

불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석

(Characteristics Analysis of Power Capacitor with Unbalanced Voltage Operation)

김종겸* · 박영진 · 이은용

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Eun-Woong Lee)

요 약

3상 4선식 전원공급에서 부하의 불평형 운전에 의한 전압 불평형은 전류 불평형을 일으켜 기기의 손실증가에 따른 출력 감소로 전원용량을 증가시키는 것은 물론이고 전기 품질에도 나쁜 영향을 미치고 있다.

전력용 커패시터는 유도성 부하의 역률 보상과 전원을 안정시키기 위해 사용되며, 유도전동기의 여자에 필요한 자화성분을 전원을 대신하여 제공하기도 한다. 전압 불평형이 지속될 경우 커패시터에 전압 스트레스로 작용하여 절연 고장을 일으킬 수 있다.

본 논문에서는 역률 개선용 커패시터가 전압 불평형 증가에 의해 받는 영향을 해석한 결과 전압 및 전류의 크기가 함께 증가하여 스트레스는 점차적으로 높아진다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

In the three phase four wire system, voltage unbalance caused by the unbalanced load operation, gives rise to current unbalance and de-rates by the increase of machine's loss and eventually enlarges power capacity and besides has a bad effect on power quality.

Power capacitor has been used for the power factor correction of inductive load and the voltage stability of power system. And it uses instead of power side for magnetic excitation of induction motor. If voltage unbalance keeps up, it affects on voltage stress at the power capacitor and finally can be caused breakdown.

In this paper, we analyzed that voltage and current of power capacitor increases by the voltage unbalance factor and its stress is growing more and more.

Key Words : Voltage unbalance, Power capacitor, Reactive power, p-q theory, Induction motor

1. 서 론

전기품질은 대부분 전압에 관련되는 것으로서 새 그러나 스웰 등 일시적인 영향을 주는 것과 고조파나 불평형 전압 공급 등과 같이 시스템 운전 중 지속적으로 전원 및 부하에 영향을 주는 것도 있다[1-2]. 우리나라 저압 수용가의 경우 단상 및 3상 부하를

* 주저자 : 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8781
E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr
접수일자 : 2008년 1월 22일
1차심사 : 2008년 2월 11일
심사완료 : 2008년 3월 4일

동시에 사용할 수 있는 3상 4선식 설비를 많이 이용하고 있다. 이 시스템에서는 부하 불평형이 최소화 되도록 설계하지만, 정상적인 운전에서도 부하의 불평형으로 인해 전압 불평형이 나타난다[1-2].

부하에 공급되는 전압은 같은 크기에 위상차가 일정한 전원이 공급되는 경우가 가장 이상적이지만 실제로 부하의 불안정 운전 등으로 인해 전압 불평형이 존재하게 된다. 이들 전압 불평형이 존재할 경우 전력특성의 변화로 부하의 불안정이 발생할 수 있다.

전압 불평형이 존재할 경우 전류 불평형으로 이어져 손실증가에 의한 출력 감소 및 전원 용량의 확대를 요구할 수 있다. 전압 불평형으로 영향을 받을 수 있는 대표적인 선형 부하는 유도전동기이다.

유도전동기는 자화를 위해 무효전력이 필요하다. 여자를 위해 필요한 무효전력을 전원 측에서 끌어들이는 경우 공급전력이 증가하기 때문에 부하 측에서 커패시터를 설치하여 대신 무효전력을 공급하는 경우가 대부분이다. 따라서 공급전력인 피상전력을 줄이기 위해서는 일정한 양의 무효전력을 전원 측을 대신할 수 있도록 역률보상용 커패시터가 사용된다.

커패시터의 수명 전기적 단축 요인으로는 전압 및 전류이다[3-4]. 전압 불평형 운전은 지속적으로 기기에 나쁜 영향을 줄 수 있는 요소 중의 하나이다.

본 연구에서는 유도성 부하인 전동기에 무효전력 보상을 위한 전력용 커패시터 설치시 각 상의 전압 크기 차이에 의한 전압 불평형에 대해 전력특성 및 부하의 동작변화를 해석하고자 한다.

2. 전압 불평형 및 전력특성

2.1 전압 불평형

전압 불평형은 3상 전원에서 단상부하의 불평형 배분과 운전 그리고 불평형된 3상 부하 임피던스 연결로 발생하기도 하고, 평형된 3상 부하라도 불평형 전원에 연결되면 유입 전류는 불평형이 되어 3상의 각상에 서로 다른 전압강하로 발생한다[1-2,5].

전압 불평형율(VUF: Voltage Unbalance Factor)은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다.

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

식 (1)에서 정상분 V_1 과 역상분 V_2 은 3상 불평형 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 식 (2)와 같은 대칭성분으로서 불평형 조건하에서 부하기의 특성 동작을 해석할 때 편리하다.

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

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

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

현장에서 3상 선간전압만의 측정으로 식 (3)을 이용하면 전압불평형율을 식 (2)보다 쉽게 정확한 값을 구할 수 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3)$$

식 (3)에서 β 는 다음으로 구한 것이다.

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

전압 불평형이 증가할 경우 선형적인 전류 불평형으로 이어져 손실증가로 인해 기기의 출력을 감소시키는 요인으로도 작용한다. 그래서 불평형은 최소화 될 수 있도록 시스템의 설계나 운전이 필요하다.

2.2 전력 특성

그림 1과 같이 전원과 부하측 전력의 흐름을 설명하기 위해서는 전력변환이론(p-q theory)을 사용한다. p-q 이론은 3상 전력시스템의 동작특성을 이해하는데 매우 편리하다[6-7].

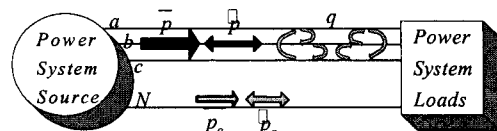


그림 1. p-q 이론 전력 성분
Fig. 1. p-q theory power components

불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석

3상 회로를 좌표변환 할 경우 순시 유효 및 무효전력을 쉽게 구할 수 있다. 그림 1에서와 같이 전원 측에서 부하 측으로 순수한 흐름을 의미하는 유효전력(p)은 식 (4)와 같이 유효전력의 평균값(\bar{p}) 및 교번값(\tilde{p})으로 나타낼 수 있다.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} = v_d i_d + v_q i_q \quad (4)$$

무효전력(q)은 시스템 상 서로 교환되는 전력 즉, 대응되는 바람직하지 못한 전류와 관련 있는 것으로서 전원 측과 부하 측 사이 에너지의 상호 이동을 나타낸 것으로서 실질적인 에너지의 전달은 없지만 전동기의 경우 필요한 여자전류를 형성하는데 필요한 성분으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = v_d i_q - v_q i_d \quad (5)$$

부하에 사용되는 유효분과 사용되지 않고 전원 측과 부하 측 사이를 왕래하는 무효전력성분의 벡터합인 피상전력(s)은 식 (6)과 같다.

$$s = p + jq = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (6)$$

전원 측에서 공급되는 피상전력에 대해 유도전동기에 제공되는 유효전력성분의 비율로 환산할 경우 식 (7)과 같이 역률로 나타낼 수 있다.

$$pf = \frac{p}{s} \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

3.1 파라미터 산출

그림 2는 3상 전원과 부하 측의 전력 흐름을 나타낸 것이다. 전동기의 출력은 P_2 이고, 전동기에 의해 흡수되는 무효전력 Q_m 과 커패시터에 의해 공급되는 무효전력이 Q_c 이기 때문에 부하에 의해 전체적으로 흡수되는 무효전력은 $Q_L (= Q_c + Q_m)$ 이다.

역률보상용 커패시터 설치시 전압불평형의 변화에 따른 특성해석을 위해 사용한 유도전동기의 파라

미터는 표 1과 같다.

3상 380[V] 2.2[kW]에서 역률보상용으로 권장되고 있는 커패시터는 15[μ F]로서 정격용량으로 환산할 경우 816.56[var]가 된다.

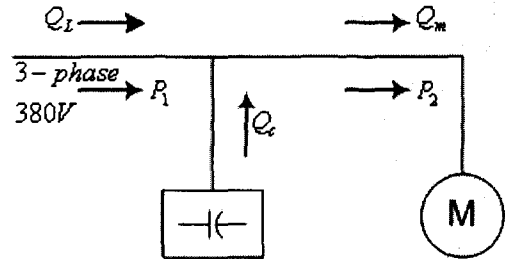


그림 2. 유도전동기와 커패시터
Fig. 2. Induction motor and capacitor

표 1. 유도 전동기의 파라미터
Table 1. Parameters of Induction motor

Capacity	2.2[kW]
Slip	3[%]
Voltage	380[V]
Current	5.2[A]
Efficiency	85[%]
Power factor	80.0[%]
Locked rotor current/nominal current	5.0

표 2는 표 1의 전동기에 대한 상세 파라미터를 나타낸 것이다.

표 2. 상세 파라미터
Table 2. The detailed parameters

Parameter	Value
stator d-q resistance	4.41726[Ω]
rotor d-q resistance	1.45134[Ω]
stator d-q inductance	0.009249[H]
rotor d-q inductance	0.009249[H]
d-axis magnetization	0.191847[H]
q-axis magnetization	0.191847[H]
Inertia moment J	0.03[kg.m ²]

불평형 전압이 인가될 경우 어떤 변화를 나타내는 지 확인하기 위해서는 전압 불평형이 존재하지 않는

이상적인 조건에서 전력의 산출이 필요하다.

그림 2의 회로에서 전동기로 공급되는 유효전력 (P_m)은 식 (8)과 같이 출력 대 효율의 비로 계산된다.

$$P_m = \frac{P_2}{\eta} \quad (8)$$

전동기로 흡수된 피상전력 (S_m) 및 무효전력 (Q_m)은 각각 식 (9)와 같다.

$$S_m = \frac{P_m}{\cos \theta} \quad (9)$$

$$Q_m = \sqrt{S_m^2 - P_m^2}$$

부하가 필요로 하는 자화성분을 제공하기 위한 커패시터 뱅크의 무효전력 (Q_c)은 식 (10)과 같다.

$$Q_c = 2\pi fCV^2 \quad (10)$$

부하에 의해 흡수되는 무효전력 성분 (Q_L)은 커패시터에서 제공되는 성분 (Q_c)과 전동기에 의해 제공되는 성분 (Q_m)의 합이다.

$$Q_L = Q_c + Q_m \quad (11)$$

따라서 전원 측에서 부하 측으로 제공되는 피상전력 (S_L)은 식 (12)와 같다.

$$S_L = \sqrt{P_m^2 + Q_L^2} \quad (12)$$

또한 선로전류 (I_L), 전동기에 흐르는 전류 (I_m) 및 커패시터에 흐르는 전류 (I_c)는 각각 식 (13)과 같다.

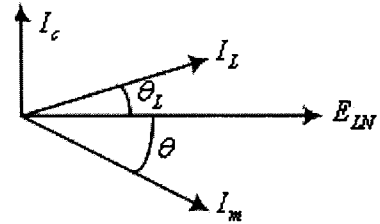
$$I_L = \frac{S_L}{\sqrt{3}E_L}$$

$$I_m = \frac{S_m}{\sqrt{3}E_L} \quad (13)$$

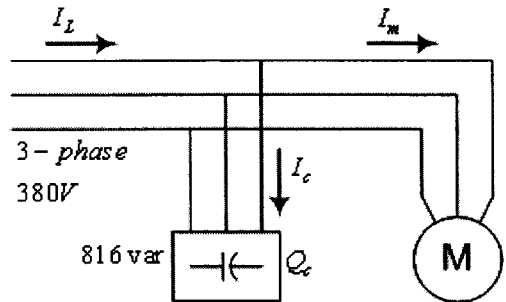
$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3}E_L}$$

전동기에 흐르는 전류 (I_m)과 상전압 (E_{LN}) 사이의 위상각 θ 가 역률이 된다.

그림 3은 식 (8)~(13)을 이용하여 구한 페이서와 전류를 나타낸 것이다.



(a) Phasor relationship



(b) Line Currents

그림 3. 페이서도와 전류
Fig. 3. Phasor relationship & line currents

그림 2 및 3에서 필요한 값은 식 (8)~(13)으로부터 구해 정리하면 표 3과 같다.

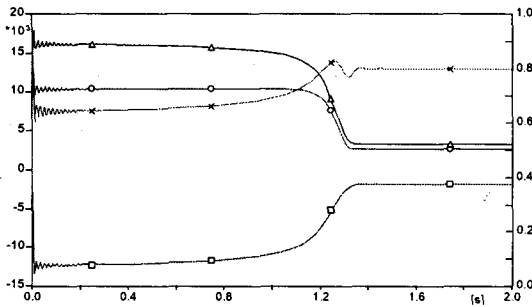
표 3. 전력, 전류, 위상각
Table 3. Power, current & phase angle

Parameters	Value
P_2	2.2[kW]
P_m	2,588[W]
S_m	3235.3[VA]
Q_m	1941.18[var]
Q_c	-816.58[var]
Q_L	1124.6[var]
$P_L = P_m$	2,588[W]
S_L	2821.998[VA]

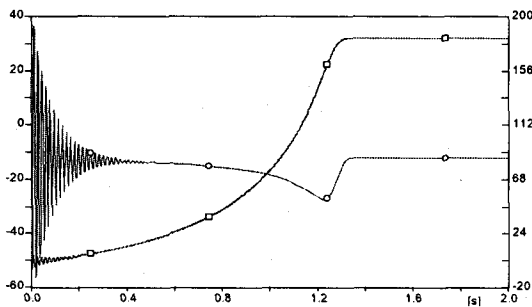
Parameters	Value
I_L	5.64[A]
I_m	4.92[A]
I_c	1.24[A]
θ	36.87[deg]
θ_L	23.485[deg]

3.2 전압 평형운전에 따른 동작 특성

우선 전압 불평형이 존재하지 않는 조건에서 역률 개선용 커패시터의 설치 전후에 대한 동작 특성을 해석하였다. 시뮬레이션은 전자계파도해석 프로그램의 ATPDRAW를 이용하였고[8], 전압 불평형에 대해서는 위상차는 일정하고 전압의 크기만을 변경하였다.



(a) 전력 및 역률



(b) 토크 및 각속도

그림 4. 평형 전압 운전시의 동작 특성(PF 미사용)
Fig. 4. Operation characteristics under the balanced voltage(No PF)

그림 4는 전압 불평형이 존재하지 않는 상태에서

커패시터가 사용되지 않는 경우 3상 380[V] 2.2[kW] 유도전동기의 기동에서 정상운전까지의 특성변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서 유효전력에 대해 무효전력은 상대적인 의미로 부(-)로 나타내었다.

그림 4 (a)에서와 같이 기동시의 높은 전류로 인해 유효(P : 0), 무효(Q : □) 및 피상전력(PS : △)값은 정상 운전시에 비해 상대적으로 높지만 정상운전에서는 표 3에서의 값보다는 전압강하 등으로 인해 약간 낮은 값을 나타내고 있다. 정상운전시의 유효전력은 2584[W], 무효전력은 1937.5[var], 피상전력은 3230[VA]이다. 정상 운전시 전동기 여자를 위해 필요한 무효전력이 상대적으로 높아 전원 측에서 공급해야 할 피상전력이 증가함을 알 수 있다. 피상전력에 대한 유효 전력 값인 역률(PF : ×)은 0.8이지만 실제로 90[%]이상 95[%]까지 요구하고 있고 전원 측에서 공급해야 할 피상전력량을 줄이기 위해서는 역률개선용 커패시터 사용은 필수적이다.

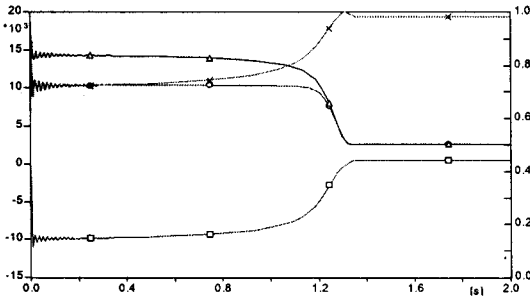
그림 4 (b)에서 정상운전시의 토크는 12.01[Nm], 각속도는 182.84[%]이다.

효율 η 은 유효전력을 입력으로 하여 발생한 토크 및 각속도의 곱을 출력으로 아래와 같이 계산할 경우 85[%]로서 표 1에서 제시한 결과와 동일하다.

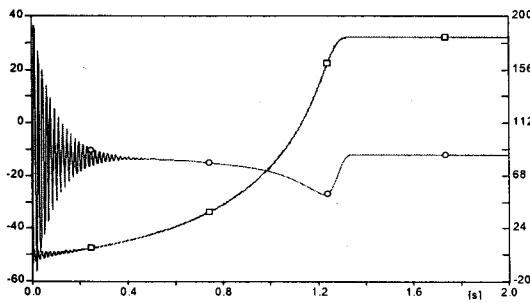
$$\eta = \frac{wT}{P} = \frac{182.84 \times 12.01}{2584} = 85[\%]$$

그림 5는 부하에 필요한 무효전력을 제공하기 위해 커패시터 설치한 후의 동작결과를 나타낸 것이다.

그림 5 (a)에서는 역률 보상 커패시터의 설치시 특성변화를 나타낸 것이다. 정상운전시의 유효전력은 2584[W]로 동일하지만, 커패시터를 통해 전원 측에서 공급하는 무효전력은 1937.5에서 507.9[var]로 많이 줄어들었고, 피상전력도 3230에서 2633[VA]로 감소하였으며, 그림 5 (b)에서와 같이 토크와 각속도는 각각 12.01[Nm] 및 182.84[%]로 동일하다. 부하에 필요한 무효전력을 커패시터가 보완한 결과로 역률은 0.8에서 0.98로 증가하였다. 그러나 효율 η 은 유효전력 및 토크, 각속도가 변하지 않기 때문에 설치전과 동일하다.



(a) 전력 및 역률



(b) 토크 및 각속도

그림 5. 평형 전압 운전시의 동작 특성(PF 사용)
Fig. 5. Operation characteristics under the balanced voltage(PF)

무효전력을 제공하기 위해 부하 측에 설치하는 커패시터의 전력 Q_c 은 식 (14)와 같이 단자에 걸리는 전압 V_c 와 전류 I_c 로도 구할 수 있다.

$$Q_c = V_c \times I_c \quad (14)$$

3.3 전압 불평형 운전에 따른 동작 특성

유도전동기에 인가되는 전압이 고르지 못한 경우의 특성변화를 확인하기 위해 전압불평형의 변화를 1~3[%]까지 위상각을 고려하지 않고 크기만 변화를 시킨 경우 전압 불평형율에 따른 각 상전압의 피크 값은 표 4와 같다.

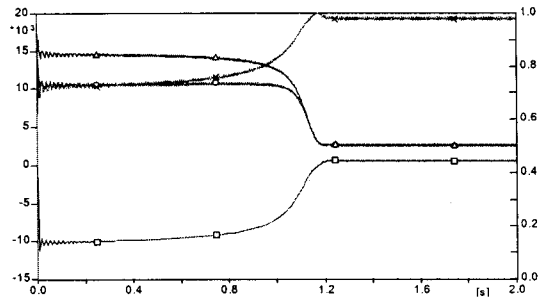
그림 6은 1[%] 전압 불평형시 전력 및 역률 그리고 토크와 각속도의 동작변화를 나타낸 것이다.

그림 6에서는 그림 5에서와 같은 안정된 경우와 달리 각 특성 값에서 약간의 편차를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6 (a)에서와 같이 정상운전시의

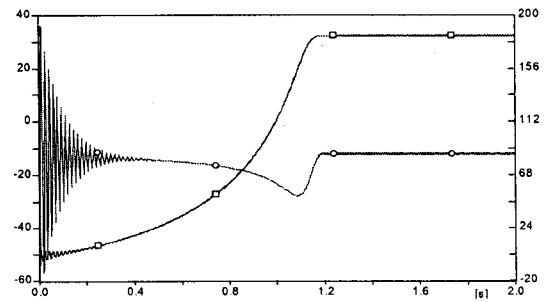
유효전력(○) 범위는 2502.6~2670.2[W]이고, 무효 전력(□)의 범위도 457.8~591.6[var]이며, 피상전력(△)은 2554.6~2726.5[VA] 사이를 나타내고 있으며, 그림 6 (b)에서와 같이 토크(○)는 11.668~12.396[Nm], 각속도(□)는 182.87~183.08[%]이다. 이와 같은 전압 불평형이 존재할 경우 기기의 동작에 불안정성을 초래할 수 있다.

표 4. 전압 불평형율의 비교
Table 4. Comparison of VUF

V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	VUF[%]
310.0	310.0	310.0	0
310.26	313.0	315.69	1
310.28	315.42	321.2	2
310.2	318.46	326.74	3



(a) 전력 및 역률



(b) 토크 및 각속도

그림 6. 1[%] 불평형 전압 운전시의 동작 특성
Fig. 6. Operation characteristics under 1[%] unbalanced voltage

그림 7은 2[%] 전압 불평형 운전시 전력 및 역률 그리고 토크와 각속도의 변화량을 나타낸 것이다.

불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석

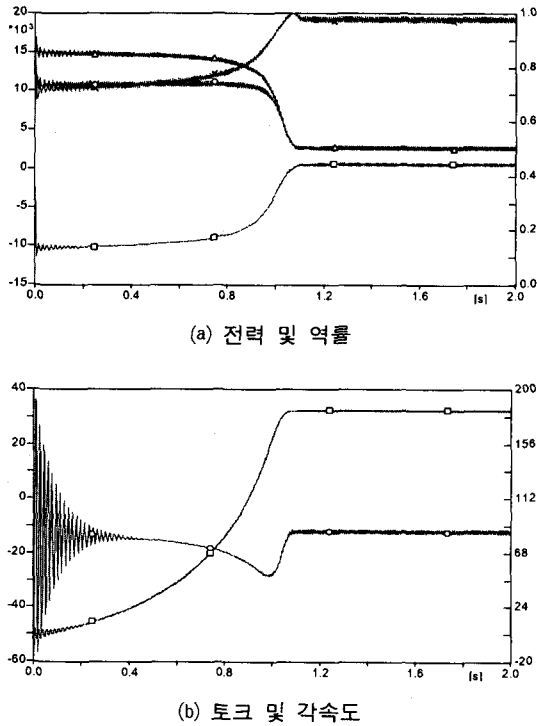


그림 7. 2[%] 불평형 전압 운전시의 동작 특성
Fig. 7. Operation characteristics under 2[%] unbalanced voltage

그림 7에서 알 수 있듯이 전압 불평형율이 증가함에 따라 각 특성값의 편차는 맥동성분으로 시스템을 불안정하게 할 수 있다.

그림 7 (a)에서 2[%] 전압 불평형으로 운전되는 경우 정상상태에서의 유효전력은 2417~2756.5[W]의 범위이고, 무효전력은 404.21~677.55[var]의 값을 나타내고, 피상전력은 2469~2820[VA]을 값을 유지한다. 그림 7 (b)에서 전동기 출력 토크는 11.287~12.776[Nm], 각속도는 183~183.2[%]이다.

그림 8은 3[%] 전압 불평형시 전력 및 역률의 변화를 나타낸 것이다.

그림 8은 앞의 1[%] 및 2[%] 전압불평형의 해석 결과에 비해 각 특성 값의 편차는 더욱 증가함을 알 수 있다. 3[%] 전압 불평형으로 운전되는 경우 정상상태에서의 유효전력은 2323.4~2846[W], 무효전력은 349.49~766.83[var], 피상전력은 2381.1~2917.2 [VA], 토크는 10.883~13.166[Nm], 각속

도는 183.03~183.35[%]이다.

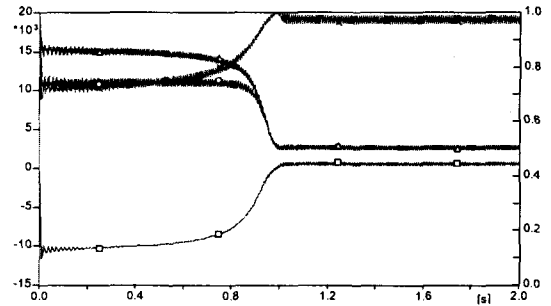


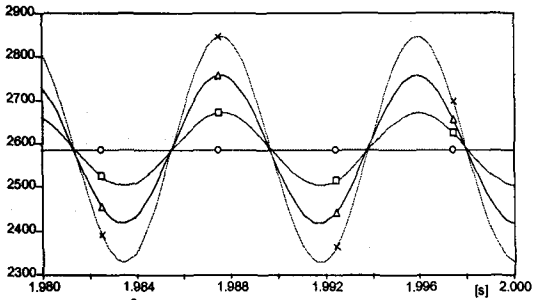
그림 8. 3[%] 불평형 전압 운전시의 동작 특성
Fig. 8. Operation characteristics under 3[%] unbalanced voltage

전압 불평형에 따라(0[%] : ○, 1[%] : □, 2[%] : △, 3[%] : ×) 정상상태에서 각각의 특성변화를 비교하기 위한 해석 결과는 그림 9와 같다.

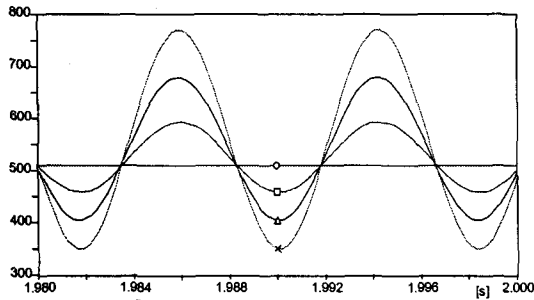
그림 9에서와 같이 전압 불평형이 존재하지 않는 경우 안정된 값을 나타내지만, 전압 불평형이 존재할 경우 각 특성값은 맥동형태를 나타내기 때문에 부하는 물론 연결된 시스템에 불안정을 초래할 수 있다. 특히 전압 불평형이 증가할수록 정상상태에 도달하는 시간을 줄어들이지만, 기동 초기에는 약간 높은 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 전압 불평형이 존재할 경우에 무효 전력값이 변동하기 때문에 일정한 역률을 유지하기가 매우 어렵다.

표 5는 그림 9에서와 같이 전압 불평형이 존재하는 경우 정상상태에서의 전력, 역률 및 커패시터의 전력을 나타낸 것으로서 전압 불평형이 증가할수록 편차의 폭이 증가하고, 역률 보상용 커패시터에 에너지도 증가함을 확인할 수 있다. 커패시터에서의 에너지증가는 스트레스로 작용하여 수명을 줄일 수 있는 요소가 될 수 있다.

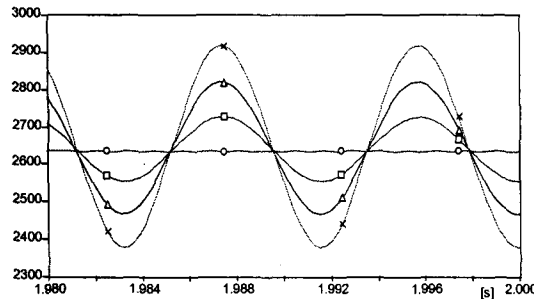
표 5에서 전압 불평형이 증가할수록 전력편차가 증가하여 불안정을 초래하게 한다. 이 편차 값에서 유효전력은 전압 불평형이 증가해도 거의 동일한 값을 유지하지만, 무효전력의 경우는 조금씩 증가한다. 따라서 피상전력도 조금 증가하게 된다.



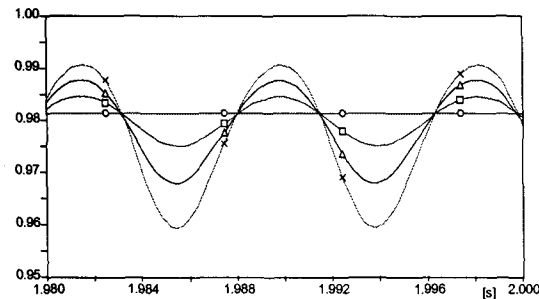
(a) 유효전력(P)



(b) 무효전력(Q)



(c) 피상전력(S)



(d) 역률(PF)

그림 9. 전압 불평형에 따른 특성 비교
Fig. 9. Characteristics comparison by VUF

표 5. 전압 불평형에 따른 전력 및 역률
Table 5. Power, pf by VUF

VUF[%]	P[W]	Q[Var]	S[VA]	pf
0	2585	507.94	2633.8	0.98
1	2502.6~ 2670.2	457.83~ 591.63	2554.6~ 2726.5	0.975~ 0.984
2	2417~ 2756.5	404.21~ 677.55	2469~ 2820	0.968~ 0.987
3	2328.4~ 2846	349.49~ 766.83	2383.1~ 2917.2	0.959~ 0.991

표 6은 커패시터에 걸리는 전압과 전류 값을 찾아 커패시터에 의해 발생하는 무효전력을 계산한 결과이다. 전압 및 전류는 각각 상전압 및 전류의 피크 값으로 나타낸 것이다.

표 6. 전압 불평형에 따른 커패시터 전력
Table 6. Capacitor power by VUF

VUF	V			I			Q _c		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0%	309.94	309.94	309.94	5.26	5.26	5.26	815.14	814.14	815.14
1%	311.56	312.93	314.26	5.28	5.31	5.33	822.52	830.83	837.85
2%	312.90	315.49	318.36	5.40	5.35	5.40	844.83	843.93	859.57
3%	314.28	318.43	322.56	5.33	5.40	5.47	837.55	859.76	882.20

표 6에서와 같이 전압불평형율이 증가함에 따라 커패시터에 인가되는 전압 및 전류가 커지기 때문에 스트레스 정도가 높아짐을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 유도성 부하인 유도전동기에 무효전력 공급을 통한 역률 개선 및 전압 안정도 향상을 위해 설치하는 커패시터의 설치 운전시 전압 불평형에 의한 전압, 전류 및 전력 특성의 변화를 해석한 결과이다.

전압 불평형이 존재할 경우 역률 커패시터의 설치에 따른 전력, 전류, 전압 및 커패시터의 에너지 변화량을 분석한 결과 전압 불평형이 증가할수록 유효, 무효, 피상전력의 최대 및 최소의 편차가 증가하여

불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석

시스템이 매우 불안정하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 각 상의 전압값이 높은 경우에도 전류의 증가로 무효전력값이 커져 콘덴서에서의 전력값도 함께 증가하였다.

따라서 전압 불평형으로 증가한 에너지는 커패시터의 스트레스로 작용할 수 있기 때문에 커패시터의 수명 보장과 시스템의 신뢰도를 높이기 위해서는 전압 불평형이 최소화될 수 있는 설계와 운전이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 전력산업 연구개발 사업으로 수행한 것의 일부입니다. (과제번호 : R-2007-3-186)

References

- [1] 김종겸, 박영진, "3상 4선식 저압 수용가의 전압불평형율 측정 분석", 한국조명전기설비학회 논문지, 제 18권, 6호, pp.91-99, 2004. 11.
- [2] 김종겸 외 3인, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석", 대한전기학회 논문지, 53(B), No.6, pp. 372-379, 2004.06.
- [3] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor", Taylor & Francis, 2005.
- [4] Theodore Wildi, "Electrical machines, Drives and power systems", Prentice Hall, 2006.
- [5] P. Pillay and M. Manayange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [6] Akagi, H et al., "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", IEEE Trans on IA, Vol.20, no.3, pp.625-630, 1984.
- [7] 김종겸, "불평형 부하 운전시 3상 유도발전기 특성 해석", 대한전기학회 논문지, 56(P), No.3, pp. 123-128, 2007.09.
- [8] ATP-DRAW Manual, 2006.

◇ 저자소개 ◇

김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987년~1988년 한국통신공사 근무. 1988년~1996년 한국수자원공사 근무. 1996년~현재 국립 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수. 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문 편집위원 및 재무이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr

박영진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수.

Tel : (033)760-8784

E-mail : popspark@kanunung.ac.kr

이은용 (李殷雄)

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1982~1983년, 1984~1985년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 대한전기학회 평의원. 1995년 대한전기학회 편집위원장 및 전기기기연구회 간사장. 1995~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~97), 1997~2000년 대한전기학회 부회장. 2004년도 대한전기학회 회장. 현재 충남대 전기공학과 교수.

Tel : (042)821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr