Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2011) 25(8) : 82~87
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2011.25.8.082

부하변동에 따른 유도전동기 전류와 전력 특성

(Characteristics for Current and Power of Induction Motor by Load Variation)

김종겸*
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract

Induction motor is most widely used as the driving power in the industrial site. Induction motor current is composed of two parts, magnetizing current and load current. Load current uses energy what is doing the work. Load current varies with load variance but magnetizing current is constant, regardless of load variation. Magnetizing current needs for establishing the rotating magnetic field of induction motor and lags behind the voltage. Generally capacitor is used for power-factor compensation of inductive load. Self-excitation occurs when the capacitive reactive current from the capacitor is greater than the magnetizing current of the induction motor. When this occurs, excessive voltages can result on the terminals of the motor. This excessive voltage can cause insulation degradation and ultimately result in motor insulation failure.

In this paper, we analyzed that how the magnetizing current and condenser current is operating at the allowable limit by the load variation. Condenser current is below allowable limit of magnetizing current but magnetizing current is above allowable limit at the lower load operation condition.

Key Words : Induction Motor, Magnetizing Current, Capacitor Current, Power Factor

1. 서 론

산업현장에서 회전력을 얻는데 유도전동기가 가장 널리 사용되고 있다. 유도전동기는 구조가 간단하고, 견고하며, 유지보수가 편리한 동시에 일정한 토크를 발생하는 특징을 가지고 있어 다른 전동기에 비해 유리한 점이 많다.

* 주저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8781
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2011년 6월 16일
1차심사 : 2011년 6월 22일
심사완료 : 2011년 7월 13일

유도전동기는 회전자계를 발생시키기 위해 여자전류를 필요로 한다. 이 회전자계에 필요한 여자전류에 상당하는 전력이 무효전력이다. 전동기에 필요한 무효전력을 전원측에서 공급할 경우 역률이 낮아지므로 전동기 단자 가까이에 설치하여 여자전원을 전원측에 대신하여 제공할 경우 역률의 향상으로 전원측에서 공급하는 피상전력을 줄일 수 있어 전력회사측에서는 발생전력을 줄일 수 있어 매우 경제적이다[1].

유도전동기의 역률을 향상하기 위해 설치하는 콘덴서는 전동기의 정격출력을 기준으로 용량이 선정되는 경우가 많다. 그러나 전동기를 정격부하로 운전하는

경우보다 낮게 운전하는 경우가 많다. 부하가 변동할 경우 여자전류는 일정하지만, 콘덴서에서 공급되는 전류는 항상 일정할 경우 여자전류 공급에 따라 전력변화량이 달라지므로 콘덴서에 의한 제공되는 전류가 전동기의 자화전류보다 많은 경우 전동기에 나쁜 결과를 초래할 수 있다[2-5].

유도전동기를 정격 운전할 때 무효전력을 보상하기 위한 콘덴서의 전류와 회전자계를 발생하기 위한 여자전류의 크기 비교는 많이 연구되었다[3-5]. 그러나 부하의 변동에 따른 각각의 전류 비교는 이루어지지 않았다. 실제 부하가 변할 때 자화전류는 변하지 않지만, 전동기 전압과 전류의 위상이 달라지므로 역률에 변화가 생겨 콘덴서 용량이 달라지므로 안정성을 높이기 위해 정확한 값을 선정할 필요가 있다.

그래서 본 연구에서는 유도전동기의 정격 및 부하 감소 운전시 여자에 필요한 자화전류, 부하전류의 크기를 계산하고, 역률을 보상하기 위해 설치하는 콘덴서의 전류와 비교하였으며, 콘덴서 설치 전후의 전력 및 역률 변화도 분석하였다.

2. 유도전동기 특성

2.1 유도전동기의 등가회로

그림 1은 유도전동기의 등가회로를 나타낸 것으로서 고정자에 흐르는 전류 I_s는 출력으로 전달되기 위해 흐르는 회전자 전류 I_r 과 회전자계를 발생하기 위해 흐르는 자화전류 I_m 성분으로 분리할 수 있다. 이 자화전류는 지상성분으로 콘덴서를 설치할 경우 늦은 위상각을 줄일 수 있어 역률을 향상시킬 수 있다.

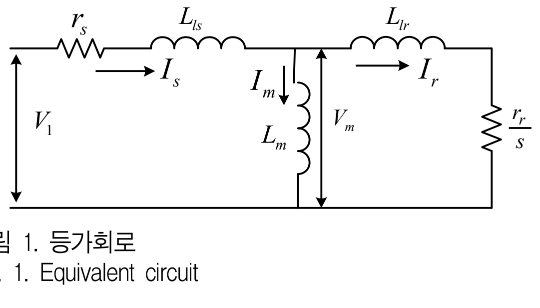


그림 1. 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit

그림 1과 같은 등가회로에서 고정자에 유입되는 전류 I_s 는 식 (1)과 같다.

$$I_s = \frac{V_1}{Z_1} \tag{1}$$

식 (1)에서 상 임피던스 Z_1은 고정자 임피던스와 자화 리액턴스 그리고 회전자의 임피던스 합으로서 식 (2)와 같다.

$$Z_1 = r_s + jwL_{ls} + \frac{jwL_m\left(\frac{r_r}{s} + jwL_{lr}\right)}{\frac{r_r}{s} + jw(L_{lr} + L_m)} \tag{2}$$

부하가 증가함에 따라 고정자 전류는 증가하므로 전압강하가 나타난다. 즉 그림 1에서 고정자 전압에서 전압강하만큼을 제외한 성분이 전동기 자화전압 V_m은 식 (3)이 된다.

$$V_m = V_1 - I_1(r_s + jwL_{ls}) \tag{3}$$

이때 자화전류는 자화전압과 자화 리액턴스에 의해 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$I_m = \frac{V_m}{jwL_m} \tag{4}$$

3상 유도전동기에서 역률 보상장치의 사용전후 유효전력(P), 무효전력(Q), 피상전력(S) 및 역률(pf)의 변화는 식 (5)와 같이 전압 및 전류의 식을 이용하여 간단하게 구할 수 있다[3].

$$P = V_aI_a + V_bI_b + V_cI_c \tag{5}$$

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

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

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

2.2 자화전류와 콘덴서 전류

전동기에서 누설 리액턴스에 의한 전류는 전동기에 유입되는 전체 전류에 영향을 받지만, 자화전류는 전동기의 부하증감에는 관련 없이 거의 일정하다. 자화전류는 실제로 전동기의 출력에는 관여하지 않지만, 회전하는데 필요한 자속을 발생시키는 역할을 하는 것으로서 전동기를 여자시키는데 필요한 자화전류는 정격 전부하 전류의 20~60[%] 범위이다[2,4].유도전동기는 회전을 위해 자화성분을 필요로 한다. 이 자화성분의 에너지를 제공하는 무효전력성분이 많아지면 역률은 떨어진다.

유도전동기의 자화전류는 설계에 따라 달라지며, 고효율 전동기일수록 낮은 자속밀도에서 동작하기 때문에 낮은 편이다. 역률 보상을 위해 설치하는 커패시터는 투입 및 차단시에 자화전류를 제공하기 때문에 자체 여자 또는 발전기로서 동작하여 전동기 권선에 나쁜 영향을 줄 수 있다[4]. 그래서 NEMA Design "B" 프레임 전동기의 경우 역률을 95[%]로 유지하기 위해서는 회전수에 따라 커패시터 용량을 달리하고 있다 [5-6].

유도전동기에 필요한 무효전력을 제공하기 위해 설치하는 콘덴서 전류(I_c)는 자화성분 전류(I_m)성분보다 높을 경우 자-여자(self-excitation)현상으로 인해 권선 등이 손상을 입을 수 있으므로 용량산정에 주의해야 한다[5-6].

그림 2는 전부하에서 무부하에 이르기 까지 전동기에 유입되는 고정자 전류(I_s), 회전자 전류(I_r) 그리고 자화성분의 전류(I_m)을 나타낸 것으로서 부하의 증감에 따라 고정자에 유입되는 전류와 출력으로 전환되는 회전자 전류의 크기는 변화지만, 자화전류의 크기는 부하 증감에 관계없이 항상 일정하다. 무부하시에 고정자 전류와 회전자 전류의 위상각 크기는 높은 편이지만, 부하가 점차 증가함에 따라 위상각이 점차 줄어들 경우 역률은 점차 높아지는 것을 알 수 있다.

그림 3은 일정한 출력의 부하를 운전하는데 필요한 전력에서 회전자계를 발생시키기 필요한 무효전력을 보상하기 위해 콘덴서를 설치하기 전과 설치하고 난 다음 고정자 전류, 회전자 전류, 자화전류의 크기 변화를 나타낸 것이다. 회전자계를 발생시키는데 필요한 성분의 자화전류의 크기는 그림 3에서와 같이 역률 보상 전후에 변화가 없지만, 고정자에 흐르는 전류(I_s)와 출력에 관여하는 회전자 전류(I_r)의 위상각은 콘덴서를 설치함으로서 줄어들게 되어 역률이 향상됨을 알 수 있다. 즉 그림 3 (a)에서 자속을 발생시키는데 필요한 자화성분의 전류는 전적으로 I_m이 담당하지만, 그림 3 (b)에서는 I_c 가 일부 담당함으로서 역률 보상전의 위상각 θ_2는 역률 보상후에는 θ_1로 줄어든다.

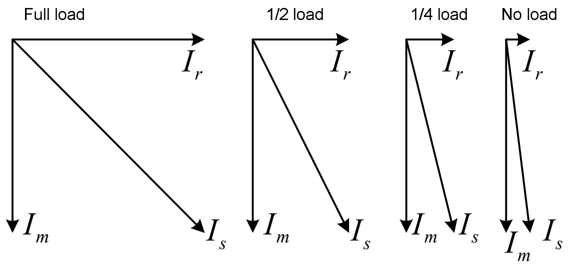


그림 2. 부하의 변화에 따른 전류의 크기
Fig. 2. Current amplitude by load variation

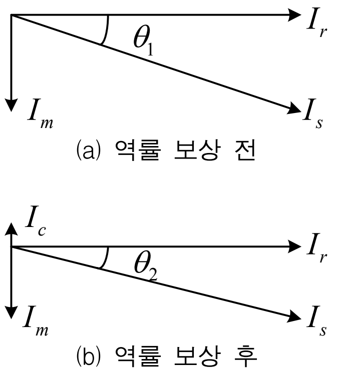


그림 3. 역률 보상 전/후 전류
Fig. 3. Current before/after power factor compensation

콘덴서는 유도성 부하인 전동기의 역률을 95[%]까지 향상시키는데 필요한 요소로서 보통 자화전류의 80[%]까지 공급하고 있다[4-5]. 그러나 역률을 좀 더 높이기 위해 사용되는 콘덴서의 용량을 증가할 경우 과여자로 콘덴서에는 역효과를 낳을 수 있다.

3. 특성해석

본 해석에는 3상 4극 75[㎾]로 3[%]의 슬립으로 유도전동기의 효율은 95[%], 역률은 80[%]로 운전할 경우 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 유도전동기 파라미터
Table. 1. Induction parameters

parameter	380[V], 4[p], 75[㎾]
stator resistance, r_s	0.024136[Ω]
rotor resistance, r_r	0.048039[Ω]
stator leakage inductance, L_{ls}	0.000386[H]
rotor leakage inductance, L_{lr}	0.000386[H]
mutual inductance, L_m	0.007813[H]

해석에 사용한 3상 유도전동기는 75[㎾] 4극으로 3[%]의 슬립으로 효율은 95[%], 역률은 80[%]로서 운전하는 조건을 가지고 부하의 변화에 따라 전력, 전류의 변화 등을 해석하였다.

현재 80[%]인 역률의 유도전동기의 역률을 95[%]로 높이기 위한 콘덴서 용량은 식 (6)과 같이 구하면 된다.

$$Q_c = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \qquad (6)$$

식 (6)에서 P는 출력이 아닌 전동기의 입력에 해당되므로 효율을 감한한 값을 대입해야 한다. 따라서 P는 78.947[㎾]을 적용하면 된다. 이를 가지고서 식 (6)에서 구한 콘덴서의 정격용량은 33.27[kVA] 로서 설치해야 할 콘덴서는 611[㎌]이다. 그러나 실제 적용할 수 있는 용량은 600[㎌]가 적합하므로 이를 이용하여 해석하였다.

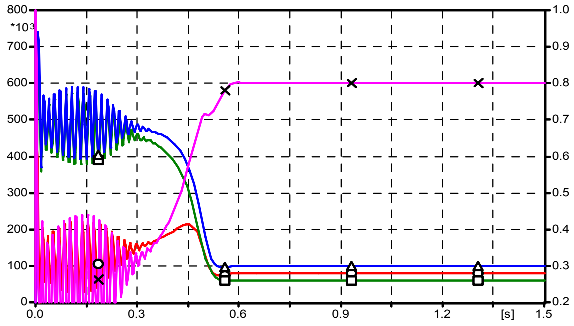
역률을 개선하기 위해 설치하는 콘덴서에 흐르는 전류는 식 (7)과 같이 구하면 된다.

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3}\,V} \qquad (7)$$

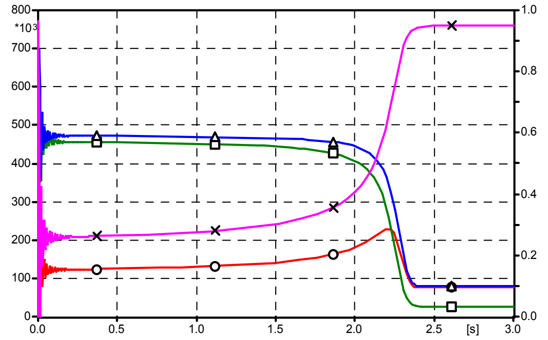
따라서 식 (7)로 구한 콘덴서에 대해 한상에 흐르는 전류는 49.6[A]가 된다.

그림 4는 표 1에서 제시한 유도전동기를 가지고서 전부하로 운전할 경우 역률 보상전과 600[㎌]의 콘덴서를 전동기 단자에 설치한 후의 전력 및 역률의 변화를 나타낸 것이다. 해석을 위해 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[7].

그림 4에서 유효전력(O), 무효전력(□), 피상전력(△)은 왼쪽 y축에 나타내었고, 오른쪽 y축에는 역률(×)을 나타내었다.



(a) 보상 전



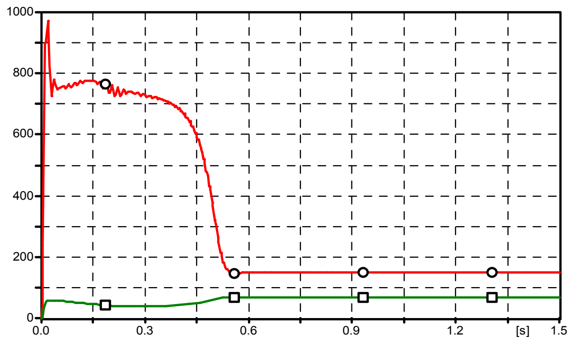
(b) 보상 후

그림 4. 보상 전/후의 전력 및 역률
Fig. 4. Power and power factor before/after compensation

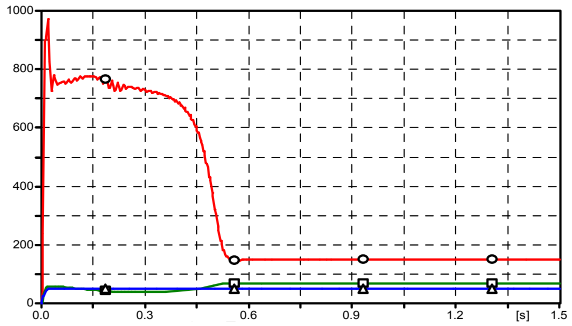
해석 결과 그림 4 (a)와 같이 역률을 보상하기 전에 유효전력, 무효전력 및 피상전력의 크기는 각각 76.27[㎾], 52.618[kVAR], 92.66[kVA]이었지만, 콘덴서를 설치할 경우 그림 4 (b)에서와 같이 유효전력에는 변화가 없지만, 무효전력 및 피상전력은 각각 25.424[kVAR], 80.386[kVA]로 줄어든 것을 확인할 수

있다. 또한 역률도 당초 0.8에서 0.95로 변화된 것을 확인할 수 있다.

다음 그림 5는 해석에 사용된 전동기의 고정자 전류(O), 자화전류(□) 그리고 콘덴서에 흐르는 전류(△)를 나타낸 것이다. 이 전동기를 여자시키는데 필요한 자화전류는 86.7[A]이다.



(a) 보상 전



(b) 보상 후

그림 5. 역률 보상 전후의 고정자전류, 자화전류, 콘덴서 전류
Fig. 5. Stator current, magnetization current, condenser current Power and power of before/after power factor compensation

보상전의 고정자 전류와 자화전류는 각각 150.05[A] 및 69.28[A]이다. 보상후에도 고정자 전류와 자화전류는 동일하고 콘덴서 전류는 49.73[A]가 되었다. 전동기를 회전시키는데 필요한 자화전류는 전동기 전류의 46.17[%]로서 허용범위 이내임을 알 수 있다. 또한 콘덴서에 흐르는 전류는 자화전류의 71.74[%]로서 전동기를 여자시키는데 필요한 범위 이내임을 알 수 있다. 따라서 과여자에 의해 콘덴서가 스트레스를 받을 우려는 없을 것으로 판단된다.

다음은 역률 개선콘덴서를 정격조건으로 정해진 상태에서 그림 2에서와 같이 전부하, 3/4부하, 1/2 부하, 1/4 부하의 4가지 운전조건에 대해 전류, 전력, 역률의 변화를 해석하였다.

표 2. 부하변동에 따른 전류, 전력 및 역률
Table 2. Current, power and power factor by load variation

구분	Full-load	3/4 Load	1/2 load	1/4 load
I_s	150.05	120.99	96.072	77.757
I_r	126.94	94.216	62.3337	30.592
I_m	69.28	69.9917	70.396	70.775
I_c	49.73	49.73	49.73	49.73
P[㎾]	78.906	59.02	39.331	19.516
Q[kVar]	26.540	20.689	16.748	14.547
S[kVA]	83.250	62.638	42.748	24.341
pf	0.948	0.94	0.92	0.80

표 2의 결과에서와 같이 부하를 줄여 운전함에 따라 고정자와 회전자에 흐르는 전류는 같이 감소하지만, 자화전류와 콘덴서 전류는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 전부하로 운전하는 경우 자화전류와 콘덴서 전류는 그림 5의 결과와 같이 허용범위 이내이다. 3/4의 부하에서 운전하는 경우에 자화전류는 고정자 전류의 57.85[%]이고, 콘덴서 전류는 자화전류의 71.05[%]로 두 가지 모두 범위 이내임을 알 수 있다. 1/2의 부하로 운전할 경우 자화전류는 고정자 전류의 73.27[%]로서 허용범위를 초과하고, 콘덴서 전류는 자화전류의 70.64[%]로서 허용범위 이내이다. 1/4의 부하로 운전할 경우 자화전류는 콘덴서 전류의 91[%]로 허용범위를 30[%] 정도 초과하고, 콘덴서 전류는 자화전류의 70.26[%]로 허용범위 이내이다.

부하를 감소함에 따라 유효전력의 감소폭 보다 콘덴서에 의한 무효전력 보충으로 무효전력의 감소폭이 낮아 역률은 오히려 줄어들게 됨을 알 수 있다.

4가지 부하 조건으로 운전한 결과 부하의 변동에서

회전자계를 발생시키는 자화전류와 무효전력을 보상하기 위해 설치한 콘덴서에 흐르는 전류는 일정하다. 그러나 부하가 감소할 경우 고정자에 인가되는 전류가 줄어들게 되어 자화전류는 허용범위를 초과하게 되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유도전동기의 지상 역률을 보상하기 위해 역률 보상 콘덴서를 설치하도록 한 경우에 대해 부하의 변동에 따라 전류, 전력 및 역률의 변화를 계산하였다. 회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류의 경우 부하의 변동에 관계없이 항상 일정하고, 또한 역률 보상 콘덴서도 일정하기 때문에 역시 전류값도 부하에 상관없이 항상 일정함을 알 수 있었다. 그러나 고정자에 유입되는 전류는 부하가 감소함에 따라 줄어들게 되므로 자화전류의 허용범위를 초과하는 부하 운전 비율을 확인할 수 있었다. 또한 부하가 감소함에 따라 역률이 떨어지므로 역률 보상을 위해서는 콘덴서를 추가할 필요가 있음을 알 수 있었다.

References

[1] 김종겸외 2인, "불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.22, No.5, pp.64-72, 2008. 05.

[2] Theodore Wildi,"Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002.

[3] 김종겸, 박영진, "유도전동기에 대한 역률 보상설비의 특성 해석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.22, No.9, pp.25-31, 2008. 09.

[4] 김종겸, "유도전동기 역률 보상 파라미터의 적정성 검토", 조명전기설비학회 논문지, Vol.22, No.12, pp.101-109, 2008. 12.

[5] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor", Taylor & Francis, 2005.

[6] NEMA, "Motor and generators", 2002.

[7] 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(K-Water) 근무. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 평의원. 전기기기 및 에너지변환시스템 부문 학술위원장. 본 학회 학술이사.
Tel : (033)760-8785
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr