국제규격(EN-50160 or IEC 1000-3-x series)은 순간 최대값으로 10분간 값으로 측정할 경우 불평형률을 LV 및 MV에서는 2[%]이하, HV에서는 1[%]이하가 되도록 규정하고 있다. 전압불평형에 대해 이와 같이 제한 기준을 두는 이유는 유도전동기의 안정적인 동작확보를 위해서이다.

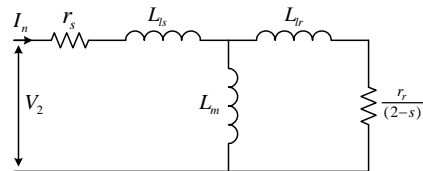
2.2 불평형에 의한 전동기의 등가회로 및 동작특성

정상상태에서 유도전동기에 인가되는 상전압이 각각 V_a , V_b , V_c 일 경우 정상분, 역상분 및 영상분 전압은 식 (7)과 같다. 3상 평행된 전압이 전동기에 인가될 경우 문제되지 않지만, 전동기에 불평형 전압이 인가될 때는 역상분 및 영상분 전류의 존재로 효율 및 출력이 저하된다.

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (7)$$



(a) 정상분 등가회로



(b) 역상분 등가회로

그림 2 유도전동기의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of Induction motor

불평형된 전압의 인가시 유도전동기의 동작특성을 해석하기 위해서는 정상분의 역상분도 고려해야 한다. 그림 2는

유도전동기의 등가회로를 나타낸 것으로서 정상분 전압 V_1 에서 슬립 s 로 동작하는 성분과 역상분 전압 V_2 에서는 $(2-s)$ 로 동작하는 성분의 합이 전동기의 출력특성이 된다. 여기서는 해석의 편리를 위해 손실은 고려하지 않았다.

그림 3은 표 2의 샘플자료를 참고로 그림 2의 등가회로에서 정상분, 역상분 임피던스값 Z_1, Z_2 를 슬립에 대해 나타낸 것으로서 무부하 또는 경부하시 및 정격부하운전시 역상분에 비해 정상분 임피던스값이 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 즉 역상분 임피던스는 슬립에 거의 영향을 받지 않지만, 정상분 임피던스는 슬립에 큰 영향을 받는다.

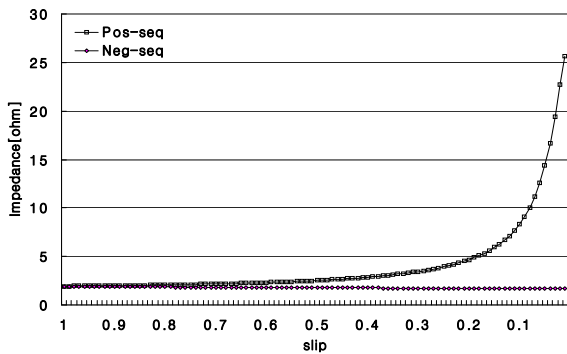


그림 3 역상분/정상분 임피던스
Fig. 3 Negative/Positive-sequence Impedance

유도전동기의 정격속도 운전시 정상분 슬립 s_1 은 매우 작아 거의 제로에 가깝지만 역상분 슬립 s_2 은 거의 2배가 된다. 기동 또는 구속시 임피던스는 슬립에 의한 영향이 낮지만, 낮은 슬립에서는 역으로 매우 높다[6]. 고정자 권선이 성형결선 또는 절연된 Y 결선으로 되어 있어 역상분을 고려하지 않을 경우 불평형 전압으로 기기에 발생되는 역상분 전류는 기기의 단락 임피던스와 거의 같거나 낮은 역상분 임피던스 때문에 매우 크다. 따라서 역상분 전류의 존재는 상당한 추가 손실을 발생시킬 수 있다. 역상분에 대한 정상분 임피던스는 식 (8)과 같다.

$$\frac{Z_1}{Z_2} \equiv \frac{I_{start}}{I_{running}} \quad (8)$$

불평형이 전압이 유도전동기에 공급될 경우 전류는 대칭 좌표법으로 분석 가능하다. 정상분 전류 I_p 와 역상분 전류 I_n 를 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{I_n}{I_p} = \frac{V_2}{V_1} \times \frac{Z_1}{Z_2} \quad (9)$$

식 (9)에서 전압불평형이 5[%]이고 구속회전자 전류가 정격전류의 6배가 될 경우 전동기 전류는 30[%]로 매우 높아지고, 온도상승은 50[%]까지 증가할 수 있으며, 정격운전시 역상분 전류의 증가는 토크감소 및 손실증가를 초래할 수 있으므로 전압불평형은 5[%]이하로 유지할 것을 권고하고 있다[7]. 3상 유도전동기에 불평형 전압으로 운전할 경우 추가되는 온도상승 (ΔT)은 다음과 같다.

$$\Delta T = 2 \times (\% \text{Voltage unbalance})^2 \quad (10)$$

전압불평형이 5[%]를 초과할 경우 온도상승은 50[%]증가되므로 전동기 출력감소로도 보호하기가 매우 어렵다.

상당 기계적 출력 P_m 은 식 (11)과 같이 정상분에서 역상분을 제외한 양으로 표현된다.

$$P_m = I_p^2 r_r \frac{(1-s)}{s} - I_n^2 r_r \frac{(1-s)}{(2-s)} \quad (11)$$

식 (11)에서 역상분 전류에 의한 감소분을 제외할 경우 상당 토크는 식 (12)와 같이 동기각속도 W_{syn} 에 반비례한다.

$$T = r_r \left(\frac{I_p^2}{s} - \frac{I_n^2}{(2-s)} \right) / W_{syn} \quad (12)$$

역상분 전압은 회전자의 회전방향과 반대로 회전하는 자속을 공극내에서 발생시켜 높은 전류불평형을 일으킬 수 있는데 유도전동기의 경우 전류불평형의 크기가 전압불평형의 5~10배 정도이고[4,5], 특히 ASD로 운전하는 유도전동기의 경우 15배를 초과할 수 있어 전동기 과열 등의 문제를 일으킬 수 있다.

3. 특성 해석 및 결과 분석

최근 수용가 저압 배전시스템의 경우 380/220[V] 시스템의 구성과 비선형 부하의 사용증가는 전압불평형을 높이고 있다. 전압불평형의 비율은 각 상전압의 크기와 위상각에 따라 달라지지만, 본 논문에서의 해석은 평형(balanced) 및 전압의 크기에 따른 불평형에 따라 계산하였다. 해석 모델로 사용한 유도전동기의 사양은 표 2와 같다.

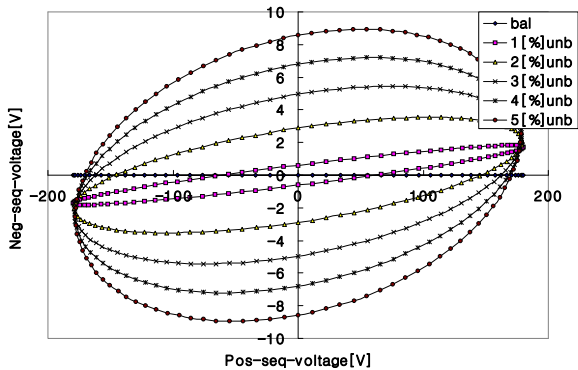
표 2 샘플 유도전동기 사양

Table 2 Specification of sample induction motor

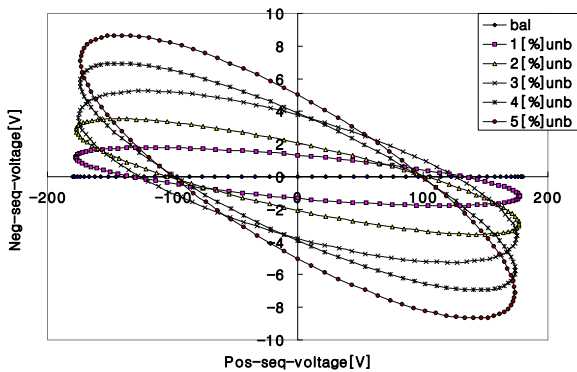
parameter	220[V], 4p, 3HP 60Hz
stator resistance, r_s	0.435[Ω]
rotor resistance, r_r	0.816[Ω]
stator leakage inductance, L_{ls}	0.002[H]
rotor leakage inductance, L_{lr}	0.002[H]
mutual inductance, L_m	0.0693[H]
Inertia moment, J	0.089[kg · m ²]
Friction coefficient, B	0.0089[Nm · m/s]

그림 4는 표 1에서와 같은 조건으로 3마력 유도전동기를 3[%]의 슬립으로 운전하는 경우 비대칭 불평형전압에 따른 전압 및 전류 궤적을 나타낸 것으로서 그림 4(a)와 (c)는 3상에서 a상의 전압 크기와 위상각을 고정하고서 다른 두상(b,c)의 전압 크기와 위상각을 변화시킨 전압궤적의 경우(I)이고, 그림 4(b)와 (d)는 위상각은 같은 조건이고, 각상의 전압 크기만을 변화(II)시켜 나타낸 전류궤적이다. 그림 4에서 전자의 경우보다는 후자의 경우가 타원궤적에서 구배가 높음을 알 수 있다. 이는 같은 전압불평형율에서도 역상분 전류값이 높아 출력 및 토크값에 영향을 준다.

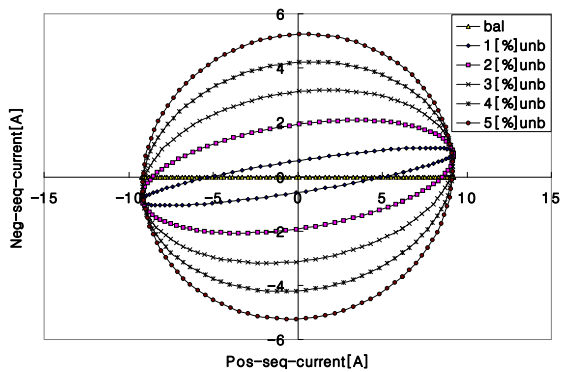
전압불평형율의 증가에 따라 x축의 정상분 전압 및 전류의 크기는 거의 일정하지만 y축의 역상분 전압과 전류의 폭이 넓어지는 형태로서 역상분의 크기가 점차 커짐을 알 수 있다. 특히 그림 4에서 완전평형시는 x축은 직선으로 y축은 값이 0이지만 불평형율의 증가로 y축 폭이 증가하여 기울기가 증가하는 타원궤적을 그린다. 이와 같이 역상분의 존재는 출력감소 및 손실증가로 이어지는 부작용을 낳을 수 있다.



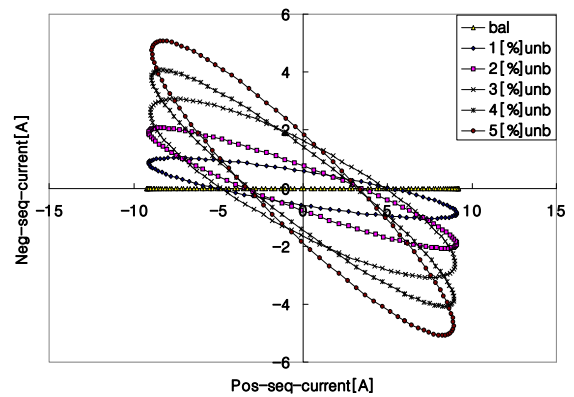
(a) Voltage locus (I)



(b) Voltage locus (II)



(c) Current locus (I)

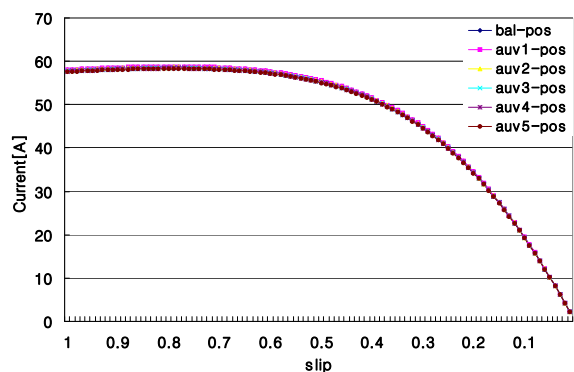


(d) Current locus (II)

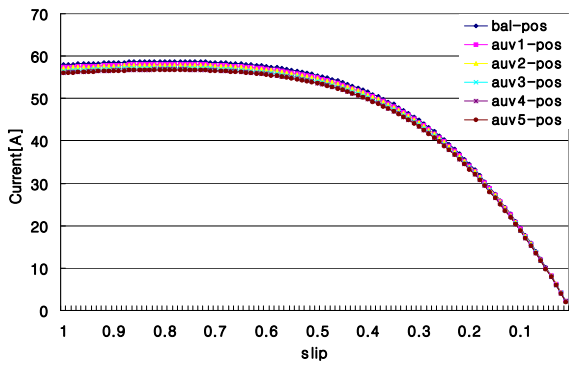
그림 4 정상분/역상분 전압 · 전류 궤적

Fig. 4 Positive/Negative sequence voltage · current locus

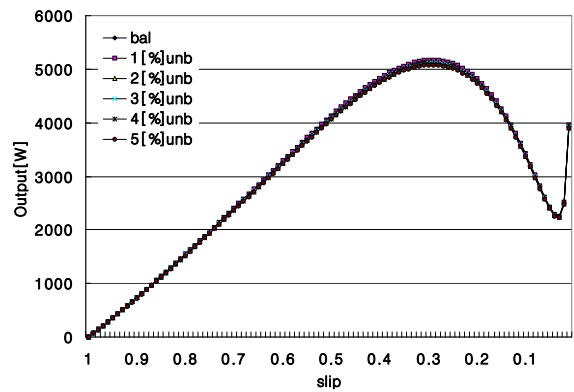
그림 5는 표 1과 같이 2상 비대칭 전압불평형율의 변화에 따라 유도전동기를 운전할 경우 슬립에 대한 정상분 및 역상분 전류의 변화를 나타낸 것이다. 그림 5(a), (b)에서와 같이 정상분 전류는 기동시에 높은 값을 나타내지만 정격속도에서는 정격전류값을 나타내고, 그림 5(c), (d)에서 역상분 전류는 슬립에 따라 큰 변동은 없지만, 전압불평형율 증가분 만큼 발생하지만 조건(II)가 약간 높게 나타난다. 그림 5에서 알 수 있듯이 같은 비대칭 2상 전압불평형에서도 기준이 되는 한상(a상)의 전압크기만을 고정하고 다른 2상의 전압 크기만을 변화시킨 경우 정상분 전류의 변화는 거의 없지만, 3상의 전압 크기를 변화시킨 경우 불평형율의 증가에 따른 역상분 전류의 증가로 정상분 전류값은 약간씩 감소함을 알 수 있다. 그림 5(c)와 (d)에서 같은 비대칭 전압불평형율의 변화에서도 3상의 전압 크기를 변화시킨 경우가 2상의 전압크기만을 변화시킨 경우에 비해 역상분 전류값이 약간 높다. 따라서 이와 같은 결과는 출력이나 토크값에 약간의 영향을 미칠 수 있다.



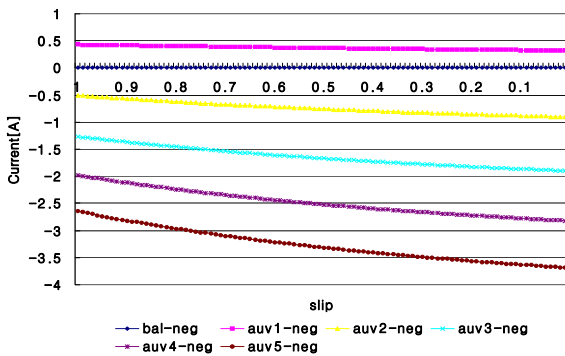
(a) Positive sequence current (I)



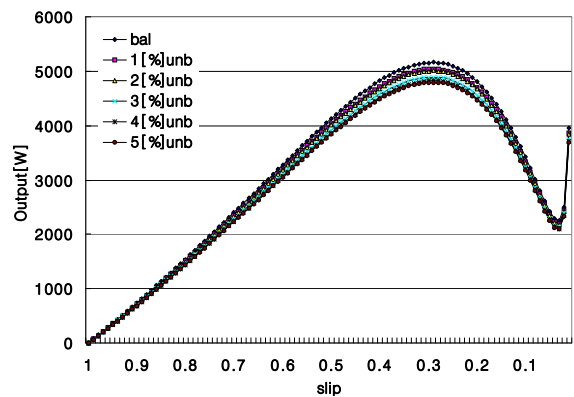
(b) Positive sequence current(II)



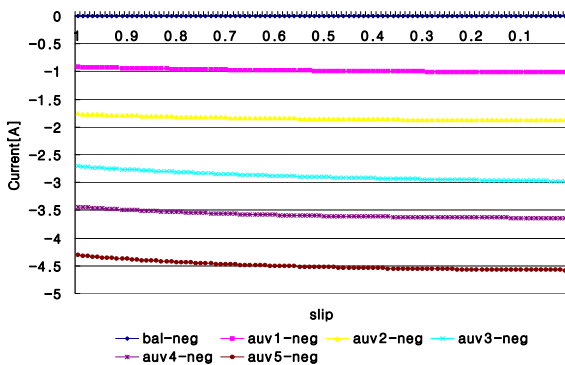
(a) Output (I)



(c) Negative sequence current(I)



(b) Output(II)



(d) Negative sequence current(II)

그림 5 정상분 및 역상분 전류

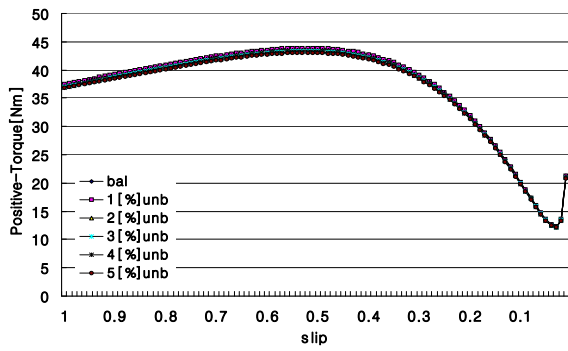
Fig. 5 Positive & Negative sequence curren

그림 6은 표 1과 같은 조건하에서 전압불평형율에 따른 유도전동기의 출력특성을 슬립에 따라 나타낸 것이다. 그림 6에서 3마력 유도전동기의 출력은 2상 비대칭 조건(I)하에서 전압불평형율이 증가함에 따라 정동토크에서 약간의 변화만 있을 뿐 전체적으로 큰 변화가 없다. 그러나 2상 비대칭 조건(II)의 전압불평형율 증가시 조건(I)에 비해 상대적인 역상분 전류의 증가로 출력값은 정동토크와 정격속도 부근에서 약간씩 줄어든다.

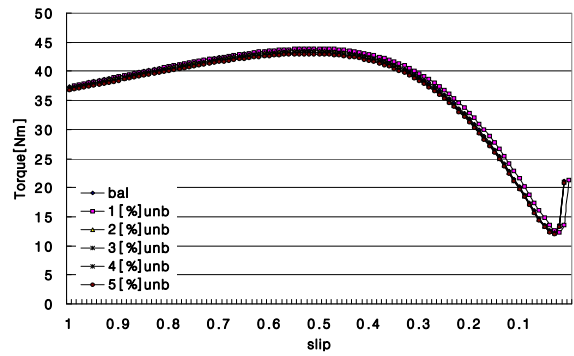
그림 6 전압불평율에 따른 전동기의 출력

Fig. 6 Output of motor due to voltage unbalance ratio

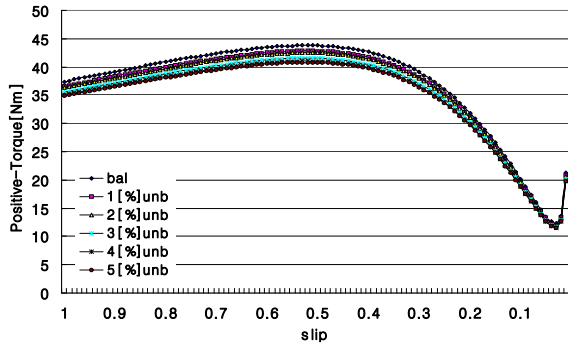
같은 전압 크기와 120°위상차를 가질 3상 전압이 부하에는 가장 적합하지만, 조건에 따라 전압의 크기와 위상차가 발생된다. 그러나 부하의 운전상황에 따라 전압불평형은 존재한다. 이와 같은 경우에 부하기기의 동작특성 해석을 위해 3상 대칭 불평형시 전압불평형을 표 1 과 같이 평형 및 1, 2, 3, 4, 5[%]의 불평형을 증가시 유도전동기의 토크 특성 변화는 그림 7과 같다. 불평형전압이 유도전동기에 인가되었을 경우 역상분에 의한 영향을 확인하기 위해 정상분 및 역상분 토크를 분리 계산하였다. 그림 7(a),(b)는 슬립에 따른 정상분 토크의 변화를 나타낸 것으로서 전압불평형율이 높아짐에 따라 조건(I)에 비해 조건(II)의 경우가 역상분의 증가로 토크 변화가 있고 값은 줄어든다. 그림 7(c)와 (d)는 전압불평형율에 따른 역상분 토크의 변화를 나타낸 것으로서 평형시는 제로이지만 역상분 전압의 크기에 따라 토크는 약간씩 증가하며, 기동시에 비해 정격속도에 가까울수록 점차 줄어든다. 그림 7(e)와 (f)는 합성 출력토크를 나타낸 것으로서 정상분에 비해 큰 값은 아니지만 같은 전압불평형율의 증가시에도 조건(II)가 토크값의 변화가 높음을 알 수 있다.



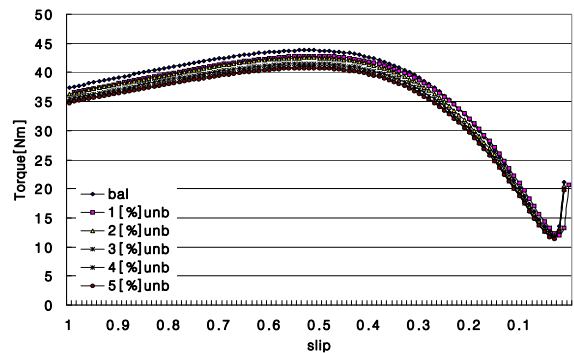
(a) Positive-torque(I)



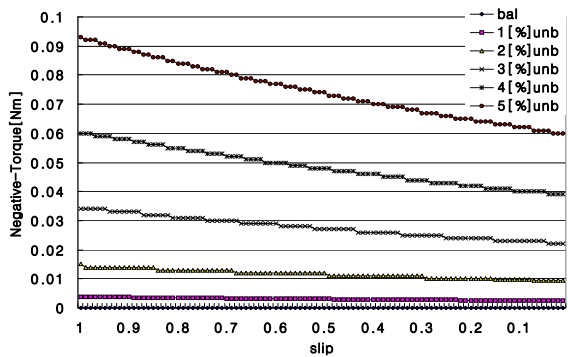
(e) Total torque(I)



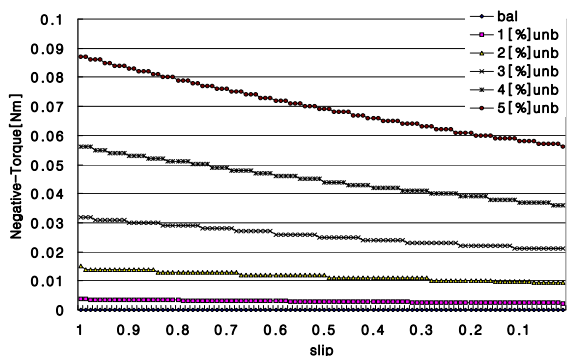
(b) Positive-torque(II)



(f) Total torque



(c) Negative-torque(I)



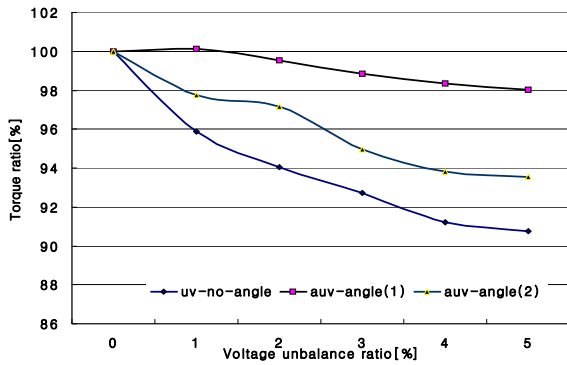
(d) Negative-torque(II)

그림 7 전압 불평형율에 따른 토크

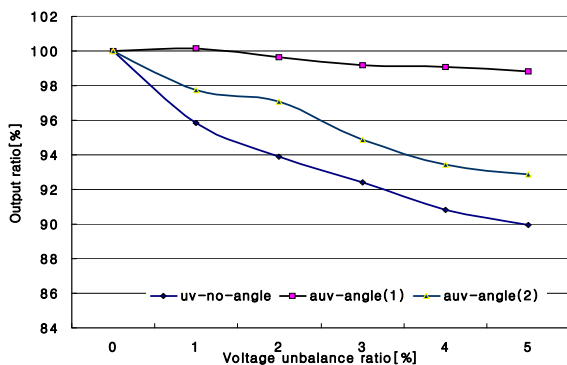
Fig. 7 Torque due to VUF

그림 8은 전압불평형율에 따른 3마력 유도전동기의 정격 운전시 출력 및 토크의 크기를 전압의 크기만 변화한 3상 대칭의 경우(uv-no-angle), 2상 비대칭에서 a상의 전압크기를 고정하고b,c상의 크기만을 조정한 경우(auv-angle[1]) 및 3상의 전압 크기를 조정한 경우(auv-angle[2])를 비교한 것이다. 전압이 평형될 때는 정격출력의 토크를 발생하지만, 전압의 크기 변화에 따른 불평형율의 증가시 토크값은 그림 8(a)에서와 같이 2상 비대칭에 비해 3상 대칭의 경우가 감소폭이 커진다. 그림 8(b)에서도 마찬가지로 출력값도 토크와 같은 변화를 나타낸다. 같은 2상 비대칭 전압불평형율 증가에서도 조건(II)가 조건(I)에 비해 토크 및 출력값의 감소폭이 낮다.

불평형 전압이 유도전동기의 고정자에 인가될 경우 역상분 전압의 존재는 전류의 증가로 권선의 온도상승, 출력 및 토크값이 저하됨을 확인할 수 있었다. 같은 조건의 전압불평형율에서도 대칭 및 비대칭에 따라 토크 및 출력값의 변화가 존재함을 확인하였다. 특히 2상 비대칭에서도 3상의 전압 크기가 다른 경우가 같은 전압불평형율의 증가시 가장 낮은 출력 및 토크 값의 감소를 나타낸다.



(a) Torque



(b) Output

그림 8 3마력 유도전동기의 정격 출력 및 토크 곡선
Fig. 8 Derating & torque curve of 3Hp IM

4. 결 론

본 논문에서는 전압불평형의 기본적인 내용의 전개와 전압불평형율에 대한 조건별 파라미터의 변경으로 불평형율을 소개하였으며, 산업현장에서 많은 전력을 소비하고 있는 전동력설비에 적용하여 불평형율에 따른 유도전동기의 동작특성을 해석하였다.

전압 불평형율은 정상분에 대한 역상분의 비율로서 전동기에 불평형된 전압이 인가될 경우 역상분의 발생이 역방향 토크의 발생으로 저하됨을 정상분 및 역상분 전압 및 전류 궤적으로 표현하였다. 같은 전압불평형율에도 대칭시 보다 2상 비대칭을 고려한 특성해석에서 출력 및 토크값의 감소폭이 낮음을 밝혔다.

불평형이 낮은 경우에는 역상분의 크기가 별로 큰 문제가 되지 않지만 높은 경우 토크는 감소한다. 따라서 부하설비를 운전하는 유도전동기의 정격출력을 확보하기 위해서는 전압 불평형율을 최소화시켜야한다. 따라서 전압불평형율을 줄이기 위해서는 3상에서 단상부하의 균등한 설계와 사용이 동시에 필요하다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 김종겸, “전기품질 변화에 따른 유도전동기의 동작특성 해석”, 전기학회 논문지, 제 49P권, 2호, pp.15-21, 2000. 10
- [2] 김종겸, 이은웅, 정중호, “비대칭 전압불평형에 의한 유도전동기의 동작특성 해석”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 추계학술대회논문집, pp.110-112, 2003. 11
- [3] P. Pillay and M. Manyange, “Definitions of voltage unbalance”, IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001
- [4] Ching-Yui Lee, “Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor”, IEEE Trans on EC, Vol.14, No.2, pp.202-208, Jun.1999
- [5] 김종겸, 이은웅, “불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상”, 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [6] 박민호, 유도기기, 동명사
- [7] NEMA MG-1-2003

저 자 소 개

김 중 겸 (金 宗 謙)

전기학회 논문지 제 53P권 1호 참조

손 홍 관 (孫 洪 寬)

전기학회 논문지 제 51B권 8호 참조

정 중 호 (鄭 鍾 浩)

전기학회 논문지 제 53P권 1호 참조

이 은 웅 (李 殷 雄)

전기학회 논문지 제 53P권 1호 참조