

## 변전소 상태변수 추정에 관한 연구

(A Study on the State Estimation for Distribution Substations)

이흥재\* · 박성민 · 이경섭

(Heung - Jae Lee · Sung - Min Park · Kyeong - Seob Lee)

### 요 약

전력계통의 자동화에 있어 측정되는 데이터의 정확성은 기본적으로 확보되어야 할 요건이다. 측정된 데이터는 통신 장애나 기기 자체의 오동작으로 인해 오차를 포함할 수 있으며, 이러한 오차는 상태추정에 의해 줄어들 수 있으나, 잘못 측정된 일부 값에 의해 상태추정의 전반적인 신뢰도가 저하될 수 있다. 본 논문에서는 가중최소 상태추정과 카이스퀘어 이론에 근거한 잘못 측정된 데이터의 검출 알고리즘이 제안되었으며, 이를 국내 154kV 변전소에 적용하였다. C 언어와 비주얼 베이직을 사용하여 GUI 환경의 시뮬레이터를 개발하였으며, 다른 운용 시스템과의 연계를 고려하여 TCP/IP 프로토콜을 탑재하였다.

### Abstract

The validity of measured data is fundamental factor for the power system automation. Measured values could have errors that are caused by the communication errors and malfunctioning measuring devices. The accuracy and reliability of measured values at a substation is an important condition for robust and fault tolerant automata. Errors can be reduced by state estimation, however, global reliability of state estimation goes down in case of the existence of some bad data. In this paper, a least square state estimation and bad sensor detection algorithm based on chi-square theory, are proposed and it is applied to a domestic 154kV distribution substations. A simulator together with user friendly graphic users interface is developed using C language and Visual Basic. TCP/IP is equipped for future connection with other operation systems.

**Key Words :** state estimation, least square algorithm, bad data detection, chi-square, substation, simulator

### 1. 서 론

전력시스템은 국가의 기간산업이며, 지속적인 수요증가로 인하여 전력설비는 점차 대규모화되어가고 복잡해지는 추세에 있다. 따라서 전력계통의 안정성과 신뢰성의 증대를 위하여 여러 가지 감시 및 제어 설비들이 증가하고 있는 상황이며, 대규모화된 전력계통의 안정적 운용 및 관리를 위하여 자동화

\* 주저자 : 광운대학교 전기공학과 교수  
Tel : 02-940-5147, Fax : 02-918-3793  
E-mail : hjlee@mail.gwu.ac.kr  
접수일자 : 2003년 3월10일  
1차심사 : 2003년 3월18일  
심사완료 : 2003년 5월 2일

시스템의 적용이 필연적이라 할 수 있다. 또한 향후 전력계통 산업시설의 규제완화가 진행된다면, 전력시설의 설치, 운용, 유지에 소요되는 비용을 줄이고자 하는 요구가 증가될 것이며, 이는 자동화 시스템의 실현을 위한 정확도가 높은 데이터 획득의 필요성을 더욱 배가시킬 것이다[1].

계통에서의 측정 데이터는 측정기기 자체의 오차와 측정값의 전송 과정에서 발생하는 오차 등을 내포하고 있다. 그러므로 오차들을 최소화함으로써 측정값의 정확성과 신뢰성을 높이는 상태변수 추정에 관한 연구의 필요성이 대두되었다. 상태추정의 성능은 측정 데이터의 정확도에 크게 좌우된다. 대상 계통에서 측정값의 오차가 허용치를 넘는 경우, 이러한 종류의 오차가 전체 상태추정 값의 신뢰도를 저하시키므로[2], 부정확한 데이터 및 고장 측정기기의 검정을 위한 절차 또한 필요하다. 이러한 연구들은 송전 계통을 시작으로 하여, 90년대에 들어서는 배전 계통의 전력조류 상태추정[3], 3상 불평형 배전 계통에서의 상태추정[4,5] 등 배전 계통에서의 연구가 발표되었고, 송전계통에 있어 불량 데이터의 검정[6]은 제안되었으나, 배전 변전소 자체에 대한 상태추정 및 검정 알고리즘은 현재까지 발표된 바 없는데, 그 주된 이유는 변전소의 내부운용이 방사상 구조로 되어있고, 상대적으로 많은 양의 측정점이 존재하기 때문이다. 그러나 차세대의 고성능 자동화 시스템 구축을 위해서는 지능형 감시/진단/운용/복구 시스템과의 유기적인 연결을 통하여 강인성(robustness)과 내결함성(fault tolerance)을 증대시킬 수 있다. 본 논문에서는 이를 위한 첫 단계로써 국내의 154[kV]/22.9[kV] 배전 변전소를 대상으로 실측값에 대하여 신뢰도를 높이고, 각 계측설비의 정확도에 따라 오차의 편차를 변경하여 각각의 계측기기의 신뢰도에 가중치를 줄 수 있는 방식의 상태추정기법과 카이스퀘어 이론을 적용한 고장 측정기기의 검정에 관한 연구를 수행하였으며, 이들 알고리즘을 내재한 시뮬레이터를 개발하였다. 본 논문의 시뮬레이터는 추후 타 시스템과의 연계를 고려하여 TCP/IP 프로토콜을 탑재하였으며, 이식성과 사용자 편의의 GUI를 위하여 Windows NT 시스템에서 C언어와 Microsoft Visual Basic을 사용하였다.

## 2. 변전소 상태변수 추정

### 2.1. 상태추정

상태추정은 식(1)과 같이 측정값과 오차의 관계에 근거하여 정식화 할 수 있다.

$$z^{meas} = z^{true} + v \quad (1)$$

여기서,  $z^{meas}$  : 측정값

$z^{true}$  : 실제상태변수

$v$  : 오차

이때, 오차가 unbiased이고, 오차의 PDF (Probability Density Function)가 중심값이 0인 가우스 분포를 갖으면,  $v$ 의 PDF는 다음의 식(2)로 표시된다.

$$PDF(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp(-v^2 / 2\sigma^2) \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$  : 오차의 표준 편차

따라서  $z^{meas}$ 의 PDF는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PDF(z^{meas}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z^{meas} - z^{true})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

$z^{true}$ 를 상태변수  $x$ 의 측정함수로 표현하면 식(4)와 같고,  $z^{meas}$ 의 PDF가 최대치일 때의 상태변수  $x$ 는 실제상태변수로 추정할 수 있으며, 이를 수식화하면 식(5)와 같다.

$$PDF(z^{meas}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z^{meas} - f(x))^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$\max_x \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z^{meas} - f(x))^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

$z^{meas}$ 의 PDF가 최대치일 때의 상태변수  $x$ 를 구하는 것은 자연로그를 취한  $z^{meas}$ 의 PDF가 최대치일 때의 상태변수  $x$ 를 구하는 것과 같으므로 계산의

편의를 위해 식(6)과 같이 표현할 수 있으며, 또한 식(6)의 이차항 계수가 음의 값이므로 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$\max_x \left[ -\ln(\sigma \sqrt{2\pi}) - \frac{1}{2} \frac{(z^{meas} - f(x))^2}{\sigma^2} \right] \quad (6)$$

측정기기의 오차가 편중되지 않고, 오차의 PDF가 중심값이 0인 가우스 분포를 가질 때의 Maximum Likelihood 추정 방법은 기중최소자승법 추정과 동일하게 되므로, 이러한 상태추정을 다수의 측정기에 대하여 나타내면 다음의 식(8)로 표시된다.

$$\min_x \left[ -\frac{(z^{meas} - f(x))^2}{\sigma^2} \right] \quad (7)$$

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(z_i^{meas} - f_i(x))^2}{\sigma_i^2} \quad (8)$$

여기서,

$f_i$  : 해당 측정기기의 측정함수

$\sigma_i^2$  : 해당 측정기기 오차의 분산

$J(x)$  : 측정기기 오차함수

$N_m$  : independent 측정기기 수

$z_i^{meas}$  : 해당 측정기기 측정값

여기에서  $f_i$  가 선형함수이면 다음과 같다.

$$f(X) = \begin{bmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ \vdots \\ f_{N_m}(X) \end{bmatrix} = [H] X \quad (9)$$

$$Z^{meas} = \begin{bmatrix} z_1^{meas} \\ z_2^{meas} \\ \vdots \\ z_{N_m}^{meas} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & & \\ & \sigma_2^2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \sigma_{N_m}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(9)~(11)을 이용하여 식(8)을 정리하면 식(12)와 같다.

$$\min_X J(X) = [Z^{meas} - [H] X]^T [R^{-1}] [Z^{meas} - [H] X] \quad (12)$$

식(12)에서 측정기기의 오차함수를 최소화하기 위한 최적조건은 식(13)과 같으며 이식의 해  $X$ 가  $X^{est}$ (추정값)이 된다.

$$\nabla J(X) = -2[H]^T [R^{-1}] Z^{meas} + 2[H]^T [R^{-1}] [H] X = 0 \quad (13)$$

## 2.2. 변전소 시스템의 모델링

본 논문에서는 전류값을 상태 변수로 하여 상태추정 및 불량 데이터의 검정을 수행하기 위한 예로서 그림 1에 표시된 국내 154[kV] 송포 변전소를 대상으로 하였다.

상태추정을 행하기 위한 전제조건은 다음과 같다.

- 대상 변전소내 선로에서의 미세손실은 없다고 가정한다.
- 변압기의 중성선을 통해 흐르는 전류는 없다고 가정한다.
- 상위 송전선에서 대상변전소로 공급되는 측정 전류값을 양의 값으로 표시하고, 외부로 공급되는 측정 전류 값을 음의 값으로 표시한다.

대상 배전 변전소내 CT는 그림 1과 같이 위치하며, CT의 측정값이 오차를 내포할 수 있으

변전소 상태변수 추정에 관한 연구

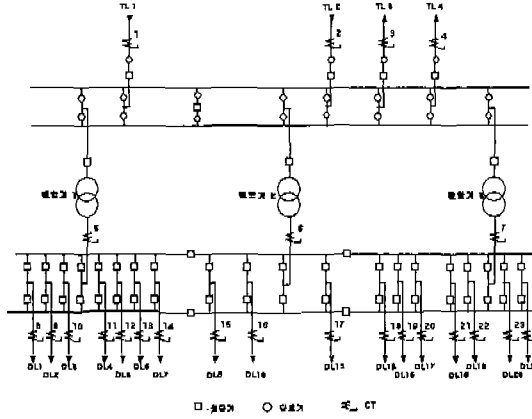


그림 1. 대상 변전소의 단선 결선도  
Fig. 1. The one-line diagram of the substation

므로, 오차  $v_1 \sim v_{24}$ 을 고려하여 계측기기의 측정값과 실제 상태변수의 관계를 식(14)와 같이 표현한다. 송전선로와 변압기 2차측의 CT 측정값을 상태변수로 하면, 식(15)와 같이 표현할 수 있으며, 식(16)~(18)은 변압기 2차측과 배전선로의 CT 측정값을 대상으로 한 상태변수의 관계식이다.

$$\begin{bmatrix} z_1^{meas} \\ z_2^{meas} \\ \vdots \\ z_{24}^{meas} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^{true} \\ z_2^{true} \\ \vdots \\ z_{24}^{true} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{24} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$z_1^{true} + z_2^{true} + z_3^{true} + z_4^{true} \quad (15)$$

$$-0.1487 \times (z_5^{true} + z_6^{true} + z_7^{true}) = 0$$

$$z_5^{true} - (z_8^{true} + z_9^{true} + z_{11}^{true} + z_{13}^{true} + z_{14}^{true} + z_{15}^{true} + z_{16}^{true}) = 0 \quad (16)$$

$$z_6^{true} - (z_{10}^{true} + z_{12}^{true} + z_{17}^{true}) = 0 \quad (17)$$

$$z_7^{true} - (z_{18}^{true} + z_{19}^{true} + z_{20}^{true} + z_{21}^{true} + z_{22}^{true} + z_{23}^{true} + z_{24}^{true}) = 0 \quad (18)$$

측정값은 24개이며,  $z_5^{true}, z_6^{true}, z_7^{true}$ 를 매개로  $z_1^{true} + \dots + z_4^{true} = 0.1487 \times (z_8^{true} + \dots + z_{24}^{true})$ 이므로, 상태변수의 개수는 20개이다. 가장 최

소지승법을 적용할 수 있으므로, 식(14)~(18)로부터 측정 함수의 관계식을 식(13)으로 표현하여 상태추정 알고리즘에 의한 추정값을 구할 수 있다. 변전소내 차단기나 단로기의 ON/OFF 상태에 따라서 CT 측정값의 획득 여부가 결정되고 이는 상태변수로의 표현과 관계되므로, 이러한 ON/OFF 상태가 변경시에는 식(14)~(18)을 다시 수립해야 한다.

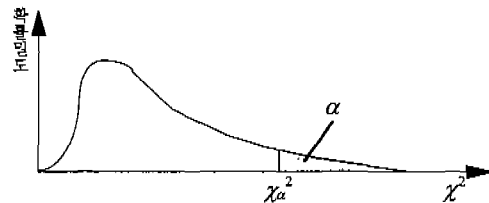


그림 2. 카이스퀘어 분포도  
Fig. 2. Chi-square distribution chart

### 3. 불량 데이터의 검정

상태추정 값의 신뢰도를 향상시키기 위하여 부정확한 측정값의 검정을 위한 절차로서 다음과 같은 카이스퀘어 테스트를 수행한다.

#### 3.1. 카이스퀘어 테스트

측정값의 오차가 무작위적이면,  $J(x)$ 도 무작위적이다. 모든 오차가 각각 표준 밀도 함수로 표현된다고 가정하면,  $J(x)$ 는 카이스퀘어 분포라 하는 확률 밀도 함수를 갖는다.

probability

$$P(J(x) > \chi_{\alpha}^2 \mid J(x) \text{ is a chi-squared}) = \alpha$$

with K degrees of freedom

여기서,

$K (= N_m - N_s)$  : 카이스퀘어 분포의 자유도

$N_m$  : 측정 데이터의 개수

$N_s$  : 상태변수의 개수

$\alpha$  : 유의수준. 보통 0.005에서 0.1

$\chi_{\alpha}^2$  : 평가치. 대상집단의 자유도와 검정의 유의수준으로부터 나온  $\chi^2$  값

검정하려는 데이터의  $J(x)$ 가 카이스퀘어 분포를 따를 경우, 이 값이  $\chi^2_\alpha$  보다 클 확률이  $\alpha$ 이며, 그림 2의 분포도에서 음영 부분의 면적이  $\alpha$ 에 해당한다. 전술한 바와 같이  $J(x)$ 가 카이스퀘어 분포를 따를 경우, 통계적 검정의 한 방법으로서 가설 검정을 행할 수 있다.

$H_0$  : 주어진 유의수준에서, 불량데이터 없음.

$H_1$  : 불량데이터가 존재함.

여기서,  $H_0$  : 영가설. 검사할 가설

$H_1$  : 대립가설.  $H_0$ 의 반대 가설

대상 시스템의  $\chi^2(K)$  값이 평가치를 넘어설 경우  $H_0$ 를 기각하고,  $H_1$ 을 채택한다.

### 3.2. 불량데이터 검정

카이스퀘어 테스트 적용 결과, 대상 시스템의  $\chi^2(K)$  값이 평가치를 넘어설 경우 가설 검정 이론을 근거로 하여 측정값 중 불량 데이터가 존재한다는 것을 알 수 있으며, 다음과 같은 표준화된 오차를 이용하여 이 불량 데이터를 검정하는 과정이 필요하다.

$$y_i^{norm} = \frac{z_{i, meas} - f_i^{est}}{\sigma_{yi}} \quad (19)$$

여기서,  $y_i^{norm}$  : 표준화된 오차

$f_i^{est}$  : 상태변수 추정 결과치

$\sigma_{yi}$  : 표준편차

$\sigma_{yi}$ 를 구하기 위해서 9개의 표본 데이터를 사용하였으며, 각 표본에 있어 24개의 측정값을  $Z_i$ 로, 추정값을  $F_i$ 로 표현함으로써, 24개의  $\sigma_{yi}$ 를 식 (20)과 같이 구하며, 그 전체적인 흐름도는 다음 그림 3과 같다.

$$\sigma_{yi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (Z_i - F_i)^2}{8}} \quad (20)$$

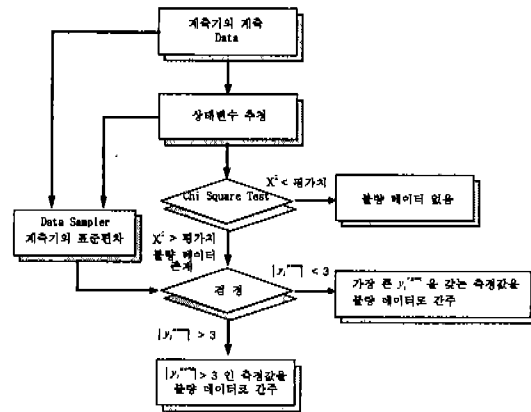


그림 3. 제안된 알고리즘의 전체 흐름도  
Fig. 3. Flow chart of the proposed algorithm

### 4. 시뮬레이터

개발된 계측기 검정 시뮬레이터는 그림 4의 구조를 갖으며, 사용자 편의를 위해 GUI 환경으로 개발하였다. 시뮬레이터는 크게 TCP/IP를 기점으로 변전소 측정값을 전송하는 모듈과 전송된 데이터를 상태추정하고 카이스퀘어 테스트를 수행하여 불량 데이터의 검정 후 결과를 디스플레이하는 모듈로 구성되어 있다. 검정 시뮬레이터는 측정값 전송 모듈로부터의 데이터를 실시간으로 상태추정한 후 이를 기반으로 불량 데이터 검정 결과 및 측정값과 추정값을 자동적으로 출력한다.

### 5. 사례연구

본 사례연구에서 사용된 데이터는 송포 변전소 CT의 실측값이며, 계측기의 표준편차를 구하기 위해 9개의 연속된 측정값을 사용하였다. 유의수준을 0.05로 두고, 대상 시스템의 자유도가 4이므로, 평가치는 9.488이다. 그림 5의 경우 CT No.1~4의 표준화된

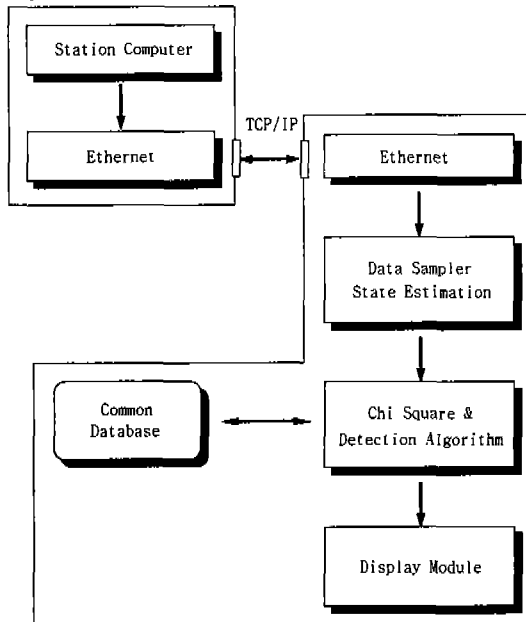


그림 4. 시뮬레이터의 구조  
Fig. 4. Structure of the simulator

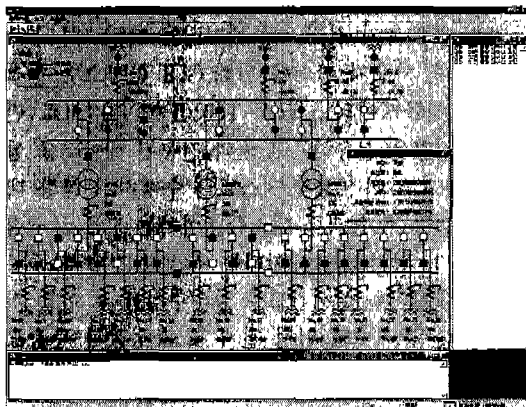


그림 5. 불량 데이터 검정 결과  
Fig. 5. Bad Data Detection Results

오차가 1.7817이지만, 대상 데이터의  $J(x)$  값이 11.66 으로서 평가치를 넘는 경우 불량 데이터의 존재가 전제되므로 가장 큰 표준화된 오차를 갖는 측정값을 불량 데이터로 간주한다. 전송된 데이터를 기반으로 상태추정 및 카이스퀘어 테스트를 실행한 후 측정값

중 불량 데이터가 존재한다고 판단되면, 검정 모듈은 이를 감지하여 불량 데이터 검정을 수행하게 된다. 불량 데이터의 검정이 완료되면 계측기의 측정치와 추정치, 그리고 검정 결과를 화면에 출력하게 된다. 위의 그림 5는 계측기 값의 이상 여부에 따라 불량 데이터 검정 결과를 오른쪽의 메시지 창을 통해 화면에 출력 처리하는 것을 보여준다.

## 6. 결 론

변전소에서 획득한 측정값에는 계측설비 자체 불량과 측정값 전송과정 중의 문제 등으로 측정값의 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차는 전력 계통을 효율적으로 운용하기 위한 여러 시스템의 기능저하를 야기할 수 있다. 본 논문에서는 차세대 지능형 변전자동화 시스템의 성능개선을 위한 기반으로 2중 모선구조이 국내의 배전변전소를 대상으로 계측기기의 정확도에 따라 다른 가중치를 적용한 상태변수 추정과 Chi-Square 이론을 적용한 불량 데이터 검정알고리즘을 연구하였다. 이 알고리즘을 내재한 GUI 방식의 시뮬레이터는 불량 데이터를 내포한 계측기를 모니터에 디스플레이하여 검정을 용이하게 하였으며, 시뮬레이션 결과는 CT 4기에 불량 데이터가 내포되어 있음을 보여준다.

본 논문에서 연구한 가중최소자승법을 사용한 상태 추정 및 카이스퀘어 테스트를 통한 검정 알고리즘과 시뮬레이터는 향후 변전소 자동화 및 고장 계측기 검정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 한국전력공사 (기초전력공학공동연구소)의 연구비 지원과 2000년도 광운대학교 교내학술 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

## References

- (1) William J. Ackerman, "Substation Automation and the EMS," IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 1, pp. 274-279, 1999.
- (2) J. F. Dopazo, O. A. Klitin, A. M. Sasson, "State Estimation for Power Systems: Detection and Identification of Gross Measurement Errors" Proceedings 8th ICA Conference, Minneapolis, June 1973.
- (3) A. P. Sakis, Fan Zhang, "Multiphase Power Flow and

- State Estimation for Power Distribution Systems" IEEE Trans. on PWRs, Vol. 11, No. 2, pp. 939-946, May 1996.
- [4] Ke Li, "State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impact", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 11, No. 2, pp. 911-916, May 1996.
  - [5] C. N. Lu, J. H. Teng, et al., "Distribution System State Estimation", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 10, No. 1, pp. 229-240, February 1995.
  - [6] R. L. Lugtu, D. F. Hackett, K. C. Liu, D. D. Might, "Power System State Estimation: Detection Of Topological Errors", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No. 6, November/December 1980.

◇저자소개◇

**이용재(李興載)**

1958년 1월 28일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기 공학과 졸업(박사). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수

**박성민(朴誠民)**

1976년 3월 13일생. 1999년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

**이경섭(李炯燮)**

1974년 7월 5일생. 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.