

## 유도전동기에 대한 역률 보상설비의 특성 해석

(A Characteristic Study on the Power Factor Correction Application for Induction Motor)

김종겸\* · 박영진

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

### 요 약

유도전동기의 자계는 전류의 방향에 따라 자화 및 감자되는 특성을 가지고 있다. 전동기의 자계를 형성하는데 필요한 자화전류는 유도성으로 무효전력의 대부분을 차지하고 있다. 무효전력은 유도전동기가 동작하는데 필요한 자계를 지속시키는 역할을 한다.

유도전동기의 역률은 낮은 편이므로 역률 보상이 필요하다. 유도전동기를 정격출력보다 낮은 부하로 운전할 경우 유효전력에 비해 무효성분의 비율증가로 역률이 낮아진다. 역률 보상장치의 용량은 전동기 정격에 맞도록 설치하기를 권고하고 있다. 그러나 부하의 운전상황에 따라 역률 보상용 커패시터 값은 수정하기가 어렵다.

본 논문에서는 저압 소용량 유도 전동기에 연결된 부하의 변화에 따라 전력 및 역률의 동작특성을 해석한 결과 기존에 제시된 낮은 역률 보상용 파라미터는 수정되어야 함을 확인하였다.

### Abstract

The field of induction motor is magnetized and demagnetized for each reversal of the current. This field component of the motor accounts for most of the reactive component of inductive load. Reactive power needs to sustain the electromagnetic field required for the induction motor to operate.

Power factor of induction motor is usually low and power factor correction needs. Power factor becomes low by the effect of the reduction operation of load capacity. In most cases, Capacitor capacity for the power factor correction should be complied with the recommendation by the motor capacity. But Capacitor value for power factor correction can't change during the normal operation. In this paper, we analyzed characteristics of power and power factor changing by load fluctuation of low-voltage small size induction motor and show that lower power factor correction's parameter of existing recommendation should be revised by new value.

Key Words : Induction motor, Capacitor, Power factor, Reactive power, Active power, Apparent power

\* 주저자 : 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수

Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8781

E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr

접수일자 : 2008년 6월 2일

1차심사 : 2008년 6월 9일

심사완료 : 2008년 7월 3일

## 1. 서 론

유도전동기는 산업현장에서 상당히 많은 양의 에너지를 사용하는 전동력 부하이다. 이 부하설비의 사용증가에 따라 필요한 전력 생산량을 높이는 것도

## 유도전동기에 대한 역률 보상설비의 특성 해석

필요하지만, 생산된 에너지의 효율을 높여 운전하는 것도 매우 중요하다.

유도전동기는 자화를 위해 무효전력을 필요로 한다. 이 무효전력을 전원으로부터 공급받을 경우 역률이 낮아지므로 부하측 단자에서 전원측을 대신하여 무효전력을 제공할 경우 피상전력이 줄어 역률을 높일 수 있다[1-3].

역률 보상장치는 부하마다 설치하는 경우와 전체를 일괄 보상하는 방법 그리고 부하의 운전용량에 따라 자동적으로 보상하는 방법 등이 있지만, 대부분의 경우 개별보상이 주로 이용되고 있다[1-2].

전동기의 출력은 부하가 필요로 하는 최적 용량의 조건으로 설치하지만, 실제 출력보다 낮게 운전하는 경우가 많다. 출력정격에 맞게 전동기에 필요한 무효전력을 대신 제공하도록 설치한 역률 보상장치의 경우 낮은 부하로 운전할 경우 유효전력에 대한 무효전력의 비율이 높아 역률이 낮아진다. 이 역률보상용 콘덴서의 용량은 전압 및 용량별로 각각 다르게 권고하고 있지만, 대개 전동기 용량에 따라 일률적으로 적용하는 경우가 많다. 이럴 경우 부하의 사용 변동에 따라 역률 보상 설비가 전동기에 공급하는 무효전력의 크기가 많아 부작용을 초래할 수 있다[1-2]. 그래서 같은 전압 및 출력에서 효율이 다른 경우 전동기 파라미터가 달라지기 때문에 특성에 맞는 역률 보상용 파라미터 선정이 필요하다.

본 연구에서는 정격출력의 부하를 경부하, 중부하, 정격부하 운전시에 역률 보상장치에 의한 전력특성 변화를 해석하여 전동기에 적합한 역률 보상용 커패시터 값을 제시하고자 한다.

## 2. 전동기와 역률

유도성 부하인 유도전동기는 자계를 발생하기 위해 여자전류를 필요로 한다. 이 여자전류는 거의 무효성분으로서 전부하 전류의 20[%] 정도이며 극수가 많은 저속 전동기의 경우 고속에 비해 상대적으로 비중이 높다. 전동기는 여자전류 외 부하의 영향에 따라 고정자와 회전자에 많은 전류가 흐른다. 이 전류는 누설리액턴스를 통해 흘러 부하전류의 제공에 비례하여 변화하는 추가적인 지상 무효전력을 발

생시키는 것으로 전부하 전류의 20[%] 이하 정도이다[2]. 전동기에 필요한 무효전력은 부하의 제공에 반비례하는 성분과 여자 또는 자화전류의 합 성분으로 구성되므로 역률은 무부하에서 20[%] 전후이지만, 전부하에서는 80[%] 전후로 변화한다.

유도전동기는 정격 운전하는 것이 바람직하지만, 실제 현장에서는 정격부하보다 낮게 운전하는 경우가 많아 유효전력에 비해 무효전력의 비중이 높아 역률이 낮아진다. 그림 1은 일반 유도전동기의 부하의 변동에 따른 무효전력의 비중을 나타낸 것으로서 정격출력에 대해 운전부하의 비중이 높은 경우 무효전력 이 차지하는 비율이 낮지만, 부하가 25[%]만 운전할 경우 유효전력과 무효전력이 절반씩 차지함으로써 역률은 70.7[%]로 낮아진다[2]. 실제 역률이 100[%]일 경우 무효성분은 제로이지만, 역률이 80[%]일 경우 유효성분에 대한 무효성분이 75[%]를 차지하기 때문에 역률 보상의 필요성이 높아지고 역률 보상 설비의 크기도 증가하게 된다.

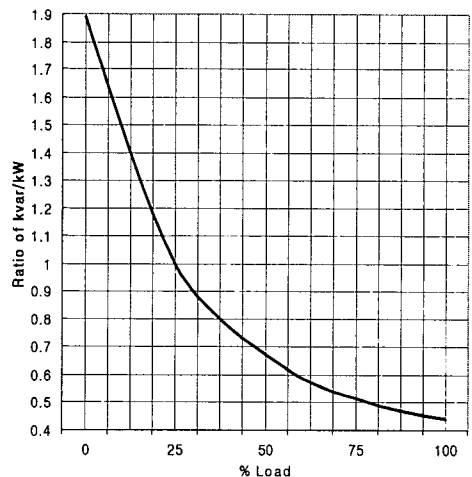


그림 1. 전동기 역률에서 부하의 영향  
Fig. 1. Effect of load on motor power factor

전동기에 필요한 여자원을 제공하기 위해서는 무효전력이 필요한데 전원 측으로부터 공급받을 경우 피상전력이 증가하지만, 전동기 측 가까운 곳에 커패시터를 설치하여 부하에 필요한 무효전력을 공급할 경우 피상전력이 감소하므로 역률이 개선될 수

있다. 소용량의 경우 역률 보상을 위해 한곳에 설치하는 경우도 있다. 그림 2는 유도전동기 부하에 역률 보상 커패시터를 개별적으로 설치한 단선결선도이다. 개별 부하에 역률 보상 커패시터 설치 외 변압기 2차측에도 커패시터를 설치하는 경우도 있다.

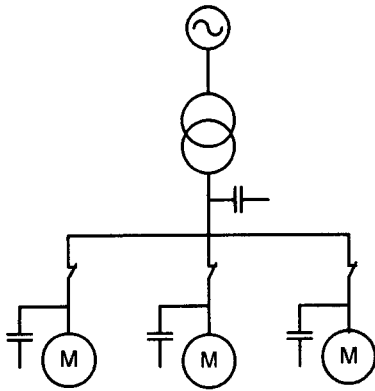


그림 2. 단선결선도  
Fig. 2. Single line diagram

그림 2에 적용된 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 380[V] 2.2[kW] 전동기의 경우 역률 보상을 위한 커패시터는 0.817[kVA]의 용량을 권고하고 있다. 같은 정격의 전동기라도 기존의 경우 역률이 82.5[%]이지만 에너지효율을 높이기 위해 지금은 87.5[%]의 전동기가 주로 공급되고 있다[4].

표 1. 전동기의 파라미터  
Table 1. Motor parameter

Section	Value
Capacity	2.2[kW]
RPM	1,746
Slip	3.0[%]
Voltage	380[V]
Current	4.23[A]
Efficiency	87.5[%]
Insulation level	F
Service factor	1.15
Power factor	79.0[%]

역률 보상장치의 사용전후 유효전력(P), 무효전력(Q), 피상전력(S) 및 역률(pf)의 변화는 식 (1)과 같

이 전압 및 전류로 간단하게 구할 수 있다.

$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \tag{1}$$

$$Q = \frac{\{(V_c - V_b)I_a + (V_a - V_c)I_b + (V_b - V_a)I_c\}}{\sqrt{3}}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$pf = \frac{P}{S}$$

### 3. 동작 특성 해석

정격속도에서 저압 유도전동기의 역률은 대부분 80[%] 전후이다. 유도전동기는 공칭 정격이하에서 운전되는 경우가 많으므로 실제 역률은 실제 약간 낮다[3]. 낮은 역률을 보상하기 위해 전동기 단자 가까운 곳에 역률 보상 커패시터를 연결할 경우 전력 및 역률의 변화를 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[5].

#### 3.1 표준 및 고효율 전동기에 의한 동작 특성

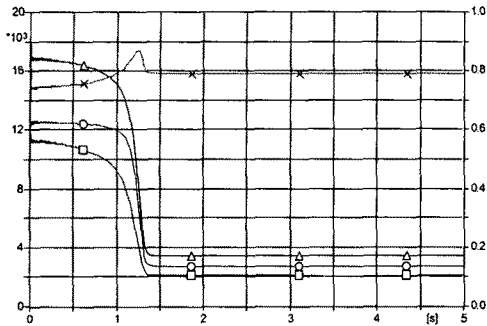
그림 3은 표 1과 같은 조건에서 효율이 82.5[%]인 2.2[kW] 유도전동기를 운전시 역률 보상장치의 설치 전후 유효전력(O), 무효전력(□), 피상전력(Δ) 및 역률(x)의 크기를 비교한 것이다. 권고하는 커패시터는 15[μF]를 부착하지 않은 경우와 부착한 경우의 결과는 그림 3과 같다. 그림 3에서 좌측은 전력이고, 우측은 역률을 의미한다.

그림 3에서 알 수 있듯이 전동기에 필요한 무효전력을 전원측을 대신하여 부하측 단자에서 커패시터를 사용할 경우 유효 및 피상전력 값의 차이는 줄어들고 무효전력과의 간격을 넓혀 역률이 높아지게 하는 것을 확인할 수 있다.

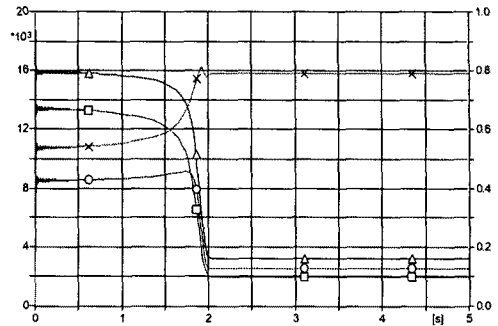
그림 4는 표 1의 효율 87.5[%]인 전동기에 대해 역률 보상 전후 전력 및 역률의 변화를 나타낸 것이다.

그림 4 (a)에서와 같이 역률 보상 커패시터 설치 전의 유효 및 무효전력이 각각 2515.4[W]와 1948.7[VAr]인 것이 2.2[kW] 출력 전동기의 낮은 역률을 보상하기 위해 권고하고 있는 15[μF]의 커패시터를 설치하고서 운전한 결과 그림 4 (b)와 같은 유효 전력

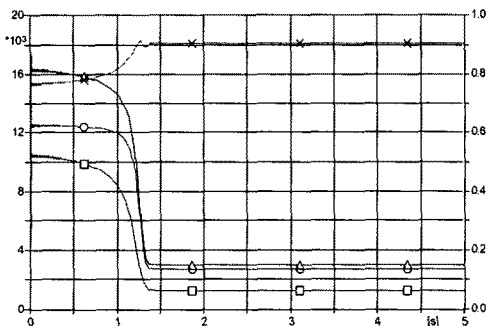
## 유도전동기에 대한 역률 보상설비의 특성 해석



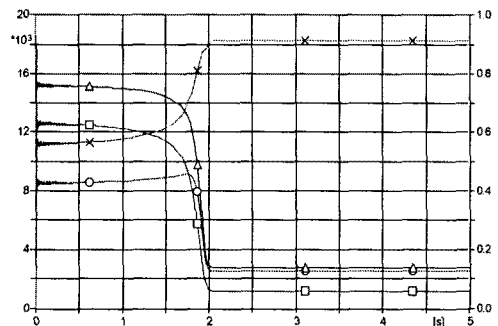
(a) 보상 전



(a) 보상 전



(b) 보상 후



(b) 보상 후 (15µF설치)

그림 3. 커패시터 설치 전후 전력 및 역률(1)

Fig. 3. Power & power factor by installation sequence of capacitor (1)

그림 4. 커패시터 설치 전후 전력 및 역률(2)

Fig. 4. Power & power factor by installation sequence of capacitor (2)

에 대해 전원측에서 공급해야 할 무효전력을 커패시터가 일부 대신 제공함으로써 역률은 91[%]로 증가하였다. 그러나 권고하고 있는 역률 95[%]에 비해 낮으므로 부하측에 더 많은 무효전력을 제공하여 역률을 높이기 위해서는 커패시터 값을 더 높게 설정할 필요가 있다.

표 2. 일반 및 고효율 전동기 역률보상 전후에 따른 전력 및 역률변화

Table 2. Power & pf general and premium motor by power correction

구분	효율 82.5[%]		효율 87.5[%]	
	보상 전	보상 후	보상 전	보상 후
P[W]	2,667.8	2,667.7	2,515.4	2,515.4
Q[Var]	2,066.3	1,251.0	1,948.7	1,113.5
S[VA]	3,374.4	2,946.5	3,181.9	2,758.9
pf	0.79	0.905	0.79	0.911

표 2는 그림 3과 4에서 정상상태에서 커패시터 설치 전후 전력 및 역률의 변화를 나타낸 것으로서 같은 역률을 가진 전동기라도 효율이 높을수록 무효전력이 낮기 때문에 역률 보상효과가 좋다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 커패시터 용량에 따른 동작 특성

전압 및 용량에 따라 권고하고 있는 역률 보상 장치의 해석결과 낮기 때문에 높은 역률 보상이 필요하다.

그림 5 (a)는 그림 4 (b)에서의 낮은 역률을 높이기 위해 한 단계 높은 등급인 20[µF] 커패시터를 부착하고서 운전한 경우이고, 5 (b)는 30[µF]를 설치한 경우에 대한 전력 및 역률 변화를 나타낸 것이다.

그림 5에서 알 수 있듯이 역률을 높이기 위해 부하

측에 설치한 커패시터 용량을 15에서 20 및 30[ $\mu$ F]으로 높일 경우 전원측에서 제공되는 무효전력이 피상 전력의 감소에 비해 줄어드는 폭이 커지기 때문에 역률은 상대적으로 높아지는 것을 확인할 수 있다.

표 3은 본 해석에 적용된 전동기에 역률 보상용 커패시터를 설치하지 않는 경우와 권고하는 규격 그리고 상위 커패시터 용량의 설치시에 유효, 무효, 피상 및 역률의 변화를 나타낸 것으로서 해석결과 본 전동기와 같은 경우에는 15[ $\mu$ F]의 용량으로는 역률 보상 효과가 낮고, 30[ $\mu$ F]의 용량으로는 역률이 너무 높기 때문에 20[ $\mu$ F] 정도가 가장 적당하다고 판단된다. 그러나 커패시터 용량 20[ $\mu$ F]는 본 해석에 사용되는 전동기의 용량보다 높은 3.75[kW]의 출력에 설치하기를 권고하고 있다.

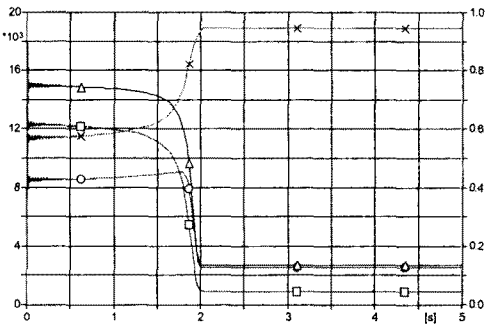
표 3. 커패시터 값에 따른 전력 및 역률  
Table 3. Power & pf by capacitor value

구 분	P[W]	Q[VAR]	S[VA]	pf
No Cap	2515.4	1948.7	3181.9	0.790
15[ $\mu$ F]	2515.4	1113.5	2758.9	0.911
20[ $\mu$ F]	2515.4	861.18	2658.7	0.946
30[ $\mu$ F]	2515.4	318.25	2535.4	0.992

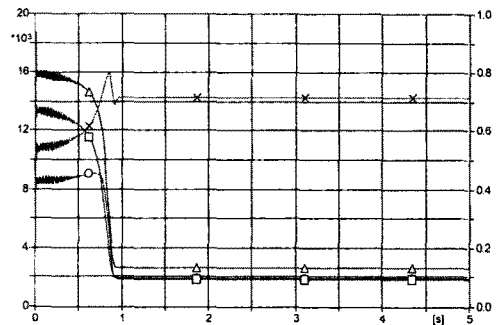
### 3.3 운전 변화에 따른 동작 특성

현장에서 사용되고 있는 유도전동기는 정격부하 운전보다는 낮게 운전하는 경우가 많다. 이와 같이 정격 부하보다 낮게 운전하는 경우에도 역률 보상설비는 당초 설치한 그대로 값의 변화 없이 운전되는 경우가 많다. 이와 같은 조건하에서 전동기를 운전할 경우 전력 특성이 어떻게 변화하는지의 해석이 필요하다.

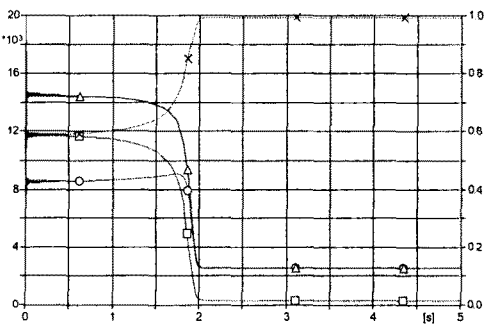
그림 6~8은 부하를 75%, 50%, 25%로 낮추



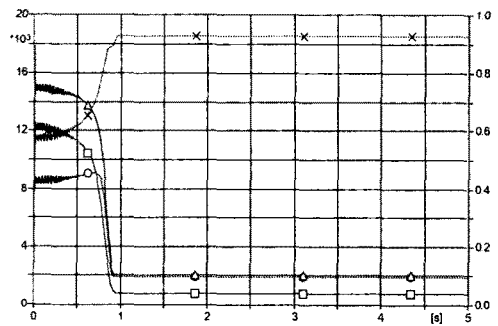
(a) 보상 후(20 $\mu$ F) 설치



(a) 역률 보상 커패시터 설치 전



(b) 보상 후(30 $\mu$ F 설치)



(b) 역률 보상 커패시터 설치 후

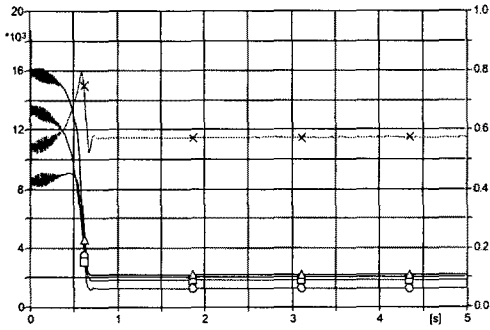
그림 5. 커패시터 값 증가에 의한 전력 및 역률  
Fig. 5. Power & power factor by the increase of capacitor value

그림 6. 75(%) 운전시 전력 및 역률  
Fig. 6. Power and pf by 75(%) load operation

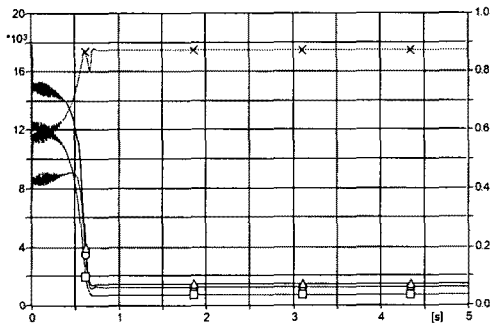
유도전동기에 대한 역률 보상설비의 특성 해석

어 운전할 경우 전력 및 역률의 변화에 대해 커패시터 설치 전후를 비교한 것이다. 역률 보상 커패시터는 본 전동기에 가장 적합한 20[μf]를 적용하였다.

그림 6에서와 같이 75[%]의 부하를 운전할 경우 보상설비를 사용하지 않는 경우 유효 및 무효전력 비율이 거의 동일하지만, 커패시터를 설치하여 무효전력을 제공할 경우 피상전력값이 낮아짐을 확인할 수 있다. 보상설비를 사용하지 않는 경우 기동시 순간적으로 역률이 높아지지만 이후 낮은 역률을 유지하는 반면 역률 보상설비를 설치하고서 기동 운전하는 경우 역률이 점차적으로 높아져 가는 것을 확인할 수 있다.



(a) 역률 보상 커패시터 설치 전



(b) 역률 보상 커패시터 설치 후

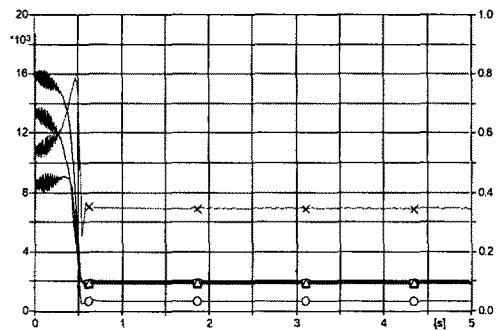
그림 7. 50[%] 운전시 전력 및 역률  
Fig. 7. Power and pf by 50[%] load operation

그림 7은 50[%] 부하를 운전하는 경우의 전력 및 역률 변화를 나타낸 것이다.

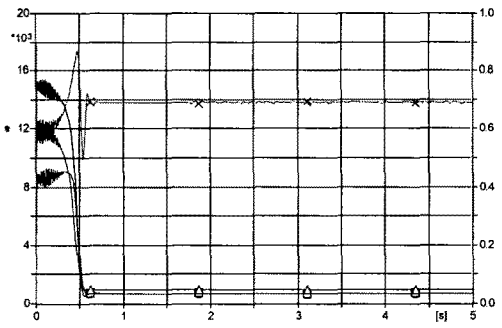
그림 7에서 알 수 있듯이 보상설비를 사용하지 않고 50[%] 부하만 운전하는 경우 무효전력이 유효전력 보다 높아지기 때문에 역률이 매우 낮아진다. 이

럴 경우 원하는 역률을 높이기 위해서는 규정된 커패시터 용량보다 높은 값을 설치해야 하지만, 실제 개별부하에 역률 보상설비를 갖추고서 운전하는 경우 어렵다. 이와 같은 경우에는 자동 역률 보상 장치와 같은 추가적인 무효전력 제공설비가 필요하다.

다음 그림 8은 25[%]만으로 운전할 경우 역률 보상 커패시터 설치 전후의 전력 및 역률변화를 나타낸 것이다.



(a) 역률 보상 커패시터 설치 전



(b) 역률 보상 커패시터 설치 후

그림 8. 25[%] 운전시 전력 및 역률  
Fig. 8. Power and pf by 25[%] load operation

그림 8 (a)에서와 같이 역률 보상장치를 사용하지 않고 경부하로 운전할 경우 무효전력은 유효전력의 1/3 정도를 차지하기 때문에 역률이 아주 낮다. 그러나 그림 8 (b)와 같이 보상설비를 설치하고 같은 부하 조건에서 운전하는 유효와 무효전력비가 비슷하게 되어 역률은 설치전에 비해 높아지지만 권고하는 값에 상당히 낮다는 것을 확인할 수 있다.

그림 6~8에서 알 수 있듯이 부하가 감소함에 따라

전력 및 역률도 함께 감소한다. 그러나 역률 보상 커패시터는 부하의 감소운전에도 불구하고 변경할 수 없기 때문에 일정한 무효전력을 전동기에 제공하고 있다.

표 4는 그림 6~8과 같은 경우에 대한 정상운전에서 부하의 증감에 따른 전력 및 역률의 변화를 요약한 것으로서 부하가 점차 감소함에 따라 정격운전에 비해 역률이 낮아지므로 일정한 용량의 커패시터로도 원하는 역률값의 유지가 어렵다. 따라서 부하의 감소 운전 시에는 추가적인 역률보상이 이루어져야 할 것이다.

표 4. 부하의 변동에 따른 전력 및 역률  
Table 4. Power & pf by load variance

구분	부 하 량					
	75[%]		50[%]		25[%]	
보상	전	후	전	후	전	후
P[W]	1870.1	1870.1	1248.4	1245.6	656.74	652.47
Q[VAr]	1841.1	753.44	1785.7	698.77	1776.0	688.56
S[VA]	2624.3	2016.1	2178.8	1428.2	1893.5	948.6
pf	0.7126	0.9275	0.5729	0.8721	0.3468	0.6878

표 4에서 75[%]의 부하로 운전할 경우 역률 보상용 커패시터를 사용하지 않을 경우에는 유효 및 무효전력의 비율이 거의 비슷하며, 부하가 감소함에 따라 유효전력에 비해 무효전력이 높아지기 때문에 역률이 점차 낮아지는 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 저압 2.2[kW] 유도전동기의 낮은 역률을 보상하기 위해 설치하는 커패시터의 값에 따라 전력 및 역률의 변화를 해석하였다.

유도전동기에 필요한 무효전력의 일부를 전원 측을 대신하여 부하측에 제공하기 위한 역률 보상용 커패시터는 전압별, 전동기 출력별로 파라미터를 달리하고 있다.

유도전동기의 낮은 역률을 높이기 위해 권고하고 있는 전력 보상용 커패시터를 가지고서 부하 측에 연결하여 운전할 때 발생하는 전력의 변화로 역률을 계산하였다. 계산결과 권고하는 전압 및 용량별로 권고 하고 있는 역률 보상용 커패시터의 경우 유도

전동기의 동작 특성을 정확하게 고려하지 못해 역률 값 보다 낮은 결과를 얻었다. 따라서 해석결과 전압 및 용량별로 권고하는 있는 역률 보상용 커패시터 값은 설치 전에 비해 역률은 높게 하지만 원하는 값의 등급유지에는 낮아 한 단계 높은 값으로 선정할 결과 사용자가 요구할 수 있는 값에 도달한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구결과는 전동기를 설치 운전할 때 원하는 역률을 얻기 위한 커패시터의 설치 효과 분석에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

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

#### References

- (1) Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor", Taylor & Francis, 2006.
- (2) R. E. Marbury, "Power Capacitors", McCRAW-Hill, 1949.
- (3) 김일중, 김종겸, "불평형 전압 운전시 역률 보상용 커패시터의 특성 연구", 대한전기학회 논문지, 제 57(P)권, No.1, pp.36-40, 2008. 03.
- (4) 김종겸, "일반 및 고효율 유도전동기 특성 비교 해석", 대한전기학회 논문지, 제 56(P)권, No.4, pp.186-190, 2007. 12.
- (5) H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 김종겸 (金宗謙)

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