

제한된 투자 예산으로 정전비용 최소화를 위한 배전계통 유지보수 계획의 투자 방안

(The Investment Scheme of the Maintenance Planning with Limited Investment Budget
in the Distribution Systems for Minimizing the Interruption Cost)

황원일* · 김규호 · 김홍래 · 송경빈**

(Won-Il Hwang · Kyu-Ho Kim · Hong-Rae Kim · Kyung-Bin Song)

요 약

전력계통의 신뢰도와 배전계통의 유지보수는 매우 밀접한 관계가 있다. 본 논문에서는 정전비용의 최소화를 목적함수로 배전계통의 유지보수 계획을 수립하는 방안을 제시한다. 시변고장률을 이용하여 배전계통 내 특정설비의 고장으로 인한 정전비용을 수식화하고 공급구역의 정전비용을 목적함수로 최적화를 수행하며 경제성 분석을 통하여 투자비용 제약을 적용하여 유지보수를 위한 투자설비 우선순위를 결정한다. 제안한 방안을 검증할 모델계통은 국내의 도심지역 변전소를 통해 만들었으며, 제안된 방안의 신뢰도의 이득을 평가함으로서 그 타당성을 검증하였다.

Abstract

The reliability of a power system has close relationship with the maintenance of the distribution systems. This paper presents the method of the maintenance planning of the distribution systems by minimizing the interruption cost. The interruption cost for the equipment failures is formulated using time varying failure rate and minimized by optimization of the object function. The proposed method provides the priority list for the investment of the maintenance subject to the limited investment budget by the economic analysis. In order to test the proposed method, the modified distribution system of a rural area is introduced for the testing system. Test results show that the proposed method is good enough by evaluating the improvement of the reliability of the power system.

Key Words : Interruption Cost, Modeling of Interruption Cost, Reliability, Reliability Centered Maintenance

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 석사과정 졸업
** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 부교수
Tel : 02-820-0648, Fax : 02-817-7961
E-mail : kbsong@ssu.ac.kr
접수일자 : 2009년 10월 14일
1차심사 : 2009년 10월 16일, 2차심사 : 2010년 4월 21일
심사완료 : 2010년 4월 28일

1. 서 론

전력계통의 고신뢰도를 확보하기 위해 전력설비에 대한 시설투자 및 유지보수는 매우 중요하다. 그 중 배전설비는 수용가의 관점에서 신뢰도와 밀접한 관계가 있다. 배전계통의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 설비투자가 필요하며, 이러한 투자비용은 수용가의 부담으로 돌아오게 될 것이다. 설비투자 및 유지보수의 미흡은 수용가의 전력공급에 대한 신뢰도를 하락시킬 수 있다. 배전 계통의 신뢰도는 배전계통의 고장률, 정전시간, 그리고 사고에 따른 공급신뢰도에 미치는 영향 등을 고려할 수 있는데, 이들을 객관적으로 평가하기 어렵다[1]. 선진국에서는 수용가의 정전비용의 산정 연구가 수행되었다[2-4]. 2002년 한국전기연구원은 배전계통의 정전비용을 합리적인 배전 설비 투자를 행하기 위한 지표로 활용하기 위해 우리나라의 배전 기자재별 고장확률을 고려한 배전계통 수용가 정전비용을 산출한 바 있으며[5], 2002~2006년 한국전기연구원에서는 수용가 설문조사[6-7]를 통해 정전비용을 산출한 바 있다. 정전비용은 전력공급중단 시 수용가의 개인적, 사회적 피해비용으로서 수용가 입장을 보다 객관적으로 표현하는 지수가 될 수 있다. 설비투자는 제한된 예산으로 공급신뢰도를 최적화하는 것이 주된 목적인데 목적함수를 정전 비용으로 채택하는 것은 타당하다.

전력공급 신뢰도를 향상하기 위한 배전계통 투자계획은 신뢰도 최적화를 목적함수로 선정하는데 본 논문에서는 시변고장률을 이용하여 배전계통 내 특정설비의 고장으로 인한 정전비용을 수식화하고 공급구역의 정전비용을 목적함수로 수립하였다. 경제성 분석을 통하여 유지보수를 위한 투자설비 우선순위를 결정하고, 유지보수 방안을 검증할 배전계통모델을 만들어 신뢰도의 이득을 평가함으로써 그 타당성을 검증하였다.

2. 정전비용 최소화를 위한 유지보수의 정식화

배전계통에 보편적으로 적용되는 ‘신뢰도’의 의미는

전력공급의 수용가에 대한 지속성을 의미한다.

기본지수는 계통 수용가 지점의 신뢰도를 나타내는 가장 기본적인 지수이지만, 이 지수만을 이용하여 실제로 이용하기에는 부하점에 연결되어 있는 수용가의 수와 부하량을 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서, 추가적인 신뢰도 지수가 필요하게 된다. 현재 IEEE 관련 규격에는 여러 가지 추가적인 신뢰도 지수가 나타나있고, 각각의 정의는 다음과 같다. 신뢰도 해석에 있어서 가장 많이 사용하는 기본지수는 다음과 같다 [8-9].

- 계통 평균 정전빈도수 지수(SAIFI : System Average Interruption Frequency Index)

$$SAIFI = \frac{\text{Total Number of Customer Sustained Interruptions}}{\text{Total Number of Customer Served}} \quad (1)$$

- 계통 평균 정전 지속시간 지수(SAIDI : System Average Interruption Duration Index)

$$SAIDI = \frac{\text{Total Duration of Customer Sustained Interruptions}}{\text{Total Number of Customer Served}} \quad (2)$$

- 공급지장 에너지 지수(ENS : Energy Not Supplied)

$$ENS = \text{Total Energy not supplied by the System} \quad (3)$$

제한된 예산으로 유지보수를 하기위해 정전비용 최소화를 목적으로 최적화를 정식화하면 다음과 같다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N IC_i \quad (4)$$

subject to $C^{CM} \leq MC$

여기서, IC_i : 각 설비의 정전으로 인한 정전비용
 C^{CM} [원] : 설비 교체비용
 MC [원] : 책정된 유지보수 비용

배전구역 내의 특정배전설비가 고장이 나면 그 배전 설비에 관여된 모든 수용가는 정전이 된다. 각각의 배 전설비는 설비의 조합과 계통의 형태에 따라 수용가 의 정전 파급 효과는 다르게 나타난다. 예를 들면 보 호설비를 설치하거나 연계계통 운영으로 특정배전설 비의 고장 시 정전의 파급을 줄여 수용가의 정전피해 를 줄일 수 있다. 정전의 경험은 설비의 조합과 계통 의 형태뿐만 아니라 각 설비의 고장률에도 영향을 미 치게 된다. 그러므로 각 설비의 고장으로 인한 정전비 용은 다음 수식으로 표현이 가능하다.

$$IC_i = \lambda_i(K_i + c_i P_i r_i) \quad [₩/yr] \quad (5)$$

- 여기서, IC_i : 각 설비의 고장으로 인한 정전비용
- λ_i [f/yr] : i 설비의 고장률
- K_i [₩/f] : 단위 고장당 정전비용
- c_i [₩/kWh] : 시간당 정전비용
- P_i [kW] : i 설비에 관련된 부하
- r_i [h/f] : 단위 고장당 고장시간

3. 경제성 분석에 따른 유지보수 계획

B/C(Benefit/Cost)분석은 투자비용에 따른 이익을 평가할 수 있다. 정전비용은 수용가의 개인적, 사회적 피해비용을 잘 나타내기 때문에 수용가의 입장을 보 다 객관적으로 표현할 수 있다. 각 설비에 대한 B/C 분석은 다음과 같이 시행하였다.

$$B/C = \frac{(\sum_{i=1}^N IC_i)_{Before} - (\sum_{i=1}^N IC_i)_{After}}{C_i^{CM}} \quad (6)$$

- 여기서, IC_i : i 설비의 고장으로 인한 정전비용
- C_i^{CM} : i 설비 교체비용
- N : 설비의 수
- $(\sum_{i=1}^N IC_i)_{Before}$: 설비교체 전 시스템 총 정전비용
- $(\sum_{i=1}^N IC_i)_{After}$: 설비교체 후 시스템 총 정전비용

3.1 모델계통

모델계통은 국내의 도심지역 변전소를 바탕으로 방 사상 계통으로 가정한 시스템으로 구성하였다. 본 논 문에서는 변압기용 COS 및 선로용 COS, 가스 개폐기 에 대한 동작 신뢰도는 100[%]로 가정하였고, 해당 계 통도를 구성하고 있는 주요 배전설비는 지중선로 191.2[m], 가공선로 2,168.2[m]와 선로용 COS 14개 변 압기 및 변압기용 COS 7개와 총 38수용가와 25개의 LP(Load Point)로 구성되어있다.

각 설비별 고장복구시간에 대한 데이터는 한국전력 의 충남지사의 2001~2004년의 평균치를 적용하였으며 기기별 교체비용은 한국전력 부산지사의 평균 교 체 및 유지보수 비용을 적용하였으며[10], 모델계통 관련 상세자료는 표 1부터 표 5에 제시하였다. 배전기 기의 고장률은 시간의 함수로서 시간 t 까지 고장이 없 다가 t 시간 이후 고장을 일으키는 단위 시간당 빈도율 로 정의할 수 있다. 배전설비기기의 고장은 크게 수명 이 다하여 고장이 발생한 열화고장과 수명과 관계가 없는 임의의 고장으로 분류할 수 있다[10]. 임의고장 이라 함은 기기의 가동연수에 관계없이 항상 일정한 값으로 존재하게 되고 각 설비기기의 시변고장률은 열화고장에 의한 시변고장률에 임의고장에 의한 시변 고장률이 일정부분만큼 더해지는 형태로 구할 수 있 다[11].

표 1. 각 설비별 고장 복구 시간
Table 1. The fault restoration time for the equipments

고장복구시간	
변압기	2시간
변압기COS	2시간
선로용COS	3시간
가공선로	1시간
지중선로	2시간
개폐기	3시간

제한된 투자 예산으로 정전비용 최소화를 위한 배전계통 유지보수 계획의 투자 방안

표 2. 기기별 교체 비용과 유지보수 비용
Table 2. The maintenance cost and the replacement cost of the equipments

설비기기	유지보수비용
	교체 비용
가공선로[일반(사선시)]	22,562천 원/[km]
가공선로[무정전공사시]	38,934천 원/[km]
지중선로[관로구]	94,591천 원/[km]
지중선로[전력구]	122,867천 원/[km]
개폐기	1,900천 원/개당 수동[활선]
	4,500천 원/개당 자동[활선]
Cut Out Switch	95,337원/개당[사선]
	208,086원/개당[활선]

표 3. LP별 수용가 계약전력 및 정보
Table 3. The contracted power and information for load points

고압 수용가		저압 수용가	
Load point	계약전력[kW]	Load point	계약전력[kW]
LP 3	700	LP 1	11
LP 4	650	LP 1	50
LP 6	300	LP 1	7
LP 7	550	LP 2	3
LP 8	2,100	LP 2	20
LP 10	250	LP 2	20
LP 12	800	LP 2	4
LP 13	2,900	LP 2	3
LP 14	950	LP 2	3
LP 15	248	LP 5	3
LP 16	700	LP 5	4
LP 17	900	LP 9	3
LP 18	700	LP 9	8
LP 19	950	LP 11	4
LP 20	400	LP 11	10
LP 22	2,300	LP 21	4
LP 23	36	LP 21	10
LP 24	800	LP 21	14
LP 25	850	LP 21	3

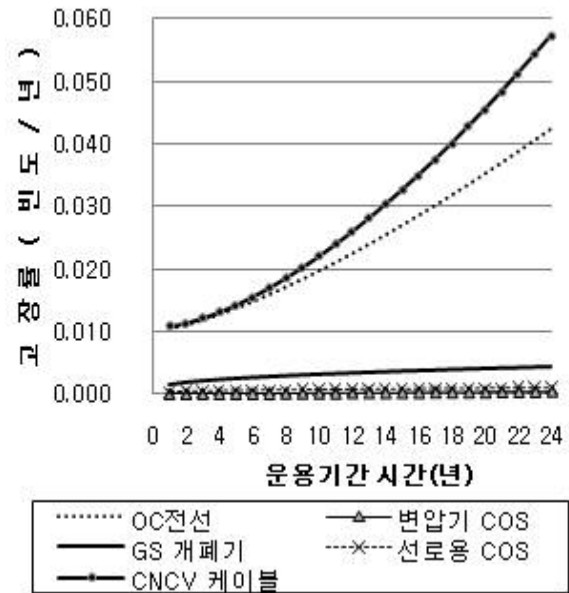


그림 1. 사례연구에서 사용되는 각 기기들의 시변고장률[11]
Fig. 1. Time-varying failure rate of the equipments on the sample study[11]

표 4. 배전선로의 정보
Table 4. The information of the feeders in the distribution system

구간번호	선 종	길이	설치년도
2746	CNCV-325	128.5[m]	1995
2747	ACSR-160 ACSR-095	42[m]	1997
2748	ACSR-160 ACSR-095	171[m]	1998
2749	ACSR-160 ACSR-095	470[m]	1993
2750	CNCV-325	42.5[m]	1995
2751	CNCV-325	233.2[m]	1996
2752	ACSR-160 ACSR-095	205[m]	2001
2753	ACSR-160 ACSR-095	30[m]	1994
2754	ACSR-160 ACSR-095	34[m]	2003
2755	ACSR-160 ACSR-095	101[m]	2002
2756	ACSR-160 ACSR-095	228[m]	1998
2757	ACSR-160 ACSR-095	25[m]	1995
2758	ACSR-160 ACSR-095	145[m]	1996
2759	ACSR-160 ACSR-095	2[m]	1999
2760	ACSR-160 ACSR-095	50[m]	1998
2761	ACSR-160 ACSR-095	253[m]	2000
2762	ACSR-160 ACSR-095	20[m]	1999
2763	ACSR-160 ACSR-095	105[m]	1994
2764	ACSR-160 ACSR-095	54[m]	1994
2765	CNCV-060	20.2[m]	1994

3.2 경제성 분석 및 신뢰도 평가

한 해의 예산은 300만원으로 한정하였으며, 8년 이상의 설비를 교체 대상으로 시행하였다. 특정설비의 교체가격이 300만원을 초과할 경우는 교체 없이 다음해에 교체하도록 하였으며, 한해의 특정설비 교체가 이루어지면 남은 금액은 다음해에 사용치 못하도록 하였다. 표 6은 설비교체를 시행하기 전 식 3에 의해 정해진 우선순위이며, 12순위까지만 교체대상으로 지정되었다. 이는 13순위부터 제한된 예산인 300만원을 초과하기 때문이다. 이와 같은 방법을 통해 매년 B/C분석 순위를 정하고 10년에 걸쳐 설비 교체를 시행하였다.

제안된 방법을 통한 설비교체를 10년에 걸쳐 시행하였을 경우와 설비교체를 시행하지 않았을 경우의 신뢰도 변화를 그림 2~4에 제시하였다.

표 5. 설치기기정보
Table 5. The information of the installed equipments

설치위치	설치기기	설치년도
LP1	변압기, 변압기COS	1995, 1997
LP2	변압기, 변압기COS	1995, 1997
LP3	선로용COS	1994
LP5	변압기, 변압기COS	1997, 1990
LP6	선로용COS	1997
LP7	선로용COS	1997
LP8	선로용COS	1997
LP9	변압기, 변압기COS	1998, 1998
LP10	선로용COS	1999
LP11	변압기, 변압기COS	1999, 1999
LP12	선로용COS	1999
LP14	선로용COS	1999
LP15	선로용COS	2002
LP16	선로용COS	1999
LP18	선로용COS	1999
LP19	선로용COS	2000
LP20	선로용COS	2001
LP21	변압기, 변압기COS	1998
LP22	선로용COS	1997
LP23	선로용COS	1996
LP24	선로용COS	2000
2747~2748	가스 개폐기	1993
2751~2752	가스 개폐기	1999
2757~2758	가스 개폐기	1996

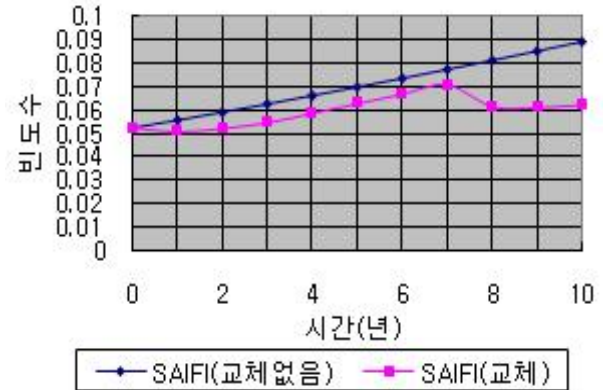


그림 2. 계통 평균정전빈도수 지수의 변화
Fig. 2. The change of system average interruption frequency index

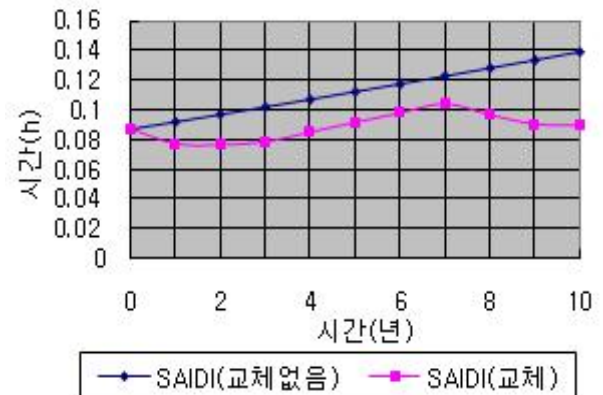


그림 3. 계통 평균정전기간 지수의 변화
Fig. 3. The change of system average interruption duration index

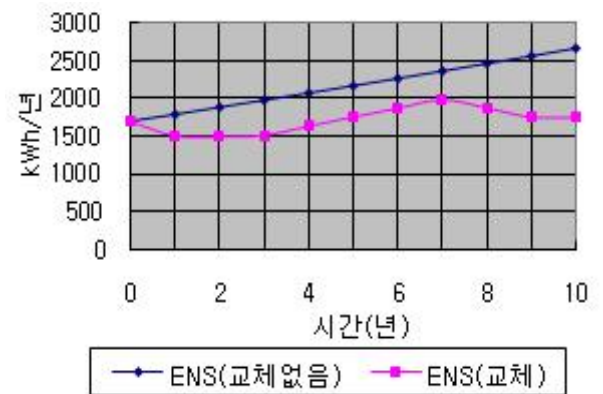


그림 4. 공급지장 에너지 지수의 변화
Fig. 4. The change of energy not supplied index

제한된 투자 예산으로 정전비용 최소화를 위한 배전계통 유지보수 계획의 투자 방안

표 6. B/C분석에 의한 설비교체 우선순위와 교체비용

Table 6. The priority list of equipment replacement by B/C test and the replacement cost

우선 순위	해당 설비	교체비용	B/C	우선 순위	해당 설비	교체비용	B/C
1	L_COS(LP3)	95,337	610.3532	23	T_COS(LP11)	95,337	39.3876
2	L_COS(LP6)	95,337	288.6970	24	2749선로	10,604,140	25.6573
3	L_COS(LP7)	95,337	288.6970	25	2747선로	947,604	15.8051
4	L_COS(LP8)	95,337	288.6970	26	T_COS(LP21)	95,337	14.4487
5	L_COS(LP14)	95,337	243.9404	27	2765선로	1,910,738	14.0161
6	L_COS(LP12)	95,337	243.9404	28	2748선로	3,858,102	13.5462
7	L_COS(LP10)	95,337	243.9404	29	2753선로	676,860	13.1975
8	T_COS(LP5)	95,337	192.8926	30	2750선로	4,020,118	12.2879
9	GS(2747-2748)	1,900,000	131.1475	31	2746선로	12,154,944	12.2879
10	L_COS(LP23)	95,337	96.2826	32	2757선로	564,050	11.7660
11	T_COS(LP1)	95,337	94.0264	33	2756선로	5,144,136	7.7456
12	T_COS(LP2)	95,337	94.0264	34	2751선로	22,058,621	5.3214
13	GS(2751-2752)	1,900,000	90.3571	35	2752선로	4,625,210	4.2097
14	L_COS(LP22)	95,337	89.7878	36	2764선로	1,218,348	4.1046
15	L_COS(LP16)	95,337	75.8681	37	2763선로	2,369,010	4.1046
16	L_COS(LP18)	95,337	75.8681	38	2758선로	3,271,490	3.2278
17	L_COS(LP19)	95,337	68.3251	39	2755선로	2,278,762	3.1632
18	L_COS(LP25)	95,337	68.3251	40	2760선로	1,128,100	2.4090
19	GS(2757-2758)	1,900,000	64.1752	41	2762선로	451,240	2.0238
20	L_COS(LP20)	95,337	60.2772	42	2759선로	45,124	2.0238
21	L_COS(LP15)	95,337	51.5866	43	2761선로	5,708,186	1.6567
22	T_COS(LP9)	95,337	46.4572				

5. 결 론

국내의 도심지역 변전소의 배전계통을 수정하여 만든 배전계통모델과 우선순위를 통한 최적화기법을 이용하여 정전의 영향을 고려한 배전계통 유지보수 방안을 제시하였다. 시변고장률을 이용하여 배전계통 내 특정설비의 고장으로 인한 정전비용을 계산하기 위해 고장시간, 고장당 정전비용, 시간당 정전비용과 고장난 설비와 연계된 부하 등을 고려하였다. 제시한 방법에 따른 다양한 신뢰도의 지수의 변화를 제시하였다. 제한된 예산으로 기기를 유지 보수함으로써 운영자에게 보다 효과적인 교체 순위를 결정하는데 참고할 수 있으며, 적정 신뢰도를 유지하기 위해 적절한

비용과 투입시기를 결정하는데 활용 가능하다.

감사의 글

본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] 박창호, 채우규, 장성일, 김광호, 김재철, 박종근, 최정환, "배전계통 신뢰도를 고려한 전기설비투자 우선순위 결정 기법", 대한전기학회 논문지, 전력기술부문A, 제54권 제4호, pp. 177-184, 2005.
- [2] Kiochi Nakamura and Susumu Yamashiro, "A Survey

- Study on Estimation of Customer Interruption Costs”, T. IEE Japan, Vol. 199-B, No. 2. 1999.
- [3] Arun P. Sanghvi, “Measurement and Application of Customer Interruption Cost/Value of Service for Cost Benefit Reliability Evaluation : Some Commonly Raised Issues”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, Nov. 1990.
 - [4] S. Ymashiro, K. Nakamura, O. Terada, and Y. Tomaki, “Residential Cost of Power Service Interruption-Recent Survey Application to Transmission Planning”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering, Vol. 1, Aug. 1996.
 - [5] 최상봉, 김대경, 정성환, “배전기자재별 고장확률을 고려한 배전계통 수용가 정전비용 산출기법”, 대한전기학회 논문지, 전력기술부문A, 제51권 제5호, pp. 232-237, 2002.
 - [6] 한국전기연구원, “경쟁체제하에서의 배전계통 공급신뢰도 및 경제성 평가기법 최종보고서”, 2004.
 - [7] 한국전기연구원, “계통계획을 위한 산업용 수용가 공급 지장비 조사연구 진도보고서”, 2006.
 - [8] 김재철, 윤상윤, “배전계통의 전력품질 및 신뢰도 평가의 방법”, 대한전기학회지, 제50권 제3호, pp. 24-31, 2001.
 - [9] Wenyuan Li, Risk Assessment of Power Systems, IEEE Press, 2005.
 - [10] 이희태, “RCM을 이용한 배전계통 설비의 유지보수 순위 결정”, 숭실대학교 석사학위논문, 2004.
 - [11] 한국전력공사, “신뢰성 및 경제성을 고려한 배전계통 최적 투자계획 수립 모델 및 시스템 개발 2차년 진도보고서”, 2007.

◇ 저자소개 ◇



황원일(黃元一)

1979년 4월 27일생. 2006년 2월 위덕대학교 전기공학과 졸업. 2009년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).



김규호(金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 안산공과대학 전기과 부교수. 2009년~현재 국립한경대학교 전기공학과 조교수.



김홍래(金鴻來)

1963년 10월 9일생. 1986년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 미국 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 순천향대학교 공과대학 전자정보공학과 교수.



송경빈(宋敬彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 미국 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 1995년 LG EDS Systems 전문과장. 1996년 한국전력공사 전력연구원 선임연구원. 1998년 대구효성가톨릭대학교 전임강사. 2000년 계명대학교 전임강사. 2002년~현재 숭실대학교 공과대학 전기공학부 전임강사, 조교수, 부교수.