

마이크로그리드(MG)의 설계를 위한 에너지저장장치(ESS)의 최소용량산정 기법에 관한 연구

(A Study on the Method to Evaluate Minimum Capacity of Energy Storage System(ESS)
for Micro-Grid Design)

이재걸* · 신정훈 · 최영도 · 남수철 · 김태균

(Jae-Gul Lee · Jeong-Hoon Shin · Young-Do Choy · Su-Chul Nam · Tae-Kyun Kim)

요 약

본 논문에서는 마이크로그리드(Micro grid, MG)의 설계에서 필요로 되는 에너지저장장치(Energy storage system, ESS)의 최소설비용량을 산정할 수 있는 확률론적 방법론을 제시하였다. ESS기술은 아직까지 경제성 측면에서 매우 높은 설비용량이 필요로 되기 때문에 적정 설비규모를 산정하는 것과 MG의 안정적인 운영을 위해서 최소 설비용량에 대한 가이드라인의 제시가 필요로 된다. 본 논문에서 제시한 방법론은 Non-dispatchable 발전원 출력의 간헐성과 모든 발전기의 고장정지확률을 고려하여 MG가 자체적인 에너지 Self balancing을 유지할 수 있는 ESS의 최소설비용량을 산정할 수 있는 것을 특징으로 한다.

Abstract

In this paper, we propose a probability method to determine minimum capacity of energy storage system(ESS) for Micro-grid. Because of high capital cost of ESS, It's very important to determine optimal capacity of ESS and for stable operation of Micro grid(MG), we should determine minimum capacity of ESS. The proposed method has abilities to consider forced outage rate of generators and intermittent of non-dispatchable generators and minimum capacity make MG keep energy balancing by oneself.

Key Words : Energy Storage System(ESS), Micro-Grid(MG), Wind Turbine(WT), Photovoltaic(PV)

1. 서 론

마이크로그리드(Micro grid, MG)는 소규모, 모듈화 된 분산형 발전시스템이 배전망에 연결되어 새로운 형태의 전력시스템을 구성하는 개념으로 어떠한 형태의 에너지 전원도 마이크로그리드 계통에 연결시킬 수 있으며, 새로운 전원의 추가로 인해 보호협조, 신뢰도, 전기품질 문제 등 다른 계통에 어떤 영향

* 주저자 : KEPCO 전력연구원 선임보연구원
Tel : 042-865-5833, Fax : 042-865-5814
E-mail : jaelry@kepco.co.kr
접수일자 : 2009년 7월 20일
1차심사 : 2009년 7월 20일, 2차심사 : 2009년 8월 17일
심사완료 : 2009년 8월 21일

을 주지 말아야 한다. 이러한 측면에서 에너지저장장치(Energy storage system, ESS)를 이용한 수급 조절의 역할이 중요하게 부각이 되고 있으며, ESS의 적용에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[1]. 또한 국외에서는 전력시장을 기반으로 한 ESS의 경제성 연구[2-4]가 진행되고 있는데 이러한 연구들은 각 기술에 대한 경제성이나 비용/이익분석을 통한 경제성 문제를 다루고 있으며 MG의 전원구성 시 경제성과 계통의 안정성은 고려한 적정 ESS의 설비규모나 용량을 산정하는 연구는 이루어지지 않았다.

이에 본 논문에서는 MG의 전원구성을 고려한 ESS의 적정설비용량을 산정할 수 있는 확률론적 방법론을 제시하였는데 이는 분산전원의 고장정지 확률과 출력의 간헐성을 지닌 풍력발전(Wind turbine, WT) 및 태양광발전(Photovoltaic, PV) 등의 발전원들의 출력변동 확률 그리고 상관관계를 반영한 것이다.

2. MG에서 ESS의 역할

MG의 구성에 있어서 중요한 부분으로 논의되는 부분 중에 하나가 다양한 분산형 에너지원(Distributed Energy Resources, DER)의 자유로운 도입과 DER의 적절한 조합이다[5]. 여기서 DER은 분산형 발전기(Distributed Generator, DG)와 ESS로 구성되기 때문에 적절한 조합이란 DG와 ESS의 조합 문제를 의미하는 것이다.

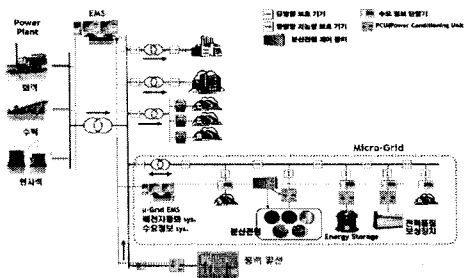


그림 1. Micro Grid(MG)의 개념도
Fig. 1. Concept of Micro Grid

MG에서 ESS는 계통운영자에 의해서 제어가 가능한 에너지저장장치(Dispatchable ESS, DESS)를 의미하는 것으로 DESS는 전압강하나 순간정전 등

에 대비한 전원으로써 초고속의 통신기능이 요구된다. 또한 DESS는 피크수요의 차감을 비롯하여 Non-dispatchable 발전기에 대한 출력변동을 담당함으로써 독립된 MG가 에너지에 대한 self balancing을 유지하는 역할을 수행한다[6]. 이러한 DESS의 기능을 정상적으로 수행하기 위해서는 MG의 설계에서 최소 DESS용량을 선정, 설치하고 이를 최적으로 운영하는 것이 중요하다.

3. 확률론방법을 이용한 DESS의 최소용량산정

MG는 다양한 DER들이 자유롭게 계통에 접속하여 전력을 생산하고 판매할 수 있는 기반을 제공하는 것을 하나의 목적으로 하고 있는데 이를 위해서는 DER에 대한 적절한 조합이 반드시 필요하며 이는 다시 DG의 구성에 따른 적절한 DESS의 규모산정의 문제로 귀착된다. DESS의 적정 규모산정이 중요한 이유는 그 경제성에서도 찾을 수 있다. 대용량 에너지 저장기술은 현재에도 개발 중에 있으며, 상용화된 기술의 경우에도 설치 및 운영비용이 매우 높기 때문에 적절한 규모를 산정하는 것이 중요하다. 아래의 표 1은 에너지저장기술 중 두 가지 기술에 대한 비용관련 데이터이다[4].

표 1. 에너지저장기술별 경제성(비용) 데이터
Table 1. Cost information of ESS technologies

| 구분 | Vanadium Redox Batteries(VRB) | Polysulfide-Bromine Batteries(PSB) |
|--------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| C_p [\$/kW] | 426 | 150 |
| C_w [\$/kWh] | 100 | 65 |
| C_M [\$/kW/year] | 9 | 9 |

여기에서 C_p 는 설비용량에 비례하는 설치비용, C_w 는 에너지저장능력에 비례하는 설치비용이며 C_M 은 운영유지비용이다.

MG에서 DESS는 초고속의 통신기능을 이용하여 순간전압강하, 순간정전, 최대전력의 저감들에도 사용되며 Non-dispatchable 발전기에 대한 출력변동을 담당함으로써 독립된 MG가 에너지에 대한 self

balancing을 유지하는 역할을 수행한다. 이 때문에 Non-dispatchable 발전기의 출력변화를 담당할 수 있는 DESS의 설비용량을 산정해야 하는데 이러한 발전기들의 출력변화는 예측이 매우 어렵고 DESS의 설치비용이 매우 높기 때문에 적절한 설비용량을 산정하기 위해서 확률적인 방법론을 적용하였다. 확률적인 분석방법은 각 발전원의 고장확률과 Non-dispatchable 발전기의 출력변동 확률 그리고 상관관계를 정의하고 아래의 식과 같이 각 확률변수에 대한 random variable을 생성시켜 전체 DG에 대한 출력변동 값을 산정하고 이를 반복적으로 수행하여 확률분포 형태의 결과를 얻는다.

$$X_{TRv} = \sum_{i=1}^n PG_i \times X_{FORi} + \sum_{j=1}^m PG_{Nj} \times X_{Vj} \quad (1)$$

여기에서,

X_{TRv} 는 전체 DG의 출력변동

PG_i 는 i번째 발전기의 발전설비용량

X_{FORi} 는 i번째 발전기의 고장방생에 대한 random variable

PG_{Nj} 는 j번째 Non-dispatchable 발전기의 발전설비용량

X_{Vj} 는 j번째 발전기의 출력변동에 대한 random variable

위 식에 대한 random variable의 발생을 위해서 Monte-carlo simulation을 사용하였다. 여기에서 Non-dispatchable 발전기의 출력변동에 대한 확률분포는 해당 지점의 발전자원(풍력, 태양광 등)에 대한 사전조사 자료를 활용하게 된다. 또한 동일한 종류의 Non-dispatchable발전기가 각각의 사이트에 입지되는 경우 각 발전기 출력간의 상관관계를 분석하여 고려해야 한다.

이렇게 산정된 전체 DG의 출력변동 확률분포를 이용하여 DESS의 최소설비용량을 산정하는데, 확률분포의 신뢰도구간 95[%] 중 하한 값(min value)을 최대수요(적정설비에비력을 포함한 최대수요)에서 차감하고 연계선로의 용량을 다시 차감함으로써 산정된다.

$$C_{DESS}^{Min} = D_{MG}^{Total} \times (1 + R) - C_{hit}^{max} - Min_{95\%}(X_{TRv}) \quad (2)$$

여기에서,

C_{DESS}^{Min} 는 DESS의 최소설비용량

D_{MG}^{Total} 는 MG의 최대수요

C_{hit}^{max} 는 주 계통과의 연계선로 용량

R 은 적정설비에비율

$Min_{95\%}$ 는 신뢰도구간 95[%]의 하한

본 논문에서는 DESS의 최소설비용량을 산정하는데 있어서 다음과 같은 두 가지 가정을 사용하였다.

- ① MG의 전원구성은 연계선로의 용량(계약을 통해 사전에 결정)을 포함하고, 전원별 피크기여도 및 고장정지확률을 고려하여 MG내의 최대 부하를 공급할 수 있는 능력을 가진다.
- ② DESS의 출력 증/감률은 매우커서 MG의 출력변동을 충분히 감당할 수 있다.

4. 사례연구

4.1 대상시스템

본 논문의 사례연구에서 적용한 대상 시스템은 아래의 그림 2와 같이 다양한 발전원으로 구성된 MG이며, 별도의 EMS를 이용해서 시스템의 제어를 수행하는 기능을 가지고 있다.

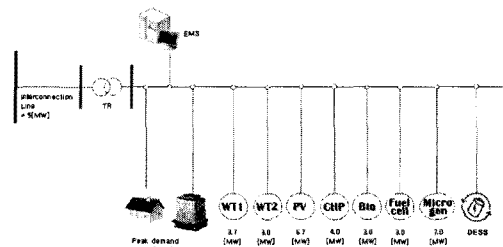


그림 2. 사례연구 대상시스템의 구성
Fig. 2. Configuration of MG system for study

본 MG의 최대수요는 20[MW]이며, 적정설비 예비발전력은 4[MW](최대수요의 20%)를 고려 총 24[MW]로 적용한다. 발전원별 설비용량은 및 주 계

통과의 연계선로의 용량은 아래의 표 2와 같이 총 24[MW]이다.

표 2. 대상계통의 발전설비 용량
Table 2. Generation capacity of MG system

| 발전원종류 | 설비용량 [MW] |
|--|-----------|
| WT | 2.0 |
| Combined Heat & Power Generation (CHP) | 4.0 |
| Bio fuel | 3.0 |
| PV | 2.0 |
| Fuel cell | 3.0 |
| MG | 5.0 |
| 연계선로 | 5.0 |
| 계 | 24 |

① 발전기 고장정지 확률

발전기의 고장정지 확률을 고려하기 위해서 각 발전기별로 이항분포(Bernoulli distribution)형태의 고장확률을 적용하였다. 고장확률은 아래의 그림 3과 같이 일괄적으로 모든 발전기에 0.5%를 적용하였다.

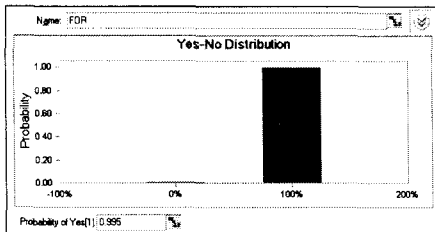


그림 3. 발전기 고장정지 확률
Fig. 3. Fault probability of generators

② Non-dispatchable 발전기의 출력변화 확률

대상계통에는 WT 2기와 PV 1기가 Non-dispatchable 발전기로 접속되어 있는데 이에 대한 발전출력변화 확률을 입력하기 위해서 확률분포를 작성하였다. 우선 WT의 경우 인근지역에 위치한 것을 가정하고 유사한 형태의 출력 변동이 발생되며, 상호 출력 변동간의 상관관계를 고려하였다. 아래의 그림 4 및 그림 5는 WT#1과 WT#2의 출력변동에 대한 확률분포를 나타내고 있다.

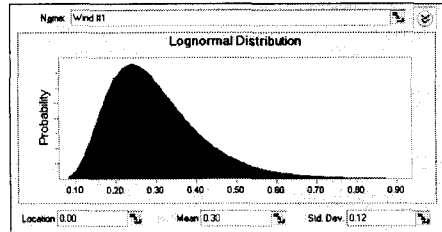


그림 4. WT#1 출력변화의 확률분포
Fig. 4. Distribution of WT#1 generation

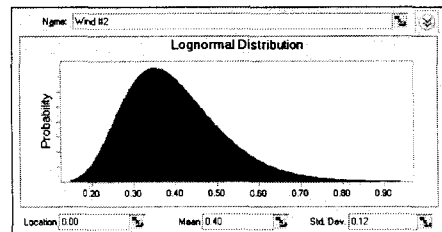


그림 5. WT#2의 출력변화 확률분포
Fig. 5. Distribution of WT#2 generation

아래의 그림 6은 WT#1과 #2의 출력변화에 대한 상관관계를 보여주는 것으로 0.5로 가정하였다. 실제적으로는 두 풍력발전단지의 출력에 대한 실적을 이용하여 비교분석을 수행하여야 하지만 본 논문에서는 이를 가정하여 분석하였다.

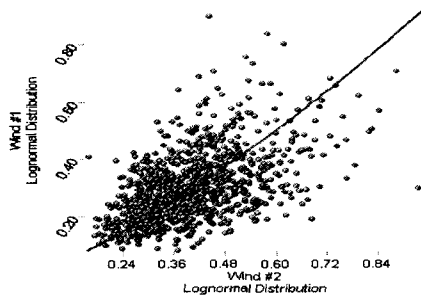


그림 6. WT#1, #2 출력변화의 상관관계
Fig. 6. Correlation of WT#1 and #2 generation

PV의 경우 아래의 그림 7과 같이 삼각분포를 이용하여 출력변화 확률분포를 적용하였고 타 발전원들에 대한 상관관계는 고려하지 않았다.

마이크로그리드(MG)의 설계를 위한 에너지저장장치(ESS)의 최소용량산정 기법에 관한 연구

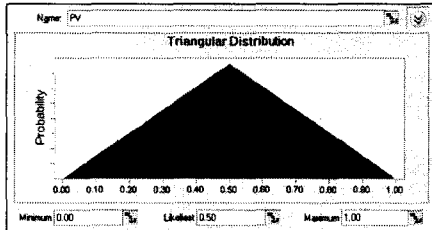


그림 7. PV의 출력변화 확률분포
Fig. 7. Distribution of PV generation

4.2 분석결과

본 대상계통에서 DESS의 최소설비용량을 산정하기 위하여 Monte-carlo simulation을 10,000회 수행하여 아래의 그림 8과 같이 전체 DG의 출력변동에 대한 확률분포를 생성하였으며, 이 확률분포에서 통계적으로 유의한 결과수준을 95[%]범위로 정의하고 그 결과를 활용하여 식 (2)에 전체 DG의 출력변동의 최소 값($\text{Min}(X_{TP})=15.65$ [MW])을 반영하였다. 또한 연계선로 최대용량($C_{\text{line}}^{\text{max}}=5$ [MW])과 최대수요($D_{\text{MG}}^{\text{Total}}=24$ [MW])를 식 (2)에 적용하여 본 계통에서 필요로 되는 최소 DESS설비용량을 산정하였다. 그 결과 대상계통의 Self energy balancing 및 안정적인 운영을 위해서는 최소 1.39[MW]의 DESS가 필요한 것으로 분석되었다.

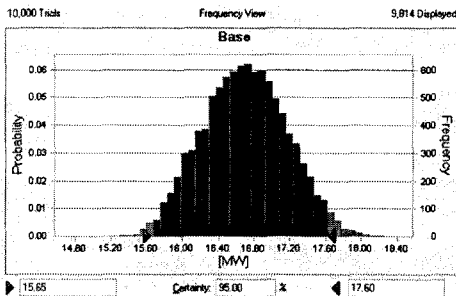


그림 8. 전체 DG의 출력변동 분포
Fig. 8. Simulation result of DG generation

이렇게 산정된 DESS의 최소 설비용량은 경제성을 고려한 최적의 용량은 아니기 때문에 계통의 부하패턴 및 구성발전원의 특성을 반영한 최적 설비용량(산정된 최소 설비용량보다는 큰)의 산정이 필요

하다. 즉, 최적설비용량을 산정하는데 있어서 DESS 설비용량의 최소설비용량 제약조건으로 반영될 수 있는 것이다.

4.3 조건변화에 따른 Case분석

앞에서 대상계통에 대한 사례연구를 Base로 하여 전원구성이 변경되는 경우에 대한 Case분석을 시행하였다. 고려한 Case는 다음과 같다.

- Case 1 - Micro generator용량 1[MW] 감소, WT용량 1[MW] 증가(WT간 상관관계 계수 고려)
- Case 2 - Micro generator용량 1[MW] 감소, WT용량 1[MW] 증가(WT간 상관관계 계수 미 고려)
- Case 3 - WT용량 1[MW] 감소, Micro generator용량 1[MW] 증가

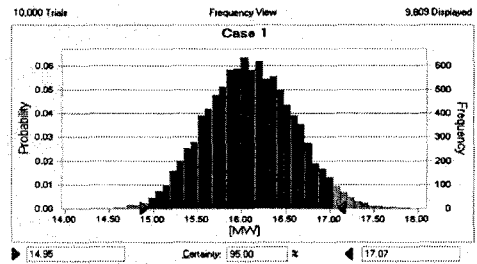


그림 9. 전체 DG의 출력변동 분포(Case 1)
Fig. 9. Simulation result of DG generation (Case 1)

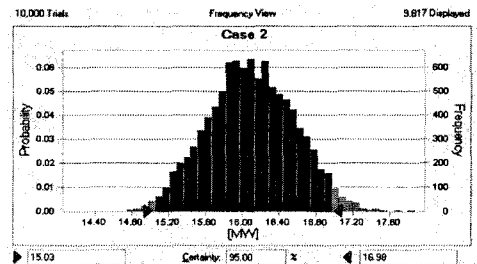


그림 10. 전체 DG의 출력변동 분포(Case 2)
Fig. 10. Simulation result of DG generation (Case 2)

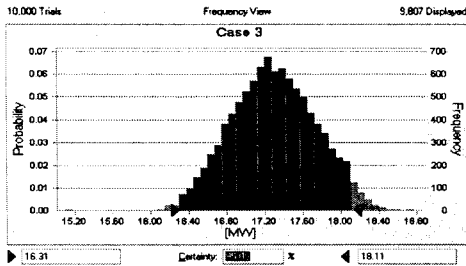


그림 11. 전체 DG의 출력변동 분포(Case 3)
Fig. 11. Simulation result of DG generation (Case3)

표 3. Case별 분석결과
Table 3. Analysis results of each case

| | Base | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|------------------|-------|--------|--------|--------|
| $Min(X_{TRV})$ | 15.65 | 14.87 | 15.03 | 16.31 |
| C_{int}^{max} | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| D_{MG}^{Total} | 24 | 24 | 24 | 24 |
| C_{DESS}^{Min} | 3.35 | 4.13 | 3.97 | 2.69 |

Case1은 그림 2와 표 2에서 제시된 분석대상계통에서 MG의 설비용량을 1[MW] 감소시키고 WT의 설비용량을 1[MW]증가시킨 경우으로써 3개의 풍력발전단지 간의 상관관계를 0.5로 고려한 경우이며, Case 2는 Case 1에서 풍력발전단지 간의 상관관계를 고려하지 않은 것이다. 두 경우의 결과를 비교하면, 상관관계를 고려하지 않은 경우가 DESS의 최소필요용량이 작게 산정되었는데, 실제적으로는 유사한 지역에 풍력발전단지가 조성되어 있는 경우에는 각 지역간 출력의 상관관계를 반영하는 것이 보다 현실적인 결과라고 할 수 있다.

Case 3의 경우는 WT의 설비용량을 1[MW] 감소시키고 MG의 설비용량을 1[MW] 증가시킨 경우인데, 그 결과는 간헐성의 특징을 가지는 발전원의 설비용량이 감소하였기 때문에 DESS의 최소필요용량이 Base 대비 0.66[MW] 감소한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드(MG)를 안정적으로 운영하기 위한 DESS의 최소설비용량을 산정할

수 있는 확률론적 방법론을 제시하였다. 기존의 연구들이 ESS의 기술에 대한 경제성분석이나 전력시장을 기반으로 한 ESS의 경제성에 관심을 두고 있었기 때문에 본 논문에서 분석하고자 하는 용량산정 방식과는 차이가 있다고 할 수 있다.

본 확률론적 방법론은 MG에 적용되는 발전원으로써 Non-dispatchable의 특성을 가지는 발전기 출력의 간헐성과 모든 발전기의 고장정지확률을 고려한 방법이다. 현재까지는 에너지저장장치의 경제성이 확보되지 않은 상태이기 때문에 적절한 설비규모를 산정하는 것은 매우 중요하며, MG의 안정적인 운영을 위해서도 최소의 설비규모에 대한 가이드라인을 제시하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

또한 사례연구를 통해서 인근지역에 위치한 풍력이나 태양광 발전소들 간의 출력에 대한 상관관계를 고려하는 것이 보다 더 현실적인 방법이라는 것과, 전원의 구성에 따라서 DESS의 최소필요용량이 변화되는 것을 확인하였다.

본 방법론은 향후 MG를 설계하고 계획할 때 활용될 수 있으며, 주 계통을 운영하는 Utility나 정부에서는 MG의 설계에 대한 기본적인 가이드라인을 제시할 때 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

향후 연구방향은 제시된 DESS의 최소설비용량을 이용하여 MG의 최적운영 전략을 수립할 수 있는 기법의 개발과 DESS의 특성에 따른 적용방안을 수립하는 것이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업(과제번호:R-2007-2-185)의 지원으로 수행된 것으로, 관계부처의 지원에 대해 깊이 감사드립니다.

References

- (1) Joannis Hadjipaschalis, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2009.
- (2) Rahul Walawalkar, "Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York", Energy Policy vol 35, April, 2007.
- (3) S. Jalal Kazempour, "Electric energy storage systems in a market-based economy: Comparison of emerging and

traditional technologies", Renewable energy, June, 10, 2009.

- [4] Fouad Abu Chacra, "Impact of Energy Storage Costs on Economical Performance in a Distribution Substation", IEEE trans on Power system, vol 20, No 2, May, 2005.
- [5] CERTS, "Microgrid Concept", California Energy Commission, Oct, 2003
- [6] NASH, "Smart Grid Issues Summary", March, 10, 2009.

◇ 저자소개 ◇

이재걸 (李宰杰)

1976년 8월 19일생. 2002년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2004년 인천대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004년 한국전력공사 입사 2007~현재 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원.

E-mail : jaelry@kepco.co.kr

신정훈 (申政勳)

1969년 1월 6일생. 1993년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 한국전력공사 입사. 2002년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.

E-mail : kkambo@kepco.co.kr

최영도 (崔泳道)

1973년 11월 2일생. 2000년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2002년 명지대학교 전기공학과 졸업(석사). 2005년 한국전력공사 입사 2009~현재 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원.

E-mail : zeroway@kepco.co.kr

남수철 (南守喆)

1978년 7월 18일생. 2001년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2006년 고려대학교 전기공학과 졸업(석사). 2006년 한국전력공사 입사 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.

E-mail : scnam@kepco.co.kr

김태균 (金泰均)

1964년 11월 28일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년 한국전력공사 입사 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.

E-mail : bhebbu@kepco.co.kr