고조파 성분이 포함된 전압 불평형 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석

論 文
54P-3-4

Analysis on the Operation Characteristics of Induction Motor Operated by Unbalanced Voltage with Harmonics Components

金 宗 謙† · 朴 永 鎭* · 李 殷 雄**
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Eun-Woong Lee)

Abstract - Most of the loads in industrial power distribution systems are usually balanced and connected to three power systems. However, in the user power distribution systems, partial loads are single & three phase and unbalanced, generating voltage unbalance by the impedance mismatching. Voltage unbalance has detrimental effects on three-phase induction motors, including over heating, line-current unbalance, derating, torque pulsation, low efficiency, etc. This paper presents a scheme on operation states of a three-phase induction motor under the unbalanced voltages with harmonics components. Three-phase voltages applied to the stator winding of the studied induction motor are controlled by respectively adjusting not only fundamental but also harmonics components. Harmonic components at the voltage unbalanced factor(VUF) of the three-phase source voltages can then be examined the different values of VUF on machine's operation characteristics.

Key Words : Voltage Unbalance, Induction Motor, Symmetrical Components, Torque Pulsation, Harmonics

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 발생되는 문제에 대한 대책수립도 시스템의 신뢰성제고를 위해 매우 중요하다.

전기품질에서 부하의 운전중에 지속적으로 영향을 미치는 것으로서는 고조파와 전압불평형이 있다[2-4]. 고조파는 비선형부하의 사용시에 발생하는 현상으로서 전압불평형과 밀접하다. 저압 수용가의 단상 및 3상 부하에 전력을 공급하는 3상 4선식 시스템에서 컴퓨터 및 전력변환장치와 같은 비선형부하의 사용증가로 전압파형에는 고조파 성분이 포함된 경우가 많아지고 있다. 특히 3상 전원으로 구동하는 유도전동기의 경우 약간의 전압불평형에도 높은 전류불평형을 초래하여 권선의 온도상승, 수명저하 및 효율감소로 시스템에 심각한 문제를 발생시킨다[4,5].

전압불평형에 대한 해석은 기본파 성분만의 크기와 위상각을 기준으로만 이루어져 왔지만[5], 실제 전압불평형에 대한 벡터는 기본파 성분외 약간의 고조파 성분이 포함되어 있으므로 정확한 특성해석을 위해서는 고조파성분을 고려한 해석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 3상 4선식 전원공급 시스템에서 비선형 부하의 사용증가로 전압파형에 고조파 성분이 포함된 경우 불평형 전압으로 운전되는 3상 유도전동기의 동작특성을 해석하고자 한다.

† 교신저자, 正會員 : 國立 原州大 電氣科 副教授 · 工博
E-mail : jgkim@wonju.ac.kr
* 正 會 員 : 國立 原州大 電氣科 副教授 · 工博
** 正 會 員 : 忠南大 工大 教授 · 工博
接受日字 : 2004年 12月 30日
最終完了 : 2005年 4月 7日

2. 전압불평형과 유도전동기의 동작특성

2.1 전압불평형

전압불평형은 전력공급 시스템에서 불균형의 부하분배나 고르지 못한 임피던스에 의해 주로 발생한다. 이들 전압불평형은 대개 부하의 형태 및 3상 전원을 사용하는 수용가와 많이 관련되어 있다.

전압불평형에 의한 영향을 해석하기 위한 불평형율(VUF:Voltage Unbalance Factor)은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대한 역상분(V_2)의 비율로 정의하고 있다[2-5].

$$\mathrm{VUF} = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%] \tag{1}$$

3상 불평형 선간전압 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}를 식 (2)와 같이 정상분 V_1과 역상분 V_2의 대칭성분으로 변환하면 불평형 조건하에서 유도전동기의 동작을 해석할 때 편리하다[6].

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3}$$
$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a V_{ca}}{3} \tag{2}$$

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

전압불평형율 계산시 기본파 전압의 크기와 위상각을 고려하여 대칭좌표법에 의해 정상분에 대한 역상분의 비율로 표현하면 일정한 값을 나타내지만, 고조파 성분이 포함될 경우 전압불평형율은 지속적인 변동성분을 가진다. 따라서 정확한 기기의 동작특성을 해석하기 위해서는 변동하는 전압불평형율을 고려해야 한다.

그림 1은 3상 4선식 저압배전시스템에서 측정한 전압파형을 나타낸 것으로서 순수한 정현파가 아닌 약간의 고조파 성분이 포함된 정현파 전압을 나타낸 것이다.

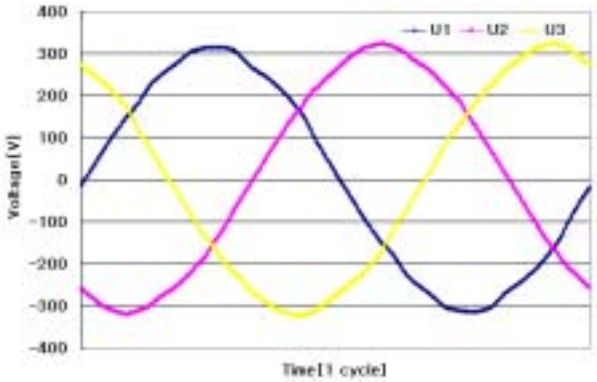


그림 1 전압파형

Fig 1. Voltage waveform

그림 1의 전압파형을 푸리에 급수변환에 의해 기본파와 각 차수의 크기와 위상각으로 나타내면 표 1과 같다.

표 1 전압의 크기와 위상각

Table 1 Magnitude and phase-angle of voltage

차수	U1상		U2상		U3상	
	크기	위상(°)	크기	위상(°)	크기	위상(°)
1	223.39	0	221.85	-119.0	220.48	120.37
2	0.03	100.84	0.06	121.19	0.09	92.95
3	0.53	89.60	0.86	131.10	0.62	91.98
4	0.05	-30.69	0.02	-65.93	0.03	-136.9
5	3.10	50.25	2.36	154.64	3.11	-77.88
6	0.04	-39.55	0.03	-125.9	0.05	64.79
7	1.95	137.10	1.78	82.39	2.23	-56.51
8	0.02	76.35	0.02	-167.1	0.05	-33.61
9	1.11	-116.1	0.41	-38.18	1.22	-92.89
10	0.02	55.27	0.01	-10.66	0.02	-170.9
11	0.16	-81.0	0.21	130.72	0.72	77.70
12	0.02	-22.60	0.02	-98.44	0.03	-41.40
13	0.61	-158.7	0.48	140.32	1.64	33.46
14	0.02	106.94	0.02	45.81	0.02	119.19
15	0.07	19.63	0.26	125.63	0.70	105.04

그림 1에서와 같이 전압불평형이나 비선형부하의 사용으로 전압파형에는 기본파 외 작은 값이지만 표 1과 같이 고조파 성분이 포함되어 있지만 본 논문에서는 전압불평형에 의한 영향의 해석에서 고조파 성분 중 홀수조파만으로 15차까지만 고려하였다.

그림 2는 전동기에 입력되는 3상 전압의 실효치로서 그림 1과 같은 전압에 1주기 동안 샘플링을 통해 계산한 것으로서 역상분과 고조파의 포함 때문에 일정한 주기의 맥동을 나타내고 있다.

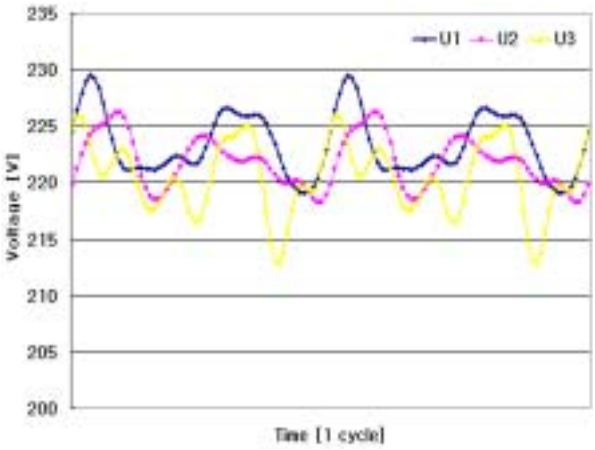


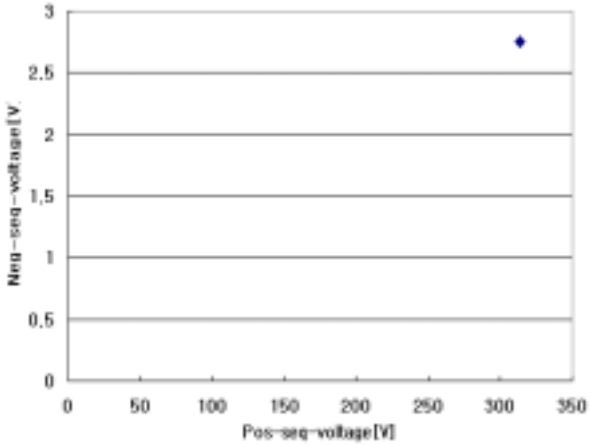
그림 2 1주기 샘플링 동안의 실효치 전압

Fig 2. Voltage rms during 1-cycle sampling period

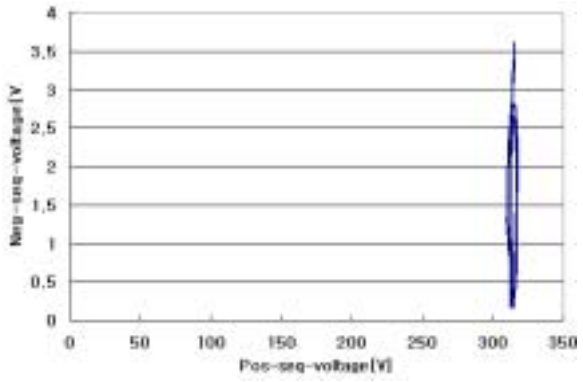
그림 1 및 표 1에서와 같이 전압 및 전류파형은 부하의 불평형이나 비선형부하 또는 임피던스의 영향으로 기본파외 고차 조파성분이 포함되어 있다. 따라서 전압불평형을 계산할 때는 고조파성분이 포함되어야 정확한 결과를 유도할 수 있다.

그림 3는 그림 1에 대한 전압불평형율을 정상분에 대한 역상분의 변화를 나타낸 것으로서 그림 3(a)와 같이 x축을 정상분전압, y축을 역상분 전압으로 정한 경우 그림 1과 같은 파형에서 기본파성분만으로 표현한 경우 전압불평형율은 0.876[%]로서 일정하여 하나의 점으로 표현되지만, 그림 3(b)와 같이 기본파와 고조파성분을 포함한 해석시 불평형율이 하나의 값을 가지지 않고 약간의 타원형 궤적형태로 지속적인 변화가 발생함을 알 수 있다. 그림 3(c)는 그림 3(b)의 오른쪽 부분의 궤적을 확대한 것으로서 그림 3(a)와는 달리 궤적형태가 일반적으로 기본파 성분만을 고려한 전압불평형율과는 달리 매우 복잡한 궤적을 형성한다.

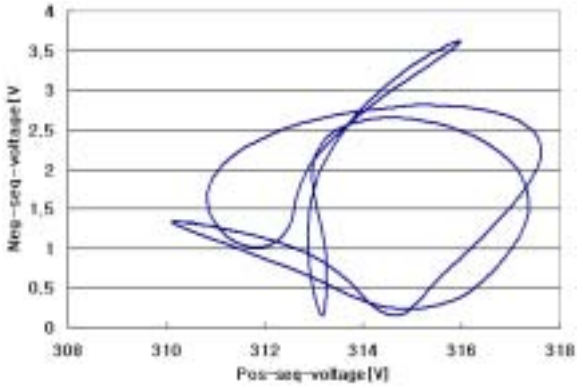
따라서 그림 3(c)와 같이 부하에 공급되는 전압파형에 고조파가 포함되어 전압불평형이 복잡한 궤적을 형성할 경우 기기의 특성에 여러 가지 부작용을 발생할 수 있다.



(a) with fundamental component



(b) with harmonic components



(c) with harmonic components(expand)

그림 3 전압파형의 정상분 및 역상분 전압
Fig 3. Pos-Neg-seq-component of Voltage

그림 4는 1주기 동안 고조파성분을 고려한 전압불평형의 변화를 나타낸 것으로서 그림 3(b), (c)를 식 (1)로 표현한 것과 같은 것으로서 1주기 동안 2번의 반복성 동작을 나타내고 있는 것으로서 전압 파형에서 고조파 차수가 많이 포함될수록 반복성 동작에서도 맥동 회수가 많아진다. 또한 그림 4에서와 같이 기본파성분만의 크기으로 구한 0.876[%]의 일정한 전압불평형율에 비해 최대 1.107[%]에서 최소 0.05[%]의 변동성분이 전압불평형율을 나타내고 있다.

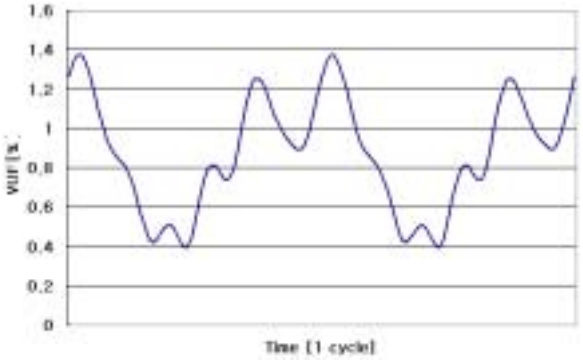
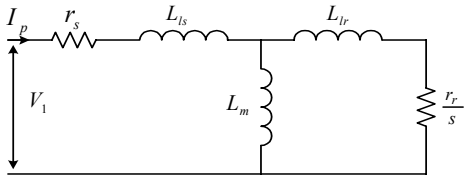


그림 4 고조파 성분을 고려한 전압 불평형율
Fig 4. VUF considering Harmonic components

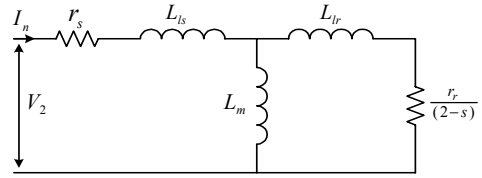
2.2 전동기의 등가회로 및 불평형에 의한 동작특성

3상 평형된 전압이 전동기에 인가될 경우 문제되지 않지만, 전동기에 불평형 전압이 인가될 때는 역상분 및 영상분 전류가 흐르게 된다. 역상분 전압은 회전자의 회전방향과 반대로 회전하는 자속을 공극내에서 발생시키는데 높은 전류의 발생시 릴레이로 보호되지 않는다면 심각한 과열이나 권선손상을 일으킬 수 있다.

그림 5는 3상 유도전동기의 등가회로를 나타낸 것으로서 정상분 전압 V_1에서 슬립 s로 동작하는 성분과 역상분 전압 V_2에서는 (2-s)로 동작하는 성분의 합이 전동기의 출력특성이 된다.



(a) positive sequence equivalent circuit



(b) negative sequence equivalent circuit

그림 5 유도전동기의 등가회로
Fig 5. Equivalent circuit of Induction motor

유도전동기는 내부적으로 회전하는 자계를 가진 비동기기로서 그 크기는 정상분 및 역상분에 비례한다. 역상분 자계는 정상분과는 반대의 개념으로 불평형 전압이 인가될 경우 전체 회전자계는 원형이 아닌 타원형 형태를 나타낸다. 특히 고조파 성분이 포함될 경우 타원형태보다 더욱 복잡한 형태의 궤적을 그리게 된다. 이와 같은 결과는 전동기 출력토크에 맥동성분에 그대로 반영된다[5].

전압불평형이 높아질수록 고조파전류에 의한 손실증가 및 온도상승으로 전동기는 출력감소로 원하는 출력을 확보하기 위해서는 전동기의 출력증가가 요구된다. 전동기내 흐르는 정상분 및 역상분 전류는 각각 상전압, 전동기 파라미터와 슬립의 함수로서 다음과 같다.

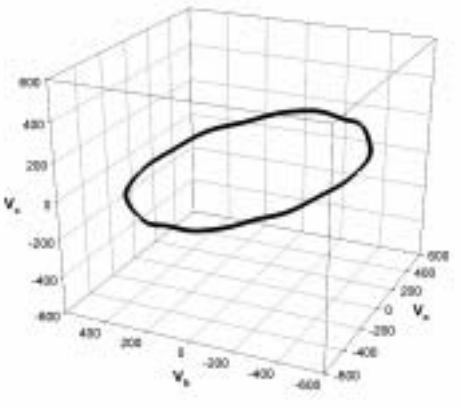
$$I_P = \frac{V_P}{\sqrt{\left(r_s + \frac{r_r'}{s}\right)^2 + (x_s + x_r')^2}} \tag{3}$$

$$I_N = \frac{V_N}{\sqrt{\left(r_s + \frac{r_r'}{2-s}\right)^2 + (x_s + x_r')^2}} \tag{4}$$

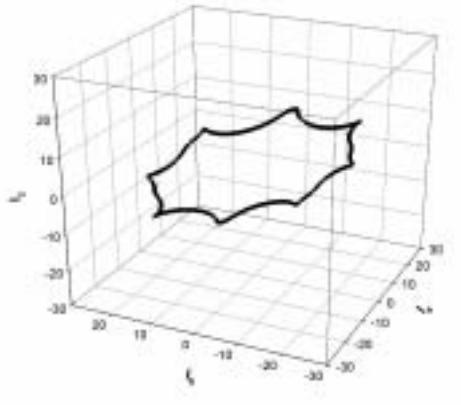
전압불평형시 고정자에 유입되는 각 상전류는 식 (5)와 같이 정상분 및 역상분의 대칭좌표성분으로도 구해진다.

$$\begin{aligned} I_a &= I_{fs} + I_{rs} \\ I_b &= a^2 I_{fs} + a I_{rs} \\ I_c &= a I_{fs} + a^2 I_{rs} \end{aligned} \tag{5}$$

그림 6(a)은 그림 1과 같은 전압파형을 순시 궤적형태로 나타낸 것으로서 각 상에 인가되는 전압에는 고조파와 역상분의 존재로 인해 순수한 원에서 약간 벗어나 있음을 확인할 수 있고, 그림 6(b)는 불평형전압으로 인가된 경우 정상분 및 역상분 전류와 임피던스 성분을 고려하여 식 (5)에 의해 각 상의 전류성분으로 나타낸 것으로서 고조파 성분이 상당이 포함되어 있음을 알 수 있다.



(a) voltage waveform



(b) current locus

그림 6 전압 및 전류궤적

Fig 6. Locus of voltage and current

유도전동기의 상당 기계적 출력 P_m 은 식 (6)과 같이 정상분에서 역상분을 제외한 만큼으로 표현된다.

$$P_m = I_p^2 r_r \frac{(1-s)}{s} - I_n^2 r_r \frac{(1-s)}{(2-s)} \tag{6}$$

식 (6)에서 역상분 전류에 의한 감소분을 제외할 경우 상당 토크는 식 (7)과 같이 동기각속도 W_{syn} 에 반비례한다.

$$T = r_r \left(\frac{I_p^2}{s} - \frac{I_n^2}{(2-s)} \right) / W_{syn} \tag{7}$$

전동기에 공급되는 입력전력 P_e은 식 (8)과 같이 전압과 전류의 대칭성분에 의해 나타내진다.

$$P_e = Re(V_p \overline{I_{fs}} + V_n \overline{I_{rs}}) \tag{8}$$

3. 특성 해석 및 결과 분석

최근 수용가 저압 배전시스템의 경우 단상 및 3상 부하에 동시에 전원공급이 가능한 380/220[V] 시스템의 구성이 널리 사용되고 있는데 이들 시스템에 연결된 부하에는 전등 및 전열부하와 같은 선형부하뿐만 아니라 전력변환장치와 같은 비선형 부하의 사용증가는 전압불평형의 크기뿐만 아니라 일정하지 않은 변화율을 발생시키고 있다. 전압불평형의 비율은 각 상전압의 크기와 위상각에 따라 달라지지만, 일시적인 전압불평형에 의한 동작특성을 해석하기 위해서는 기본파외 고조파 성분이 포함된 해석이 필요하다. 본 논문에서의 해석은 전압의 기본파 크기 만에 의한 것과 홀수 차 고조파 성분을 포함한 불형형율에 따른 특성해석을 실시하였다. 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]

해석의 편리함을 도모하기 위해 다음과 같은 간단한 가정을 두었다.

① 등가회로내 모든 요소는 일정하다.

② 마찰 및 풍손을 포함한 모든 기계적인 손실은 무시하였다.

그림 7은 표 2와 같은 모델 전동기로 슬립 2[%]로 전압불평형율이 그림 4와 같이 변화하여 운전하는 경우 정상분 및 역상분 전류의 변화를 나타낸 것으로서 정상분 및 역상분 성분이 일정한 주기로 맥동하는 형태를 지니므로 일정한 원형 궤적을 구성하지 못한다.

그림 7에서와 같이 시간에 따라 정상분 전류의 크기는 변화율이 낮은 형태를 나타내지만 고조파성분의 존재로 인해 역상분 전류는 맥동성분이 다소 높아짐을 알 수 있다.

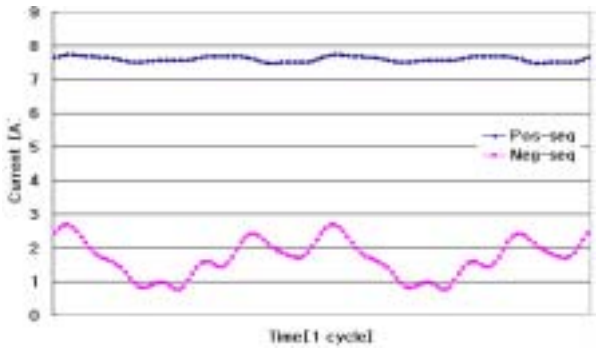
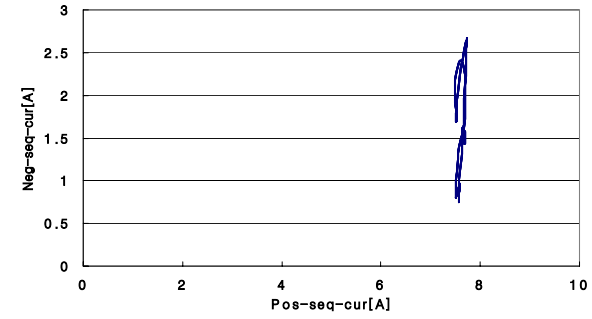
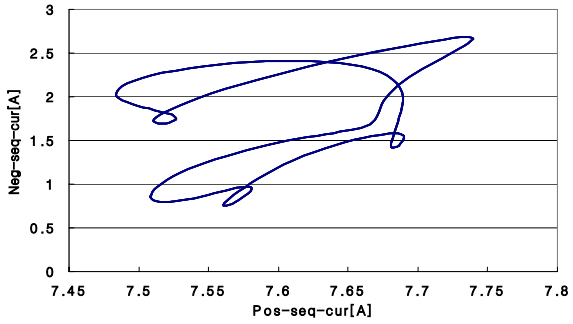


그림 7 정상분 및 역상분 전류
Fig 7. Positive-Negative sequence current

그림 8(a)는 정상속도로 운전하는 유도전동기에 공급되는 고조파성분이 포함된 전압에 의해 나타나는 전류성분을 그림 7의 정-역상분 전류를 각각 x축과 y축으로 나누어 궤적형태로 표현한 것으로서 그림 3과 같은 형태를 나타내고 있다. 그림 8(b)은 그림 8(a)의 파형을 확대한 것으로서 기본파 전압성분만으로 구성된 전압불평형에 의한 유도전동기의 정-역상분 전류를 구할 경우 직선 또는 타원형 궤적을 그리지만, 전압파형이 왜형될 경우 하나의 점궤적을 나타내는 그림 3(a)와는 달리 고조파 성분이 포함되어 있으므로 그림 3(b)와 같은 형태의 일정하지 않은 궤적을 그리게 된다. 따라서 일정한 속도로 회전할 수 없게 된다.



(a) with harmonic components



(b) with harmonic components(expand)

그림 8 정상분 및 역상분 전류궤적
Fig 8. Positive-Negative sequence current locus

부하에 필요한 최적의 출력을 보장하기 위해서는 고조파성분이 포함되지 않은 최소의 전압불평형율이 필요하다. 그러나 저압으로 공급되는 배전시스템에서 전압불평형은 부하의 불평형운전과 비선형부하의 사용으로 발생한다. 그림 1과 같은 전압파형에서 기본파만으로 공급될 경우 식 (6)으로 구한 발생출력은 2,313[W]이지만, 고조파성분이 포함된 전압이 인가될 경우 발생하는 출력성분의 크기는 그림 9와 같이 최대 2,390에서 최소 2,240[W]로 변화함을 알 수 있다.

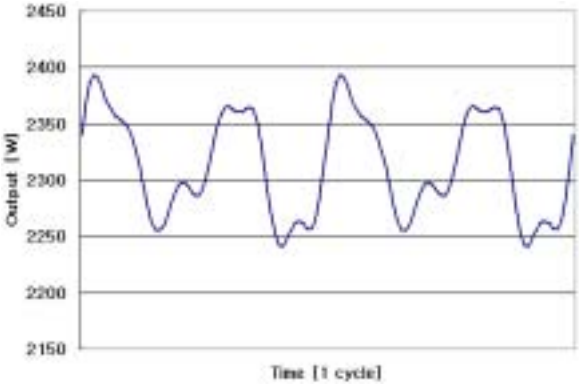
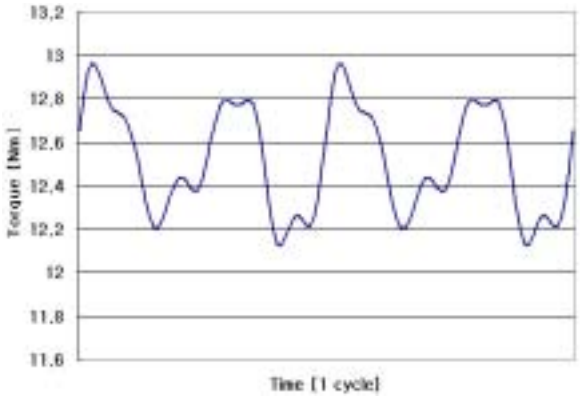
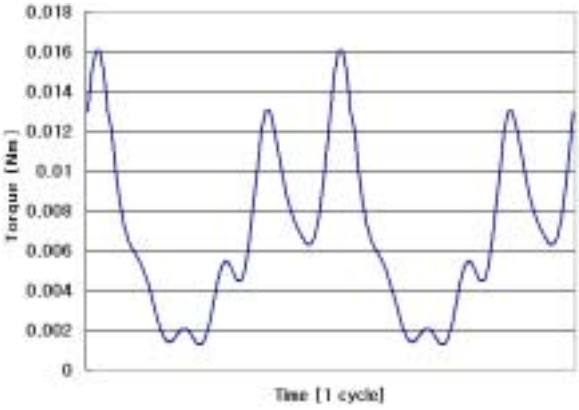


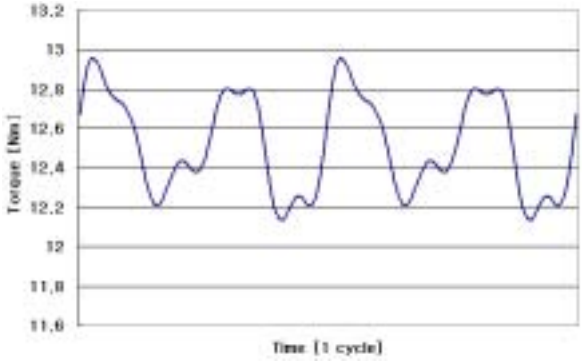
그림 9 전압불평형시 출력
Fig 9. Output at VUF



(a) Positive torque



(b) Negative torque



(c) Total torque

그림 10 불평형시 토크

Fig 10. Torque at VUF

그림 10 (a), (b), (c)는 전압불평형에 고조파 성분이 포함된 경우 각각의 정상분, 역상분 및 합성 토크곡선을 나타낸 것이다. 전압불평형율이 0.876[%]인 일정한 크기의 기본파 전압성분만을 고려한 운전시에 전동기의 토크는 12.519[Nm]로 일정하지만, 그림 10(a)의 경우와 같이 고조파성분을 고려한 전압불평형율의 운전시 정상분 토크는 12.125에서 12.965[Nm]사이 일정한 주기로 변동하며, 역상분에 의한 토크의 크기도 역시 0.00124에서 0.016[Nm]로 같은 변화를 한다. 그림 10(c)는 역상분이 존재하지 않을 경우 발생할 수 있는 토크 크기로서 정상분과 역상분을 합한 결과로서 최소 12.134에서 최대 12.959[Nm]로 주기적인 맥동성분이 포함되어 있음을 알 수 있다.

단상 및 3상 부하에 전력을 동시에 공급할 수 있는 시스템에서 전압불평형의 발생은 많은 문제를 발생하고 있다. 특히 비선형부하의 사용으로 전압파형에 고조파성분이 포함되고 있다. 이와 같은 상황에 사용되고 있는 유도전동기의 경우 전압불평형으로 역상분의 전류의 존재는 맥동성분을 발생하여 출력변동 및 맥동토크의 발생으로 이어진다.

그림 11은 고조파 성분이 포함된 전압불평형 전압이 전동기에 인가될 경우 효율곡선을 나타낸 것으로서 시간에 따라 효율값이 일정하지 않고 순간적인 변화가 발생함을 알 수 있다.

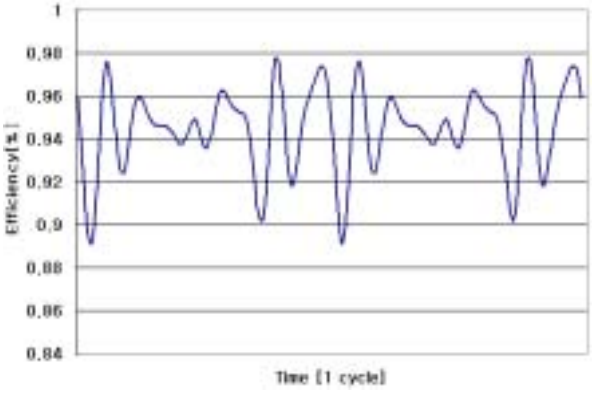


그림 11 전압 불평형시 효율

Fig 11. Efficiency at VUF

전압불평형에서 고조파의 존재로 의해 발생하는 유도전동기의 토크 맥동을 줄이기 위해서는 단상 및 3상 부하를 분리 운전하는 방식의 설계나 운전 그리고 전압불평형의 최소화와 고조파성분을 줄일 수 있는 전력품질장치의 적용이 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 전압불평형의 내용 전개와 전압불평형율에 고조파 성분이 포함된 경우의 불평형율의 변화를 나타내었으며, 산업현장에서 많은 전력을 소비하고 있는 전동력설비에 적용하여 불평형율에 따른 전압 및 전류궤적, 출력 및 토크 특성변화를 해석하였다.

3상 유도전동기에 고조파 성분이 포함된 불평형된 전압이 인가될 경우 역상분의 발생이 변동하여 토크 맥동으로 이어짐을 전압·전류 궤적으로 나타내었다.

전압 불평형이 낮은 경우에는 역상분의 크기가 별로 큰 문제가 되지 않지만 높아질 경우 토크는 감소한다. 따라서 정격출력을 확보하기 위해서는 전압 불평형율의 최소화와 안정된 토크를 확보하기 위해 고조파 성분이 제거되도록 부하의 분배나 3상 동력 및 단상 전등·전열부하를 분리시키는 방법의 채택이나 전압불평형을 줄이는 전력품질개선장치를 설치해야할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 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, 손홍관, 정종호, 이은웅, “대칭 불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석”, 대한전기학회 논문지(P), 제 53권 제 3호, pp.110-115, 2004. 9

[3] 김종겸, 손홍관, 정종호, 이은웅, “비대칭 전압불평형에 의한 유도전동기의 동작특성 해석”, 대한전기학회 논문지(P), 제 53권 제 2호, pp.58-64, 2004. 6

[4] 김종겸, 박영진, 정종호, 이은웅, “불평형 전압운전시 유도전동기의 동작특성 해석”, 대한전기학회 논문지(B), 제 53권 제 6호, pp.372-379, 2004. 6

[5] Yaw-Juen Wang, "Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor", IEEE Trans EC, Vol.16, No.3, pp270-275, Sep. 2001

[6] NEMA MG-1-2003, "Motors and Generators"

저 자 소 개

김 종 겸 (金 宗 謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1991년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 졸업 공학박사 1996년~현재 국립원주대학 전기과 부교수. 현재 당학회 B부문 및 본부 편집위원, P부문 편집위원장

Tel : 033)760-8423

E-mail : jgkim@wonju.ac.kr

박 영 진(朴 永 鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 국립 원주대학 전기과 부교수.

Tel : 033)760-8424

E-mail : popspark@wonju.ac.kr

이 은 웅 (李 殷 雄)

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

Tel : 042)821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr