

물류 시스템 적용 유도전동기의 전압강하와 역률 보상 관계

Voltage Drop and Power Factor Compensation Relation of Induction Motor applied to Logistics System

김 종 겹[†]
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract - Recently, the expansion or establishment of facilities for the logistics system is increasing. Conveyor facilities play a major role in sorting and transporting logistics. Induction motors are widely used for the operation of these conveyor systems. In the logistics system, a large number of induction motors are used. These motors have a considerable distance from the power source side and have a low power factor. The installation position for the power factor compensation of the induction motor is very important. Since the voltage drop depends on the length of the line, it is an important parameter in capacitor capacity determination for power factor compensation. The capacity of the capacitors installed to compensate the power factor of the inductive load should be designed to the extent that self-excitation does not occur. In this study, we analyze the method of compensating the proper power factor considering the voltage drop and the installation position of the induction motor in the logistics system.

Key Words : Active power, Induction motor, Power factor compensation, Reactive power, Voltage drop.

1. 서 론

유도성 부하의 대표인 유도전동기는 다른 전동기에 비해 견고하고, 가격측면에서 유리하며, 유지보수가 편리하여 산업현장에서 회전용 구동전원으로서 가장 널리 사용하고 있다[1-3]. 유도전동기의 역률은 기동시는 매우 낮지만, 속도가 상승함에 따라 조금씩 상승하여 정격속도 근처에서 운전할 경우 0.8 정도가 된다[1-6]. 이 역률은 전력회사에서 요구하는 것보다 낮기 때문에 보통 부하측 또는 변압기 2차측에 커패시터를 설치하여 역률을 보상하고 있다[2, 4-8].

유도전동기에 정격전압이 공급되고, 연결되는 부하도 정격 조건에 가까울 때 최대 효율 운전이 가능하지만, 실제로 전원측에서의 거리가 꽤 있거나 측에 연결된 부하가 변동할 경우 최적운전이 어려워진다. 특히 물류시스템에서와 같이 컨베이어에 의해 물건을 운반하는 반송시스템에 설치되어 있는 유도전동기는 전원측에서 거리가 꽤 있어 전압강하가 크게 발생하고, 반송해야 할 부하도 정격에 거의 절반정도로 운전되고 있으므로 역률이 정격운전에 비해 매우 낮은 편이다.

유도전동기가 정격보다 낮은 값의 부하를 운전할 경우 역률이 떨어지므로 커패시터를 설치하여 일정 이상 유지되도록 보상해야 한다. 일반적으로 유도전동기의 역률 보상은 전압별로 정격운전 조건에서 필요한 커패시터를 설치하도록 전기설비기술기준 및 판단기준에 명시되어 있다[9]. 그러나 유도전동기가 전원측으로부터 거리가 있는 경우 전압강하의

존재와 정격보다 낮은 값의 부하를 연결하여 운전할 경우 역률을 보상하기 위해서는 이 두 가지 조건을 함께 검토되어야 한다.

본 연구에서는 실제 물류시스템에서 적용되고 있는 운전 조건을 고려하여 부하의 크기 및 전압강하를 고려하여 최적의 무효전력을 공급할 수 있는 커패시터 용량 계산과 설치 위치에 대해 해석하였다.

2. 시스템 구성 및 전압과 무효전력

2.1 컨베이어 시스템 구성도

물류시스템은 공장에서 생산된 여러 종류의 물건들이 한 곳에 모아 수요자에게 최종 전달하기 전에 분류하는 곳이다. 이곳에서는 물건의 분류를 위해 많은 종류의 컨베이어 시스템이 직렬 또는 병렬로 구성 운전되고 있다. 이들 컨베이어 시스템에서는 물류를 저속으로 운반하기 위해 유도전동기에 감속기를 연결하여 물류가 천천히 이동되도록 운전하고 있다. 그림 1은 컨베이어 시스템을 한 부분을 나타낸 것으로서 물건을 반송되도록 유도전동기에 10:1 또는 20:1의 감속기를 사용하여 회전속도가 반송시스템에 적합하게 저속운전이 가능하도록 구성되어 있다. 이들 유도전동기에 연결되는 부하의 크기와 무게가 높지 않기 때문에 주로 저압 소용량이 이용되고 있다.

2.2 회로 구성도

그림 2는 본 연구에 적용한 반송시스템에 전원을 공급하는 회로도를 나타낸 것으로 컨베이어에 유도전동기가 부착되어 있고, 변압기에서 유도전동기까지의 거리는 보통 수백

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2018년 8월 16일

최종완료 : 2018년 8월 19일

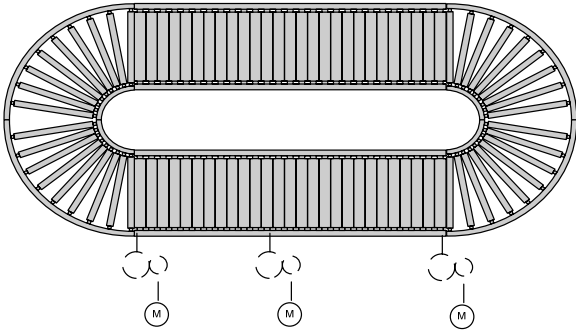


그림 1 컨베이어 시스템 구성도
Fig. 1 Conveyor system configuration diagram

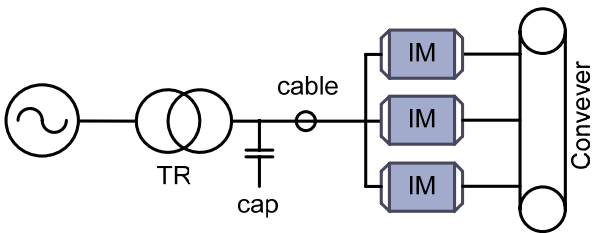


그림 2 회로 구성도
Fig. 2 System configuration diagram

m가 된다. 유도전동기의 역률 보상을 위해 부하측 단자에 여러 대의 전동기를 그룹으로 구성하고서 병렬로 설치된 커패시터를 사용하여 역률을 보상하고 있다.

본 연구에 사용된 저압 3상 유도전동기의 정격사양은 표 1과 같다.

표 1 유도전동기 사양

Table 1 Induction motor specification

Quantity	Value
Voltage	380V
Rated output	2.2kW
Pole	4
Power factor	0.8
Efficiency	90%

그림 3은 유도전동기의 등가회로도를 나타낸 것이다.

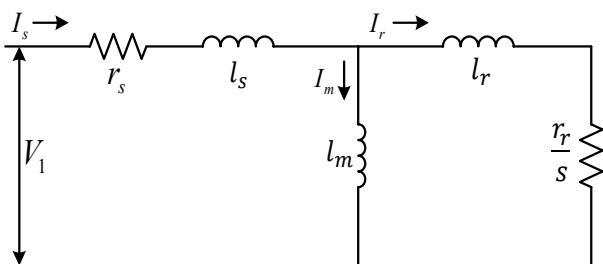


그림 3 유도전동기 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of induction motor

그림 1에서 r_s, l_s 는 고정자 측의 저항과 누설리액턴스이고, r_r, l_r 은 회전자 측의 저항과 누설리액턴스이며, l_m 은 자화 리액턴스이고, s 는 슬립이다. 또한 I_s, I_r, I_m 은 각각 고정자 전류, 회전자 전류 및 자화전류이고, V_1 은 고정자에 인가되는 전압이다.

유도전동기의 고정자에 인가되는 전압 V_1 과 고정자 전류 I_s 에 의해 발생하는 유효전력과 무효전력은 다음과 같다[2, 6, 7].

$$P = \text{Re} \left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \overline{I_s} \right) \quad (1)$$

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

표 2는 표 1에 제시된 용량의 유도전동기에 대한 파라미터를 나타낸 것이다.

표 2 유도전동기의 파라미터

Table 2 Parameters of induction motor

Items	Values
고정자 저항, r_s [Ω]	2.906949
고정자 누설 리액턴스, l_s [H]	0.010385
자화 리액턴스, l_m [H]	0.227254
회전자 누설 리액턴스, l_r [H]	0.010385
회전자 저항, r_r [Ω]	1.761463

그림 4는 표 1에서 제시된 3마력 유도전동기의 부하증감에 따른 유효전력, 무효전력, 역률과 효율의 변화를 분석한 결과이다. 부하가 증가할 경우 유효전력의 크기는 증가하지만, 무효전력의 크기는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 회전자계를 발생시키는 필요한 자화전류는 부하의 증감에는 관계가 없음을 알 수 있다. 부하의 증가에 따라 효율은 거의 변화가 나타나지 않지만, 역률은 약간 높아진다. 실제 반송시스템에서 적용되고 있는 50~60% 부하의 운전시 역률은 정격보다 낮은 66%정도이므로 전력회사에서 요구하

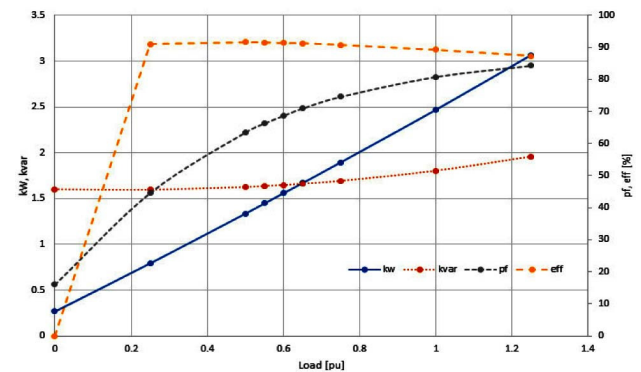


그림 4 부하 크기 변화에 따른 유효전력, 무효전력 및 역률과 효율

Fig. 4 Active power, reactive power, power factor and efficiency according to load change

는 역률을 달성하기 위해서는 반드시 역률보상이 이루어져야 함을 알 수 있다.

2.3 전압강하와 무효전력

유도전동기 회전자계에 필요한 무효전력을 전원측을 대신 하여 보상하기 위해 커패시터를 추가할 경우 개선되는 전압강하의 변화는 다음 식 (3)과 같다.

$$e = \frac{XP_L}{V_2} (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (3)$$

여기서, R, X 케이블의 저항과 리액턴스이고, P_L 은 부하의 유효전력이며, V_2 은 부하단의 전압 그리고 θ_1, θ_2 는 각각 역률 보상전과 보상후의 전압과 전류 사이의 위상각이다. 식 (3)에서 부하단의 전압이 케이블 길이의 증가로 인해 줄어들수록 전압강하는 커지게 된다. 이 전압의 변화는 바로 커패시터에 영향을 줄 수 있다.

커패시터에 저장되는 전력은 회전자계의 유지에 필요한 무효전력에 해당되는 것으로서 전압의 제곱에 비례한다. 식 (4)는 정격용량의 커패시터가 단자에 인가되는 전압의 변화에 따라 바뀔 수 있는 무효전력의 크기를 나타낸 것이다.

$$Q_{c2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \times Q_{c1} \quad (4)$$

여기서 V_1 과 V_2 는 각각 정격전압과 동작전압이고, Q_{c1}, Q_{c2} 도 각각 전압변동 전후의 무효전력이다. 부하측에서 전압강하가 클 경우 식 (4)에서 V_2 이 V_1 에 비해 부하측까지의 거리증가로 인해 감소할 경우 무효전력은 당초 목표한 것보다 줄어들게 된다. 이럴 경우 역률 보상을 위해 추가로 커패시터를 추가할 지에 대해 결정이 필요하다.

역률 보상을 위해 설치하는 커패시터의 용량이 클 경우 자기여자 현상이 일어나지 않도록 해야 한다. 그래서 유도전동기의 자기여자 현상에 의해 고정자 권선의 전압스트레스를 막기 위해 설치하는 커패시터용량은 다음을 만족하도록 권고하고 있다[5, 10].

$$Q_{c3} \leq 0.9 \times \sqrt{3} \times V_2 \times I_0 \quad (5)$$

여기서 I_0 는 전동기의 무부하 전류이다.

3. 계산 및 분석

본 연구에서는 정격보다 낮은 부하와 전원에서 부하까지의 거리가 길어서 전압강하가 발생하는 조건에서 유도전동기의 역률을 어떻게 확보할 수 있는지에 대해 분석하였다. 해석의 전제조건으로서는 선로길이를 일정하게 하고, 전동기 부하를 반부하에 가깝게 설정하고서 역률 보상 커패시터의 설치위치 변화에 따라 어떤 결과가 나타나는지를 분석하였다. 해석 대상 전동기는 380V 3상 4극 3마력 유도전동기가 3대가 반송시스템에 병렬로 설치되어 있지만, 같은 조건으로

운전하고 있어 한 대만을 대상으로 이 전동기에 연결된 케이블은 2.5mm² 규격으로 길이는 300m로 설정하였다.

그림 5는 기동에서 정상운전까지 변압기 2차측과 전동기 단자에서의 전압의 크기를 나타낸 것이다.

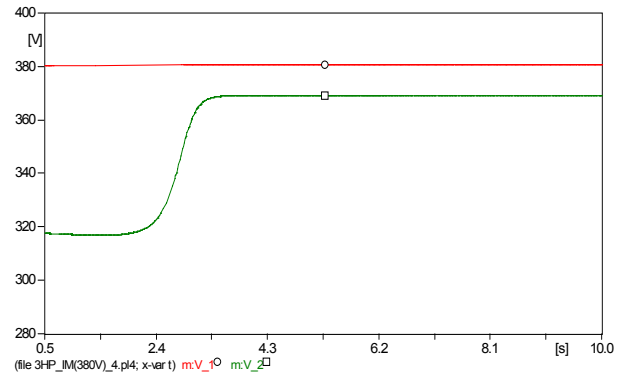


그림 5 변압기 2차측과 전동기 단자에서의 전압
Fig. 5 Voltage at the transformer secondary and motor terminals

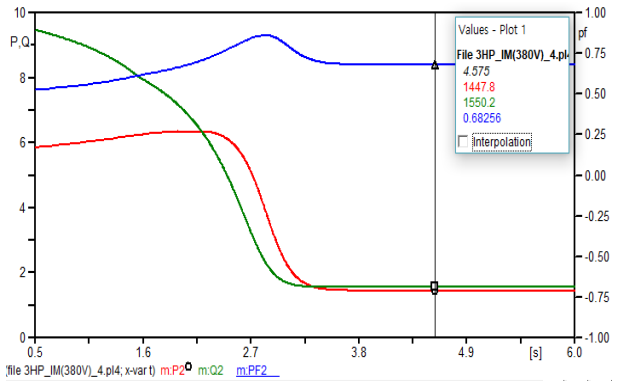
그림 5에서 전동기 단자에서의 전압이 변압기 2차측(380V)보다 11V 낮은 369V로 나타나고 있다. 이는 전기설비 판단기준에서 정한 범위를 초과하지는 않지만, 설비의 안정적인 운전에는 장애요소가 된다. 전압이 이와 같이 줄어들 경우 무효전력의 크기는 당초 목표로 한 것보다 6%가 낮은 94%가 된다. 무효전력의 크기가 줄어든 주원인은 케이블 길이에 따라 발생한 전압강하의 결과이다. 케이블 길이가 길어질 경우 전압강하에 의해 무효전력이 전압의 제곱에 해당하는 만큼 감소하게 되므로 당초 목표한 역률을 얻기가 어려워진다. 그래서 부족한 무효전력을 보상해야 한다.

유도전동기에 필요한 무효전력은 전원측을 대신하여 보상하는 방법으로는 부하측에 개별로 설치하는 것과 부하의 운전이 다양하게 다른 경우 변압기 2차측에 설치하여 역률을 일률적으로 보상하는 방법이 있다.

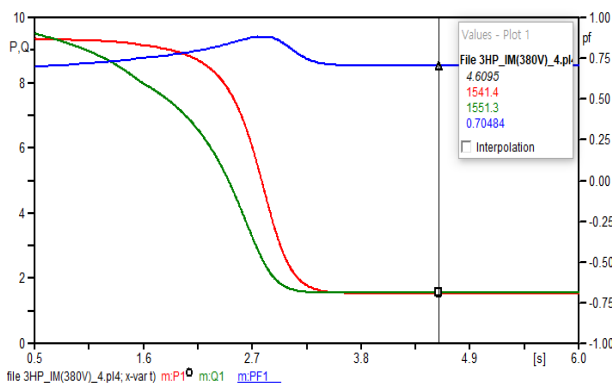
첫 번째로 부하단에 커패시터의 설치전과 설치후 변압기 2차측과 전동기 입구단에서 전력 및 역률의 변화를 계산하였다. 우선 역률 보상이 이루어지지 않은 경우 부하측과 변압기 2차측에서의 유효전력(P2:○), 무효전력(Q2:□) 및 역률(PF2:△)의 계산결과는 그림 6과 같다.

그림 6에서 무효전력은 전동기 단자에서나 변압기 2차측에서 거의 변화가 없으나, 유효전력은 변압기 2차측이 전동기 입구단보다 약간 높게 나타났다. 이 때문에 역률은 변압기 2차측(70.48%)이 전동기 입구측(68.25%)보다는 약간 높은 편이다. 역률 보상을 실시하지 않고서 운전한 경우 역률은 그림 4에서 제시한 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 역률이 낮은 경우 전력회사에는 수용가에 보내야 할 피상전력의 크기가 증가하기 때문에 수용가에 일정 이상의 역률을 유지하도록 요구한다.

한편 이 역률은 전력회사에서 요구하는 것에 매우 낮으므로 역률은 90%로 보상하기 위해 부하측에 커패시터를 설치하여 운전한 경우 유효전력, 무효전력 및 역률의 변화는 그림 7과 같다.



(a) 부하측



(b) 변압기 2차측

그림 6 역률 보상전 유효전력, 무효전력 및 역률

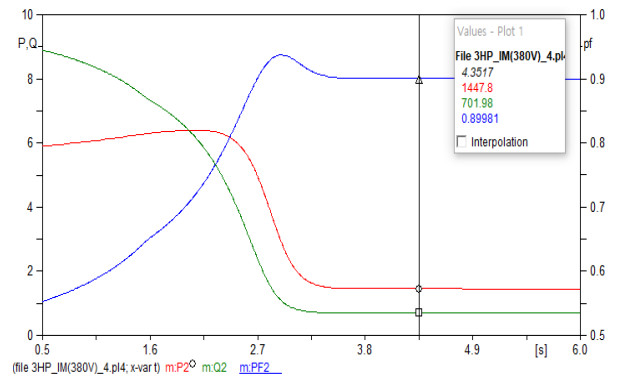
Fig. 6 Active power, reactive power and power factor before power factor compensation

그림 7(a)에서 P2, Q2, PF2는 부하측에서의 유효전력, 무효전력 및 역률이고, 그림 7(b)에서 P1, Q1, PF1은 각각 변압기 2차측에서의 유효전력, 무효전력 및 역률이다.

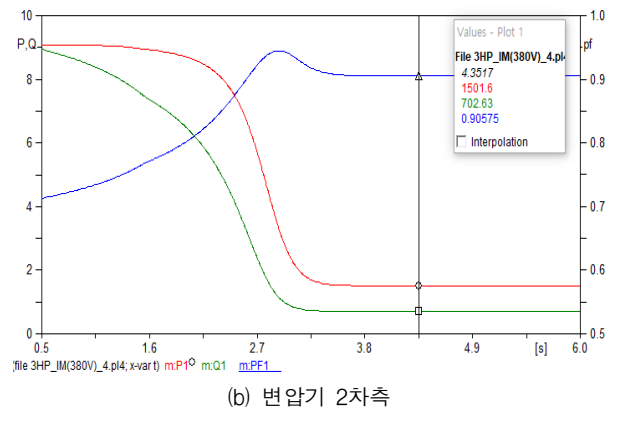
그림 7은 그림 6과 비교해서 역률 보상을 시행한 이후에도 유효전력은 변화가 없지만, 커패시터의 추가로 인해 무효전력이 감소(1,550→702var)하였기 때문에 역률은 보상 전에 비해 약간 증가하였음을 알 수 있다. 이때 사용한 커패시터의 무효전력은 크기는 849var로서 식 (5)에서 제시한 값 이하이므로 자기여자를 일으킬 가능성은 낮다고 판단할 수 있다.

두 번째로는 유도성부하의 낮은 역률을 보상하기 위해 변압기 2차측에 커패시터를 설치하여 유효전력(P1:○), 무효전력(Q1:□) 및 역률(PF1:△)의 변화에 대한 해석결과는 그림 8과 같다. 해석한 사용된 커패시터는 부하측 단자에 설치한 것과 같은 크기를 적용하였다.

그림 8에서 알 수 있듯이 부하측보다 변압기 2차측에 커패시터를 설치하는 경우 역률은 90%에서 92%로 2% 더 향상됨을 알 수 있다. 또한 그림 8은 그림 6(b)와 비교해서 역률 보상을 시행한 이후에도 유효전력은 변화가 없지만, 커패시터의 추가로 인해 무효전력이 감소(1,551→649var)하였다. 이때 사용한 커패시터의 무효전력은 크기는 903var로서 식 (5)에서 제시한 값 이하이므로 이 역시 자기여자를 일으킬 가능성은 낮다고 판단할 수 있다. 이는 유도발전기에서와 같이 회전속도의 증가로 인해 전동기 단자에서 전압이 증가하



(a) 부하측



(b) 변압기 2차측

그림 7 역률 보상후 유효전력, 무효전력 및 역률

Fig. 7 Active power, reactive power and power factor after power factor compensation

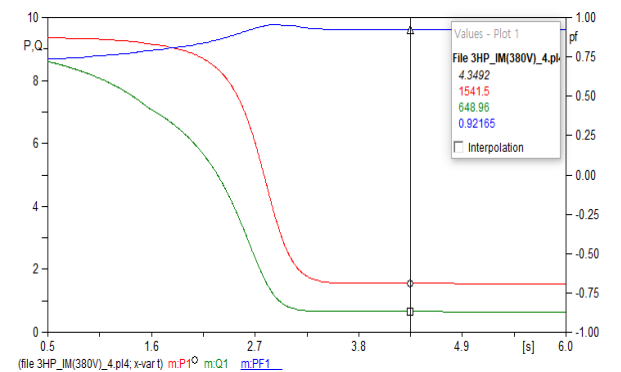


그림 8 변압기 2차측에 커패시터를 설치한 경우의 유효전력, 무효전력 및 역률

Fig. 8 Active power, reactive power and power factor when a capacitor is installed on the transformer secondary side

는 것이 아니라 전압감소하기 때문에 무효전력의 크기가 감소한 결과라고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 물류시스템에서 사용하는 유도전동기가 전원측으로부터 거리가 있어 전압강하가 존재하는 상황에서 부하

가 반부하에 가까운 조건으로 운전할 때 낮게 존재하는 역률을 어떻게 향상할 수 있는지에 대해 해석한 것이다.

분석결과 부하까지의 거리가 존재할 경우 전압강하에 대한 영향을 보상해야 할 무효전력의 용량에 반영할 필요가 있음을 알 수 있다. 또한 부하측에 커패시터를 설치하는 것 보다는 전동기를 그룹으로 연결하여 전원을 공급하는 변압기 2차측에 설치할 경우 역률을 조금 더 높일 수 있음도 확인할 수 있었다.

향후 본 연구결과는 신규 또는 기존 물류시스템에서 유도전동기의 전압강하 저감과 역률 향상을 위한 설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] Minho Park, "Induction Machines," Dongmyungsa, 1990.
- [2] Jong-Gyeum Kim, "Characteristics for Current and Power of Induction Motor by Load Variation," *KIIEE*, vol. 25, no. 8, pp. 82-87, Aug. 2011.
- [3] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems," Prentice Hall, 2002.
- [4] Jong-Gyeum Kim, "A Research on Self-excitation and Power Factor Compensation of Induction Motor," *KIEE*, vol. 63P, no. 4, pp. 236-240, 2014.
- [5] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor," Taylor & Francis, 2005.
- [6] Jong-Gyeum Kim, "Relationship between Voltage Drop and Power Factor Compensation in Induction Motor Operation," *KIIEE*, vol. 22, no. 4, pp. 43-49, April, 2017.
- [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, September, 2008.
- [8] IEEE Std 141-1993, "Power factor and related considerations".
- [9] KEA, "Electric facility technical standards and criteria standards," 2016.
- [10] www.nepsi.com, "Self-Excitation Concerns with Power Factor Correction on Induction Motors," pp. 1-4.

저 자 소 개



김 종 겹 (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 평의원 및 B부분회 부회장
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr