

포화성분을 고려한 3상 유도전동기 리액터 기동 특성 분석

(Characteristics Analysis for Reactor Starting Method of 3-Phase Induction Motor Considering Saturation)

김중겸*

(Jong-Gyeum Kim)

Abstract

Induction motor is the most widely used to obtain the driving force in the industrial site. Induction motor generates a high current at startup. Most of starting currents are often more than five times of rated current. This high starting current can cause problems such as the voltage drop in the system. In order to solve these problems, if the motor capacity is large, generally we use reactor starting method rather than direct on line starting method. When a high startup current passes through reactor, reactor can serve as a nonlinear elements.

In this study, we analyzed that the current, torque and power of the induction motor are different from the change of linear and nonlinear components of the reactor magnetic field.

Key Words : Reactor Starting Method, Saturation, Magnetization Curve, Reactor, Induction Motor

1. 서 론

유도전동기는 산업현장에서 회전력을 얻는데 가장 많이 사용되고 있다. 유도전동기는 다른 전동기에 비해 구조가 간단하고, 견고하며, 유지보수가 편리한 동시에 일정한 토크도 얻을 수 있는 장점을 가지지만, 기는 기동시에 높은 기동전류가 발생하여 다른 시스템에 전압강하 등의 영향을 줄 수 있으므로 출력 용량이 작은 전동기를 제외하고는 Y- Δ , 리액터,

soft-start 기동방법 등을 적용하여 기동전류를 줄이고 있다. Soft-start 기동방법은 효과는 좋지만, 가격이 비싸고 대용량의 경우에는 적용하기가 어려워 일반 산업현장에서는 리액터 기동방법을 많이 이용하고 있다[1].

용량이 큰 유도전동기를 리액터 기동방식으로 운전할 경우 정격속도에 도달하는 시간이 매우 긴 편이다. 이럴 경우 높은 기동전류가 매우 지속되게 된다.

리액터 기동법은 기동시의 높은 전류를 저감하기 위해 전동기 앞단에 리액터를 설치하는 것으로서 보통 3단계의 탭으로 구성되어 있다. 리액터의 경우 변압기와는 달리 전류의 증가에 따라 자속밀도분포가 선형적인 변화에 가깝지만, 기동시의 높은 전류가 리액터

* 주저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8781
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2012년 5월 29일
1차심사 : 2012년 6월 9일
심사완료 : 2012년 6월 28일

에 유입될 경우 선형특성의 영역을 넘어 비선형에 가깝게 변화할 수 있다[1~5]. 따라서 기동시의 높은 전류로 리액터가 비선형 특성을 가지는 경우에서 유도전동기의 기동시 전력 및 토크 특성 분석이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 유도전동기를 리액터로 기동할 경우 리액터의 비선형요소가 포함되지 않는 경우와 포함된 경우 동작특성을 비교 분석하였다.

2. 리액터 기동

일반적으로 교류 전동기의 기동전류가 정격전류의 5~8배가 흐르는 것은 정지 상태에서 시스템이 가지는 관성을 이겨내기에 충분하도록 전동기를 자화시키는데 필요한 충분한 양의 에너지를 필요로 하기 때문이다[1-2,4]. 기동시의 큰 전류발생은 전압강하는 물론이고 어떤 경우에는 시스템 동작불능과 같은 문제를 일으킬 수 있다. 높은 기동전류는 전동기의 회전자바와 권선에 큰 기계적인 스트레스를 일으킬 수 있고, 구동장비와 기초에도 영향을 줄 수 있다. 그래서 기동방법을 선택할 때는 부하, 전동기 그리고 전원 시스템을 함께 고려할 필요가 있다[1].

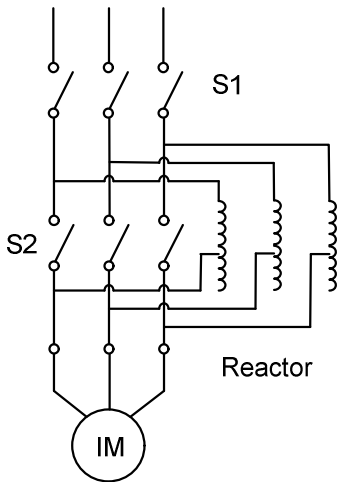


그림 1. 리액터 기동방식
Fig. 1. Reactor starting method

리액터 기동방법은 전동기에 직렬로 리액터를 연결함으로써 기동전류를 전압에 비례하여 제한하는 것이

지만, 실질적으로 이용 가능한 기동 토크도 줄어든다. 이 방식의 장점은 다른 기동방법에 비해 비용이 저렴하여 펌프와 같은 구동설비에 많이 적용되고 있다.

그림 1은 리액터 기동방식의 회로도를 나타낸 것으로서 S1 스위치를 닫은 후 리액터를 통해 전류가 흐르게 한 다음 전동기가 정격속도에 도달할 경우 스위치 S2를 닫아 전동기가 지속적으로 운전하게 된다.

그림 1과 같은 유도전동기를 리액터 기동방식으로 운전할 경우 리액터의 용량산정이 필요하다. 리액터의 탭은 대부분 50[%], 65[%], 80[%]의 3부분으로 구성되어 있다. 이 3가지 탭의 리액턴스 값이 특성 해석에 필요하다.

리액터 기동시 탭에 흐르는 전류는 식 (1)과 같이 전동기 단자전압에 대해 각각 전동기 리액턴스 X_M 와 리액터의 리액턴스 X_R 로부터 구할 수 있다.

$$I_{tap} = \left(\frac{U_N}{X_M + X_R} \right) \quad (1)$$

그러나 전동기 리액턴스를 계산하기가 어려울 경우 기동전류를 상정하여 설정하고자 하는 전압탭의 값을 이용하여 쉽게 탭 전류를 구할 수 있다. 이때 기동전류 I_{st} 와 탭 α 값을 사용하여 리액터의 탭전류 I_{tap} 는 식 (2)와 같이 구하면 된다.

$$I_{tap} = \frac{\alpha}{100} \times I_{st} \quad (2)$$

리액터 탭전압 V_{tap} 는 정격전압 V 와 탭 선정 값에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{tap} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times V \times (100 - \alpha)\% \quad (3)$$

3상 리액터의 정격용량 P_{react} 은 식 (4)와 같이 구하거나 식 (5)와 같이 리액터의 탭 전압과 탭 전류의 곱으로도 구할 수 있다.

$$P_{react} = \sqrt{3} V \times I_{st} \times \frac{\alpha}{100} \times \left(1 - \frac{\alpha}{100} \right) \quad (4)$$

$$P_{react} = 3V_{tap} \times I_{tap} \quad (5)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 탭 임피던스 Z_{tap} 가 얻어지므로 기동용 리액터의 인덕턴스 $L_{reactor}$ 는 다음과 같다.

$$L_{reactor} = \frac{Z_{tap}}{\omega} \quad (6)$$

리액터는 변압기 철심과 달리 공극을 갖도록 설계하고 있다. 공극이 포함될 경우 높은 자화를 감자하는 결과를 나타내어 히스테리 루프를 깎아 변형시키고, 높은 투자율을 가진 재료의 투자율도 상당히 감소시킨다[3-4].

그림 2는 공극의 유무에 따른 자로의 유효길이를 비교한 것으로서 공극이 포함되지 않는 것은 변압기에 해당되고, 공극이 포함된 경우는 리액터에 이용되는 것으로서 자로 길이가 변압기에서 이용하는 것보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 또한 공극이 없는 경우 잔류자속밀도와 최대자속밀도의 크기에서는 큰 차이가 없지만, 철심에 공극이 고려된 경우에는 이 두 경우의 차이는 높은 편이다[3-4]. 따라서 자계와 자속밀도의 기울기에 차이가 존재함을 알 수 있다.

리액터에 사용되는 철심에서 공극의 고려는 변압기 포화 때문에 누설 인덕턴스에 의해 발생한 전압 스파이크를 상당히 제거하거나 줄이는 역할을 하고 있다[4].

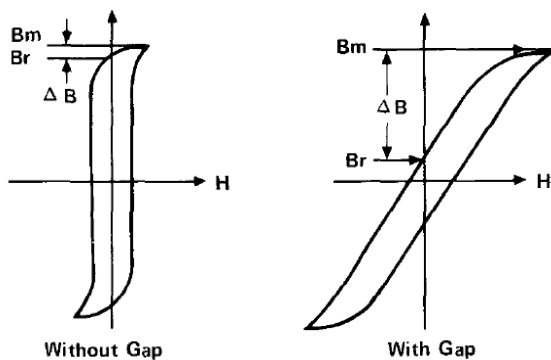


그림 2. 공극의 유무에 따른 리액터의 자화곡선
Fig. 2. Magnetization curve of reactor with/without air-gap

3. 해석 및 결과 분석

직입 기동의 운전에 대해 리액터의 선형 및 비선형 영향에 따라 유도전동기 특성이 어떻게 변화하는지를 해석하였다. 리액터의 비선형 특성 해석은 전자계과도해석 프로그램(EMTP)[6]의 type 98을 이용하였다.

본 해석에 사용된 3상 유도전동기는 저압의 4극 75[kW] 용량으로 효율은 95[%], 역률은 80[%]로서 기동시 전류는 운전전류의 6.5배로 될 수 있는 조건 하에서 3[%]의 슬립으로 운전할 경우 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 유도전동기 파라미터
Table 1. Induction motor parameters

parameter	440[V], 4p, 75[kW]
stator resistance, r_s	0.095[Ω]
rotor resistance, r_r	0.075[Ω]
stator leakage inductance, L_{ls}	0.0005[H]
rotor leakage inductance, L_{lr}	0.0004[H]
mutual inductance, L_m	0.016[H]
Inertia moment, J	5.0[kg · m ²]
Friction coefficient, B	0.075[Nm · rad/s]

표 1에서 제시된 전동기를 가지고 직입기동과 리액터 기동에서는 선형 및 비선형 요소를 고려한 3가지에 비교 분석하였다.

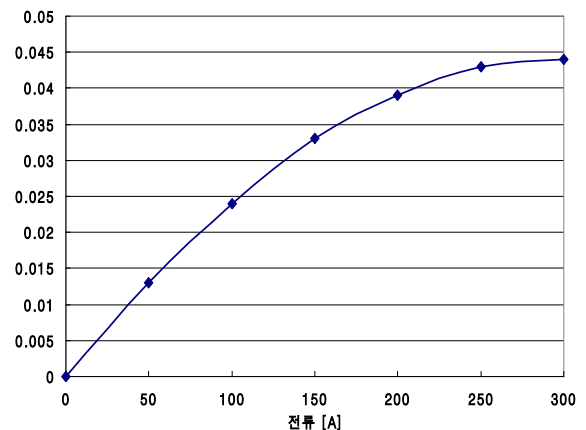


그림 3. 리액터의 비선형 특성
Fig. 3. Non-linear characteristics of reactor

그림 3은 식 (2)와 (6)을 이용하여 표 1에서 제시한 유도전동기를 구동하기 위해 적용하는 리액터의 비선형 자화곡선을 나타낸 것이다. 이 리액터의 자화특성 곡선은 그림 2의 공극을 가진 리액터의 자화곡선과 거의 같은 특성을 가지고 있다.

3.1 직입기동시의 특성

우선 표 1에서 제시한 전동기의 파라미터를 가지고서 리액터 기동방식과의 특성 비교를 위해 직입 기동한 경우의 고정자 전류, 토크 그리고 전력에 대한 해석 결과는 그림 4와 같다.

그림 4 (a)에서는 직입 기동시 고정자에 흐르는 전류를 나타낸 것으로서 정격속도에서의 104[A] 전류에 비해 기동시의 전류는 677[A]로서 약 6.5배로 해석 조건에서 제시한 것과 동일하게 나타남을 알 수 있다.

그림 4 (b)는 직입 기동시의 토크를 나타낸 것으로서 기동순간의 맥동토크는 1,037[Nm]이고, 정격속도에서의 토크는 354[Nm]이며, 탈출 토크는 1,088[Nm]이다. 실제 직입 기동할 경우 약 2.5초에 정격속도에 도달할 정도로 빠르다는 것을 알 수 있다.

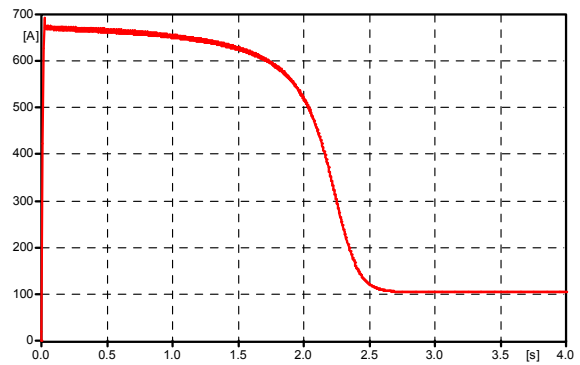
그림 4 (c)는 직입 기동으로 동작한 경우 유효전력(O), 무효전력(□), 피상전력(△) 그리고 역률(x)의 변화를 나타낸 것으로서 정격속도에 도달하기 전까지는 무효전력이 유효전력보다 높으므로 역률이 상대적으로 낮다는 것을 알 수 있다. 또한 전력은 정격속도에 도달하기 전에 높게 나타나지만, 정격속도 이후에는 매우 안정되어 높은 역률을 보장하고 있다.

3.2 선형 요소만 고려한 리액터 기동 특성 분석

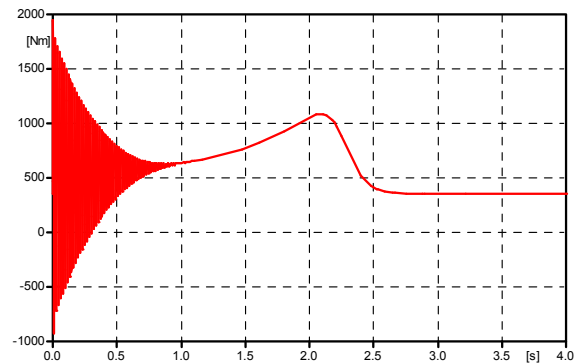
그림 5는 리액터의 전압 탭을 80[%]로 설정하고 자체 선형만을 고려하여 기동하는 경우의 동작 특성을 분석한 것이다.

그림 5 (a)는 고정자에 흐르는 전류를 나타낸 것으로서 551[A]이고, 정격속도에 도달한 경우의 전류는

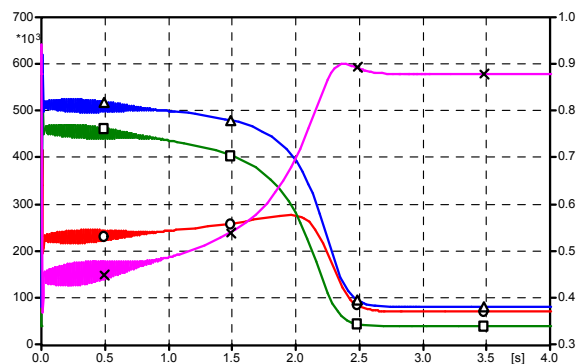
102[A]로서 거의 5.4배가 기동시에 흐른다는 것을 알 수 있다. 이는 직입기동에 비해 약 0.8배에 해당되는 값이므로 리액터에 의해 기동전류가 다소 완화되어짐을 알 수 있다.



(a) 고정자 전류

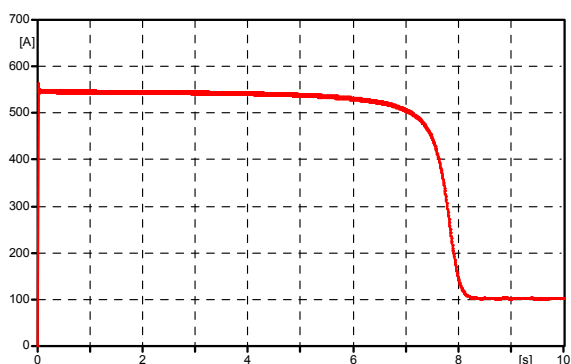


(b) 토크

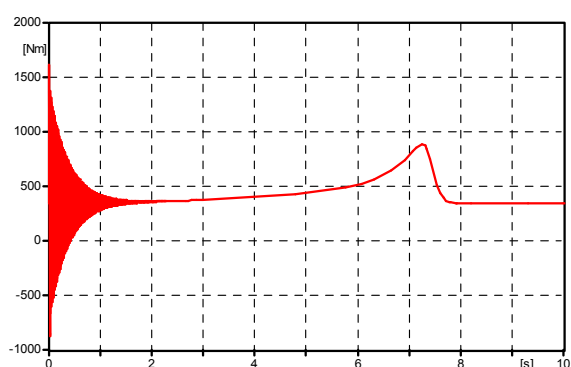


(c) 전력 & 역률

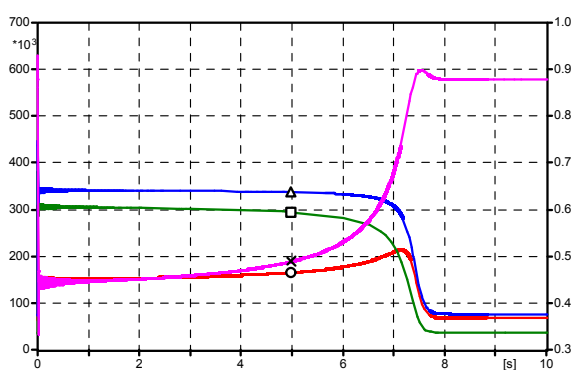
그림 4. 직입 기동시의 전류, 토크 및 전력
Fig. 4. Current, torque and power at the direct on line starting



(a) 고정자 전류



(b) 토크



(c) 전력 & 역률

그림 5. 리액터 선형 요소만을 고려한 경우 전류, 토크 및 전력

Fig. 5. Current, torque and power at the only linear component of reactor

그림 5 (b)는 토크 특성을 나타낸 것으로서 기동시의 맥동 토크는 741[Nm]이고, 탈출 토크는 887[Nm]이며, 정격속도에서의 토크는 340.8[Nm]로서 직입 기

동시에 비해 최대토크가 약간 감소함을 알 수 있다. 리액터 기동시 직입 기동에 비해 토크는 전압의 제곱보다는 약간 높고 전압탭의 비율과 비슷한 값을 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 기동순간의 맥동성분이 직입기동에 비해 아주 짧게 발생함을 알 수 있다. 정격속도는 기동 후 약 8초 가까이 도달하므로 직입기동에 비해 거의 3배의 시간이 소요됨을 알 수 있다.

그림 5 (c)는 유효전력(O), 무효전력(□), 피상전력(△) 그리고 역률(×)의 변화를 나타낸 것으로서 직입기동에 비해 전력값이 상대적으로 낮아 연결된 시스템에 미치는 영향이 작다는 것을 알 수 있다.

3.3 자계의 비선형을 고려한 리액터 기동 특성 분석

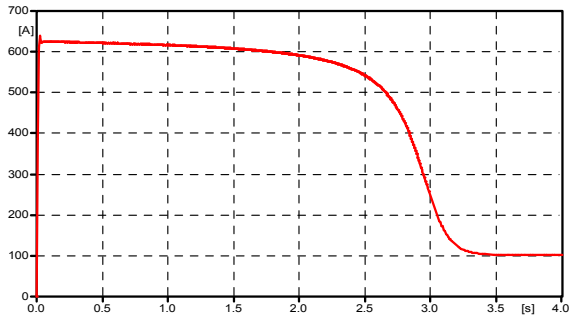
그림 6은 식 (6)으로 구한 리액터에 포화특성을 고려한 경우 전류, 토크, 전력의 변화를 해석한 결과이다.

그림 6 (a)에서 고정자 전류는 기동 초기에 615[A]이지만, 정상속도에 도달한 이후의 전류는 103.6[A]로서 기동시 정격의 약 6배가 흐른다는 것을 확인할 수 있다.

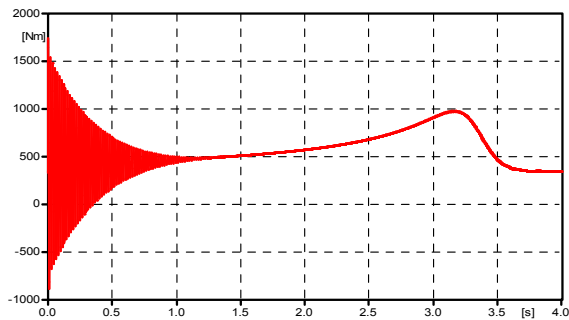
그림 6 (b)는 리액터 포화특성을 고려한 경우 토크 변화를 나타낸 것으로서 정격속도에서의 토크는 346[Nm]이지만, 기동시의 맥동 토크는 854[Nm]로서 약 2.47배가 되고, 최대 탈출 토크는 974[Nm]임을 알 수 있다.

그림 6 (c)는 유효전력(O), 무효전력(□), 피상전력(△) 그리고 역률(×)의 변화를 나타낸 것으로서 직입기동에 비해서는 전력은 약간 낮은 값이지만, 리액터의 선형 성분에 비해서는 매우 높은 값이 기동시에 필요함을 알 수 있다.

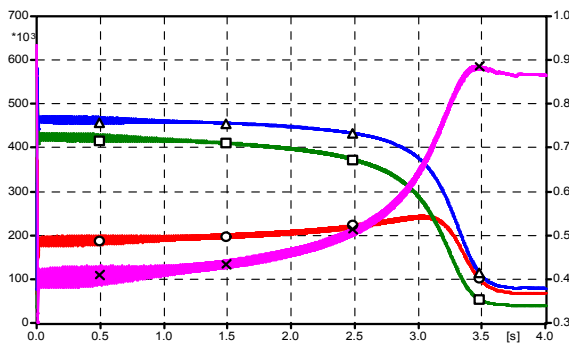
포화특성을 고려할 경우 정격속도에 도달하는 시간이 순수하게 비선형 요소의 리액터만 사용하는 경우에 비해 매우 빠르고 직입기동보다는 약간 늦은 시간에 도달한다는 것을 알 수 있다. 또한 전류의 크기도 직입기동보다는 작지만 선형 요소보다는 높아 전력의 크기도 정격속도에 이를 때까지는 높은 값을 유지함을 알 수 있다.



(a) 고정자 전류



(b) 토크



(c) 전력 및 역률

그림 6. 리액터의 비선형 성분을 고려한 경우 전류, 토크 및 전력

Fig. 6. Current, torque and power at the only non-linear component of reactor

4. 결 론

본 연구에서는 유도전동기를 직입 기동할 경우 발생하는 문제점을 줄이기 위해 전동기 앞단에 설치하는 리액터의 선형 및 비선형에 따라 전류, 토크 그리고 전력의 변화가 어떻게 달라지는지를 해석하였다. 리액

터의 탭을 사용할 경우 기동순간의 전류는 리액터의 탭에 비례하는 크기가 발생하지만, 토크는 전압의 제곱보다는 약간 낮은 값을 나타내었다.

3가지 해석을 통해 정격속도에 가장 빠르게 도달하는 것은 직입기동이지만, 정격속도에 도달하기까지 전력은 직입기동이 가장 높고, 그 다음은 포화특성을 고려한 경우이며 포화를 고려하지 않은 경우가 가장 낮다는 것을 알 수 있었다. 또한 최대 토크의 크기에서도 같은 형태로 나타남을 알 수 있었다.

본 연구결과는 향후 전동기의 가속도 계산에도 도움이 될 것으로 판단된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2012년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] Theodore Wild, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002.
- [2] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, Eun-Woong Lee, "A Characteristic Study on the Power Factor Compensation Application of High Voltage Induction Motor", KIIE, Vol.57P, pp.225~230, 2008. 9.
- [3] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, "Characteristics Analysis of Reactor Considering Magnetization Saturation", KIIE, Vol.26, No.2, pp.92~98, 2012. 02.
- [4] IEC 60076-6, "Power transformer-part 6: Reactors".
- [5] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, "A Characteristic Study on the Power Factor Correction Application for Induction Motor", KIIE, Vol.22, No.9, pp.25-31, 2008. 09.
- [6] 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 국립강릉원주대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 평의원. 전기기기 및 에너지변환시스템 부문 학술위원장. 한국조명·전기설비학회 학술이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr