

Analysis on the Operation Characteristics of Induction Motor Operated by Symmetric 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.

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.

최근 전력품질에 대한 관심증가로 새그나 스웰 등과 같은 일시적인 전압 변동시 부하기의 동작특성은 해석하였으나 [1] 지속적인 전압불평형의 경우에 대한 유도전동기의 해석은 이루어지지 않았다.

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 기기의 오동작 및 과열을 방지하기 위해 전압제어가 필요하다. 특히 유도전동기의 경우는 약간의 전압불평형에도 높은 전류 불평형을 초래하여 권선의 온도상승, 수명저하 및 효율감소로 시스템에 심각한 문제를 발생시킨다[1,2].

같은 분전반 또는 배전반에 연결된 설비에서 전압의 크기에 의한 불평형은 운전 조건 및 상황에 따라 발생한다. 이와 같은 전압불평형에 의해 구동되는 유도전동기는 역상분의 존재로 맥동 및 토크 리플이 발생하여 정밀한 속도제어나 균일한 제품생산이 필요한 곳에서는 심각한 결과를 낳을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 불평형된 전압이 전동기 단자에 인가될 때 출력특성의 변화를 찾기 위해 우선 유도전동기의 등가회로를 정상분 및 역상분으로 구분하고, 전류의 크기 및 임피던스 변화를 슬립에 따라 해석하였다. 또한 전압 불평형율의 존재로 나타나는 토크값의 변화를 슬립에 따라 정상분과 역상분으로 나누어 해석하였다.

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:Voltage Unbalance Factor)이다.

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

[†] 교신저자, 正會員 : 國立 原州大 電氣科 副教授 · 工博
E-mail : jgkim@sky.wonju.ac.kr

^{*} 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 2月 25日

最終完了 : 2004年 5月 14日

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.

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

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

식 (3)은 IEC의 선간전압에 대한 불평형율이다. 이 식은 현장측정시 위상을 고려하지 않고 실효치 전압의 크기만으로도 불평형율을 산정할 수 있다.

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

식 (3)에서 β 는 식 (4)로 계산한 것이다.

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

선간전압 불평형율(LVUR:Line voltage unbalance rate)은 식 (5)와 같다.

$$LVUR = \frac{\text{평균 선간전압 크기에서 최대전압편차}}{\text{평균선간전압}(V_{avg})} \times 100[\%] \quad (5)$$

식 (5)에서 평균전압 V_{avg} 는 식 (6)과 같다.

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (6)$$

식 (1), (3) 및 (5)에 의해 전압의 크기만으로 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	Unbalance ratio[%]
balanced	$127.0 \angle 0^\circ$	$127.0 \angle 240^\circ$	$127.0 \angle 120^\circ$	0
3ph-uv1	$121.9 \angle 0^\circ$	$125.1 \angle 240^\circ$	$126.0 \angle 120^\circ$	1
3ph-uv2	$118.2 \angle 0^\circ$	$125.09 \angle 240^\circ$	$126.0 \angle 120^\circ$	2
3ph-uv3	$115.41 \angle 0^\circ$	$123.12 \angle 240^\circ$	$128.0 \angle 120^\circ$	3
3ph-uv4	$113.31 \angle 0^\circ$	$120.1 \angle 240^\circ$	$130.0 \angle 120^\circ$	4
3ph-uv5	$110.1 \angle 0^\circ$	$121.0 \angle 240^\circ$	$131.0 \angle 120^\circ$	5

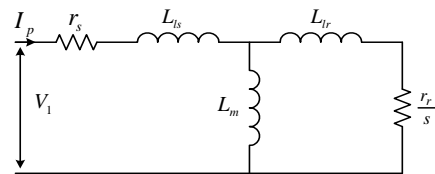
전압불평형에 대한 국제규격(EN-50160 or IEC 1000-3-x series)은 순간 최대값으로 10분간 값으로 측정할 경우 불평형율을 LV 및 MV에서는 2[%]이하, HV에서는 1[%]이하가 되도록 규정하고 있다. 전압불평형에 대해 이와 같이 제한 기준을 두는 이유는 유도전동기의 안정적인 동작확보를 위해서다.

2.2 불평형에 의한 전동기의 등가회로 및 동작특성

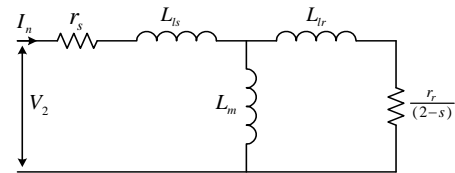
정상상태에서 유도전동기에 인가되는 상전압이 각각 V_a , V_b , V_c 일 경우 정상분, 역상분 및 영상분 전압은 식 (7)과 같다. 3상 평형된 전압이 전동기에 인가될 경우 문제되지 않지만, 전동기에 불평형 전압이 인가될 때는 역상분 및 영상분 전류의 존재로 효율 및 출력이 저하된다.

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

불평형된 전압의 인가시 유도전동기의 동작특성을 해석하기 위해서는 정상분의 역상분도 고려해야 한다. 그림 1은 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.



(a) 정상분 등가회로



(b) 역상분 등가회로

그림 1 유도전동기의 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of Induction motor

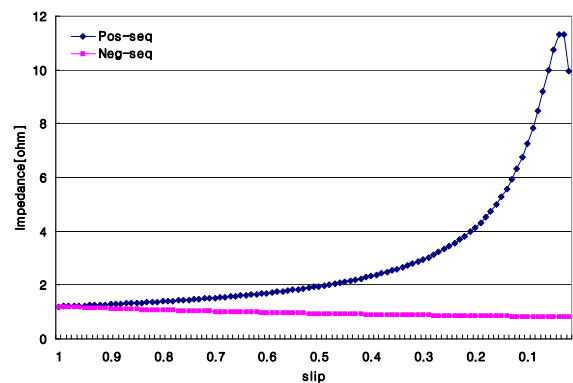


그림 2 슬립에 따른 역상분/정상분 임피던스

Fig. 2 Negative/Positive-sequence Impedance due to slip

그림 2는 표 2의 샘플자료를 참고로 그림 1의 등가회로에서 정상분, 역상분 임피던스값 Z_1, Z_2 를 슬립에 대해 나타낸 것으로서 무부하 또는 경부하시 및 정격부하 운전시 역상분에 비해 정상분 임피던스값이 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 즉 역상분 임피던스는 슬립에 거의 영향을 받지 않지만, 정상분 임피던스는 슬립에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

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 발생하는 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 대칭좌표법으로 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 만큼으로 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 발생시키는데 높은 전류를 발생하는 경우가 있다. 고정자에 역상분 전류의 존재는 회전자 철심에 고정자 주파수의 2배인 전류를 유기한다. 역상분 전류의 양이

지나치거나 지나칠 경우 회전자를 과열시키고 진동을 일으킨다.

불평형 전압 운전은 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. 유도전동기의 토크는 식 (13)과 같이 불평형율이 증가할 경우에도 정격 토크값은 감소폭이 낮지만 토크 맥동분은 매우 높다[7].

$$T_u = T_b \times K \times \left[1 - \left(\frac{\%VUF}{100} \right)^2 \right] \quad (13)$$

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 토크 리플은 정격부하 토크의 퍼센트로서 순시 최대 및 최소토크의 차이로 정의할 수 있다.

$$\text{Torque ripple} = \frac{T_{inst(max)} - T_{inst(min)}}{T_{rated}} \quad (14)$$

3. 특성 해석 및 결과 분석

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

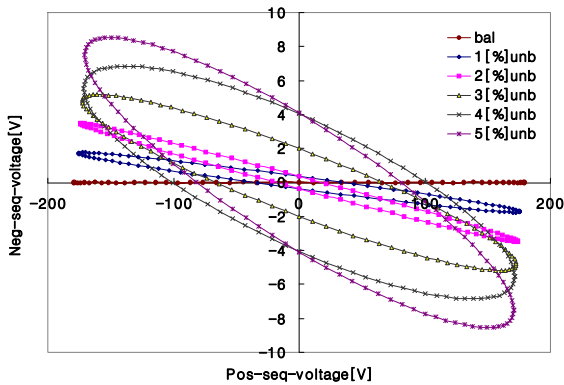
표 2 샘플 유도전동기 사양

Table 2 Specification of sample induction motor

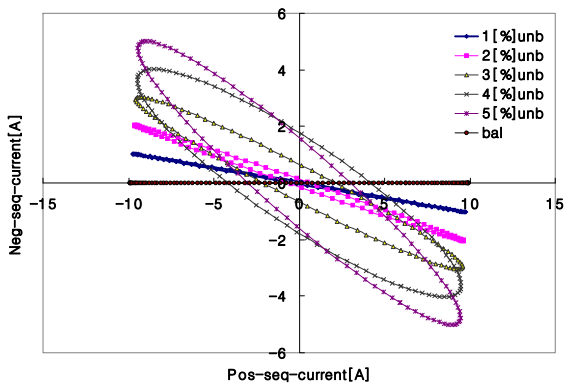
parameter	220[V], 4p, 3HP 60Hz
stator resistance, r_s	0.435[Ω]
rotor resistance, r_r	0.816[Ω]
stator leakage inductance, L_{ls}	0.002[H]
rotor leakage inductance, L_{lr}	0.002[H]
mutual inductance, L_m	0.0603[H]
Inertia moment, J	0.089[kg · m ²]
Friction coefficient, B	0.0089[Nm · m/s]

그림 3은 3마력 유도전동기를 3[%]의 슬립으로 운전하는 경우 불평형전압에 따른 정상분 및 역상분의 전압 및 전류 궤적을 나타낸 것이다. 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 그림에서 완전평형시는 x축은 직선으로 y축은 값이 0이지만 불평형율의 증가로 y축 폭이 증가하여 기울기가 증가하는 타원궤적을 그린다. 이와 같이 역상분의 존재는 출력감소 및 손실증가로 이어지는 부

작용을 받을 수 있다.

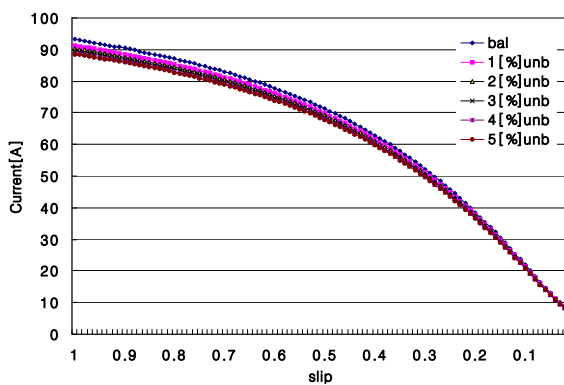


(a) 전압궤적

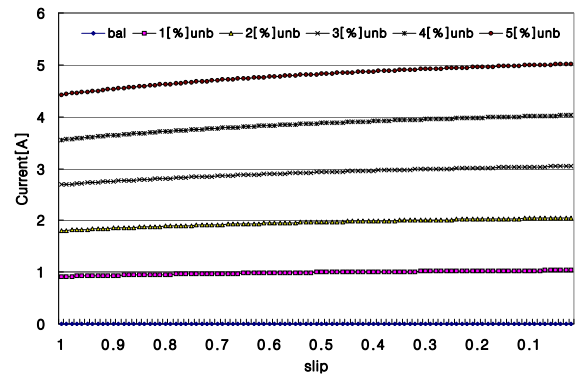


(b) 전류궤적

그림 3 정상분/역상분 전압·전류 궤적
Fig. 3 Positive/Negative sequence voltage·current locus



(a) Positive sequence current



(b) Negative sequence current

그림 4 정상분 및 역상분 전류
Fig. 4 Positive & Negative sequence current

그림 4는 전압불평형율의 변화에 따라 유도전동기를 운전할 경우 슬립에 대한 정상분 및 역상분 전류의 변화를 나타낸 것이다. 정상분 전류는 그림 4(a)에서와 같이 전압이 평형일 경우 기동시에 가장 높은 전류값을 나타내지만 불평형율이 높아짐에 따라 기동 전류값은 줄어드나, 정격속도 부근에서는 불평형율에 관계없이 일정한 정격전류값을 유지한다. 그림 4(b)의 역상분 전류는 슬립에 따라 거의 변동이 없지만 불평형율의 증가시 높아진다. 또한 전압불평형에 따라 정상분 전류값은 약간씩 감소하다가 정격속도 부근에서는 거의 변화가 작은 반면, 역상분 전류는 슬립의 변화에도 불구하고 거의 일정한 변화를 유지하고 있다.

그림 5는 전압불평형율에 따른 유도전동기의 출력특성을 슬립의 변화에 따라 계산한 것이다. 그림에서 3마력 유도전동기의 출력은 전압불평형율이 증가함에 따라 정동토크에서 가장 큰값을 나타내고, 정격속도 부근에서는 정격출력을 나타내지만 전압불평형율의 증가로 출력값은 약간씩 줄어든다.

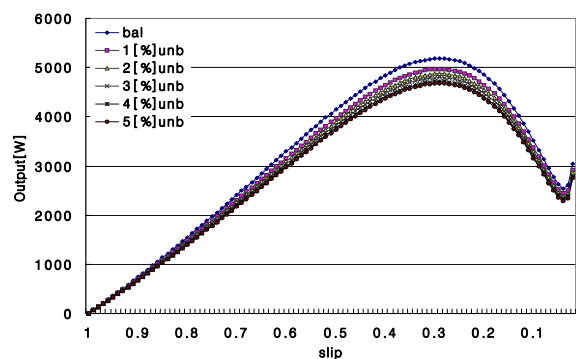
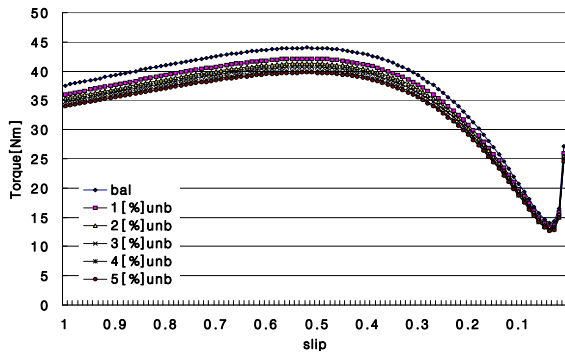


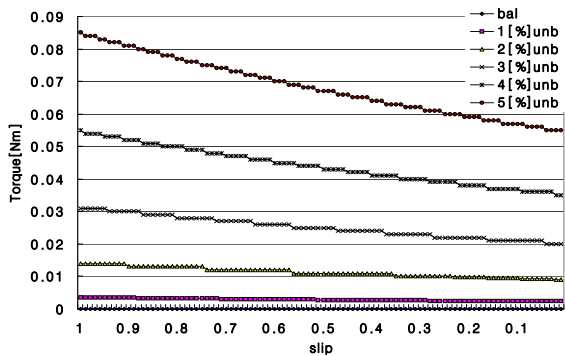
그림 5 전압불평율에 따른 전동기의 출력
Fig. 5 Output of motor due to voltage unbalance ratio

같은 전압 크기와 120°위상차를 가질 3상 전원이 부하에는 가장 적합한 전원시스템이지만, 조건에 따라 전압의 크기와 위상차가 발생된다. 이 경우에 부하기기의 동작특성 해석을 위해 3상 대칭 불평형시 전압불평형을 표 1 과 같이

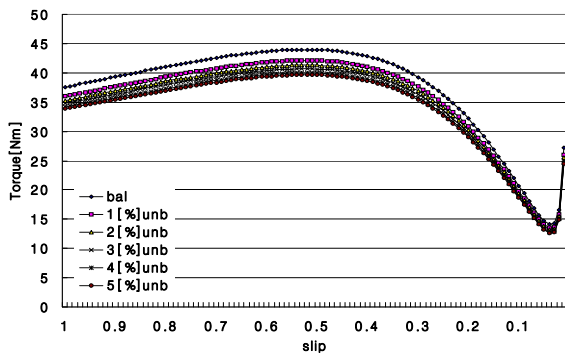
평형 및 1, 2, 3, 4, 5[%]의 불평형율로 변경하였을 경우 유도전동기의 토크 특성변화는 다음과 같다. 불평형전압이 유도전동기에 인가되었을 경우 역상분에 의한 영향을 확인하기 위해 정상분 및 역상분 토크를 분리 계산하였다. 그림 6(a)는 슬립에 따른 정상분 토크의 변화를 나타낸 것으로서 전압불평형율이 높아짐에 따라 역상분 토크성분의 미소증가로 인해 정상분 토크는 약간씩 감소한다. 그림 6(b)는 역상분 토크의 변화를 나타낸 것으로서 평형시는 제로이지만 역상분전압의 크기에 따라 토크는 약간씩 증가하며, 기동시에 비해 정격속도에 가까울수록 점차 줄어든다. 그림 6(c)는 정격출력토크를 나타낸 것으로서 정격 토크의 크기에 비해 역상분 토크가 작아 큰 감소를 나타내지 않는다.



(a) Positive-torque



(b) Negative-Torque



(c) Total torque

그림 6 전압 불평형율에 따른 토크
Fig. 6 Torque due to VUF

그림 7은 전압불평형율에 따른 3마력 유도전동기의 정격 운전시 출력 토크의 크기를 비교한 것이다. 전압이 평형일 때는 정격출력의 토크를 발생하지만, 불평형율이 증가함에 따라 출력토크값이 감소하다가 5[%]에서는 약 10[%]정도 줄어듦을 알 수 있다.

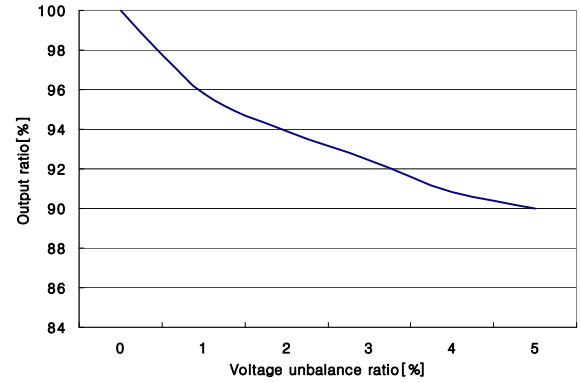


그림 7 3마력 유도전동기의 출력저하 곡선
Fig. 7 Derating curve of 3Hp IM

불평형된 전압이 유도전동기의 고정자에 인가될 경우 정상분에 대한 역상분 전류 성분의 증가는 권선의 온도상승, 출력 및 토크값을 저하시킨다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전압불평형율이 존재할 경우 기동시 정상분 전류의 감소로 큰 부하를 직입 기동하는 부하설비에서는 안정적인 토크를 얻을 수 없다.

따라서 전압불평형에 의해 발생하는 유도전동기의 출력 및 토크감소를 줄이기 위해서는 단상 및 3상 부하를 분리 운전하는 방식의 설계나 운전 그리고 전압불평형을 최소화시킬 수 있는 전력품질장치의 적용이 필요하다.

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 출력 및 토크 특성변화를 해석하였다.

전압 불평형율은 정상분에 대한 역상분의 비율로서 전동기에 불평형된 전압이 인가될 경우 역상분의 발생이 역방향 토크의 발생으로 출력저하로 이어질 수 있음을 정상분 및 역상분 전압 및 전류 궤적으로 표현하였다.

전압 불평형이 낮은 경우에는 역상분의 크기가 별로 큰 문제가 되지 않지만 높아질 경우 토크는 감소한다. 따라서 정격출력을 확보하기 위해서는 전압 불평형율이 최소화되도록 부하의 분배나 3상 동력 및 단상 전동·전열부하를 분리시키는 방법의 채택이나 전압불평형을 줄이는 전력품질개선장치를 설치해야할 것이다.

감사의 글

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

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, 1996
- [7] NEMA MG-1-2003, “Motors and Generators”

정 중 호 (鄭 鍾 浩)



1969년 6월20일생. 1993년 충남대학교 공과대학 전기공학교육과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 박사과정수료. 현재 경기기계공업고등학교 공동실습소 교사

Tel : 02-970-8922

E-mail : jeong-jh@hanmail.net

이 은 웅 (李 殷 雄)



1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평위원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~97), 1997년~2000년 당학회 부회장. 2004년 현재 당학회 회장, 현재 충남대 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr

저 자 소 개



김 중 겸 (金 宗 謙)

1961년 10월 3일생. 1991년 충남대학교 대학원 졸업. 1996.2 동대학원 졸업 공학박사 1996년~현재 국립원주대학교 전기과 부교수. 현재 당학회 B부문 및 본부 편집위원

Tel : 033-760-8423

E-mail : jgkim@sky.wonju.ac.kr

손 홍 관 (孫 洪 寬)

전기학회 논문지 제53P권 2호 참조