

## 구역전기사업자로 분리된 배전계통의 신뢰도 평가

(Reliability of Distribution System Divided into Community Energy Systems)

배인수 · 김진오\*

(In-Su Bae · Jin-O Kim)

### 요 약

본 논문은 기존 분산전원 신뢰도에 관한 연구를 기반으로, 여러 구역전기사업자로 인해 분산전원의 소유권과 수용가에 대한 전력공급 책임이 분리된 배전계통에 적용할 수 있는 신뢰도 해석기법을 제안한다. 구역전기사업자는 자신의 수용가에게 양질의 전력서비스를 제공할 의무가 있으므로, 계통사고시 자신의 분산전원 비상전력을 자신의 수용가에게 우선적으로 공급하는 비상대책을 선호한다. 기존 신뢰도 해석기법에서는 하나의 운영주체가 모든 전력원과 전력망을 관리하기 때문에, 여러 구역전기사업자가 존재하는 계통 운영 상황에서 분산전원의 소유권을 별도로 고려하지 않는 해석결과는 실제 신뢰도 지수와 차이를 보일 수 있다. 본 논문의 사례연구에서는 RBTS 2번 모선에 2개의 구역전기사업자가 존재하는 경우를 모의하였으며, 기존 기법과 제안된 기법의 신뢰도 지수 결과를 비교하여 제안된 기법의 유효성을 증명하였다.

### Abstract

This paper presents a technique to evaluate the reliability of customers in Community Energy System(CES). Operators of the CES are responsible for a reliable energy supply to their customers. Due to the strategy of the priority on their customers, the restoration process of DGs should be reordered when system outage happens. The previous study has proposed the technique in the distribution system in which one operator owns all DGs. Case studies in Bus 2 of Roy Billinton Test System(RBTS) verify that the accuracy of the proposed technique is comparable to that of previous technique, and the distribution system divided into several CESs changes the reliability index of customers in the CESs.

Key Words : Reliability, Distribution System, Distributed Generation, Community Energy System

\* 교신저자 : 한양대학교 전기 제어 생체공학부 교수  
Tel : 02-2220-0347, Fax : 02-2297-1569

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr  
접수일자 : 2009년 7월 3일  
1차심사 : 2009년 7월 6일, 2차심사 : 2009년 8월 21일  
심사완료 : 2009년 10월 19일

## 1. 서 론

2005년 1월, 한국전력거래소는 새로운 전기사업의 형태로 '구역전기사업자의 전력거래에 관한 항'을 전력시장운영규칙에 추가하였다. 과거 판매사업자나 직

접구매자와는 달리 구역전기사업자는 전력구입 뿐만 아니라 전력판매도 가능하고, 미리 계약한 수용가의 전력부하 중 일정 부분은 전력시장을 통해서가 아니라 자체적으로 운영하고 있는 발전설비를 통해 공급해야 한다[1].

구역전기사업자는 자신의 수용가에게 양질의 전력 서비스를 제공할 의무가 있으므로, 주어진 설비를 통해 최대의 공급 신뢰도를 유지하는 것은 구역전기사업자의 계통운영 목표 중 하나이다. 따라서 계통사고 시 구역전기사업자는 자신이 운영 중인 분산전원의 비상전력을 자신의 수용가에게 우선적으로 공급하는 비상대책을 선호하며, 다른 구역전기사업자의 수용가에게 비상전력을 공급하는 것은 별도의 계약이 없는 한 어떠한 경제적 이득도 없다.

기존 신뢰도 해석기법에서는, 하나의 운영주체가 모든 전력원과 전력망을 관리하고 계통 내 모든 수용가의 공급지장에 대한 책임을 진다는 가정이 전제된다. 여러 구역전기사업자가 물리적으로 독립된 계통을 구성하고 있다면 기존 신뢰도 해석기법을 그대로 적용해도 무리가 없다. 그러나 기존 전력망을 여러 구역전기사업자가 동시에 사용하는 계통운영 상황에서, 분산전원의 소유권을 별도로 고려하지 않을 경우 이론적인 해석결과는 실제 신뢰도 지수와 큰 차이를 보일 수 있다.

이에 본 논문에서는 과거 분산전원 신뢰도에 관한 연구[2-3]를 기반으로, 여러 구역전기사업자로 인해 분산전원의 소유권과 수용가에 대한 전력공급 책임이 분리된 배전계통에 적용할 수 있는 신뢰도 해석기법을 제안한다. 기존 연구는 정확한 신뢰도 결과를 위해 다소 복잡한 수식전개를 필요로 하므로, 본 논문에서는 간략화한 방법을 분산전원 소유권에 도입하였다.

## 2. 신뢰도 평가 방안

### 2.1 Connection행렬

본 논문이 제안하는 신뢰도 해석기법에서 사용되는 첨자에 대해 우선 설명하면,  $i$ 는 개폐기로 구분된 배전선로에 임의로 부여한 번호를 말한다.  $j$ 는 고장이

발생할 수 있는 배전설비에 부여된 번호이며 개폐기로 구분된 배전선로, 분산전원, 변압기, 주변전소 등이 해당된다.  $k$ 는 전력원에 부여된 번호이며, 분산전원과 주변전소에 대해 각각 독립적으로 번호를 부여한다.

참고문헌 [3]에서 제안한 Connection행렬은  $A_{k(i,j)}$ 와  $B_{k(i,j)}$  두 종류가 있다.  $A_{k(i,j)}$ 의  $i$ 번째 행,  $j$ 번째 열의 원소는  $j$ 번째 요소에서 고장이 발생했을 경우  $i$ 번째 배전선로와  $k$ 번째 주변전소의 연결상태를 표현하며, 분리되었을 경우는 0, 연결되었을 경우는 1의 값을 갖는다.  $B_{k(i,j)}$ 는  $i$ 번째 배전선로와  $k$ 번째 분산전원의 연결상태를 표현하고, 분리되면 0, 연결되면 비상전력이 공급되는 순서에 따라 1부터 시작하는 자연수의 값을 갖는다.

Connection행렬은 신뢰도 해석 전에 미리 수작업을 통해 작성해야 한다.  $A_{k(i,j)}$ 의 경우 주변전소의 용량이 충분하다고 가정하므로 비상전력 공급순위는 의미가 없는 반면, 분산전원에 관한  $B_{k(i,j)}$ 에서는 비상전력을 공급받는 배전선로와 분산전원 간의 거리나 기타 가중치에 의존해서 공급순위를 결정한다. 이런 이유로 인해 참고문헌 [4]에서는, 개폐기로 구분된 각 요소간의 연결상태를 표현하는 대칭행렬  $D$ 를 정의하고 이를 통해  $B_{k(i,j)}$ 을 자동으로 구성할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. Connection행렬 구성 알고리즘에서 비상전력 공급 우선순위를 결정할 때 분산전원의 소유권을 가중치로 고려하면, 구역전기사업자의 계통사고 시 비상대책을 신뢰도 해석에서 실제 상황과 유사하게 모의할 수 있다. 분산전원의 소유권을 도입한  $B_{k(i,j)}$  구성 알고리즘은 다음과 같다.

1. 대칭행렬  $D$ 를 구성한다.  $D$ 의  $x$ 번째 행,  $y$ 번째 열의 원소  $D(x,y)$ 는  $x$ 번째 배전선로와  $y$ 번째 배전선로가 직접 개폐기를 사이에 두고 연결되었으면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 대칭행렬이므로  $D(x,y)$ 와  $D(y,x)$ 는 그 값이 동일하며, 대각원소  $D(x,x)$ 는 모두 0의 값을 갖는다.
2.  $k=1$
3.  $B_{k(i,j)}$ 의 모든 원소에 0의 값을 대입한다.
4.  $j=1$
5.  $D$ 행렬의  $j$ 번째 행 모든 원소와  $j$ 번째 열 모든 원소에 0의 값을 대입한다.

6. 반복횟수를 초기화한다. ( $N_{iter} = 1$ )
7.  $k$ 번째 분산전원을 포함하고 있는 배전선로 번호를  $z_0$ 라고 하면,  $Bk(z_0, j)$ 에 1을 대입한다. 만약,  $k$ 번째 분산전원에서 고장이 발생했다면 1을 대입하지 않고 바로 15번째 단계로 간다.
8. 이미 비상전력을 공급받는 배전선로 번호의 집합  $Z$ 를 구한다. 첫번째 반복에서는  $Z = \{z_0\}$ 이며, 반복횟수가 증가함에 따라  $z_1$ 이  $Z$ 의 원소로 누적되어  $Z$  집합의 크기는  $n(Z) = N_{iter}$ 가 된다.
9. 반복횟수  $N_{iter}$ 를 1 증가시킨다.
10.  $D$ 행렬 중  $Z$ 의 원소에 해당하는 모든 행에서 값이 1인 원소를 찾고 그 원소의 행을  $z_2$ , 열을  $z_1$ 라고 한다. 만약 다수의 배전선로가  $z_1$ 이 될 수 있다면,  $k$ 번째 분산전원을 소유한 구역전기사업자가 공급의무를 갖는 배전선로 번호를 선택한다. 공급의무 조건이 동일하다면, 배전선로에 연결된 전력부하의 크기나 수용가 수를 가중치로 하여 선택할 수 있다.
12. 더 이상 비상전력을 공급받는 배전선로 번호  $z_1$ 을 찾을 수 없다면 14번째 단계로 간다.
11.  $Bk(z_1, j)$ 에  $N_{iter}$  값을 대입한다.
12.  $D(z_2, z_1)$  원소와  $D(z_1, z_2)$  원소에 0의 값을 대입한다. 이는 이미 비상전력을 공급한 배전선로가 다시 선택되는 것을 방지하기 위한 장치다.
13. 8번째 단계로 간다.
14. 대칭행렬  $D$ 를 1번째 단계에서 구한 값으로 복귀시킨다.
15.  $j$ 가  $j^{max}$ 보다 작다면,  $j$ 를 1만큼 증가시키고 5번째 단계로 돌아간다. 여기서 위 첨자  $max$ 는 해당 변수의 최대값을 의미하므로,  $j^{max}$ 는 고장이 발생하는 배전설비의 총 개수를 말한다.
16.  $k$ 가  $k^{max}$ 보다 작다면,  $k$ 를 1만큼 증가시키고 3번째 단계로 돌아간다.

위 알고리즘을 결국 분산전원에 관한 Connection 행렬인  $Bk(i, j)$ 을 자동으로 구성하는 알고리즘이며,  $Bk(i, j)$ 에는 구역전기사업자의 분산전원에 대한 소유권과 수용가에 대한 전력공급 의무가 반영되어 있다.

## 2.2 수용가에게 공급되는 분산전원의 비상 전력

$i$ 번째 배전선로와 연결된 전체 전력부하를  $Load_i$ 라 하면 계통사고 후  $Load_i$ 는 분산전원이나 주변전소를 통해 공급받아야 할 전력이다.  $Load_i = 0$ 이 될 때까지 충분한 전력을 공급받지 못한다면 계통사고로 인해  $i$ 번째 배전선로에는 공급지장이 발생하며, 결국 해당 배전선로에 연결된 모든 수용가에서 정전이 발생한다. 수용가의 공급지장 여부를 판별하기 위해  $i$ 번째 배전선로에 공급해야 할 전력을 구하는 알고리즘은 다음과 같다.

1. 모든  $i, j, k$ 에 대해 초기값을 대입한다.

$$L_{0,i,j} = Load_i \tag{1}$$

$$P_{k,0,j} = Power_k \tag{2}$$

여기서,  $Power_k$ 는  $k$ 번째 분산전원의 최대 출력을 말한다.

2.  $j=1$
3.  $i=0$
4.  $k=1$
5.  $i'$ 의 값으로  $i$ 의 값을 대입한다. ( $i'=i$ )
6.  $Bk(i, j)$ 의  $j$ 번째 열에서  $k$ 값에 해당하는 원소를 찾고, 그 원소의 행값을  $i$ 라고 한다.
7.  $k$ 번째 분산전원을 통해 비상전력을 공급받은 후 아직 남아있는  $i$ 번째 배전선로의 전력부하를 계산한다.

$$L_{k,i,j} = (L_{k-1,i,j} - P_{k,i',j}) \times H(L_{k-1,i,j} - P_{k,i',j}) \tag{3}$$

여기서,  $H(x)$ 는 단위계단함수 또는 헤비사이드 (Heaviside)계단함수를 말하며, 아래 식과 같은 값을 갖는 함수이다.

$$\begin{aligned} H(x < 0) &= 0 \\ H(x = 0) &= 0.5 \\ H(x > 0) &= 1 \end{aligned} \tag{4}$$

구역전기사업자로 분리된 배전계통의 신뢰도 평가

8.  $i$ 번째 배전선로에 비상전력을 공급한 후 아직 여분으로 남아있는  $k$ 번째 분산전원의 용량을 계산한다.

$$P_{k,i,j} = (P_{k,i',j} - L_{k-1,i,j}) \times H(P_{k,i',j} - L_{k-1,i,j}) \quad (5)$$

9.  $k$ 가  $k^{max}$ 보다 작다면,  $k$ 를 1만큼 증가시키고 4번째 단계로 돌아간다.

10.  $j$ 가  $j^{max}$ 보다 작다면,  $j$ 를 1만큼 증가시키고 2번째 단계로 돌아간다.

위 알고리즘을 반복한 후 최종적으로 필요한 값은  $L_{k^{max},i,j}$ 이다.  $L_{k^{max},i,j}=0$ 인 의미는,  $j$ 번째 요소에서 고장이 발생할 때  $i$ 번째 배전선로에는 분산전원의 비상전력이 충분히 공급됨을 의미한다.

2.3 수용가 신뢰도 지수

배전계통의 신뢰도 지수 중 가장 대표적으로 사용되는 지수는 SAIFI, SAIDI, CAIDI이다. 배전계통의 SAIFI, SAIDI, CAIDI를 구하기 위해서는 우선 개폐기로 구분된 각 배전선로의 정전횟수와 정전시간을 알아야 한다.  $i$ 번째 배전선로의 연간 정전횟수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$Fr_i = \sum_{j=1}^{max} \left[ \lambda_j \times \prod_{k=1}^{k^{max}} (1 - A_k(i,j)) \right] \quad (6)$$

여기서,  $\lambda_j$ [f/yr]는  $j$ 번째 요소의 연간 고장률을 말한다.

$i$ 번째 배전선로의 연간 정전시간을 구하는 식은 다음과 같다.

$$Du_i = \sum_{j=1}^{max} \left[ \left\{ \frac{\lambda_j}{\mu_j} \times (2H(L_{k^{max},i,j}) - 1) + \lambda_j S_{DG} \times (2 - 2H(L_{k^{max},i,j})) \right\} \times \prod_{k=1}^{k^{max}} (1 - A_k(i,j)) \right] \quad (7)$$

여기서,  $\mu_j$ [f/yr]는  $j$ 번째 요소의 수리율,  $S_{DG}$ [yr]는 분산전원이 비상전력을 공급하기까지 소요되는 시간을 말한다.

$i$ 번째 배전선로에 연결된 수용가의 총 세대수를  $N_i$ 라고 하면, 배전계통 전체의 SAIFI, SAIDI, CAIDI는 다음 식과 같다[5].

$$SAIFI = \sum_{i=1}^{max} \frac{Fr_i N_i}{N_i} \quad (8)$$

$$SAIDI = \sum_{i=1}^{max} \frac{Du_i N_i}{N_i} \quad (9)$$

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \sum_{i=1}^{max} \frac{Du_i N_i}{Fr_i N_i} \quad (10)$$

배전계통 전체가 아닌  $m$ 번째 구역전기사업자의 SAIFI, SAIDI, CAIDI는, 해당 구역전기사업자가 전력을 공급하는 배전선로의 수용가에 대해서만 다음 식과 같이 계산한다.

$$SAIFI_{CES_m} = \sum_{i \in CES_m} \frac{Fr_i N_i}{N_i} \quad (11)$$

$$SAIDI_{CES_m} = \sum_{i \in CES_m} \frac{Du_i N_i}{N_i} \quad (12)$$

$$CAIDI_{CES_m} = \sum_{i \in CES_m} \frac{Du_i N_i}{Fr_i N_i} \quad (13)$$

3. 사례연구

구역전기사업자의 분산전원 소유권과 배전계통 신뢰도 지수의 관계를 살펴보기 위해, RBTS 2번 모션 배전계통을 모의계통으로 활용하였다. RBTS 2번 모션의 계통도는 그림 1과 같으며, 자세한 파라미터는 참고문헌[6]을 참조하였다. 본 사례연구를 위해 발전용량 2,500[kW],  $S_{DG}=5$ [min]인 분산전원 3기를 연결하였으며, 총 2개의 구역전기사업자가 그림 1과 같이 해당 지역의 분산전원과 수용가를 담당한다고 가정하였다.

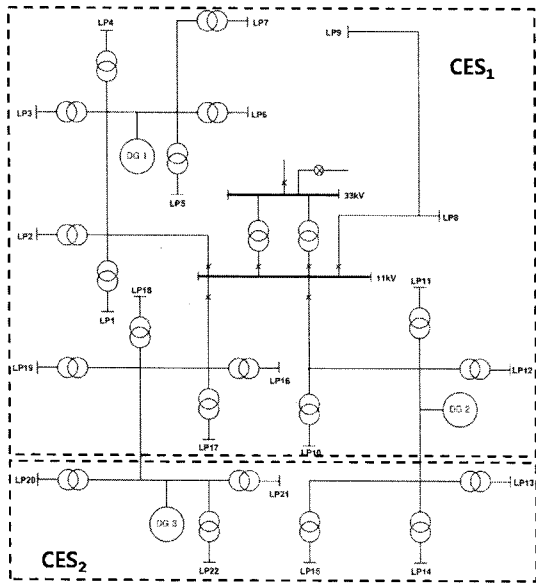


그림 1. RBTS 2번 모선 모의계통  
Fig. 1. Test system of RBTS Bus 2

분산전원의 소유권을 무시하고 부하점의 전력부하 크기를 기준으로 비상전력 공급순위를 결정할 경우, 배전계통 전체의 신뢰도 지수와 각 구역전기사업자별 신뢰도 지수 결과는 표 1과 같다.

표 1. DG소유권을 무시한 신뢰도 지수  
Table 1. Reliability indices without ownership of DGs

	배전계통	CES <sub>1</sub>	CES <sub>2</sub>
SAIFI [f/yr · 가구]	0.3385	0.3371	0.4513
SAIDI [hr/yr · 가구]	2.1379	2.1456	1.5388
CAIDI [hr/f]	6.3155	6.3650	3.4094

2번 구역전기사업자의 전력공급을 받는 수용가는 모두 계통 말단의 부하점이므로 SAIFI는 상대적으로 높다. 반면 계통사고시 2번 구역전기사업자의 수용가는 2번, 3번 분산전원의 비상전력을 공급받는 상황이 자주 발생하여, SAIDI는 낮은 편이고 정전 1회당 평균 복구시간에 해당하는 CAIDI도 값이 작다.

분산전원의 소유권을 고려한 경우, 각 신뢰도 지수

는 표 2와 같다.

표 2. DG소유권을 고려한 신뢰도 지수  
Table 2. Reliability indices with ownership of DGs

	배전계통	CES1	CES2
SAIFI [f/yr · 가구]	0.3385	0.3371	0.4513
SAIDI [hr/yr · 가구]	2.1296	2.1370	1.5532
CAIDI [hr/f]	6.2910	6.3396	3.4413

표 1과 표 2를 비교하면, SAIFI는 동일함을 알 수 있다. 분산전원이 비상전력을 공급하기까지 소요되는 시간이 5분이라고 가정하였으므로, 비상전력을 공급받던 공급받지 못하던 수용가의 정전횟수에는 영향을 미치지 못한다.

분산전원 소유권을 고려하여 신뢰도를 해석할 경우 계통 말단의 수용가와 분산전원 1기만을 소유한 2번 구역전기사업자는 SAIDI가 증가한 반면, 주변전소와 가까운 수용가와 분산전원 2기를 소유한 1번 구역전기사업자는 SAIDI가 감소한 것을 알 수 있다. 또한 200가구 이상의 주거형 부하는 모두 1번 구역전기사업자에 포함되므로, 1번 구역전기사업자 SAIDI 감소는 바로 배전계통 전체의 SAIDI 감소로 연결됨을 확인할 수 있다.

분산전원 소유권과 무관하게 SAIFI는 동일하므로, SAIDI 증감에 따라 CAIDI도 동일한 패턴으로 증가하거나 감소한다.

분산전원의 소유권 포함여부에 따른 22개 부하점의 연간 정전시간을 그래프로 나타내면 그림 2와 같다.

1~9번 부하점은 분산전원 소유권을 고려하는 것과 무관하게 연간 정전시간은 일정하다. 반면 10~22번 부하점은 분산전원 소유권에 따라 연간 정전시간이 변동하며, 계통 말단쪽으로 향할수록 그 변동폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

한 예로 공공형 수용가이자 말단에 해당하는 13, 14번 부하점의 경우 인근 주거형 부하점이나 상업형 부하점에 비해 높은 피크부하를 갖는다. 분산전원 소유

## 구역전기사업자로 분리된 배전계통의 신뢰도 평가

권을 무시할 경우, 피크부하를 기준으로 비상전력을 공급하기 때문에 주위 11, 12, 15번 부하점에 비해 연간 정전시간이 상대적으로 낮다. 그러나 분산전원 소유권을 고려할 경우, 인근 분산전원을 다른 구역전기사업자가 소유하고 있으므로 비상전력을 공급받지 못하여 연간 정전시간이 큰 폭으로 증가한다.

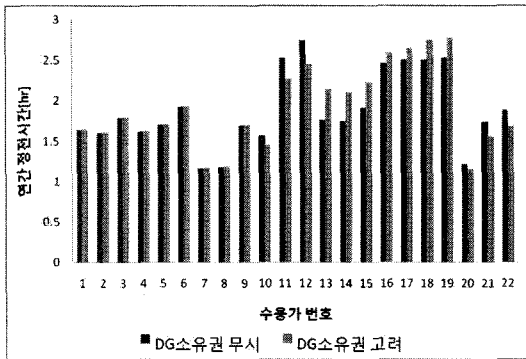


그림 6. DG소유권에 따른 부하점의 연간 정전시간  
Fig. 6. Annual interruption duration of load points by DGs ownership

## 4. 결 론

본 논문에서는 과거 분산전원 신뢰도에 관한 연구를 기반으로, 구역전기사업자의 분산전원 소유권과 수용가에 대한 전력공급 의무를 적용시킬 수 있는 신뢰도 해석기법을 새롭게 제안하였다. 분산전원 소유권을 별도로 고려하지 않는 기존 신뢰도 해석기법은 구역전기사업자의 계통사고시 비상대책을 정확히 모의할 수 없는 한계가 있으며, 사례연구를 통해 그 오차를 확인하였다.

본 논문에서는 가장 널리 사용되는 배전계통 신뢰도 지수인 SAIFI, SAIDI, CAIDI를 구하는 수식을 전개하였으며, 그 외 공급지장 에너지나 정전비용 관련 지수는 별도의 수식을 필요로 한다. 또한, 일반 연료형 분산전원 외에 태양광발전이나 풍력발전 등 신재생에너지원은 본 논문에서 제안한 수식을 바로 적용하기에 무리가 따르는 것이 사실이다. 향후에는 다양한 배전계통 신뢰도 지수와 종속적 출력의 분산전원을 고려하여, 구역전기사업자 내 수용가의 신뢰도 산출기법을 확장할 계획이다.

## References

- (1) 전력시장운영규칙, 한국전력거래소, 2006.
- (2) 조종만, 배인수, 심헌, 김진오, "수용가의 신뢰도 평가를 위한 분산전원 모델링", 한국조명전기설비학회논문지, 제 19권, 제8호, pp. 70-76, 2005.
- (3) In-Su Bae and Jin-O Kim, "Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode", Trans. on Power Sstems, vol. 22, no. 2, pp. 785-790, 2007.
- (4) In-Su Bae and Jin-O Kim, "Reliability Evaluation of Customers in a Microgrid", IEEE Trans. on Powr Systems, vol. 23, no. 3, pp. 1416-1422, 2008.
- (5) R. Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", 2nd Edition, Plenum Press, 1994.
- (6) R. Billinton and etc. "A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Data" IEEE Trans. on Power System, vol. 4, pp. 1238-1244, 1989.

## ◆ 저자소개 ◆

### 배인수 (裵引洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2008년 ~ 현재 강원대학교 전기제어공학부 전임강사.

### 김진오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 1987년 ~ 현재 한양대학교 전기제어생체공학부 교수.