

A Study on the Characteristics for Power Capacitor under the Voltage Unbalance Operation

金 一 中[†] · 金 宗 謙^{*}
 (Il-Jung Kim · Jong-Gyeum Kim)

Abstract - Most of the low-voltage feeder are designed with approximately balanced and connected at the three phase four wire systems. However, Most of the power distribution systems' load which is composed of single or three phase are unbalanced by generating load unbalance. Unbalanced current will draw a highly unbalanced voltage.

The power factor of an induction motor at rated operation is between 25 and 90%, depending on the size and speed of the motor. However, many induction motors operate below the nominal rating, resulting in poor power factor. This condition needs power factor improvement. Addition of power capacitor at the motor terminal may draw to stress due to voltage unbalance.

This paper presents operation characteristics on steady states of a three-phase induction motor under unbalanced voltages with power capacitor. The existence of voltage unbalance have an effect on stress of power capacitor

Key Words : Voltage unbalance, Power capacitor, Reactive power, p-q theory, Induction motor

1. 서 론

산업현장에서 소비되는 전력에너지의 2/3 정도는 전동기가 차지하고 있다. 이 전동기의 대부분은 유도전동기로 다른 전동기에 비해 합리적인 가격에 유지비용도 저렴하고 오랜 기간 동안 안정적인 운전이 가능하여 널리 사용되고 있다.

대부분의 유도전동기 정격부하로 운전할 때 역률은 전동기의 용량과 속도에 따라 다르지만 대개 90[%]이하다. 특히 기동시 역률은 매우 낮은 편이다. 유도전동기는 대부분의 경우 공칭 정격보다 낮은 범위에서 운전되기 때문에 실제 운전시의 역률은 공칭역률보다는 낮다[1].

유도전동기는 기동시에 자화를 위해 무효전력이 필요하다. 이에 따라 여자를 위해 필요한 무효전력을 전원측에서 전원을 끌어들이는 경우 공급전력이 증가하기 때문에 부하측에서 커패시터를 설치하여 대신 무효전력을 공급하는 경우가 대부분이다. 따라서 공급전력인 피상전력을 줄이기 위해서는 일정한 양의 무효전력을 전원측을 대신할 수 있도록 역률보상용 커패시터가 사용된다.

커패시터의 수명 단축 요인으로는 온도상승 및 전압 및 전류 등이다[1]. 부하에 공급되는 전압원은 같은 크기의 전압에 위상차가 일정한 전원을 공급되는 경우가 가장 이상적이지만 실제로는 부하의 불안정 운전 등으로 인해 전압불평형이 존재하게 된다. 이들 전압불평형이 존재할 경우 전력

특성의 변화로 부하의 불안정이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 전압불평형이 존재하는 경우, 유도성 부하인 전동기에 무효전력 보상을 위한 전력용 커패시터 설치시 발생할 수 있는 전력 및 부하의 특성변화를 해석하고자 한다.

2. 전력특성 및 전압불평형

그림 1과 같이 전원과 부하측 전력의 흐름을 설명하기 위해서는 전력변환이론(p-q theory)을 사용한다. p-q 이론은 3상 전력시스템의 동작특성을 이해하는데 매우 편리하다 [2,3].

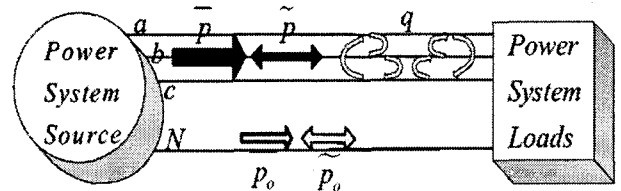


그림 1 p-q 이론 전력 성분
 Fig. 1 p-q theory power components

3상 회로를 좌표변환을 할 경우 필요한 전력을 구할 수 있다. 그림 1에서와 같이 전원측에서 부하측으로 순수한 흐름을 의미하는 유효전력(p)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = v_d i_d + v_q i_q \tag{1}$$

무효전력(q)은 시스템 상 서로 교환되는 전력이다. 즉, 대

[†] 교신저자, 正會員 : 湖西大學校 벤처大學院 教授 · 工博
 E-mail : ijkim@hoseo.edu
^{*} 正會員 : 江陵大學校 電氣情報通信工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2008年 1月 18日
 最終完了 : 2008年 1月 29日

응되는 바람직하지 못한 전류와 관련 있는 것으로서 전원측과 부하측 사이 에너지의 상호 이동을 나타낸 것이다. 이는 실질적인 에너지의 전달은 없지만 전동기의 경우 필요한 여자전류를 형성하는데 필요한 성분으로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = v_d i_q - v_q i_d \quad (2)$$

부하에 사용되는 유효분과 사용되지 않고 전원측과 부하측 사이를 왕래하는 무효전력성분의 벡터합인 피상전력(s)은 식 (3)과 같다.

$$s = p + jq = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (3)$$

전원측에서 공급되는 전력에 대해 유도전동기에 제공되는 전력성분의 비율을 역률로 환산할 경우 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$pf = \frac{p}{s} \quad (4)$$

전압불평형은 3상 전원에서 단상부하의 불평형 배분과 운전 및 불평형된 3상 부하 임피던스 연결로 발생하기도 하고, 평형된 3상 부하라도 불평형 전원에 연결되면 유입 전류는 불평형이 되어 3상의 각상에 서로 다른 전압강하로 발생한다. 전압불평형이 증가할 경우 선형적인 전류불평형으로 이어져 손실증가로 인해 기기의 출력을 감소시키는 요인으로 작용한다. 그래서 불평형을 최소화 시키도록 시스템의 설계나 운전이 필요하다.

부하 설비에서 발생하는 전압 불평형율(VUF)은 식 (5)와 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다 [3,4].

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \quad (5)$$

현장에서 3상 선간전압값을 측정된 다음 식 (6)을 이용하면 전압불평형율을 식 (5)보다 쉽게 구할 수 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (6)$$

식 (6)에서 β 는 다음으로 구한 것이다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

3. 시뮬레이션 및 결과분석

역률보상용 커패시터 설치시 전압불평형의 변화에 따른 특성해석을 위해 사용한 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 3상 380[V] 2.2kW에서 역률보상용으로 권장되고 있는 커패시터는 15[μ F]로서 무효전력으로 환산할 경우 용량은 816.56[Var]가 된다.

표 1 유도 전동기의 파라미터

Table 1 Parameters of Induction motor

Capacity	2.2kW
Slip	3%
Voltage	380V
Current	5.2A
Efficiency	85%
Power factor	80.0%
Locked rotor current/nominal current	5.0

표 2는 표 1의 전동기에 대한 상세 파라미터를 나타낸 것이다.

표 2 상세 파라미터

Table 2 The detailed parameters

parameter	value
stator d-q resistance	4.41726 Ω
rotor d-q resistance	1.45134 Ω
stator d-q inductance	0.009249H
rotor d-q inductance	0.009249H
d-axis magnetization	0.191847H
q-axis magnetization	0.191847H
Inertia moment J	0.03[kgm ²]

3.1 평형전압으로 운전시 동작 특성

우선 전압 불평형이 존재하지 않는 조건에서 역률 개선용 커패시터의 설치 전후에 대한 동작 특성을 해석하였다. 특성해석에는 전자계 과도해석 프로그램(EMTP)을 사용하였다[5].

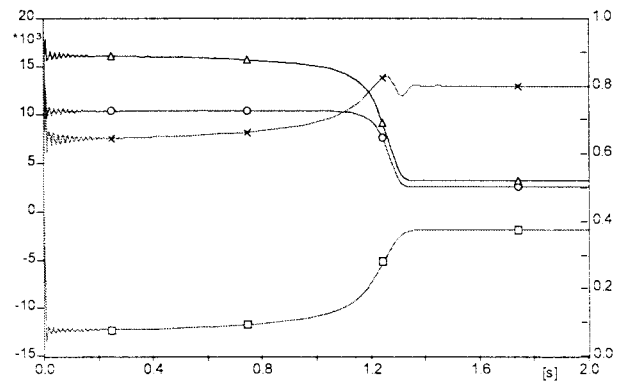


그림 2 평형 전압 운전시의 동작 특성(PF 미사용)
Fig. 2 Operation characteristics under the balanced voltage(No PF)

그림 2는 평형전압 상태에서 커패시터가 사용되지 않는 경우 3상 380[V] 2.2kW 유도전동기의 기동에서 정상운전까지

의 특성변화를 나타낸 것이다. 그림 2에서 유효전력에 대해 무효전력은 상대적인 의미로 부(-)로 나타내었다.

그림 2에서와 같이 기동시의 높은 전류로 인해 유효(P:○), 무효(Q:□) 및 피상전력(S:×)값은 정상운전시에 비해 상대적으로 높지만 정상운전에서는 표 1에서와 같은 값을 나타내고 있다. 정상운전시의 유효전력은 2584[W], 무효전력은 1937.5[Var], 피상전력은 3230[VA], 토크는 12.01[Nm], 각속도는 182.84[%]이다. 정상운전시 전동기 여자를 위해 필요한 여자전력이 상대적으로 높아 전원측에서 공급해야 할 피상전력이 증가함을 알 수 있다. 피상전력에 대한 유효전력값인 역률(PF)은 0.8이지만 실제로 90%이상 95%까지 요구하고 있고 전원측에서 공급해야 할 피상전력량을 줄이기 위해서는 역률개선용 커패시터 사용은 필수적이다.

효율 η 은 유효전력을 입력으로 하여 발생한 토크 및 각속도의 곱을 출력으로 아래와 같이 계산할 경우 85%로서 표 1에서 제시한 결과와 동일하다.

$$\eta = \frac{wT}{P} = \frac{182.84 \times 12.01}{2584} = 85\%$$

그림 3은 부하에 필요한 무효전력을 제공하기 위해 커패시터 설치한 후의 동작결과를 나타낸 것이다.

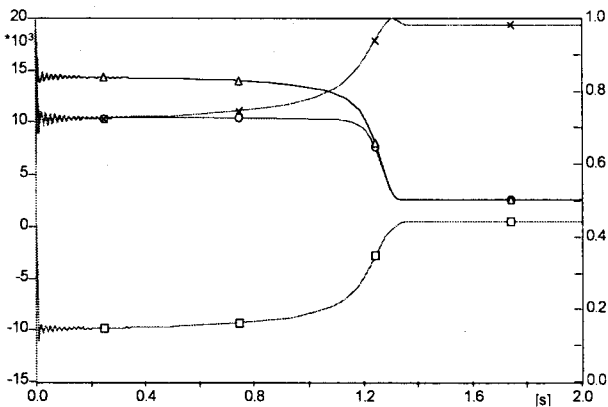


그림 3 평형 전압 운전시의 동작 특성(PF 사용)
Fig. 3 Operation characteristics under the balanced voltage(PF)

그림 3에서는 역률 보상 커패시터의 설치시 특성변화를 나타낸 것이다. 정상운전시의 유효전력은 2584[W]로 동일하지만, 커패시터를 통해 전원측에서 공급하는 무효전력은 1937.5에서 507.9[Var]로 많이 줄어들었고, 피상전력도 3230에서 2633[VA]로 감소하였으며, 토크와 각속도는 각각 12.01[Nm] 및 182.84[%]로 동일하다. 부하에 필요한 무효전력을 커패시터가 보완한 결과로 역률은 0.8에서 0.98로 증가하였다. 그러나 효율 η 은 유효전력 및 토크, 각속도가 변하지 않기 때문에 설치전과 동일하다.

무효전력을 제공하기 위해 설치하는 커패시터의 전력 Q_c 은 식 (7)과 같이 단자에 걸리는 전압 V_c 와 전류 I_c 로 구할 수 있다.

$$Q_c = V_c \times I_c \quad (7)$$

3.2 불평형전압으로 운전시 전압 따른 동작 특성

유도전동기에 인가되는 전압이 고르지 못한 경우의 특성변화를 확인하기 위해 불평형전압의 변화를 1~3%까지 위상각을 고려하지 않고 크기만 변화를 시킨 경우 전압불평형율에 따른 각상의 전압은 표 3과 같다.

표 3 전압 불평형율의 비교
Table 3 Comparison of VUF

V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	VUF[%]
310.0	310.0	310.0	0
310.26	313.0	315.69	1
310.28	315.42	321.2	2
310.2	318.46	326.74	3

그림 4는 1% 전압불평형시 전력 및 역률의 동작변화를 나타낸 것이다.

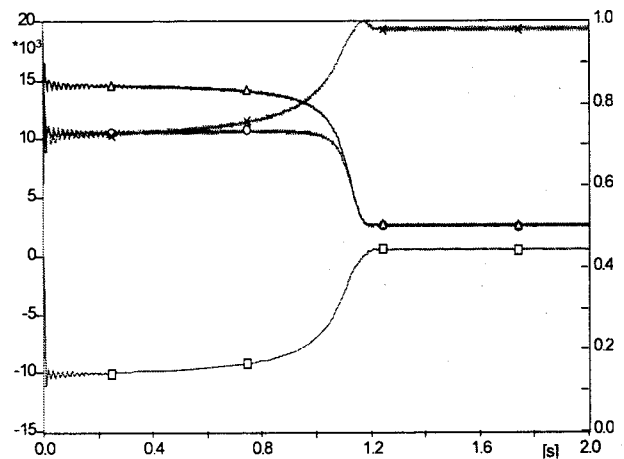


그림 4 1% 불평형 전압 운전시의 동작 특성(PF 사용)
Fig. 4 Operation characteristics under 1% unbalanced voltage(PF)

그림 3에서와 달리 안정된 조건의 경우와 달리 각 특성값에서 약간의 편차를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 정상운전시의 유효전력은 2502.6~2670.2[W]이고, 무효전력은 457.8~591.6[Var]이며, 피상전력은 2554.6~2726.5[VA], 토크는 11.668~12.396[Nm], 각속도는 182.87~183.08[%]이다. 이와 같은 전압불평형이 존재할 경우 기기의 동작에 불안정성을 초래할 수 있다.

그림 5는 2% 불평형전압으로 운전시 전력 및 역률의 변화량을 나타낸 것이다. 전압불평형의 존재로 인해 맥동성분이 상당히 존재함을 확인할 수 있다.

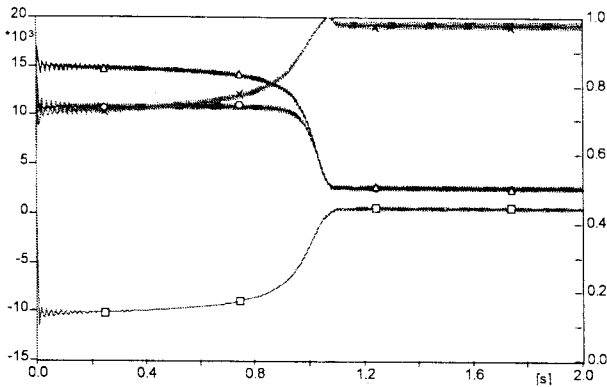


그림 5 2% 불평형 전압 운전시의 동작 특성(PF 사용)
 Fig. 5 Operation characteristics under 2% unbalanced voltage(PF)

그림 5에서 알 수 있듯이 전압불평형율이 증가함에 따라 각 특성값의 편차는 앞의 경우에 비해 더욱 증가함을 알 수 있다.

2% 전압불평형으로 운전되는 경우 정상상태에서의 유효전력은 2417~2756.5[W]의 범위이고, 무효전력은 404.21~677.55[Var]의 값을 나타내고, 피상전력은 2469~2820[VA]을 값을 유지한다. 한편 전동기 출력 토크는 11.287~12.776[Nm], 각속도는 183~183.2[%]이다.

그림 6은 3% 전압 불평형시 전력과 역률의 변화를 나타낸 것이다.

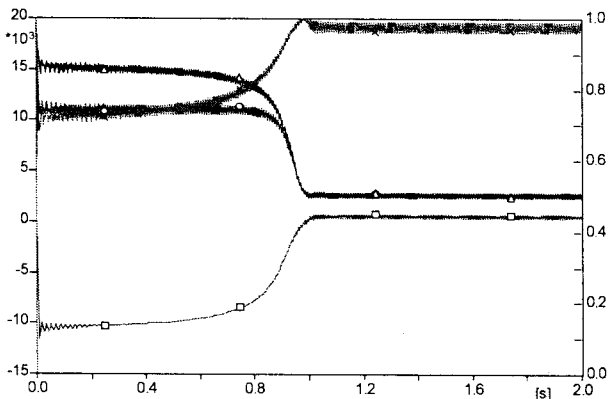
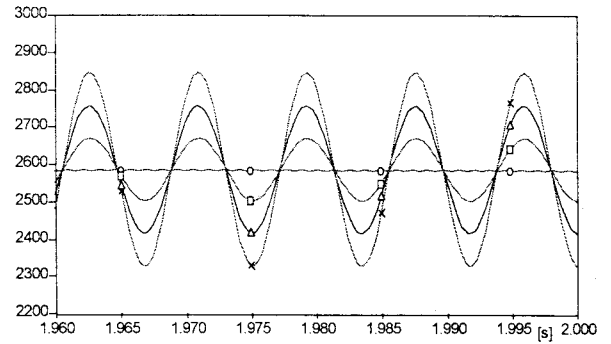


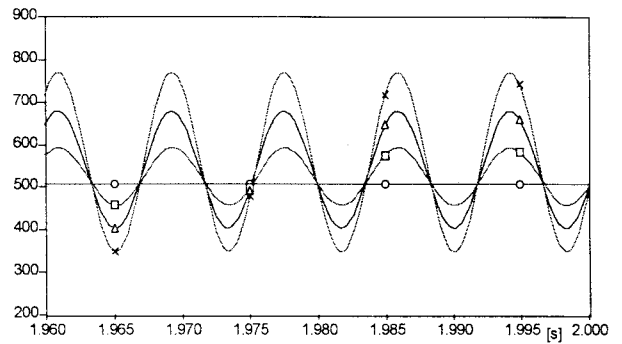
그림 6 3% 불평형 전압 운전시의 동작 특성(PF 사용)
 Fig. 6 Operation characteristics under 3% unbalanced voltage(PF)

그림 6은 앞의 1% 및 2% 전압불평형의 해석결과에 비해 각 특성값의 편차는 더욱 증가함을 알 수 있다. 3% 전압불평형으로 운전되는 경우 정상상태에서의 유효전력은 2323.4~2846[W], 무효전력은 349.49~766.83[Var], 피상전력은 2381.1~2917.2[VA], 토크는 10.883~13.166[Nm], 각속도는 183.03~183.35[%]이다.

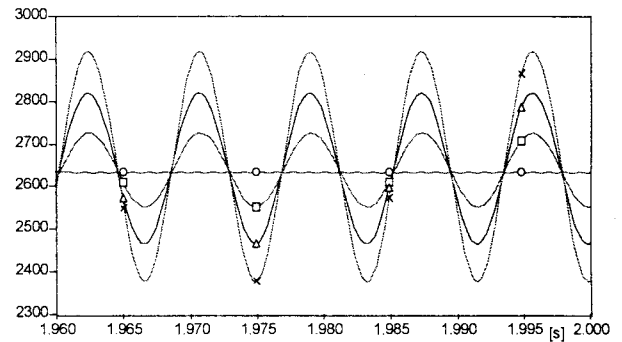
불평형전압(0%:○, 1%:□, 2%:△, 3%:×)에 따라 기동에서 정상상태에 이르기까지의 각각의 특성변화를 비교하기 위한 해석 결과는 그림 7과 같다.



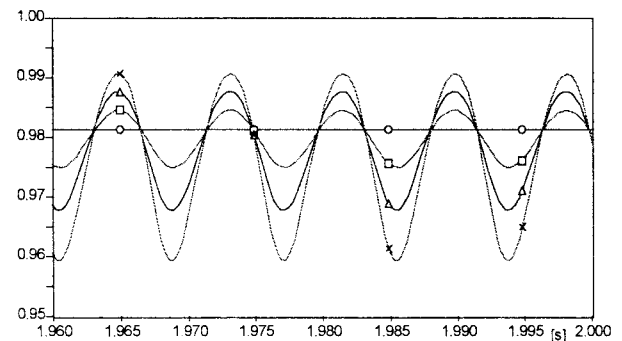
(a) 유효전력(P)



(b) 무효전력(Q)



(c) 피상전력(S)



(d) 역률(PF)

그림 7 불평형전압에 따른 특성 비교

Fig. 7 Characteristics comparison by VUF

그림 7에서의 같이 전압불평형이 존재하지 않는 경우 안정된 값을 나타내지만, 전압불평형이 존재할 경우 각 특성값은 맥동형태를 나타내기 때문에 부하는 물론 연결된 시스템

에 불안정을 초래할 수 있다. 특히 전압불평형이 증가할수록 정상상태에 도달하는 시간을 줄여줄지만, 기동 초기에는 약간 높은 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 전압 불평형이 존재할 경우에 무효전력값이 변동하기 때문에 일정한 역할을 유지하기가 매우 어렵다.

표 4 전압 불평형율에 따른 전기량의 변화
Table 4 Power, pf, capacitor energy of VUF

VUF[%]	P[W]	Q[Var]	PS[VA]	pf	Qc[Var]
0	2585	507.94	2633.8	0.981	815
1	2502.6~	457.83~	2554.6~	0.975~	823
	2670.2	591.63	2726.5	0.984	
2	2417~	404.21~	2469~	0.968~	830
	2756.5	677.55	2820	0.987	
3	2328.4~	349.49~	2383.1~	0.959~	838
	2846	766.83	2917.2	0.991	

표 4는 그림 7에서와 같이 전압불평형이 존재하는 경우 정상상태에서의 전력, 역률 및 커패시터의 전력을 나타낸 것으로서 전압불평형이 증가할수록 편차의 폭이 증가하고, 역률 보상용 커패시터에의 에너지도 증가함을 확인할 수 있다. 커패시터에서의 에너지증가는 스트레스로 작용하여 수명을 줄일 수 있는 요소가 될 수 있다.

4. 결 론

산업용 동력으로 많이 사용되고 있는 유도전동기의 경우 자화를 위해 무효전력을 필요로 한다. 이 무효전력을 전원 측보다 부하측에 가까운 곳에서 공급하기 위해 역률 보상용 커패시터를 많이 사용하고 있다. 이와 같은 전력시스템에 공급되는 전압이 평형이 아닌 불평형으로 공급되는 경우가 많다.

전압불평형이 존재할 경우 역률 커패시터의 설치에 따른 전력 및 커패시터의 에너지 변화량을 분석하였다. 전압불평형이 높아질수록 전력의 편차가 증가하고 커패시터에서의 인가되는 전압 및 전류의 증가로 에너지가 증가함을 확인할 수 있었다. 증가한 에너지는 커패시터의 스트레스로 작용할 수 있음을 입증하였다. 따라서 안정된 전력의 사용과 커패시터의 수명을 보장하기 위해서는 전압불평형이 최소화될 수 있는 설계와 운전이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임. (과제번호 : 20070101)

참 고 문 헌

- [1] Ramasamy Natarajan, "Power Syatem Capacitor", Taylor & Francis, 2005
- [2] Akagi, H et al., "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", IEEE Trans on IA, Vol.20, no.3, pp.625-630, 1984
- [3] 김종겸 외 3인, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지, 53(B), No.6, pp. 372-379, 2004.06
- [4] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbaiance", IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50~51, May 2001.
- [5] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개



김 일 중 (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)일신 엔지니어링 기술연구소장. 2007년 ~ 현재 호서대학교 벤처전문대학원 교수
Tel : 041-540-9633
E-mail : ilkim@hoseo.edu



김 종 겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1991년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 졸업 공학박사. 1996년~현재 국립 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수. 현재 전기학회 B부문 재무이사
Tel : 033-760-8785
E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr