

배전시스템의 신뢰도에 관한 연구

(A Study on the Reliability of Electric Power Distribution System)

김경철* · 최홍규 · 원진희

(Kyung-Chul Kim · Hong-Kyu Choi · Jin-Hee Won)

요 약

배전시스템은 고 신뢰도가 요구되는 사례시스템이다. 신뢰도는 정해진 기간과 운전 조건하에서 설비나 시스템이 적절히 자기 기능을 할 수 있는 확률로 정의된다. 수용가에서 배전시스템의 성능을 예측하고 검증하기 위한 기본적인 신뢰지수는 평균 고장률, 평균 고장기간, 평균 활용률 등이 포함된다. 본 논문에서는 EDSA의 배전계통 신뢰도 평가 프로그램을 이용하여 배전 시스템의 기본적인 신뢰도 평가지수를 구하고, 수치식 사례 배전시스템을 개선시키기 위한 방법으로 환상식 시스템으로 구성을 변경시켜 수치적으로 얼마나 높은 신뢰도가 얻어졌는지를 보여준다.

Abstract

Electric power distribution networks are prime examples of systems where a very high degree of reliability is expected. Reliability is the probability of a device or system performing its function adequately for the period of time intended and under the operating conditions intended. This paper shows that a better meshed distribution configuration over the case study of radial configuration distribution system was selected by comparing the indices obtained from EDSA's reliability worth assessment of distribution systems program.

Key Words : Reliability, SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI

1. 서 론

전력시스템은 전기를 생산하는 발전 부분과 생산된 전력을 수송하는 송전 부분 및 수용가에 전력을 배분하는 배전 부분으로 크게 나눌 수 있다. 전력시

스템은 고도의 신뢰도를 요구하는 좋은 사례이다. 신뢰도란 정해진 기간과 운전 조건하에서 시스템이 적절히 자기 기능을 할 수 있는 확률로 정의된다. 전력 시스템을 계획, 설계, 운용, 유지 보수하는데 신뢰도가 중요한 역할을 한다. 전력시스템에서 신뢰도는 수용가에 만족할 만한 양질의 전기를 계속 공급할 수 있는 확률이다. 양질의 전기는 규정이내의 전압과 주파수를 유지하는 것을 말한다[1,2,3].

전기설비는 수리 가능한 것과 수리 불가능한 것으로 나눌 수 있다. 각각의 전기 설비는 어떤 형태이든지 서

* 주저자 : 홍익대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수

Tel : 041-860-2568, Fax : 011-863-7605

E-mail : yangjier@wow.hongik.ac.kr

접수일자 : 2001년12월 7일

1차심사 : 2001년12월10일, 2차 심사 : 2002년 1월 2일

심사완료 : 2002년 1월 9일

로 결합되어 시스템을 구성한다. 시스템의 신뢰도는 각 전기설비의 신뢰도와 시스템의 구성에 따라 결정된다.

신뢰도 연구의 목표는 전기 설비의 고장 데이터를 기준으로 시스템의 적절한 신뢰도 지수를 예측하는 것이다.

전력시스템은 발전, 송전과 배전 시스템으로 구분한다. 전력시스템 모두를 신뢰도 평가하는 것은 너무 복잡하기 때문에 주로 구별하여 따로 분석하고 있다.

배전시스템은 수용가에 전기를 공급하는 전력계통의 일부이다. 가공선로는 주로 바람이나 낙뢰 등에 의한 영향을 받으나 지중 선로는 사고시 보수하는데 어려움을 갖는다.

수용가는 적절한 신뢰도로 전기를 공급받기를 원한다. 기본적인 신뢰도를 평가하는 지수는 정해진 기간 내에 평균 고장률, 평균 고장기간, 평균 활용률 등이다.

본 논문에서는 배전 시스템의 기본적인 신뢰도 평가 지수를 구하고, 사례 배전 시스템을 개선시키기 위한 방법으로 수지식 시스템에서 환상식 시스템으로 구성을 변경시켜 보다 높은 신뢰도를 얻고자 한다.

2. 배전시스템의 신뢰도 평가

배전시스템의 신뢰도는 전력을 공급하는 회사나 수용가 모두에게 중요한 관심사이다. 신뢰도 평가는 각 부하마다의 신뢰도 지수를 구하고 사례연구 배전 시스템의 신뢰도 지수를 구하여 보다 양질의 전기를 공급하는데 목적이 있다. 수용가별로 전력이 공급되지 않을 때 손실을 금액으로 환산할 필요가 있지만 다양한 수용가를 구별하기 어렵고 배전 시스템 전체로 볼 때 차별하기 곤란하므로 손실 금액을 참고로 하는 것이 타당하다.

전력시스템의 신뢰도 평가는 전력 공급자에게는 더 좋은 양질의 전력을 공급하기 위한 수단으로 활용되고 수용가는 전력이 공급되지 않으면 손실을 초래한다. 전력회사는 경제 급진 하에서 충분한 신뢰도를 얻고 수용가의 손실을 최소화해야 한다.

배전시스템은 차단기, 변압기, 배전선로, 스위치, 모선 등의 결합으로 이루어진다. 수용가는 적어도 하나 이상의 선로를 통해 전력을 공급받는다.

기본적인 신뢰도 지수는 일년동안에 설비의 평균 실패율과 평균 고장기간이다. 신뢰도 평가로 배전계통 구성요소를 보다 적절하게 재배치하거나 배전계

획을 세울 수 있다.

2.1 사례연구 계통도

신뢰도 평가를 하기 전에 배전시스템을 구성하는 설비는 적절한 모델로 전환할 필요가 있다.[4] 각 설비는 적용에 따라 세 가지 모델로 나타낼 수 있다. Two-state 모델은 설비가 정상 상태이던가 고장상태 인지를 나타내는 간단한 것이다(그림 1).



그림 1. 두개의 상태모델
Fig 1. A Two-State Model

Three-state 모델(그림 2)은 설비가 정상상태, 고장으로 인하여 정지 상태가 되던가 수리를 위해 설비를 제거한 상태로 구별된다. 고장은 두 가지 형태로 구분하는데 능동 고장(Active)은 다른 보호 설비의 동작을 일으키는 고장으로 이때는 고장난 설비를 제거해야 한다. 수동(Passive) 고장은 다른 설비에 어떠한 영향도 주지 않는 경우를 뜻한다.

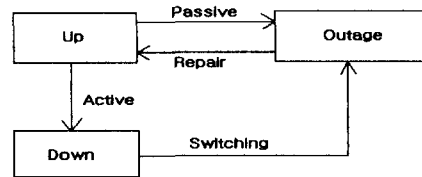


그림 2. 세개의 상태모델
Fig 2. A Three-State Model

Four-state 모델(그림 3)은 Three-state 모델에서 유지 보수를 위한 상태를 포함시킨 것이다.

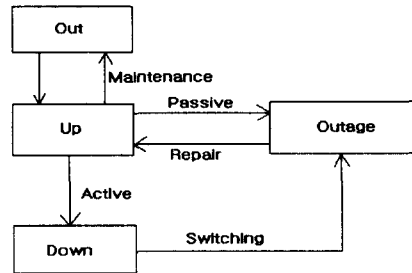


그림 3. 네개의 상태모델
Fig 3. A Four-State Model

2.2 신뢰도 지수

신뢰도 평가를 위한 기본적인 지수는 각부하단과 시스템의 평균 고장률, 평균 고장기간, 그리고 평균 공급 허용지수 등이다. 각 부하 점에서 일련의 설비 중 어느 하나만 실패해도 일련의 설비가 모두 서비스가 안 되는 경우를 1차 최소 cut set이라 한다. 이 경우의 설비 실패율(λ), 고장기간(γ), 그리고 비활용치(u)는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\lambda = \lambda_1 \quad (1)$$

$$\gamma = \gamma \quad (2)$$

$$u = \lambda \cdot \gamma \quad (3)$$

여기서 실패율은 관련설비 모두를 합한 실패율이다.

2차 최소 cut set은 일련의 설비중 두 개가 고장이 나면 서비스가 안 되는 경우이다. 이런 경우에 기본 신뢰도 지수는 아래와 같은 관계식이 된다.

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (5)$$

$$u = \lambda \cdot \gamma \quad (6)$$

3차 최소 cut set은 일련의 설비중 세 개가 고장이 나면 서비스가 안 되는 경우이다. 이런 경우에 기본 신뢰도 지수는 아래와 같은 관계식이 된다.

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 (r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3) \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3} \quad (8)$$

$$u = \lambda \cdot \gamma \quad (9)$$

지금까지 구한 신뢰도 지수를 근거로 각 부하 점에서의 최종 신뢰도 지수를 구한다.

$$\lambda_{load} = \sum \lambda \quad (10)$$

$$u_{load} = \sum \lambda \cdot \gamma \quad (11)$$

$$r_{load} = \frac{u_{load}}{\lambda_{load}} \quad (12)$$

신뢰도 평가를 하기 위해서는 시스템 구성도, 각

설비의 신뢰도 관련 데이터, 그리고 전력 공급이 중단될 때의 수용가 손실금액 등이 필요하다. 각 부하 점에서의 실패율, 고장기간, 비활용값을 근거로 시스템 전체의 여러 가지 신뢰도 지수를 구한다.

먼저, 시스템 평균 고장률 지수(System average interruption frequency index, SAIFI)는

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (13)$$

여기서 λ_i 는 실패율이고, N_i 는 부하점 i 에서의 수용가 수이다.

시스템 평균 고장기간 지수(System average interruption duration index, SAIDI)는

$$SAIDI = \frac{\sum u_i N_i}{N_i} \quad (14)$$

여기서 u_i 는 연간 고장 시간이다.

수용가 평균 고장기간 지수(customer average interruption duration index, CAIDI)는

$$CAIDI = \frac{\sum u_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \quad (15)$$

평균 공급 활용값 지수(average service availability index, ASAI)는

$$ASAI = \frac{\sum N_i \times 8760 - \sum u_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \quad (16)$$

여기서 8760은 일년을 시간으로 환산한 값이다.

혹은 평균 공급 비활용값 지수(average service unavailability index, ASUI)는

$$ASUI = \frac{\sum u_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \quad (17)$$

3. 사례연구

그림 4는 전력공급원이 둘(1과 5)이고, 수용가 부하는 일곱(15, 19, 23, 26, 30, 34, 38)인 사례 배전시스템이다. 각 부하는 두개의 전력공급원으로부터 전력을 공급받거나 둘 중 하나의 배전 변전소로부터 공급

받을 수 있다.

각 설비(변전소, 차단기, 선로, 모선, 부하 등)는 편의상 번호를 매긴 다음 원안에 넣는다. 설비와 설비는 선으로 연결한다. 전력의 흐름이 바뀔 수 있는 모선과 모선 사이를 화살표로 표시하는데 branch라 한다. 조류가 양방향 일 때는 양방향 화살표를 그린다. 사례 배전시스템의 조류흐름도는 그림 5에 있다.

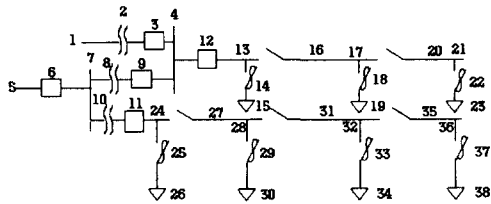


그림 4. 사례배전 시스템
Fig. 4. Single Line Diagram of Case Study

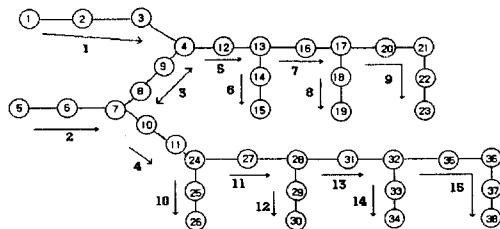


그림 5. 사례배전 시스템의 조류흐름도
Fig. 5. Power Flow Diagram of Case Study

EDSA 프로그램을 이용한 배전시스템 신뢰도 평가를 위해서 나머지 입력 데이터는 표 1에서 표 4까지 정리되어 있다. 표 1은 배전 시스템의 구성 데이터이고, 표 2는 각 설비의 신뢰도 데이터, 표 3은 각 부하의 용량[kW], 수용가 수를 나타내고, 표 4는 부하가 얼마만큼 단계적으로 투입되는지를 나타낸다.

표 1. 배전시스템 구성 데이터
Table 1. Branch Configuration Data for Case Study System

NO.	Branch				Components at one branch
	Send	End	Dir.	Group	
1	-1	4	0	0	1, 2, 3, 4
2	-1	7	0	0	5, 6, 7
3	7	4	1	0	7, 8, 9, 4
4	7	24	0	0	7, 10, 11, 24
5	4	13	0	0	4, 12, 13
6	13	15	0	0	13, 14, 15
7	13	17	0	0	13, 16, 17

8	17	19	0	0	19, 18, 19
9	17	23	0	0	17, 20, 21, 22, 23
10	24	26	0	0	24, 25, 26
11	24	28	0	0	24, 27, 28
12	28	30	0	0	28, 29, 30
13	28	32	0	0	28, 31, 32
14	32	34	0	0	32, 33, 34
15	32	38	0	0	32, 35, 36, 37, 38

비고 : Send는 조류흐름을 보내는 것으로, -1은 전력 공급원을 나타낸다.
Direction은 조류 방향으로 1은 양방향이고 0은 한쪽 방향을 나타낸다.
Group은 branch가 평행일 때 하나의 group으로 한다.

표 2. 설비 신뢰 데이터
Table 2. Component Reliability Data

NO.	Type	A fail rate (t/yr)	P. fail rate (t/yr)	M. fail rate (occ./yr)	Switch time (hours)	Repair duration (hours)	Maint. duration (hours)	Ad. fail rate (t/yr)
1	5	0.01	0.0	0.0	0.5	12.0	0.0	0.0
2	2	0.02	0.0	0.0	2.0	200.0	0.0	0.0
3	0	0.01	0.005	0.0	0.5	100.0	0.0	0.0
4	1	0.1	0.0	0.0	0.3	10.0	0.0	0.0
5	5	0.01	0.0	0.0	0.5	12.0	0.0	0.0
6	0	0.01	0.005	0.0	0.5	100.0	0.0	0.0
7	1	0.1	0.0	0.0	0.3	10.0	0.0	0.0
8	2	0.02	0.0	0.0	2.0	200.0	0.0	0.0
9	0	0.01	0.005	0.0	1.0	100.0	0.0	0.0
10	2	0.02	0.0	0.0	2.0	200.0	0.0	0.0
11	0	0.01	0.005	0.0	0.5	100.0	0.0	0.0
12	0	0.01	0.005	0.0	0.5	100.0	0.0	0.0
13	1	0.01	0.0	0.0	0.3	10.0	0.0	0.0
14	7	0.01	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0
15	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	3	0.1	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0
17	1	0.1	0.0	0.0	0.3	10.0	0.0	0.0
18	7	0.01	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0
19	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	3	0.1	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0
21	1	0.1	0.0	0.0	0.3	10.0	0.0	0.0
22	7	0.02	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0
23	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	1	0.1	0.0	0.0	0.3	10.0	0.0	0.0
25	7	0.01	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0
26	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	3	0.1	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0
28	1	0.1	0.0	0.0	0.3	10.0	0.0	0.0

29	7	0.01	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0
30	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	3	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0
32	1	0.0	0.0	0.0	0.3	100	0.0	0.0
33	7	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0
34	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	3	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0
36	1	0.0	0.0	0.0	0.3	100	0.0	0.0
37	7	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0
38	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Note : Type : 0(circuit breaker) 1(bus), 2(transformer), 3(short line), 4(N/C switch), 5(supply), 6(load), 7(fuse), 8(N/O switch), 9(others)
 A. fail : active failure such as short circuit.
 P. fail : passive failure such as open circuit.
 M. out : maintenance outage.
 Ad. fail : failure rate under adverse weather conditions.

표 3. 부하 데이터
 Table 3. Load Data

Load NO.	Component NO.	Capacity [kw]	Users (subtotal)
1	15	100	50
2	19	80	45
3	23	60	40
4	26	100	50
5	30	80	45
6	34	60	40
7	38	90	60

표 4. 부하 변화 데이터
 Table 4. Step Change of Load Data

Step NO.	Percent of load	Probability of the load
1	100	1.0
0	0	0.0

사례연구 시스템은 부하가 대부분 수지식(tree or radial type)이므로 상대적으로 전력공급 신뢰도가 높은 환상식(loop or mesh type)으로 배전구성을 바꾸면 얼마나 신뢰도 지수가 향상되는지를 관찰하기로 한다.

그림 4의 배전 시스템에서 모선 21과 36을 배전 선로와 필요시 전력을 양방향으로 공급할 수 있도록 스위치로 연결시키면 환상식 배전 시스템이 구성된다(그림 6).

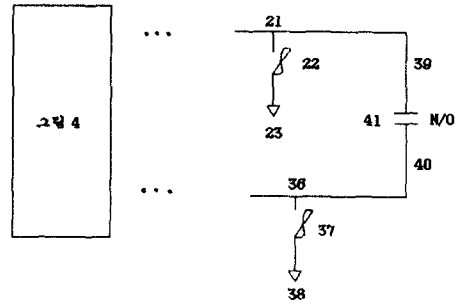


그림 6. 개선된 사례 배전 시스템
 Fig 6. Single Line Diagram of Improved Case Study

개선된 배전 시스템의 조류흐름도(그림 7)는 원래 배전 시스템의 조류흐름도와 약간의 차이가 있다.

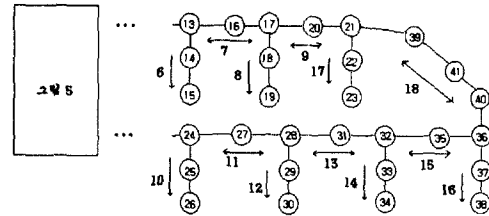


그림 7. 개선된 사례 배전시스템의 조류흐름도
 Fig 7. Power Flow Diagram of Improved Case Study

개선된 시스템은 설비가 3개 추가되었다. 설비 39, 40은 배전 선로이고, 설비 41은 정상적으로는 개방 상태이나 필요시 개폐 할 수 있는 스위치이다. 설비 신뢰도 데이터에서 스위치 시간은 4시간으로 하여 결과를 도출했다.

EDSA의 Reliability Worth Assessment of Distribution Systems 프로그램[4]을 이용한 결과를 말단 부하 23과 38, 그리고 시스템 신뢰 지수를 수지식 시스템(원래의 사례 시스템)과 환상식(개선된 사례 시스템)을 비교하여 간추리면 표 5,6,7과 같다.

표 5. 부하 23에서의 신뢰 지수 비교표
 Table 5. Comparison of Calculated Indices at Load 23

	Radial system	Loop system
outage frequency	0.365164 f/yr	0.375164 f/yr
outage duration	8.572147 h/out	3.910058 h/out
annual unavailability	3.130238 h/yr	1.466912 h/yr
annual availability	99.964267 %	99.983254 %

표 6. 부하 38에서의 신뢰 지수 비교표
Table 6. Comparison of Calculated Indices at Load 38

	Radial system	Loop system
outage frequency	0.5150697 f/yr	0.5250697 f/yr
outage duration	14.497536 h/out	3.859132 h/out
annual unavailability	7.467242 h/yr	2.026313 h/yr
annual availability	99.914757 %	99.976868 %

표 7. 사례배전 시스템에서의 신뢰 지수 비교표
Table 7. Comparison of Calculated Indices at the System

	Radial system	Loop system
system average interruption frequency index	0.427987 int./cust.	0.463744 int./cust.
system average interruption duration index	5.584180 h/cust.	1.492240 h/cust.
customer average interruption duration index	13.047545 h/cust.int.	3.217806 h/cust.int.
average service availability index	0.999362	0.999829
average service unavailability index	0.000637	0.000170

사례 배전 시스템에서 지리적 구조상 가장 말단 부하인 38모선의 결과를 검토해 보자. 수지식 시스템의 고장시간은 1회 고장시 14.49 시간인데 비하여 환상식은 3.85 시간으로 많이 개선되었다. 연간 활용률은 99.91[%]에서 99.97[%]로 향상되었다.

수지식 시스템과 환상식 시스템의 여러 가지 공급 신뢰도 지수 중에서 수용가 평균 고장기간지수를 비교하면 수지식 시스템은 수용가당 13.04 시간에서 환상식 시스템은 3.21 시간으로 개선된 것을 알 수 있다.

4. 결 론

전력 시스템은 고도의 공급 신뢰도를 요구한다. 전력 시스템을 계획, 운용, 유지 보수하는데 신뢰도 평가는 전력 공급자에게 중요한 역할을 담당하며, 수용가에게는 만족할 만한 양질의 전기를 공급할 수 있는 중요한 지표가 된다.

본 논문에서는 배전 시스템의 기본적인 신뢰도 평

가 지수를 구하고, 사례 배전 시스템을 개선시키기 위한 방법으로 수지식 시스템에서 환상식 시스템으로 구성을 변경시켜 보다 높은 신뢰도를 얻었다. 신뢰도 평가로 배전 계통을 보다 더 적절하게 배치하여 전력회사는 경제 급전 하에서 충분한 신뢰도를 얻고, 수용가의 손실을 최소화시키는 효과를 구할 수 있었다.

추후 배전시스템을 구성하는 차단기, 변압기, 배전선로, 모선 등의 신뢰 데이터에 날씨로 인한 요소와 수용가별로 전력이 공급되지 않을 때의 손실금액을 포함시켜 보다 현실적인 신뢰도 평가를 할 계획이다.

References

- (1) M. Munasinghe, "The Economic of Power System Reliability and Planning", The Johns Hopkins University Press, 1979.
- (2) J. J. Burke, "Power System Distribution Engineering", Marcel dceker Inc., 1994.
- (3) J. Endrenyi, "Reliability Modeling in Electric Power System", John Wiley & Sons Ltd., 1978.
- (4) EDSA user's Guide, "Reliability Worth Assessment of Distribution System", EDSA Micro Co., 1998.
- (5) 김재철, 윤상윤, "배전계통의 전력품질 및 신뢰도 평가의 방법", 전기학회지, 제50권 3호, 2001.
- (6) 박동욱, 이용환, "국내의 신뢰도 관리 체계 및 기준", 전기학회지, 제50권 3호, 2001.

◇ 저자소개 ◇

김 경 철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수.

최 홍 규 (崔洪圭)

1950년 1월 7일생. 1975년 홍익대학교(공학사). 1977년 연세대학교(공학석사). 1992년 홍익대학교(공학박사). 현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수. 전기설비 연구소 소장.

원 진 희 (原鎭熙)

1959년 8월 29일생. 1985년 홍익대학교(공학사). 2000년 홍익대학교(공학석사). 현재 홍익대학교 전기공학과 대학원 박사과정. 전기설비기술사. 1998년 12월~현재 (주)다산전기기술사 사무소 대표이사.