

유도전동기의 자기여자 및 역률보상에 대한 연구

A Research on Self-excitation and Power Factor Compensation of Induction Motor

김 종 겹^{*}
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract - Induction motor requires a rotating magnetic for rotation. Current required to generate the rotating magnetic field is magnetizing current. This magnetizing current is associated with the reactive power. This reactive power must be supplied from source side. Therefore, the power factor of the induction motor is low. So, the capacitor is installed on the motor terminals to compensate for the low power factor. Power supply company has recommended to maintain a high power factor to the customer. If the capacitor current is greater than the magnetizing current of the motor, there is a possibility that the self-excitation occurs. So it is necessary to calculate the optimal capacity capacitor current does not exceed the magnetizing current. In this study, we first compute the no-load current and the reactive power of the induction motor and then calculates the limit of the maximum power factor without causing self-excitation.

Key Words : Active power, Exciting current, Induction motor, Magnetizing current, Reactive power

1. 서 론

유도 전동기는 다른 전동기에 비해 튼튼하고 가격이 저렴하여 일정한 속도를 필요로 하는 부하의 운전에 가장 많이 사용되고 있다[1-3].

유도전동기 토크는 전류와 자속의 곱으로서 이 자속을 발생시키기 위해서는 여자전류에 해당되는 무효전력이 필요하다. 이 무효전력은 전동기 자체적으로 만들어지지 않으므로 전원에서 공급해야 한다. 만약 전원측에서 무효전력을 제공할 경우 역률이 떨어지므로 대개 전동기 단자에 커패시터를 설치하여 무효전력을 전원측을 대신하여 전동기에 공급한다.

유도전동기의 역률은 대개 90% 이하이므로 전력회사에서는 수용가의 역률이 95% 이상 유지하도록 요구하고 있다. 이를 위해서는 전동기 단자에 커패시터를 설치하여 필요한 무효전력을 자체적으로 제공하고 있다.

전동기 단자에 설치하는 커패시터는 무효전력을 발생하지만, 그 용량이 전동기 자화에 필요한 무효전력보다 높을 경우 자기여자 현상의 발생으로 전동기 권선에 전기적인 스트레스로 작용할 수 있다[2-8]. 그래서 전동기에 전기적인 스트레스를 줄이면서 역률을 향상시키기 위해 설치하는 커패시터의 용량을 결정하기 위해서는 전동기의 자화에 필요한 전류와 무효전력의 정확한 계산이 필요하다.

본 연구에서는 역률 개선용으로 설치하는 커패시터가 유도전동기의 자기여자를 일으킬 가능성이 없는 범위에서 최대 역률을 개선할 수 있는지를 분석하였다.

2. 자화전류 및 무효전력

전동기가 무부하에서 회전할 때 고정자 전류는 전부하 전류의 0.3~0.5[pu] 정도가 흐른다. 이 무부하 전류는 변압기의 여자전류와 비슷하다. 이 여자전류는 회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류(I_m)와 철손 및 마찰손을 공급하는 유효전류의 합이다. 유도전동기의 경우 공극이 있으므로 자화전류가 크고, 마찰손이 있기 때문에 유효전류가 많이 흐르므로 변압기에 비해 무부하 전류가 큰 편이다[4].

저장된 전기적 기계적 에너지를 가지는 전동기와 커패시터 회로에서 둘 사이를 순환하는 전류가 흐를 경우 전압이 발생한다. 이를 유도기의 자기여자라고 한다[8]. 유도전동기가 정지한 경우 역률 보상 커패시터는 자화전류를 제공하여 전동기는 자기여자 또는 발전기로 동작할 수 있다[5, 8]. 이때 발생한 전압의 크기는 커패시터 전류와 전동기 속도에 따라 달라진다. 자기여자 전압의 크기는 전동기의 설계, 회전속도 및 회전자의 관성 모멘트에 의해 좌우된다. 자기여자 전압은 대개 수초 안에 없어지지만, 회전체의 관성이 클 경우 수분 동안 지속할 수 있다[5].

유도전동기는 회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류에 해당되는 무효전력이 필요하다. 이 무효전력은 전원측에서만 제공받을 경우 역률이 떨어진다. 커패시터가 자화전류의 일부분을 제공할 수 있어 대부분의 경우 전동기 단자에 커패시터를 설치하여 필요한 무효전력의 상당한 부분을 자체적으로 해결한다.

그림 1은 전동기의 입력에서 출력에 이르기까지의 에너지 변환관계를 설명하기 위한 유도전동기의 단상 등가회로도이다. 고정자에 유입된 전류(I_1)에서 회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류(I_m)를 제외한 전류(I_2)가 회전자에 흘러 출력으로 변환된다. 그림 1과 같은 등가회로도에는 저항 및 리액턴스 성분으로 지상회로이기 때문에 역률이 낮다. 그래서 고정자측에 역률 보상을 위해 커패시터를 설치하여 자화에

^{*} Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2014년 8월 25일

수정일자 : 2014년 11월 13일

최종완료 : 2014년 11월 17일

필요한 무효전력을 제공하여 역률을 개선할 수 있다.

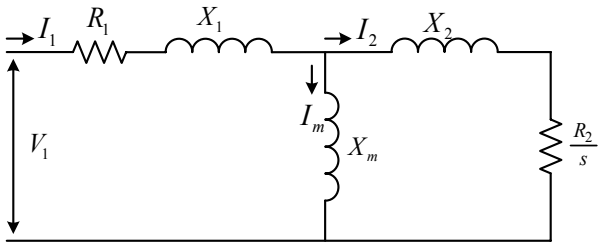


그림 1 유도전동기의 등가회로도
Fig. 1 Equivalent circuit diagram of induction motor

유도전동기 고정자에 유입되는 유효전력 및 무효전력은 그림 1의 단상 등가회로도를 참조하여 식 (1) 및 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P = Re\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (1)$$

$$Q = Im\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (2)$$

유도전동기에서 무효전력은 회전자계를 만드는데 필요하다. 이 무효전력은 부하의 증감에 관계없이 거의 일정한 값을 유지한다. 무효전력을 전원측에서만 공급할 경우 전원측의 역률이 떨어지므로 전동기측에서 단자에 병렬로 커패시터를 설치하여 전원측을 대신하여 무효전력을 제공할 경우 역률을 향상시킬 수 있어 많이 사용하고 있다. 전동기에 필요한 무효전력을 전원측으로부터 공급받는 것을 대신하여 전동기 단자에 설치하는 무효전력 보상용 커패시터의 용량은 다음과 같이 구한다.

$$Q_{c1} = P \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}}{\cos \theta_1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}}{\cos \theta_2} \right) \quad (3)$$

여기서 $\cos \theta_1$ 은 보상전의 역률이고, $\cos \theta_2$ 는 보상후의 역률이다.

식 (3)에서 역률 보상용 커패시터에 흐르는 전류(I_c)는 다음과 같다.

$$I_c = \frac{Q_{c1}}{\sqrt{3} V_1} \quad (4)$$

역률 보상을 위해 설치하는 최대 무효전력은 다음과 같이 구할 수도 있다[9].

$$Q_{c2} = \sqrt{3} \times \frac{AT_g}{AT_m} \times V_1 I_m \quad (5)$$

위 식 (5)에서 AT_g , AT_m 은 각각 공극 및 자화 기자력이고, I_m 은 자화전류를 의미한다. 식 (5)는 기자력 및 자화전류를 파악하기 어려운 엔지니어가 사용하는데 다소 어려움이 있다.

유도전동기의 자기여자 현상에 의한 권선의 전압 스트레스를 막기 위해서는 다음과 같은 커패시터의 용량 고려가 필요하다[10, 11].

$$Q_{c3} \leq 0.9 \times \sqrt{3} \times V_1 I_o \quad (6)$$

식 (6)에서 I_o 는 전동기를 운전할 때 1차측에 흐르는 무부하 전류이다. 무부하 전류는 전동기 특성시험에서 무부하 운전으로 운전할 경우 확인할 수 있다. 그러나 무부하 전류는 전동기의 전부하 전류(I_n)와 역률($\cos \theta$)로 다음과 같이 구할 수 있다[10, 11].

$$I_o = 2I_n(1 - \cos \theta_1) \quad (7)$$

식 (7)에서 구한 무부하 전류를 식 (6)에 대입하여 커패시터 용량을 구할 경우 식 (3)에서 구한 것과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있다.

그림 1의 등가회로도에서 자화전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_m = \frac{V_1 - I_1(R_1 + jX_1)}{jX_m} \quad (8)$$

식 (4)와 식 (8)의 전류로부터 각각의 리액턴스를 구할 수 있다.

그림 2는 유도전동기의 자화곡선 및 커패시터의 특성을 나타낸 것이다. 그래프에서 커패시터 특성은 직선 형태를 나타내지만, 전동기의 자화전류를 직선과 포화구간을 포함하고 있다. 그림 2에서 C_1 은 역률 보상을 위해 설치하는 커패시터로서 적절하며, 커패시터에 흐르는 전류가 공칭전압에서 자화전류보다 낮지만, C_2 는 전동기 자화리액턴스 보다 기울기가 완만하여 역률 보상용으로 부적절한 것이며 공칭전압에서 커패시터 전류가 자화전류보다 높다. 그림 2에서 커패시터 C_1 및 C_2 그리고 자화곡선에 대한 기울기가 임피던스 값이므로 용량성 임피던스 $X_{c1} > X_m$ 의 조건이 되도록 커패

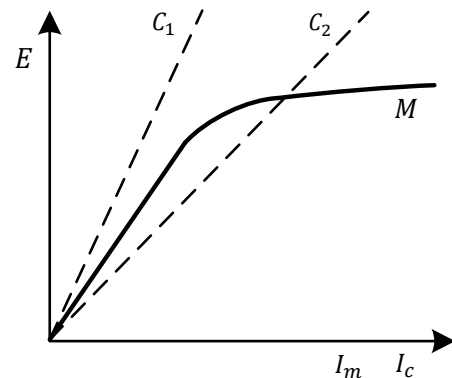


그림 2 전동기 자화곡선 및 커패시터 특성 곡선
Fig. 2 Motor magnetization curve and capacitor characteristic curves

시터를 적용해야 한다.

유도전동기의 자화곡선은 설계에 따라 궤적이 달라진다. 효율이 높은 전동기는 자화곡선의 기울기가 커서 작은 자화곡선 포인트에서 동작하므로 역률을 개선하기 위해 더 작은 커패시터를 필요로 한다[8].

그림 2에서 전동기 자화곡선과 커패시터 전류/전압 특성을 나타내는 직선의 교차점은 커패시터의 스위칭 동작이후 거의 단자전압이 된다.

3. 계산 및 결과 분석

유도전동기 회전자계 발생에 필요한 자화전류를 담당하는 무효전력을 전원측을 대신하는 제공하기 위해 설치하는 커패시터의 정격을 선정하기 위해서는 유도전동기에 대한 정확한 파라미터가 제공되어야 한다. 본 연구에서 사용한 3상 4극 460V 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 유도전동기 파라미터

Table 1 Induction motor parameter

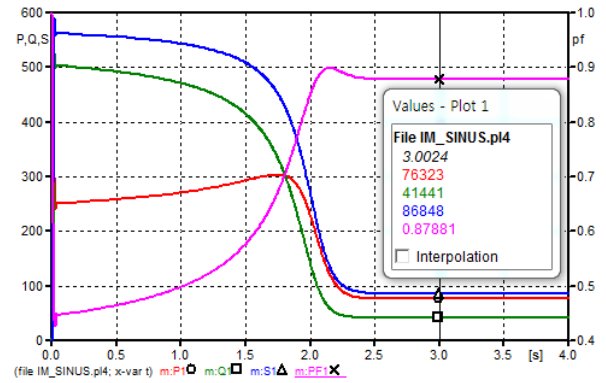
parameters	Values
stator resistance, R_1	0.095[Ω]
rotor resistance, R_2	0.075[Ω]
stator leakage reactance, X_1	0.189[Ω]
rotor leakage reactance, X_2	0.151[Ω]
magnetizing reactance, X_m	6.032[Ω]
rotation speed[RPM]	1,746

표 1에서 주어진 파라미터로 우선 자화전류와 무효전력을 찾아야 한다. 그림 3은 역률 보상 커패시터 설치 전후의 유효전력, 무효전력, 피상전력 및 역률의 변화를 구한 결과이다. 해석에는 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[12].

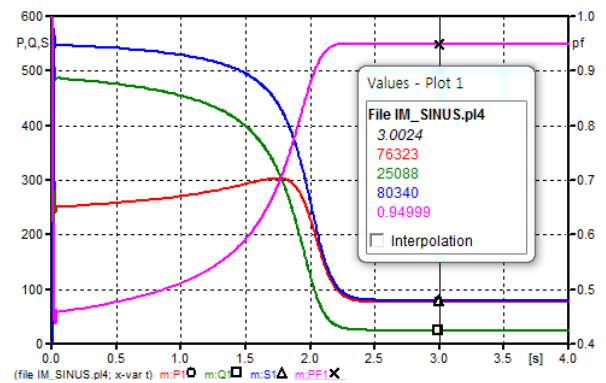
그림 3(a)에서 역률 보상 전에 유도전동기의 역률(PF:×)이 0.8788이므로 전력회사에서 요구하는 0.95의 역률 유지를 위해 식 (3)을 이용하여 필요한 커패시터 용량을 찾아 전동기 단자에 부착하였을 경우에 대한 전력 및 역률에 대한 해석결과는 그림 3(b)와 같다.

그림 3에서 역률 보상 커패시터의 설치 전후에 유효전력(P1:○)의 크기는 변화가 없지만(76.3→76.3kW), 무효전력(Q1:□)은 그림 3(a)와 같이 커패시터 설치 전 41,441[VAR]에서 그림 3(b)와 같이 커패시터를 설치한 경우에는 25,088[VAR]로 감소한 것을 알 수 있다. 이때 커패시터에 의해 제공된 역률 보상을 커패시터의 용량은 16.353[kVAR]이다. 식 (6)에 제시된 공식을 이용하여 계산할 경우 17.01[kVAR]의 무효전력이 구해지므로 역률 보상을 커패시터의 용량 16.3[kVAR]의 값보다 높으므로 자기여자를 일으키지 않는 허용범위 이내임을 알 수 있다.

그림 4는 그림 3(b)와 같은 조건에서의 유도전동기 자화전류(○)와 역률 보상을 위해 설치한 커패시터에서 흐르는 전류(□)를 비교한 것이다. 여기서 제시한 커패시터를 적용할 경우 그림 2에서와 같이 커패시터에 흐르는 전류(20.5[A])가 전동기의 자화전류(40.9[A])보다 낮기 때문에 자기여자에 대



(a) 설치 전



(b) 설치 후

그림 3 커패시터 설치 전후 전력 및 역률

Fig. 3 Power and power factor before/after capacitor

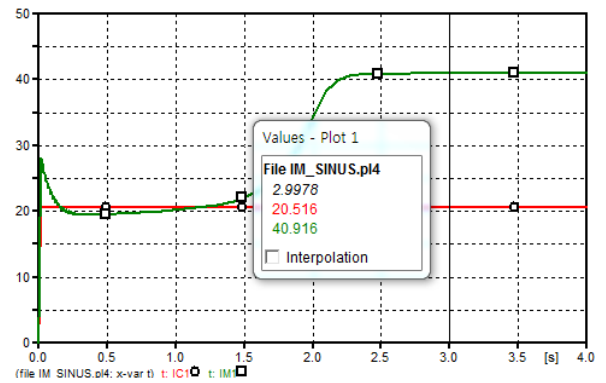


그림 4 자화전류와 커패시터 전류

Fig. 4 Magnetization current and capacitor current

한 문제 가능성은 없다.

그림 5는 역률이 거의 1에 가깝게 역률 보상을 커패시터를 설정하고서 전력 및 역률을 계산한 결과이다. 커패시터 용량의 증가에도 유효전력의 크기(76,323[W])는 그림 4에서와 같이 전혀 변화가 없지만, 유도전동기에 필요한 무효전력의 대부분은 커패시터에서 제공하므로 전원측에서 공급되는 무효전력은 9,133[VAR]로 매우 줄어들었기 때문에 피상전력도 함께 줄어든 것을 알 수 있다. 따라서 역률은 거의 1에 가깝게 된다. 그러나 식 (6)에서 제시한 값의 범위를 초과할 수 있다.

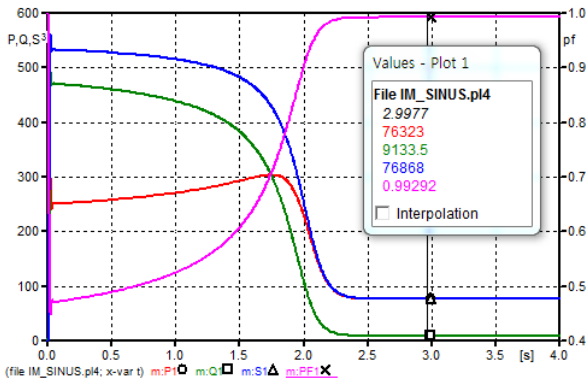


그림 5 역률이 1에 가까울 때의 전력 및 역률
 Fig. 5 Power and power factor when power factor is close to 1

그림 6은 그림 5와 같은 운전 조건에서 유도전동기의 자화전류(○)와 역률 보상을 위해 설치한 커패시터에서 흐르는 전류(□)를 비교한 것이다. 그림 2에서 커패시터의 경우 전류 대 전압 곡선이 직선이지만, 유도전동기의 경우 자화곡선은 선형 및 비선형 영역으로 구성되어 있다. 자화곡선의 선형구간만 고려할 경우 커패시터에 흐르는 전류(40.5[A])와 전동기의 자화전류(40.9[A])가 거의 동일하므로 그림 2에서와 같이 두 곡선의 기울기가 거의 같은 모양으로 역률은 거의 1까지 향상시킬 수 있다.

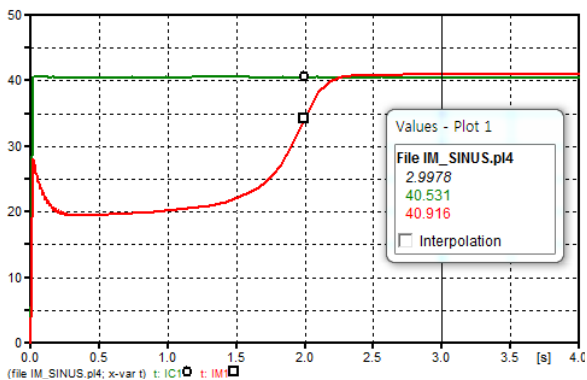


그림 6 자화전류와 커패시터 전류
 Fig. 6 Magnetization current and capacitor current

표 2는 역률 보상 전후에 무효전력과 용량성 리액턴스의 계산 결과이다. 유도전동기의 역률을 당초 0.87788에서 0.95까지 높이는 경우는 자기여자를 일으킬 가능성이 낮지만, 역률이 0.96을 초과할 경우 대부분의 커패시터 제작사에서 제시한 식 (6)의 범위를 초과하기 때문에 자기여자를 일으킬 가능성이 있음을 알 수 있다. 실제 저압 4극 75kW 유도전동기의 역률 개선을 위해 권장하는 커패시터의 무효전력은 17[kVAr]이다.

유도전동기에 필요한 무효전력을 전원측을 대신하여 단자에 커패시터를 설치하여 역률을 향상시키는데 자기 여자를 일으킬 염려가 없는 조건까지 최대한 역률을 높일 수 있는 무효전력을 계산하였다. 계산 결과 유도전동기의 역률을 95%까지는 가능하나 그 이상 높이기 위해 커패시터 용량을

표 2 역률 보상 전후의 무효전력

Table 2 Reactive power before and after power factor compensation

구분	power factor			
	before	0.95	0.96	0.97
Q_{c1} [kVAr]	41	16.3	19.1	22.3
Q_{c3} [kVAr]	-	17.9	17.9	17.9

증가할 경우 자기여자를 일으킬 우려가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 유도전동기의 운전에서 자속을 발생시키는데 필요한 자화전류를 공급하는 무효전력을 전원측에서 전부 공급할 경우 역률이 떨어지므로 전동기 단자에 커패시터를 설치할 경우 자기 여자와 같은 문제가 일어나지 않는 범위에서 얻을 수 있는 역률의 한계를 확인하기 위한 해석 결과이다.

역률 향상은 전력회사에 도움이 되므로 가능한 높게 설정하도록 하고 있지만, 커패시터의 용량성 리액턴스가 전동기 자화리액턴스 보다 낮을 경우 자기여자로 인해 전동기에 전기적인 스트레스로 작용할 수 있다. 그래서 전동기의 역률을 어느 정도까지 안정되게 향상시킬 수 있는지를 확인하기 위해 무부하 및 자화전류를 구하고, 무효전력과 역률을 분석 후 커패시터를 설치하여 자기여자가 발생하지 않는 범위까지 역률을 향상시킬 수 있도록 커패시터의 용량을 계산하였다. 계산 결과 유도전동기 역률이 어느 범위를 초과할 경우 자기여자를 일으킬 수 있는 가능성 영역에 들어갈 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구결과는 향후 자기여자 유도발전기의 전압발생 메커니즘 분석에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] Theodore Wildi, Electrical Machines, Drives and Power Systems, Prentice Hall, 2002
- [2] Jong-Gyeum Kim, "Characteristic Comparison Analysis for Standard and High-Efficiency Induction Motor", KIEE, Vol.56P, No.4, pp.186-190, 2007. 12
- [3] NEMA, Motor and Generators, 2002
- [4] Minh Park, Induction Machines, Dongmyungsa, pp.315, 1990
- [5] Ramasamy Natarajan, Power System Capacitor, Taylor & Francis, 2005
- [6] Jong-Gyeum Kim, "Suitability Review for Power Correction Parameter of Induction Motor", KIIEE, Vol.22, No.12, pp.101-109, 2008.12
- [7] Jong-Gyeum Kim, Youn-Jeen Park, "A Characteristic Study on the Power Factor Correction Application

for the Induction Motor”, KIIEE, Vol.22, No.9, pp.25-31, 2008.09

- [8] IEEE Std 141-1993, Power factor and related considerations
- [9] TECO-Westinghouse Technical Report, No.014, 2013, Feb
- [10] Schneider Electric Technical Report, Industrial Electrical Network Design Guide, pp.622,
- [11] <http://nepsi.com/resource>, “Self-Excitation Concerns with Power Factor Correction on Induction Motors”, pp.1-4.
- [12] H.W. Dommel, Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book), BPA 1986.

저 소 개



김 종 겸 (金 宗 謙)

1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수, 현재 당학회 평의원

Tel : 033) 760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr