

Characteristics Analysis of Induction Generator with a Change in Rotor Speed

김종겸[†] · 박영진^{*} · 김일중^{**} · 김영국^{***}

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Il-Jung Kim · Young-Kuk-Kim)

Abstract - Squirrel cage induction motor is the main driving system of industrial field and familiar with its use in a large variety of applications. However, many engineer are unfamiliar with the induction generator, even though no difference exists between both machines except for the mode of operation. But an induction generator is commonly used for micro & small hydro power applications due to its simplicity, reliability, low cost and robustness. Input and output of induction motor has turned against at the induction generator operation. Rotation speed of induction generator is small faster than induction motor. As output of induction machines increases with the increasement of speed, so loss is same. Actually, generator efficiency is lower than motor at this condition. If induction generator is connected with mechanical load, total efficiency is decreased. In this paper, we analyzed that input, output, torque and efficiency is different from each other above and below synchronous speed.

Key Words : Induction generator, Induction motor, Efficiency, Active & reactive power, Torque

1. 서 론

발전기로 사용되는 설비로서는 동기기와 유도기로 분류할 수 있다. 동기기의 경우 계통연계 없이 독립운전이 가능하지만, 유지보수와 가격이 높아 대용량의 경우에 주로 적용하고, 유도기의 경우 계통 연계되는 곳에 설치되어야 하는 단점이 있지만, 가격 및 유지보수가 동기기에 비해 유리하여 최근 개발되고 있는 신재생에너지 전력설비에 주로 사용하고 있다[1-4]. 유도기에서도 구조가 복잡한 권선형보다는 구조가 간단한 농형이 주로 이용되고 있다.

유도전동기는 산업현장에서 구조 및 유지 보수의 편리성 등으로 인해 구동력 전원으로 가장 널리 사용되는 있다. 유도전동기는 동기속도 이하에서 운전할 경우 기계적 에너지로 변환되지만, 동기속도 이상으로 운전할 경우 역으로 기계 에너지가 전기에너지로 변환된다[2,4,5]. 그래서 소수력 발전설비에서는 수차를 이용하여 유도전동기의 회전자를 동기속도 이상으로 운전하여 전력을 생산하고 있다.

전동기를 발전기로 사용할 경우 속도의 증가에 따라 특성 값이 변화지만 전동기의 특성 값을 그대로 발전기 특성 값으로 사용할 경우 종합 효율 계산 등에 오류가 발생할 수 있다.

유도발전기는 유도전동기와 달리 동기 속도 이상에서 운

전하므로 제작시 전동기 운전의 경우와 다르게 설계 제작이 이루어져야 하지만, 출력이 작은 경우와 수요가 많지 않아 대부분의 중소형의 발전설비에서는 유도전동기를 그대로 유도발전기로 사용하는 경우가 많은 편이다[4].

유도전동기는 회전자계를 발생하기 위해 자화전류가 필요하다. 이 자화전류는 무효전력 성분으로서 전원측에서 공급받을 경우 역률이 낮아지지만, 콘덴서를 전동기 입구단에 설치할 경우 무효전력을 전원측을 대신하여 공급받을 수 있으므로 역률이 높아진다. 그러나 유도발전기의 경우 자화전류는 전압발생에 이용된다. 같은 출력의 유도기라도 전동기로 운전할 때보다 발전기로 운전할 경우 콘덴서 용량은 높다[4,6,7].

유도발전기는 일단 동기속도 이상으로 운전하여 전압이 확보된 경우 계통에 투입하므로 콘덴서는 전압확보가 이루어지면 분리하고 있다. 그러나 계통연계가 이루어지지 않는 경우 콘덴서에 의해 전압이 발생하더라도 부하증감에 따라 전압이 쉽게 변하므로 일정한 전압이 확보되도록 하기 위해서는 회전속도를 높이거나 콘덴서 용량을 조정하여 무효전력 공급 비율을 변화시켜야 한다.

본 연구에서는 유도 전동기를 발전기로 운전하는 경우 슬립의 변화에 따라 공극에서의 전압과 회전자계를 발생시키는 데 필요한 자화전류의 크기를 계산하고, 무효전력과의 관계를 해석하였다.

2. 자화전류와 전력

2.1 자화전류

유도발전기는 회전자속을 발생시키기 위한 여자전원을 외

[†] 교신저자, 시니어회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

^{*} 정 회 원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

^{**} 정 회 원 : 호서대학교 기계공학과 교수 · 공박

^{***} 정 회 원 : K-water 팀장

접수일자 : 2011년 9월 3일

최종완료 : 2011년 10월 19일

부에서 공급받아야 한다. 외부 전원공급에는 계통연계하거나 콘덴서와 같은 설비를 이용할 경우 전력을 발생시킬 수 있다. 고정자로부터 회전하는 자속은 회전자에 전류를 유도하여 자계를 발생시킨다. 만일 회전자가 회전자속의 비율보다 늦게 회전한다면 기기는 유도전동기와 같이 동작한다. 만일 회전자가 빠르게 회전할 경우 발전기로서 동작하여 동기주파수에서 전력을 발생시킨다[2,4,5].

유도발전기는 동기속도 이상의 임의 속도로 운전할 수 있고, 동기이탈 현상도 없어 안정하다. 여자를 위해서는 선로에 연결되어야 하므로 선로가 단락된 경우에는 여자를 확보하지 못하는 단점도 있다. 그리고 기동 운전이 동기발전기에 비해 비교적 간단하지만, 여자회로의 리액턴스가 주파수 변화에 영향을 받아 여자의 크기에 변화가 나타나므로 불안정한 특성을 지니고 있다[3,4].

그림 1은 유도기의 단상 등가회로를 나타낸 것이다. 유도전동기의 경우 고정자에 인가된 전류에 의해 회전자계를 발생하기 위해 자화전류가 필요하고 출력은 회전자 전류가 그 몫을 담당하게 된다[1-4,6,8]. 같은 정격의 기기라도 슬립에 따라 고정자에 인가되는 전력과 고정자에서 발생하는 전력에는 차이가 존재한다. 따라서 고정자와 회전자 전류의 변화에 따라 자화전류도 약간의 변화가 존재한다.

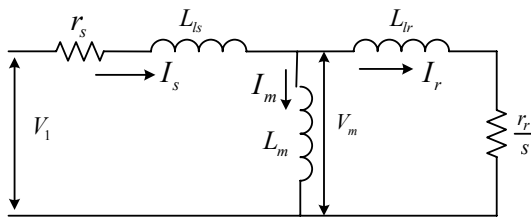


그림 1 유도기 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of induction machine

그림 1과 같은 유도전동기 등가회로에서 고정자에 유입되는 전류는 식 (1)과 같다.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \tag{1}$$

식 (1)에 사용된 상 임피던스 Z_1 은 고정자의 임피던스와 자화 리액턴스와 회전자 임피던스의 합 Z_f 과 같다.

$$Z_1 = r_s + j\omega L_{ls} + Z_f \tag{2}$$

여기서 Z_f 는 다음과 같다.

$$Z_f = \frac{j\omega L_m \left(\frac{r_r}{s} + j\omega L_{lr} \right)}{r_r + j\omega(L_{lr} + L_m)}$$

전동기에서 부하가 증가함에 따라 고정자 전류가 증가하기 때문에 전압강하가 일어난다. 즉 그림 1에서 단자전압에서 고

정자 전압강하를 뺀 값이 전동기의 자화전압 V_m 이 된다.

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

2차측에 유도된 전압은 공극자속을 결정하는 전압으로서 약간 감소하므로 자화전류와 철손도 따라서 줄어든다. 그러나 발전기 영역에서는 고정자 전압 강하 때문에 공극전압은 오히려 역으로 증가한다. 이는 더 높은 자화전류를 요구하므로 결과적으로 철손은 증가하게 된다.

그림 1에서 고정자 전압강하를 뺀 전동기의 자화전압을 V_m 이라고 할 경우 자화전류는 다음과 같다.

$$I_m = \frac{V_m}{j\omega L_m} [A] \tag{4}$$

자화전류는 기기 파라미터를 알 경우 슬립의 변화에 따라 계산이 가능하다. 이 자화전류로부터 무효전력을 계산할 수 있다.

2.2 전력

그림 1과 같은 등가회로에서 고정자 단자에 인가되는 전압과 고정자에 흐르는 전류의 곱이 피상전력이 된다. 이 전력에서 출력으로 변환되는 성분이 유효전력이고, 회전자계를 발생시키는데 필요한 전력은 무효전력성분이며, 출력으로 변화되는 성분에서 손실을 제외하고는 유효전력성분이 담당한다.

3상 유도전동기에서 역률 보상장치의 사용전후 유효전력(P), 무효전력(Q), 피상전력(S) 및 역률(pf)의 변화는 식 (5)와 같이 각상의 전압 및 전류로부터 간단하게 구할 수 있다[4,9].

$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \tag{5}$$

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

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

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

전동기와 발전기의 유효전력이 같다고 할 경우 발전기 운전모드에서 고정자 손실은 자화전류의 증가로 더 많은 유도 성분으로 인해 전동기 운전에서 보다 더욱 커진다. 실제 발전기로 운전할 경우 동작결과를 설명하기 위한 전류, 전력 그리고 토크는 전동기와 같은 수식을 전개하여 흐름방향을 반대로 하면 결과를 얻을 수 있다.

유도전동기를 동기속도 이상으로 회전할 경우 슬립은 마이너스가 되므로 식 (1)에서 고정자에 흐르는 전류의 부호가 전동기와 반대가 되므로 전력의 흐름을 알기 위해 전력을 구해야 한다. 동기속도 이상으로 운전하는 경우 유도발전기 단자에서의 전력은 다음 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$S = 3VI^* \tag{6}$$

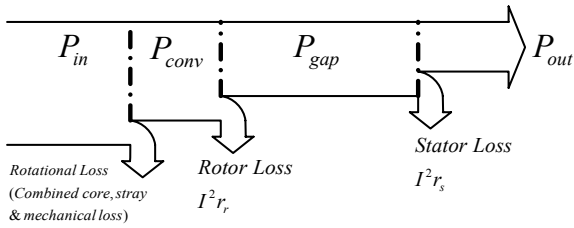


그림 2 발전기 운전시 전력 흐름도
Fig. 2 Power flow at the generator operation

그림 2는 발전기 운전 영역에서의 전력 흐름도로서 전동기와 반대가 된다. 먼저 축의 회전운동으로 발생된 입력에너지 (P_{in}) 에서 회전손실을 제외한 전력이 변환된 전력성분 (P_{conv}) 이 된다. 이 성분에서 회전자 손실 (P_{loss-r}) 을 제외한 전력성분이 고정자에 전달된다. 고정자에 전달된 성분중에서 고정자 자체 손실 (P_{loss-s}) 을 제외한 성분은 전력으로 변환되는 출력성분 (P_{out}) 가 된다. 실제 발전기의 전력발생은 출력성분에서 각종 손실을 제외한 유효전력성분이다.

유도발전기의 유효전력은 전동기에서와 반대로 수차 등의 기계적 에너지로부터 얻은 회전력으로 회전자를 동기속도 이상으로 회전시켜 공극을 거쳐 출력으로 전달되는 성분으로 식 (6)에서 유효분에 해당되는 것으로 식 (7)과 같다. 또한 전동기에서와 같이 전압의 발생을 위해 필요한 무효 전력 성분은 식 (6)에서 무효분에 해당되는 것으로 식 (8)과 같다.

$$P = \text{Re}(S) = P_{out} \quad (7)$$

$$Q = \text{Im}(S) \quad (8)$$

식 (7)에서의 유효전력의 부호는 (-)가 되는 것은 발전기 단자에서 전력이 전동기와 달리 유출되는 것을 의미하고, 식 (8)의 무효전력의 부호는 (+)가 되는 것은 고정자 단자로 전력이 공급되는 것을 의미한다.

3. 해석 모델의 특성 분석

해석에 사용된 유도전동기의 사양은 표 1과 같다. 이 유도전동기를 슬립의 변화에 따라 전동기와 발전기 영역에서 운전할 경우 전압, 자화전류, 토크 및 전력의 변화를 해석하였다. 이와 같은 전동기를 발전기로 사용하는 경우가 많기 때문에 전동기 파라미터를 가지고서 동기속도 이상으로 운전할 경우 어떤 결과가 나타나는지 확인할 필요가 있다.

표 1 유도기 사양

Table 1 Specification of Induction machine

parameter	380[V], 4p, 100HP
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]
power factor	0.8
efficiency	0.95
slip	3%

그림 3은 표 1의 파라미터를 가지고서 그림 1과 같은 등가회로에 적용하여 발전기와 전동기로 운전할 경우에서 슬립에 따른 전력변화를 나타낸 것이다. 전동기($0 < s < 1$)로 운전할 경우 유효전력(\diamond)은 정(+)값을 나타내지만, 발전기($-1 < s < 0$)로 운전할 경우 출력전력인 유효전력(\diamond)은 전동기와 반대로 부(-)값을 나타내고 있다. 회전자계를 발생하는데 필요한 무효전력(\square)은 전동기로 운전하는 경우보다 발전기로 운전하는 경우 더 높은 값을 나타냄을 알 수 있다. 유도기에서 필요한 피상전력(Δ)의 경우 전동기로 운전하는 영역에서보다 발전기로 운전하는 영역에서 더 높은 값이 필요함을 알 수 있다. 그러나 실제 운전 영역에 가까운 슬립범위에서는 발전기와 전동기의 토크 크기에는 큰 차이가 나타나지 않고 있지만, 유효 및 무효전력은 발전기 운전영역에서의 값이 전동기 운전영역보다 약간 높은 편이다.

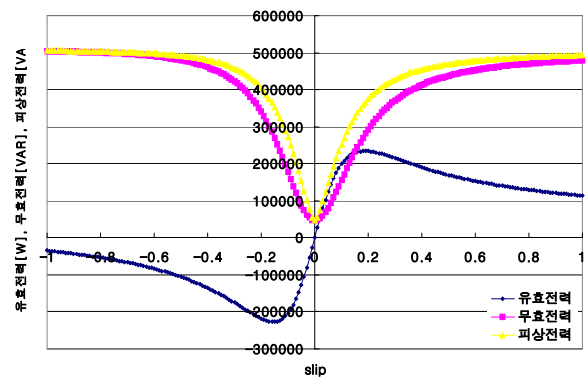


그림 3 유효전력, 무효전력, 피상전력
Fig. 3 Active power, reactive power, apparent power

그림 4는 전동기와 발전기로 운전 가능한 영역에서의 전력과 토크 특성을 나타낸 것이다. 전동기 운전영역에서의 전력과 토크가 발전기 영역에서는 반전됨을 알 수 있다. 또한 크기의 변화에서도 전동기 운전영역보다는 발전기 운전영역에서 약간 크기 폭이 넓어지므로 입력 대 출력 비율의 차로 나타내는 효율 특성은 발전기가 전동기에 비해 떨어지게 된다.

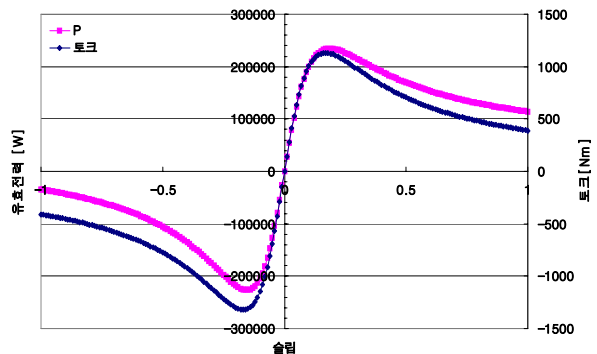


그림 4 유효전력 및 토크
Fig. 4 Active power & torque

전동기의 정동토크와 발전기의 push-over 토크는 서로 다르게 나타나는데 발전기의 최대 토크가 전동기의 최대 토크보다 약간 높은 것을 알 수 있다. 그러나 실제 운전하고 있는 낮은 슬립 범위에서의 전동기와 발전기 각 값에는 약간의 차이만 존재한다. 그림 4에서 최대 토크가 발생하는 슬립 영역에서 전동기는 유효전력에 대한 출력의 비율로 나타내어지는 효율과 발전기의 경우 최대 토크 출력에서 유효전력으로 변환되는 효율 비교시 발전기로 운전하는 경우가 효율이 떨어짐을 알 수 있다.

그림 5는 전동기와 발전기로 운전할 경우 고정자 전류, 회전자 전류 및 자화전류의 변화를 나타낸 것이다. 전동기의 경우 기동시에 높은 전류는 전압강하를 일으킬 수 있고 발전기의 경우 계통에 연계할 경우 과도전류 발생으로 시스템의 불안정을 초래할 수 있다. 따라서 이 기동시간을 가능한 짧게 하기 위해서는 별도의 저감용 설비가 필요하다. 그림 5에서 발전기나 전동기의 운전영역에 가까워질수록 고정자와 회전자 전류를 줄여주지만, 자화전류를 반대로 약간 증가함을 알 수 있다.

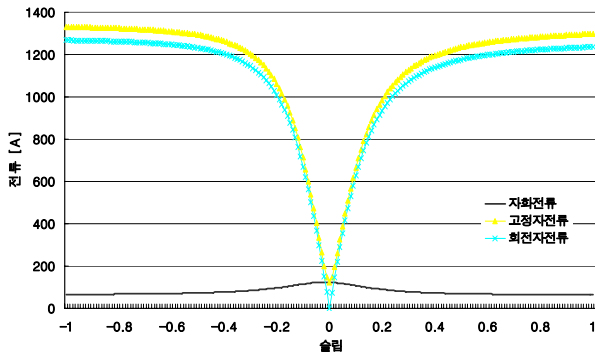


그림 5 슬립에 따른 고정자, 회전자 및 자화전류
Fig. 5 Stator current, rotor current & magnetizing current with slip

그림 5에서 알 수 있듯이 전동기의 경우 기동시에 높은 전류를 나타내지만, 운전영역에 가까운 속도에서는 고정자와 회전자 전류가 줄어드는 반면 자화전류는 전동기나 발전기의 운전영역에 가까운 곳에서 약간 높아짐을 알 수 있다. 발전기의 경우도 전동기와 같은 변화를 나타내고 있다. 그림 5에서 슬립이 0 인 곳에서 고정자 전류는 제로가 되지 않지만, 회전자 전류가 0 로 나타나는 것은 동기속도에서는 유도기가 에너지 변환이 전혀 이루어지지 않는다는 것을 의미하고 있다.

그림 6은 발전기와 전동기로 운전할 경우 고정자에 인가되거나 고정자에 나타나는 전압이 일정할 경우 공극에서의 전압 그리고 자화전류에 대한 것을 나타낸 것이다. 전동기로 운전하거나 발전기로 운전하더라도 단자에 나타나는 전압이 일정하다고 할 경우 공극에 나타나는 전압과 자화전류는 회전자에 따라 대칭관계의 전압과 전류분포 특성을 가지지만, 실제 전동기로 운전하는 슬립영역에서는 공극전압과 자화전류가 발전기로 운전할 경우보다 약간 높은 값을 나타내고 있다. 실제 기동시에 비해 슬립이 0 에 가까운 운전영역에서 공급전압과 자화전류가 높게 나타나고 있다.

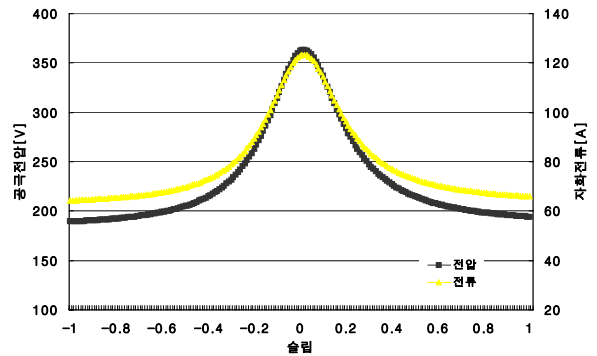


그림 6 슬립에 따른 공극전압과 및 자화전류
Fig. 6 Air-gap voltage and magnetizing current with slip

자화전류는 실제로 전동기의 출력에는 관여하지 않지만, 회전하는데 필요한 자속을 발생시키는데 필요한 역할을 하는 것으로서 전동기나 발전기를 여자시키는데 필요한 자화전류는 정격 전부하 전류의 20~60% 범위이다[5,7].

슬립이 3%로 운전하는 전동기 운전영역에서 자화전류는 약 120[A]로서 이때 전동기의 역률을 80[%]에서 95[%]로 높이기 위해 60[μF]의 콘덴서를 설치할 경우 49.6[A]로 41.37[%]로 권장허용범위 60[%]로 운전됨을 알 수 있다.

그림 7은 전동기 및 발전기로 운전하는 영역에서의 자화전류와 무효전력의 관계를 나타낸 것이다. 발전기로 운전할 경우의 자화전류 및 무효전력이 전동기로 운전할 경우보다 약간 높은 값을 나타내고 있다. 전동기의 경우 기동시 자화전류는 낮지만, 정격운전에 가까운 영역에서는 전류가 증가하지만 무효전력도 전류의 변화와 반대로 정격운전에서는 작은 값을 필요로 한다.

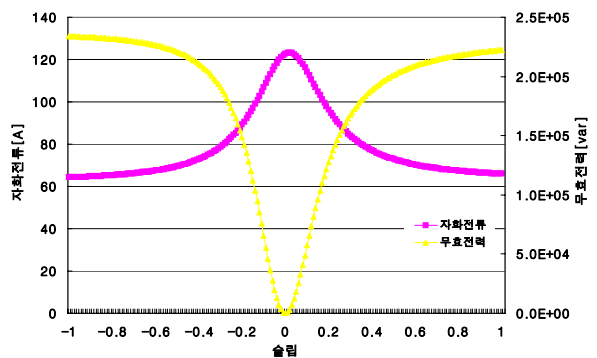


그림 7 자화전류 및 무효전력
Fig. 7 Magnetization current & reactive power

4. 결 론

본 연구에서는 유도전동기를 회전속의 증감에 따라 전동기 영역과 발전기 영역에서 운전할 경우 공극에서의 전압, 고정자와 회전자 전류, 자화전류 및 전력의 변화를 계산하였다. 전동기 파라미터를 그대로 이용하여 슬립변화에 따라 해석할 경우 전동기와 발전기에서 운전 특성이 약간 다르게 나타났다. 같은 값의 슬립 조건에서 전동기에서 전력이 전

동기의 경우보다 약간 높았다. 또한 토크의 경우 발전기 운전시가 전동기 운전시보다 높게 분포한다는 것도 확인할 수 있었다. 회전속도가 변화할 경우 공극전압과 전류가 변하는데 정격 운전점에 가까운 곳에서 가장 높게 나타나므로 이 값을 적절하게 이용할 경우 역률개선과 전압 발생시에 최적 운전점에서 무효전력 선정에 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

[1] Charles I. Hubert, "Electric Machines-Theory, Operation, Applications, Adjustment and Control", Prentice Haul, 2002

[2] Theodore Wild I, "Electrical Machines, Drives, and Power Systems", Prentice Haul, 2002

[3] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004

[4] 김종겸, "불평형 부하 운전시 3상 유도발전기 특성 해석", 대한전기학회 논문지, Vol.56P, No.3, pp.123-128, 2007. 09

[5] NEMA MG1-2003, "Motor and Generators",

[6] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Std 112-2004, 2004.

[7] K. S. Pankaj, J. P. Nelson, "Application Guidelines for Induction Generators," in Proc. International Conference on Electrical Machines and Drives, Milwaukee, Wisconsin, May 18-21, 1997, Paper WC1/5.1 - WC1/5.3.

[8] Paul L. Cochran, "Poly Induction Motors-Analysis, Design and Application", Marcel Dekker, 1989

[9] John R. Smith & Meng J. Chen, "Three-Phase Electrical Machine Systems-Computer Simulation", John Wiley & Sons, 1994

저 자 소 개



김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원, 본부 학술이사, B부문 학술위원장
 Tel : 033) 760-8785
 E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



박영진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수.
 Tel : 033) 760-8784
 E-mail : popspark@gwnu.ac.kr



김일중 (金一中)

1958년 12월 10일생. 1980년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~2005년 주성대학 전기과 교수. 2006년 (주)일신엔지니어링 기술연구소장. 2007년~현재 호서대학교 기계공학과 교수
 Tel : 041) 540-5805
 E-mail : ijkim@hoseo.edu



김영국 (金榮國)

1966년 1월 18일 생. 1990년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1990년 1월 8일 ~ 현재 한국수자원공사 재직중. 2010. 9~ 현재 강릉원주대학교 전기공학과 산업대학원 재학중
 E-mail : kyk1817@kwater.or.kr