

# 유도전동기 효율향상에 따른 역률 보상 콘덴서 최적 선정에 대한 연구

## A Study on the Optimum Selection of the Power Factor Compensation Condenser According to the Improved Efficiency of Induction Motor

김 종 겹\*  
(Jong-Gyeum Kim)

**Abstract** - Induction motor requires a rotating magnetic field for rotation. Current required to generate the rotating magnetic field is immediately magnetizing current. This magnetizing current is associated with the reactive power. Induction motor is always required reactive power. If reactive power is supplied only to the power supply side, the power factor is low. Therefore, it is to compensate the power factor by connecting capacitors in parallel to the motor terminal. If the capacitor current is greater than the magnetizing current of the motor, there is a possibility that the self-excitation occurs. High voltage generated by the self-excitation leads to insulation failure on the motor. So it is necessary to calculate the power factor correction capacitor capacity the most suitable to the extent that the magnetizing current does not exceed the capacitor current. In this study, we first computed the magnetization current and the reactive power of the induction motor and then calculates a limit of the maximum power factor by comparing the magnetizing current and the capacitor current installed in order to achieve the target power factor.

**Key Words** : Active power, Capacitor, Magnetizing current, Power-factor, Reactive power

### 1. 서 론

유도 전동기는 산업현장에서 사용되는 부하 중에서 거의 80% 차지할 정도로 에너지 소비량이 매우 높은 비중을 차지하고 있다 [1,2,3]. 그래서 사용되고 있는 유도전동기의 효율을 향상시켜 에너지 소비량을 줄이는 연구가 계속되고 있다. 최근 재료, 설계 및 제작기술의 향상으로 기존 표준 효율(IE1)을 가진 유도 전동기는 거의 사라지고, 고효율(IE2)의 전동기가 기본 전동기 자리를 한때 차지하였으나, 현재는 생산된 에너지를 효율적으로 관리하기 위해서 효율을 더욱 높은 프리미엄급(IE3)과 슈퍼 프리미엄급(IE4)으로 등급을 상향 조정하고 있다[4,5].

유도전동기는 유도성 부하로 역률이 낮으며, 회전자계를 발생 시키기 위해서는 무효전력을 운전중에 지속적으로 공급해야 하므로 이를 위해 역률 개선용 콘덴서를 전동기 단자에 설치하여 역률 개선을 실시하고 있다[5~9]. 지금까지 설계, 재료 등의 기술 개발로 인해 전동기의 효율은 점차 개선되었지만, 효율 향상에 따른 전동기의 무효전력 변화에 대한 정확한 계산 없이 역률 개선을 위해 기존에 제시된 전압별, 용량별 콘덴서를 그대로 적용하고 있다. 전동기 효율이 개선될 경우 자화전류가 변화하기 때문에 이에 대한 정확한 값의 선정이 요구된다. 역률 개선용 콘덴

서와 자기여자에 의해 공진이 발생할 경우 높은 전압으로 권선 고장에 이르게 할 수 있으므로 자기여자를 일으키지 않는 범위에서 최대한의 역률을 보상할 수 있는 콘덴서 파라미터 산출이 필요하다.

본 논문에서는 유도전동기의 효율 향상에 따라 전동기의 등가 회로도에서 자화전류에 대한 정확한 값을 산출하여 목표하는 역률을 얻되 자기여자를 일으키지 않는 콘덴서를 선정하였다.

### 2. 자화전류 및 무효전력

유도전동기가 무부하에서 회전할 때 고정자 전류는 전부하 전류의 0.3~0.5[pu] 정도가 흐른다. 유도전동기 무부하 운전시에 흐르는 전류는 변압기의 여자전류와 비슷하다. 이 여자전류는 회전자계를 만들어 주는데 필요한 자화전류( $I_m$ )와 철손 및 마찰손을 공급하는 유효전류의 합이다. 유도전동기의 경우 공극이 있으므로 자화전류가 크고, 마찰손이 있기 때문에 변압기에 비해 유효전류가 많이 흐르므로 무부하 전류가 높은 편이다[3].

유도전동기는 회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류에 해당하는 무효전력을 필요로 한다. 이 무효전력은 유효전력과 같이 일을 하는데 사용하지 않지만, 전동기 회전에 필수요소로서 자체적으로 만들어지지 않으므로 전원측으로부터 항상 제공받아야 한다. 전동기 단자에 설치하는 콘덴서의 용량이 전동기에 적합하지 않을 경우 고장을 일으킬 수 자기여자 현상을 초래한다. 자기여자는 콘덴서의 용량성 무효전류가 전동기의 자화전류보다 클 때

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

E-mail:jgkim@gwnu.ac.kr

Received : June 2, 2016; Accepted : June 20, 2016

주로 발생하며 지나칠 경우 권선에 높은 전기적 스트레스로 작용할 수 있다[10,11,12].

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 등가회로도는 저항 및 리액턴스 성분으로 지상회로이기 때문에 역률이 낮다. 그래서 고정자측에 역률 보상을 위해 콘덴서를 설치하여 자화에 필요한 무효전력을 제공하여 역률을 개선할 수 있다.

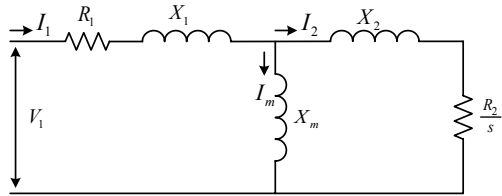


그림 1 유도전동기의 등가회로도

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of induction motor

유도전동기의 고정자에 흐르는 전류  $I_1$ 은 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{V_1}{(R_1 + jX_1) + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right)}}} \quad (1)$$

자속을 발생하기 위해 자화에 필요한 전류가 흐를 때의 전압은 식 (2)와 같다.

$$E_1 = V_1 - I_1(R_1 + jX_1) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 자화에 필요한 전류  $I_m$ 은 식 (3)과 같이 구해진다.

$$I_m = \frac{E_1}{jX_m} \quad (3)$$

유도전동기 고정자에 유입되는 유효전력 및 무효전력은 그림 1의 단상 등가회로도를 참조하여 식 (4) 및 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$P = Re\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \overline{I_1}\right) \quad (4)$$

$$Q = Im\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \overline{I_1}\right) \quad (5)$$

유도전동기에서 무효전력은 회전자계를 만드는데 필요하다. 무효전력을 전원측에서만 공급할 경우 전원측의 역률이 떨어지므로 전동기측에서 단자에 병렬로 콘덴서를 설치하여 전원측을 대신하여 무효전력을 제공할 경우 역률을 향상시킬 수 있다.

유도전동기에 필요한 무효전력을 전원측으로부터 공급받는 것을 대신하여 전동기 단자에 설치하는 무효전력 보상용 콘덴서의 용량은 다음과 같이 구한다.

$$Q_{cl} = P \left( \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}}{\cos \theta_1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}}{\cos \theta_2} \right) \quad (6)$$

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

식 (6)에서 역률 보상용 콘덴서에 흐르는 전류( $I_c$ )는 다음과 같다.

$$I_c = \frac{Q_{cl}}{\sqrt{3} V_1} \quad (7)$$

유도전동기의 자화와 관련하여 유도성 또는 지상 전류를 줄이기 위해 설치하는 콘덴서가 전동기에 적절하지 않을 경우 전동기 고장을 일으킬 수 있으며, 적정 사이즈를 초과할 경우 자기여자를 일으켜 전동기 절연고장을 일으킬 수 있다[12]. 그래서 저압 전기기계에서 380V로 사용하는 경우 역률을 보상하기 위한 콘덴서의 용량은 부하정격 입력[kVA]의 최저 1/3~1/2로 권장하거나 유도전동기의 자기여자 현상에 의한 권선의 전압 스트레스를 막기 위해서는 다음과 같은 역률 보상용 콘덴서의 용량의 고려가 필요하다[11,12].

$$Q_2 \leq 0.9 \times \sqrt{3} \times V_1 I_0 \quad (8)$$

식 (8)에서  $I_0$ 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 근사화하여 계산할 수 있다[12].

$$I_0 = 2 I_n (1 - \cos \theta_1) \quad (9)$$

유도전동기의 자기여자 현상은 권선에 전압 스트레스를 작용할 수 있으므로 이 자기여자 현상을 피하기 위해서는 역률 보상을 위해 설치하는 용량성 리액턴스( $X_c$ )는 전동기의 자화 리액턴스( $X_m$ )보다 높아야 하기 때문에 콘덴서에 흐르는 전류는 자화 전류보다 작아야 한다[7,12].

$$I_c < I_m \quad (10)$$

### 3. 계산 및 결과 분석

유도전동기 회전자계 발생에 필요한 자화전류를 담당할 수 있는 무효전력을 전원측을 대신하는 제공하기 위해 설치하는 콘덴서의 정격을 선정하기 위해서는 유도전동기에 대한 정확한 파라미터가 제공되어야 한다. 본 연구에서 사용한 3종류의 3상 4극 380V 30kW 유도전동기의 효율에 따른 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 효율에 따른 유도전동기의 파라미터

Table 1 Parameters of the induction motor according to the efficiency

구분	Standard efficiency (IE1)	High efficiency (IE2)	Premium efficiency (IE3)
efficiency(%)	89.5	93.0	94.1
power factor	0.835	0.835	0.835
stator resistance [ $\Omega$ ]	0.232237	0.128703	0.094414
rotor resistance [ $\Omega$ ]	0.114996	0.120365	0.122223
stator inductance [H]	0.000665	0.000774	0.000801
rotor inductance [H]	0.000665	0.000774	0.000801
magnetizing inductance [H]	0.018288	0.020690	0.021453

표 1에서와 같이 효율이 향상됨에 따라 고정자 저항은 그 값이 점차 줄어들지만, 고정자와 회전자 그리고 자화 인덕턴스 값은 역으로 조금씩 증가한 것을 알 수 있다. 이는 고정자에서 저항을 줄여 손실을 감소한 것이며, 인덕턴스 값이 증가한 것은 자성재질의 에너지 밀도를 높인 결과이다. 또한 효율이 높아질수록 자화곡선의 기울기는 효율이 낮은 것에 비해 약간 가파르기 때문에 무효전력이 줄어들게 되므로 여자를 위해 추가적으로 콘덴서를 필요로 한다.

표 1에서 제시한 효율에 따른 3가지 종류(IE1:○, IE2:□, IE3:△)의 유도전동기에 대해 역률 보상전의 유효 및 무효전력, 자화전류, 출력과 역률에 대한 해석결과는 그림 2~6과 같다.

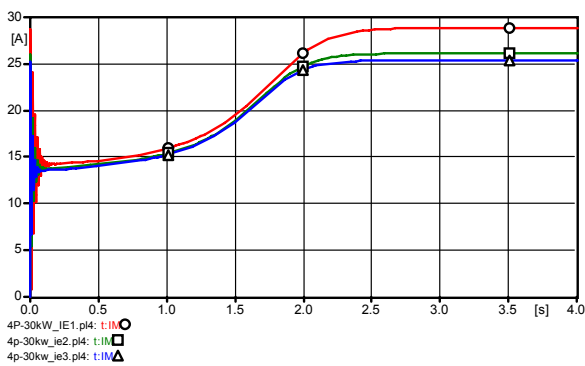


그림 2 효율에 따른 자화전류  
Fig. 2 Magnetization current according to the efficiency

그림 2는 같은 30kW 용량의 유도전동기에 대해 효율에 따른 자화전류를 비교한 것으로서, 표준 전동기(IE1)보다 효율이 높아질수록 자화전류가 더 낮아지는 것을 알 수 있다. 따라서 효율의

증가에 따른 자화전류의 변동시 역률을 향상시키기 위해 설치하는 콘덴서의 파라미터도 변화가 필요하다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 기동 초기에서부터 정격속도에 도달할 때까지의 3종류의 유도전동기에 대한 유효전력의 변화를 나타낸 것이다. 기동 초기에 효율이 낮은 전동기(IE1)가 가장 높은 유효전력을 필요로 하고, 효율이 높아질수록 전동기에 공급되어야 할 유효전력은 낮은 편이며, 정격속도에 도달하고 난 이후에는 그 차이가 조금 줄어들지만, 그래도 효율이 높은 전동기에 비해 효율이 낮은 전동기가 유효전력을 더 필요로 함을 알 수 있다. 이는 같은 출력의 부하를 운전하는 경우 유효전력의 차이가 존재하므로 효율에 차이가 존재하게 되는 이유이다.

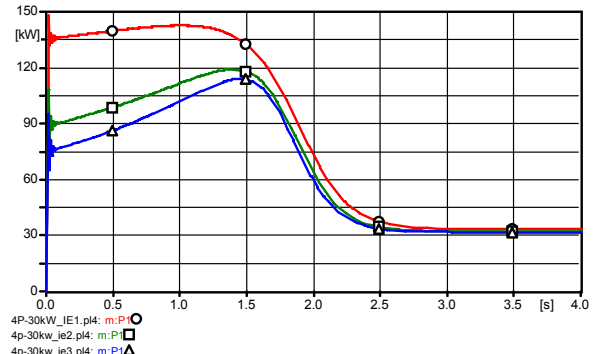


그림 3 효율에 따른 유효전력  
Fig. 3 Active power according to the efficiency

그림 4는 기동에서부터 정격속도로 회전할 때까지의 효율이 서로 다른 3종류 유도전동기의 무효전력 변화를 계산한 것이다. 그림 3에서와 달리 기동초기에 무효전력은 효율이 높은 전동기가 효율이 낮은 전동기에 비해 낮다는 것을 알 수 있다. 정격속도에서는 그 차이가 반대로 나타남을 알 수 있다. 따라서 같은 정격의 유도전동기라도 효율증가에 따라 무효전력이 감소하게 되므로 역률 보상을 위한 콘덴서의 파라미터는 다르게 선정할 필요가 있음을 알 수 있다.

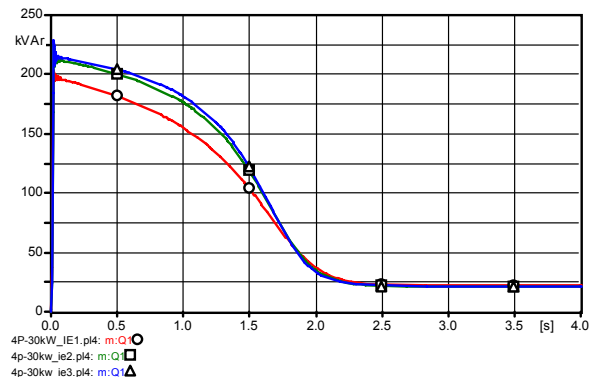


그림 4 효율에 따른 무효전력  
Fig. 4 Reactive power according to the efficiency

그림 5는 기동에서부터 최대 및 정격속도로 운전할 때까지 표준(IE1), 고효율(IE2) 및 프리미엄(IE3) 유도전동기 효율에 따른 출력을 비교한 것이다. 최대 토크가 발생할 때는 제외하고는 기동 초기나 정격속도로 회전할 때 효율에 따른 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다.

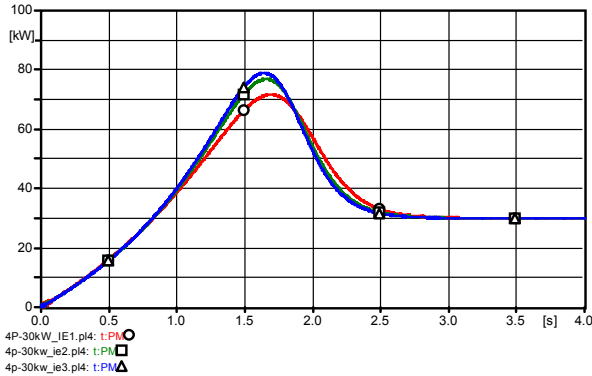


그림 5 효율에 따른 전동기 출력  
Fig. 5 Output according to the efficiency

그림 6은 기동 초기에서부터 정격속도로 운전할 때까지 효율 차이에 따른 3종류의 유도전동기에 대한 역률 변화를 나타낸 것이다. 효율이 낮은 전동기가 기동 초기 높은 역률을 나타내는 것은 그림 3 및 4에서 알 수 있듯이 기동 초기 무효전력에 비해 상대적으로 유효전력을 더 필요하기 때문이다. 속도가 증가하여 정격속도에서는 거의 같은 역률을 나타내는 것을 알 수 있다.

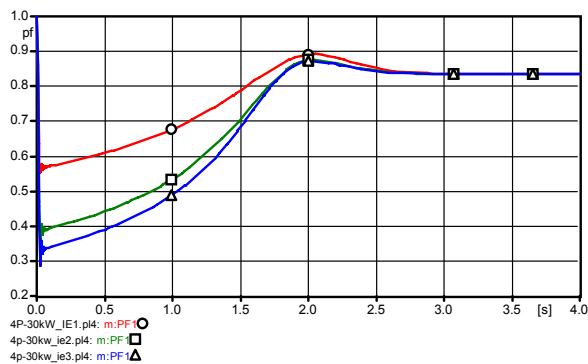


그림 6 효율에 따른 역률  
Fig. 6 Power factor according to the efficiency

효율의 차이에 따른 유효 및 무효전력의 변화는 역률 보상을 위한 기초 자료가 된다. 표 2는 정격 용량의 부하를 운전할 때 효율 차이에 따라 역률 보상하기 전의 전력을 비교한 것이다. 유도전동기의 효율이 높아짐에 따라 고정자에 인가되는 유효 및 피상전력 그리고 자화를 위한 무효전력이 조금씩 감소함을 알 수 있다. 같은 출력에서 유효전력의 감소는 전동기의 효율에 관련된 것이지만, 여자에 필요한 무효전력의 감소는 기존에 제시된 효율의 역률 보상용 콘덴서가 효율향상에 따라 용량 변화가 필요하다는 것을 알 수 있다.

표 2 정격 운전시 효율에 따른 전력

Table 2 Power according to the efficiency during rated operation

구분	IE1	IE2	IE3
P[W]	34,001	33,005	32,687
Q[VAR]	22,204	21,408	21,188
S[VA]	40,609	39,340	38,953

표 1에서 제시된 유도전동기의 역률은 전력회사에서 요구하는 값이 미치지 못하기 때문에 유도 전동기에 필요한 무효전력을 보상하기 위해 콘덴서를 전동기 단자에 병렬로 연결하여 무효전력을 보완함으로써 전원측에서 공급하는 피상전력의 값을 낮추어야 한다.

표 3은 3가지 종류의 유도전동기에 대해 기존의 역률을 95%로 조정할 경우 콘덴서의 용량( $Q_{c1}$ ), 공진을 일으키지 않는 범위의 콘덴서 용량( $Q_{c2}$ ), 자화전류( $I_m$ ), 역률을 95%로 조정할 경우의 콘덴서 전류( $I_c$ )와 콘덴서 용량(cap[ $\mu F$ ])을 계산한 결과이다. 공진을 일으킬 수 있는 콘덴서의 용량( $Q_{c2}$ )은 역률을 95%로 보상할 콘덴서 용량( $Q_{c1}$ )의 거의 62%에 해당되는 것을 확인할 수 있다. 자기여자가 일어나지 않도록 콘덴서 전류는 자화전류보다 낮아야 하지만, 고효율(IE2) 및 프리미엄(IE3) 전동기의 경우 반대가 되므로 원하는 역률보다 낮게 설정하지 않을 경우 자기여자를 일으킬 가능성이 높아질 수 있다. 또한 효율이 증가함에 따라 자화전류도 감소하기 때문에 보상되어야 할 무효전력이 줄어들게 되므로 기존 30kW 전동기의 역률 보상 콘덴서 용량은 효율이 증가함에 따라 그 값을 줄여야 한다. 그러나 대부분의 경우 표준용량에 적용되고 있는 콘덴서를 효율이 증가된 전동기에 그대로 적용하고 있다.

표 3 보상 무효전력, 자화전류, 콘덴서 전류 및 역률 보상 콘덴서 파라미터

Table 3 Reactive power compensation, magnetizing current, capacitor current, power factor correction capacitor current parameters

구분	IE1	IE2	IE3
$Q_{c1}$ [var]	11,022	10,555	10,444
$Q_{c2}$ [var]	6,862	6,581	6,510
$I_m$ [A]	16.65	14.99	14.58
$I_c$ [A]	16.76	16.04	15.87
cap[ $\mu F$ ]	202	194	191

3상, 380V, 30kW 정격의 유도전동기의 역률보상에는 200 $\mu F$ 의 콘덴서를 표준으로 사용하고 있다. 자기여자를 일으키지 않는 범위에서 이보다 낮은 정격의 콘덴서 용량은 180 $\mu F$ 과 150 $\mu F$ 이다. 그래서 이 규격의 콘덴서를 IE1, IE2와 IE3의 전동기에 적용할 경우 자화전류와 콘덴서 전류 그리고 전력 및 역률의 변화를 해석한 결과는 표 4와 같다. 200 $\mu F$ 의 콘덴서에 흐르는 전류는

14.89A이지만, 이보다 낮은 180 $\mu$ F의 콘덴서에는 15.2A 그리고 150 $\mu$ F의 콘덴서에는 12.66A 전류가 흐르기 때문에 3종류의 자화전류보다 낮아 자기여자를 일으킬 수 있는 범위를 벗어나는 것을 알 수 있다.

**표 4** 보상 전후 콘덴서와 자화전류 및 보상전력

**Table 4** Capacitor current, magnetization current and power of before and after compensation

구분	보상 전			보상 후		
	IE1	IE2	IE3	IE1	IE2	IE3
콘덴서 전류[A]	-	-	-	14.89	15.20/ 12.66	15.20/ 12.66
자화전류 [A]	16.65	14.99	14.58	16.65	14.99	14.58
역률	0.835	0.835	0.835	0.94	0.94/ 0.93	0.94/ 0.93

표 4에서와 같이 고효율(IE2) 및 프리미엄급(IE3) 유도전동기의 경우 역률을 95%로 높이기 위해 표준 유도전동기의 역률 보상용 콘덴서를 설치할 경우 자기여자를 일으킬 수 있는 범위가 되므로 이보다 낮은 용량의 콘덴서를 설치할 경우 원하는 역률보다 1 또는 2% 정도 낮아지나 자기여자를 일으킬 수 있는 범위를 벗어나게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 유도전동기 효율이 증가함에 따라 전동기에 인가되는 전력도 표준 전동기에 비해 낮아지고 있다. 이들 전력에서 자속을 발생시키는데 필요한 무효전력이 효율 증가에 따라 감소하지만, 표준 전동기에 적용하고 있는 콘덴서를 효율이 향상된 전동기에 그대로 적용할 경우 자기 여자와 같은 문제가 일어날 수 있는지에 대해 해석하였다.

역률 향상은 전력회사에 큰 도움이 되기 때문에 가능한 높게 설정하도록 권고하고 있지만, 콘덴서의 전류가 전동기 자화전류보다 높을 경우 자기여자로 인해 전동기에 전기적인 스트레스로 작용할 수 있다. 그래서 전동기의 역률을 어느 정도까지 안정되게 향상시킬 수 있는지를 확인하기 위해 자화전류를 구하고, 무효전력과 역률을 분석 후 콘덴서를 설치하여 자기여자가 발생하지 않는 범위까지 역률을 향상시킬 수 있도록 콘덴서의 용량을 계산하였다. 계산 결과 표준보다 효율이 한 두 단계 높은 전동기의 경우 표준정격의 콘덴서보다 한 단계 또는 두 단계 낮은 콘덴서를 선정할 경우 자기여자를 회피할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

#### References

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

[2] Jong-Gyeum Kim, "Characteristics for Current and Power of Induction Motor by Load Variation", KIIEE, Vol.25, No.8, pp. 82-87, 2011. 08

[3] Minhoo Park, Induction Machines, Dongmyungsa, pp.315, 1990

[4] IEC 60034-30(2008) std, "Efficiency classes for low voltage AC motors".

[5] Jong-Gyeum Kim, "Characteristic Comparison Analysis for Standard and High-efficiency Induction Motor", KIEE, Vol. 56P, No. 4, pp. 186-109, 2007.12

[6] IEC 60831-1, "Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1,000V-Part 1: General-Performance, testing and rating-Safety requirements-Guide for installation and operation", 2014

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

[8] Jong-Gyeum Kim, "Suitability Review for Power Correction Parameter of Induction Motor", KIIEE, Vol.22, No. 12, pp. 101-109, 2008.12

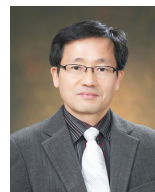
[9] Jong-Gyeum Kim, Youn-Jeen Park, "A Characteristic Study on the Power Factor Correction Application for the Induction Motor", KIIEE, Vol. 22, No. 9, pp. 25-31, 2008.09

[10] IEEE Std 141-1993, "Power factor and related considerations"

[11] www.nepsi.com, "Self-Excitation Concerns with Power Factor Correction on Induction Motors", pp.1-4.

[12] Jong-Gyeum Kim, "A Research on Self-excitation and Power Factor Compensation of Induction Motor", KIEE, Vol. 63P, No. 4, pp. 236-240, 2014.12

### 저 자 소 개



#### 김 종 겐 (Jong-Gyeum Kim)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987.1~1988.1 KT 근무. 1988.1~1996.3 K-water 근무. 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수, 현재 당학회 사업이사, 평의원, 전기기기 연구회 위원장  
Tel : 033) 760-8785  
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr