

신재생에너지와 부하의 불확실성을 고려한 마이크로그리드의 단순화된 강인최적운영 기법에 관한 연구

A Study on Simplified Robust Optimal Operation of Microgrids Considering the Uncertainty of Renewable Generation and Loads

이 병 하*
(Byung Ha Lee)

Abstract - Robust optimal operation of a microgrid is required since the increase of the penetration level of renewable generators in the microgrid raises uncertainty due to their intermittent power output. In this paper, an application of probabilistic optimization method to economical operation of a microgrid is studied. To simplify the treatment of the uncertainties of renewable generations and load, the new 'band of virtual equivalent load variation' is introduced considering their uncertainties. A simplified robust optimization methodology to generate the scenarios within the band of virtual equivalent load variation and to obtain the optimal solution for the worst scenario is presented based on Monte Carlo method. The microgrid to be studied here is composed of distributed generation system(DGs), battery systems and loads. The distributed generation systems include combined heat and power(CHP) and small generators such as diesel generators and the renewable energy generators such as photovoltaic(PV) systems and wind power systems. The modeling of the objective function for considering interruption cost by the penalty function is presented. Through the case study for a microgrid with uncertainties, the validity of proposed robust optimization methodology is evaluated.

Key Words : Uncertainty, Renewable generation, Load, Microgrid, Virtual equivalent load variation, Simplified robust optimal operation

1. 서 론

분산전원으로서 마이크로그리드에 사용되는 태양광발전과 풍력발전 등의 신재생 에너지는 자연 친화적인 그린 에너지라는 장점이 있지만, 전력계통 운영에서 발전량이 일정치 않은 간헐적으로 발전되는 에너지원이라는 큰 단점을 가지고 있다. 신재생발전은 예측하기가 어려우며 랜덤하게 변하는 확률적인 특성이 강하다. 이러한 특성을 제대로 분석하기 위하여 랜덤하게 변하는 신재생발전을 고려하는 확률적인 마이크로그리드의 운영 기법 연구가 필요하고, 이러한 점들을 고려하여 환경과 여러 조건들이 변하더라도 안정되게 마이크로그리드를 운영할 수 있는 강인한 최적운영기법이 요구되고 있다.

신재생에너지와 같은 간헐적인 발전 전원이 많이 사용되는 마이크로그리드에서는 배터리와 같은 전력저장장치가 에너지 공급과 수요의 균형을 맞추며 마이크로그리드 시스템을 효율적으로 운전하기 위한 주요 설비가 된다. 마이크로그리드의 핵심설비 중 하나인 배터리에 대한 연구가 활발히 수행되어 오고 있다. 전력저장장치로 널리 사용되고 있는 납축전지와 리튬계열의 배터리의

특성들을 분석하고[1], 여러 가지의 에너지저장장치인 납축전지, 리튬스 배터리, 플라이휠 등의 최적화 운영방법에 대하여 논의하였다[2]. 그리고 운용측면에서 마이크로그리드를 경제적으로 운용하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 신재생전원과 같은 간헐적으로 발전하는 발전원을 포함하는 전력시스템에 대하여 경제적인 면과 환경적인 면을 함께 고려하는 급전문제를 해결하기 위하여 모델예측제어에 기반을 둔 기법을 제시하고, 간단한 시스템에서의 시뮬레이션을 통하여 그 가능성을 보여 주었다[3]. 신재생에너지를 포함한 마이크로그리드의 최적운영을 위한 발전계획 방안을 DP를 이용하여 제시하고 그 효율성을 사례연구로 보여 주었다[4]. 상위 시스템과 마이크로그리드의 연계 운전 모드에서 마이크로그리드의 운용을 위한 멀티에이전트 시스템을 제안하고, 계약망 프로토콜을 적용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 타당성을 보여주었다[5]. 열병합발전과 신재생에너지와 배터리를 포함하는 마이크로그리드 시스템의 최적운용을 위한 정식화를 수행하고, 배터리의 피크부하 저감 효과를 반영하는 시뮬레이션 결과를 보여주었고[6], BESS의 특성과 디젤발전기의 출력비에 따른 효율변화량을 고려하는 BESS와 디젤발전기의 최적운영방안을 제시하였다[7]. 풍력발전과 부하의 불확실성을 고려하는 확률적인 최적조류계산 모델을 제시하고, 풍력발전의 확률밀도를 가우시안 혼합모델로 근사화하는 기법이 효율적인 분석을 위해 제안되었다[8]. 신재생에너지의 불확실성을 고려하여 이에 따른 모션전압의 영향을 구하고 이 변수들의 분산의 합을 최소화하는 신재

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University

E-mail : bhlee@inu.ac.kr

Received : November 7, 2016; Accepted : February 2, 2017

생에너지의 불확실성의 영향을 줄이는 알고리즘을 제안하였다 [9]. 또한, 확률적인 해석기법에서 더 나아가 신재생발전이나 부하의 불확실성을 고려하여 환경과 여러 조건들이 변하더라도 안정되게 마이크로그리드를 운영할 수 있는 강인한 최적운영기법에 대한 연구도 수행되고 있다. 간헐적인 분산전원의 불확실한 출력과 1일 전의 시장가격의 모델링이 수행되고, 실시간 전력시장에서 불균형전력을 제한함으로써 강인한 최적화가 이루어지는 기법이 제안되었다[10]. 간헐적인 신재생발전의 변화범위를 정하고 신재생발전의 변화에 따른 화력발전, 수력발전 등의 동요에 기인하는 페널티 비용들의 합을 최소화하는 강인한 최적급전기법을 연구하였다[11]. 풍력발전과 전기자동차를 포함하는 마이크로그리드에서 풍력발전의 최악의 시나리오를 고려하여 발전비용을 최소화하는 강인한 최적급전 전략에 대한 연구가 수행되었다[12].

일반적으로 강인한 최적운영이 되도록 하기 위하여 변동가능성이 있는 상한치와 하한치의 변동범위 내에서 랜덤하게 변하는 시나리오들을 선정하고 이에 대하여 시뮬레이션을 행하고 있지만, 신재생에너지와 부하에 대하여 각각의 변동범위의 상한치와 하한치를 결정하고 시나리오를 선정하는 것이 번거롭고, 일관성이 없이 이루어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 강인한 최적운영 해를 얻는 과정을 단순화하기 위하여, 신재생발전의 불확실성을 등가의 부하의 불확실성으로 부하와 통합하여 고려하는 새로운 '가상등가부하변동밴드'의 개념을 도입하고, 이를 적용하여 강인한 해를 보다 쉽게 구하는 단순화된 기법을 제시한다. 이러한 모델을 독립운전 모드의 가상의 마이크로그리드의 시스템에 적용하여 그 효과를 보여준다.

2. 가상등가부하변동밴드를 이용한 단순화된 강인최적화기법의 적용을 위한 모델링

2.1 가상등가부하변동밴드의 도입 및 적용 절차

발전력과 부하 등의 확률적인 변화의 특성을 효과적으로 쉽게 반영하기 위하여 태양광발전, 풍력발전과 같이 인위적으로 조절할 수 없는 발전력의 변화의 부분을 증가적인 부하의 변화의 부분으로 치환하여 고려하는 가상 등가 부하 변화량을 도입한다. 부하가 이러한 가상 등가 부하 변화량의 폭 내에서 변할 때의 최적의 운영방안을 결정하면 강인한 최적화의 해를 구하는 것이 된다. 여기서는 독립적으로 운영하는 독립운전모드의 마이크로그리드를 고려한다. 또 신재생에너지로서는 가장 널리 활용되고 있는 태양광발전과 풍력 발전을 고려하여, 마이크로그리드의 발전원은 태양광발전과 풍력발전의 신재생발전기와 CHP(열병합발전)과 디젤발전기들로 이루어진 분산전원이고 부하와 에너지저장설비인 배터리를 포함한다고 가정한다.

전력시스템은 전력의 공급과 수요가 항상 균형을 이루어야 한다. 배터리는 방전 시에는 전력을 공급할 수 있는 발전원의 역할을 하고, 충전 시에는 전력을 소비하는 부하의 역할을 한다. t구간에서의 전체의 그리드 주입전력 총량, 전체의 소비전력 총량을, 각각 $P_{TG,t}$, $P_{TL,t}$ 라고 표기하면, $P_{TG,t}$ 와 $P_{TL,t}$ 는 아래와 같이

나타낼 수 있다.

$$P_{TG,t} = P_{DS,t} + P_{CHP,t} + P_{PV,t} + P_{Wind,t} + B_{Dis,t} \quad (1)$$

$$P_{TL,t} = P_{LOAD,t} + B_{Cha,t} \quad (2)$$

여기서 $P_{DS,t}$, $P_{CHP,t}$, $P_{PV,t}$, $P_{Wind,t}$, $P_{LOAD,t}$, $B_{Dis,t}$, $B_{Cha,t}$ 는 각각 t구간에서의 디젤발전기, 열병합발전, 태양광발전, 풍력발전, 부하, 배터리 방전 및 배터리 충전의 총량을 의미한다. 그때 전력방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$P_{TL,t} = P_{TG,t} \quad (3)$$

$$P_{LOAD,t} + B_{Cha,t} = P_{DS,t} + P_{CHP,t} + P_{PV,t} + P_{Wind,t} + B_{Dis,t} \quad (4)$$

이 식은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$P_{LOAD,t} = P_{DS,t} + P_{CHP,t} + P_{PV,t} + P_{Wind,t} + B_{Dis,t} - B_{Cha,t} \quad (5)$$

여기에서 태양광과 풍력 발전의 변화량과 부하의 변화량을 고려하여 각각 $\Delta P_{PV,t}$, $\Delta P_{Wind,t}$, $\Delta P_{LOAD,t}$ 라고 두면, 전력방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{LOAD,t} + \Delta P_{LOAD,t} = P_{DS,t} + P_{CHP,t} + P_{PV,t} + \Delta P_{PV,t} + P_{Wind,t} + \Delta P_{Wind,t} + B_{Dis,t} - B_{Cha,t} \quad (6)$$

또 식 (6)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$P_{LOAD,t} + \Delta P_{LOAD,t} - \Delta P_{PV,t} - \Delta P_{Wind,t} = P_{DS,t} + P_{CHP,t} + P_{PV,t} + P_{Wind,t} + B_{Dis,t} - B_{Cha,t} \quad (7)$$

위의 식 (7)에서 살펴보면, 예측한 태양광 발전에서 $\Delta P_{PV,t}$ 만큼 태양광 발전이 증가하면 다른 발전량을 그만큼 줄일 수 있으므로 부하의 관점에서는 부하가 $\Delta P_{PV,t}$ 만큼 감소한 것과 등가의 효과가 있다. 풍력 발전의 변화량 $\Delta P_{Wind,t}$ 도 동일한 방식으로 해석할 수 있다. 따라서 가상 등가 부하 변화량 $\Delta P_{EL,t}$ 를 도입하여

$$\Delta P_{EL,t} = \Delta P_{LOAD,t} - \Delta P_{PV,t} - \Delta P_{Wind,t} \quad (8)$$

라고 두면, 위의 식 (7)은 아래의 식 (9)로 표현될 수 있다.

$$P_{LOAD,t} + \Delta P_{EL,t} = P_{DS,t} + P_{CHP,t} + P_{PV,t} + P_{Wind,t} + B_{Dis,t} - B_{Cha,t} \quad (9)$$

신재생에너지와 부하에 확률적인 불확실성을 고려하면, 태양광발전, 풍력발전, 부하는 확률변수가 되고, 가상 등가 부하 $P_{EL,t}$ 는 아래와 같이 표현되는 확률변수들의 모음으로 표현된다.

$$P_{EL,t} = P_{LOAD,t} - P_{PV,t} - P_{Wind,t} \quad (10)$$

신재생에너지 발전량과 부하량의 불확실성에 대한 처리를 단순화하기 위하여, 이 변화들은 모두 서로 독립인 Gaussian 정규분포 특성을 가진다고 가정할 수 있다. 이 경우에 확률특성과 관련된 아래의 두 가지 정리가 성립한다.

1) 확률변수들이 모두 서로 독립이고 Gaussian 정규분포인 경우에 이러한 확률변수들의 합의 기댓값은 각각의 확률변수들의 기댓값의 합과 같다.

$$E(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = E(X_1) + E(X_2) + \dots + E(X_n) \quad (11)$$

여기서, X_1, X_2, X_n 은 서로 독립인 확률변수들을 나타내고, $E(X_1)$ 은 X_1 확률변수의 기댓값을 나타낸다.

2) 확률변수들이 모두 서로 독립이고 Gaussian 정규분포인 경우에 이러한 확률변수들의 합의 분산은 각각의 확률변수들의 분산의 합과 같다.

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2 \quad (12)$$

여기서, σ^2 은 확률변수들의 합인 $(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$ 의 분산을 나타내고, σ_1^2 은 X_1 확률변수의 분산을 나타내며, σ 와 σ_1 은 각각 확률변수들의 합과 X_1 확률변수의 표준편차를 나타낸다.

가상 등가 부하 변화량 $\Delta P_{EL,t}$ 에 상한치($\Delta P_{ELupper,t}$)와 하한치($\Delta P_{ELlower,t}$)를 두어 아래와 같은 '가상등가부하변동밴드'를 만들 수 있다.

$$\Delta P_{ELlower,t} \leq \Delta P_{EL,t} \leq \Delta P_{ELupper,t} \quad (13)$$

여기서 상한치(Upper limit)와 하한치(Lower limit)는 가상등가부하의 표준편차를 고려하여 원하는 적정 확률의 신뢰도범위까지 쉽게 결정할 수 있다. 이것이 신재생발전의 불확실성을 등가의 부하의 불확실성으로 부하와 통합하여 고려하는 새로운 '가상등가부하변동밴드'이다. 90%의 확률범위 정도의 신뢰도를 고려하면 표준편차의 1.28배를 적용하면 되고, 더 신뢰성을 높여 99%의 확률범위 정도의 신뢰도를 원한다면 표준편차의 2.31배를 적용하면 된다. 쉽게 적용할 수 있는 상·하 리미트로 $\pm 2\sigma$ 의 범위를 적용하면 그 확률은 $Pr[m-2\sigma \leq X \leq m+2\sigma] \approx 0.954$ 으로서 신뢰의 확률은 95.4%가 된다(여기서 σ 와 m 은 각각 확률변수 X 의 표준편차와 평균이다). 분석하는 각 시간대에 대하여 부하와 신재생에너지의 각각의 분산과 표준편차의 값들을 위의 식 (12)에 근거하여 계산하고, 이를 식 (13)에서 나타난 각 시간대의 상한치(Upper limit)와 하한치(Lower limit)를 결정하는데 적용하면, 각 시간대별 상한치와 하한치를 훨씬 더 쉽게 정할 수 있다. 각 시간대별로 상한치(Upper limit)와 하한치(Lower limit)를 경계로 하는 '가상등가부하변동밴드'의 한 예가 그림 1에 보여져 있다.

확률적인 해석기법으로 Monte-Carlo method, Cumulant method, Fourier series method, LOLP, LOLE 등의 기법들이 있으나, 이러한 기법들은 계산이 복잡하고 기존의 상용화된 결정적

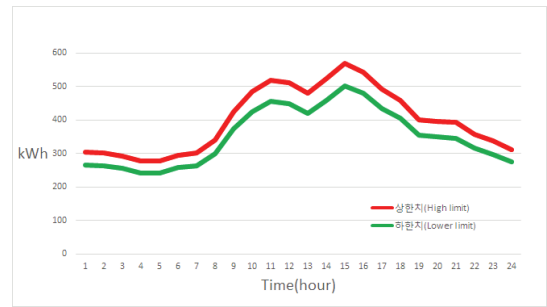


그림 1 가상등가부하변동밴드
Fig. 1 Virtual equivalent load variation band

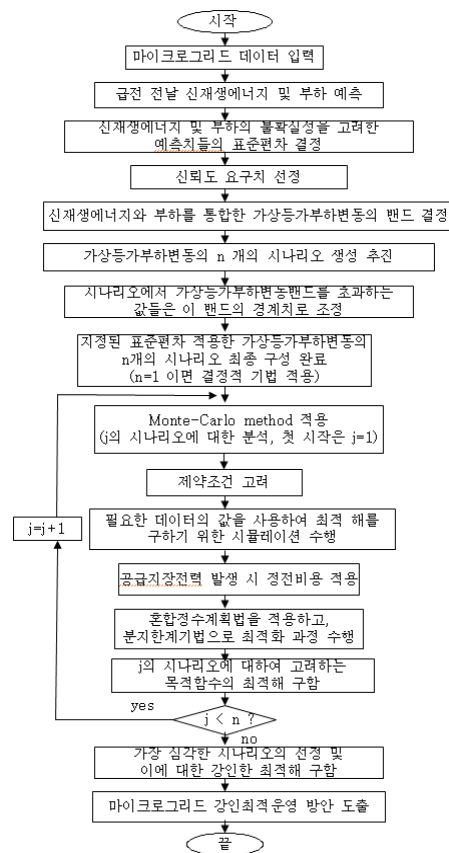


그림 2 마이크로그리드 강인 최적 운영 기법의 절차도
Fig. 2 The procedure for determination of robust optimal operation of a microgrid

기법의 최적화 알고리즘과는 별도의 해석과정이 필요하다. 확률적인 해석기법이 결정적 기법에 비하여 단점으로 부각되는 부분이 시뮬레이션이 복잡하고 시간이 많이 소요된다는 점으로 해서 실제 현장에서는 결정적 기법에 근거한 프로그램을 사용하고 있다. 이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 기존의 결정적 기법으로 해를 구하는 기법의 틀을 그대로 유지하면서 확률적인 효과를 반영할 수 있도록 하기 위하여 확률적 해석기법으로서 Monte-

Carlo method를 적용한다. Monte-Carlo 시뮬레이션을 위한 수많은 시나리오(Scenario)들이 '가상등가부하변동밴드' 내에서 만들어질 수 있다. 랜덤발생 함수를 통하여 랜덤한 시나리오들이 발생되며, 각 시간대별로 상한치와 하한치를 초과하는 경우는 그 시간대의 한계값인 '가상등가부하변동밴드'의 경계에서의 값을 취하는 것으로 시나리오를 구성한다.

그림 2에 마이크로그리드 강인 최적 운영 기법의 절차도가 보여져있다. 급전 1일 전에 일기예보와 여러 가지 데이터들을 고려하여, 태양광발전, 풍력발전 및 부하를 예측한다. 신재생에너지 및 부하의 불확실성을 고려한 각각의 예측치의 표준편차를 결정하고 신재생에너지와 부하를 통합한 가상등가부하변동의 표준편차를 결정한다. 어느 정도의 신뢰도까지 고려할지 신뢰도 요구치를 결정하고, 신재생에너지와 부하를 통합한 가상등가부하변동의 밴드를 결정한다. 이를 토대로 Monte Carlo 시뮬레이션 기법에 근거하여 발생 가능한 n개의 시나리오들을 만들어 분석을 수행한다. n=1이면 자연스럽게 결정적 기법에 의한 최적운영해를 구하는 것이 된다. 강인한 최적운영이 되도록 하기 위하여 상한치와 하한치의 허용된 변동범위 내에서 랜덤하게 변하는 n개의 선정된 시나리오들에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 가장 심각한 시나리오를 선정하고, 이에 대한 최적해를 구함으로써 강인한 최적해를 구한다. 최적화 기법으로는 혼합정수계획법을 적용하고 최적화 알고리즘으로는 분지한계기법을 적용한다.

기존의 강인 최적화 기법 적용을 위한 시나리오 발생 과정에서는 태양광 발전, 풍력 발전 등 각 신재생발전과 부하마다 랜덤하게 변하는 시나리오를 발생시키고, 번거로운 작업을 통해 이를 종합하는 과정을 거쳐서 시나리오를 만든다. 각 발전기마다 발전량 예측치 오차 발생 확률을 적용하여 이러한 시나리오를 따로 만들고 이들을 다시 통합하여 분석을 해야 한다. 이에 반해 본 논문에서 제안하는 기법에서는 모든 신재생발전과 부하의 예측 오차가 발생할 확률을 통합하여 가상등가부하변동으로 환산하여 랜덤하게 변하는 시나리오를 한 번에 생성함으로써 동일한 결과를 산출하면서도 훨씬 간결하게 처리할 수 있다. 또한 여러 개의 확률변수를 하나의 확률변수만 있는 것처럼 취급할 수 있기 때문에 훨씬 쉬워진다.

2.2 마이크로그리드의 최적 운영 모델링

마이크로그리드는 광역기반 분산전원과 연계되어 운전하는 계통연계형 모드와 독립적으로 운영하는 독립운전모드 두 가지가 있는데, 여기서는 분석의 효과를 보다 확실히 파악하기 위하여 독립적으로 운영하는 독립운전모드의 마이크로그리드에 대하여 분석한다.

가. 목적함수

고려하는 마이크로그리드는 태양광발전과 풍력발전의 신재생발전기와 CHP와 디젤발전기 등의 분산전원 및 부하와 에너지저장설비인 배터리를 포함한다고 가정한다.

위에서 제안하는 기법을 반영하는 목적함수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \min_w C = & \min_w [\sum_{t=1}^T (\sum_{j=1}^J C_j \cdot P_{DSj,t,w} + \sum_{k=1}^K C_k \cdot P_{CHPk,t,w} \\ & + \sum_{l=1}^L C_l \cdot P_{PVL,t,w} + \sum_{m=1}^M C_m \cdot P_{Windm,t,w} \\ & + \sum_{j=1}^J C_{stDSj} \cdot \delta_{stDSj,t,w} \\ & + C_{penalty} \cdot |P_{TG,t,w} - P_{TL,t,w} - \Delta P_{EL,t,w}|] \end{aligned} \quad (14)$$

$T =$ 일일운영구간수

$C_j =$ j번째 디젤발전기 발전단가[원/kWh]

$C_k =$ k번째 열병합발전기 발전단가[원/kWh]

$C_l =$ l번째 태양광발전 발전단가[원/kWh]

$P_{DSj,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 j번째 디젤 발전기의 발전량[kWh]

$P_{CHPk,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 k번째 열병합발전기의 발전량[kWh]

$P_{PVL,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 l번째 태양광발전의 발전량[kWh]

$C_m =$ m번째 풍력발전기 발전단가[원/kWh]

$P_{Windm,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 m번째 풍력 발전기의 발전량[kWh]

$C_{stDSj} =$ j번째 디젤발전기의 기동비용[원/회]

$\delta_{stDSj,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 j번째 디젤발전기의 기동 변경 상태(직전 상태가 정지에서 현 상태가 기동으로 바뀐 경우 1, 그렇지 않으면 0)

$C_{penalty} =$ 페널티 함수 값(정전비용단가)[원/kWh]

$P_{TG,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 전체 발전량과 배터리 방전량의 합

$P_{TL,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 전체 부하량과 배터리 충전량의 합

$\Delta P_{EL,t,w} =$ w시나리오의 t구간에서의 가상 등가부하 변화량

$\min_w =$ 가장 심각한 시나리오 w의 최소값

위의 목적함수에서 $P_{PVL,t,w}$, $P_{Windm,t,w}$, $P_{TL,t,w}$ 는 평균값(mean)이며, 가상 등가 부하 변화량인 식 (8)의 $\Delta P_{EL,t,w}$ 의 값은 시나리오에 따라 변화하는 값을 갖는다. 목적함수에 공급전력이 불충분하여 공급지장이 발생하는 경우도 고려하기 위하여 페널티 함수를 도입하여 정전비용을 목적함수에 반영하는 최적운영의 모델링이 제시되었다. 페널티 함수는 정전시의 공급지장전력에 대하여 산정하는 정전비용 단가를 적용한다. 가장 심각한 시나리오 w는 확률적인 것을 고려하지 않고 세운 1일 전의 발전계획을 사용하여 고려하는 모든 시나리오에 대하여 시뮬레이션을 하여 정전비용을 포함하여 가장 높은 발전비용이 발생하는 시나리오이다.

나. 제약조건

각 분산전원은 최소출력 및 최대출력 사이의 범위 내에서 운

전해야 하므로, 마이크로그리드의 분산전원은 각 발전기의 최소 출력 이상, 최대 출력 이하의 범위 내에서 운전하여야 하는 제약 조건이 가해진다. 전력공급과 전력수요가 동일하다는 전력방정식의 제약조건식을 조정하여, 목적함수에 이를 페널티 함수로 표현하여 포함시킨다.

또한, 이러한 제약조건들에 추가하여 BESS의 제약 조건들이 포함된다. 저장장치에서 방전 가능한 전력은 에너지저장장치에 남아있는 전력량 내에서 방전이 가능하며 이는 제약조건의 식 (15)와 같다.

$$0 \leq B_{Dis,t,w} \leq B_{acc,(t-1),w} \quad (15)$$

여기서, $B_{acc,(t-1),w}$ = w 시나리오의 $t-1$ 구간에서 에너지저장장치에 남아있는 전력량[kWh]

저장장치에서 충전 가능한 전력은 현재 충전되어 있는 전력량을 제외한 여분의 범위 내에서 충전이 가능하며 이는 제약조건의 식 (16)과 같다.

$$0 \leq B_{Cha,t,w} \leq B^{MAX} - B_{acc,(t-1),w} \quad (16)$$

여기서, B^{MAX} = 저장장치의 최대용량[kWh]

저장장치의 최종 충전상태는 손실률을 고려하여 제약조건의 식 (17)과 같이 나타낸다.

$$B_{acc,t,w} = B_{acc,(t-1),w} + B_{Dis,t,w} / (1 - L_d) - B_{Cha,t,w} \cdot (1 - L_c) \quad (17)$$

여기서,

$$B_{acc,t,w} = w\text{시나리오의 } t\text{번째 구간의 충전상태 [kWh]}$$

$$L_d = \text{저장장치의 방전 손실률 [p.u]}$$

$$L_c = \text{저장장치의 충전 손실률 [p.u]}$$

3. 마이크로그리드의 간략화된 강인한 최적운영 시뮬레이션 및 검토

3.1 강인최적화 기법 분석을 위한 마이크로그리드 시스템

본 논문의 분석을 위하여 적용되는 마이크로그리드 시스템은 태양광발전이 150[kW], 풍력발전이 100[kW]의 용량이고, 열병합발전과 디젤발전이 각각 200[kW] 용량이다. 여기서는 마이크로그리드의 계획이 아니라 마이크로그리드의 운영을 다루고 있기 때문에 태양광발전과 풍력발전의 발전단가는 기본 유지비만 포함되어 아주 낮다. 발전단가는 태양광발전이 15[원/kWh], 풍력발전이 20[원/kWh], 열병합발전과 디젤발전이 각각 150[원/kWh], 175[원/kWh]이고, 디젤발전기의 기동정지비용은 970[원/회]이라고 가정한다. 에너지저장장치인 BESS의 용량은 300[kWh], BESS의 충전 손실률은 $L_c = 0.075$ [p.u], BESS의 방전 손실률은 $L_d = 0.075$ [p.u]이고, 운용 C -rate는 $0.5C$, BESS의 SOC최소치와

SOC최대치는 각각 0.1과 0.9로 운전된다고 가정하였다. 고려되는 태양광 발전 및 풍력발전과 부하는 표 1과 같다. 도입되는 페널티 함수로 반영되는 공급시장전력 단가는 정전비용으로서 최고발전단가인 디젤발전단가의 10배로 가정한다.

마이크로그리드의 급전 단일의 전달에 부하 및 신재생전원 발전을 예측하고, 이에 근거하여 1일 동안의 최적운영계획을 수립하며, 하루의 시간을 총 24개의 구간으로 구성하여 1시간 간격의 최적 운영 해를 구한다.

3.2 기존 강인최적화 시뮬레이션의 절차

강인 최적화 기법이 마이크로그리드에 적용된 것은 해외 연구에서도 아주 최근의 일이다.

표 1 마이크로그리드의 태양광 발전 및 풍력발전과 부하의 데이터

Table 1 Data of the photovoltaic generation, wind generation and load of the microgrid

시간 (hour)	태양광발전 (kWh)	풍력발전 (kWh)	부하 (kWh)
1	0.0	45.0	285.3
2	0.0	44.4	282.8
3	0.0	38.7	274.0
4	0.0	38.6	259.2
5	0.0	39.7	259.3
6	6.0	38.7	275.4
7	18.0	36.8	281.8
8	27.0	32.9	319.4
9	39.0	29.9	399.4
10	45.0	29.0	454.3
11	51.0	27.1	486.6
12	57.0	27.6	480.1
13	60.0	25.8	449.3
14	57.0	24.4	490.5
15	50.4	22.2	535.0
16	39.0	20.0	510.6
17	21.0	19.5	462.8
18	6.0	20.7	431.9
19	0.0	27.3	377.0
20	0.0	32.5	372.9
21	0.0	34.8	369.0
22	0.0	32.3	336.2
23	0.0	29.4	317.0
24	0.0	32.9	292.7

확률적인 특성을 고려한 강인최적화를 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션 기법이 가장 널리 적용되고 있으며, 강인한 최적운영이 되도록 하기 위하여 변동가능성이 있는 상한치와 하한치의 변동범위 내에서 랜덤하게 변하는 시나리오들에 대하여 시뮬레이션을 하고 가장 심각한 시나리오에 대해서도 운영이 가능하도록 함으로써 강인한 특성을 갖도록 한다. 그러나 여러 가지 특성의 신재생에너지와 부하에 대하여 각각 변동범위의 상한치와 하한치를 결정하는 것이 번거롭고, 일관성이 없이 이루어지고 있다. 또 여러 가지 특성의 신재생에너지와 부하에 대하여 랜덤하게 변화하

는 시나리오를 각각 만들고 이를 종합하여 고려하는 것이 번거로운 작업이다. 기존 기법을 앞 절의 마이크로그리드 시스템에 적용하는 과정을 요약하여 설명하면 아래와 같다.

신재생에너지인 태양광발전 및 풍력발전과 부하의 확률특성을 고려하여 각각에 대하여 시나리오를 작성한다. 태양광발전과 풍력발전과 부하가 매 시간대마다 각각 10%, 10%, 3%의 표준편차를 갖는 정규분포를 나타낸다고 가정하면, 태양광 발전의 확률적 특성을 고려한 시나리오는 그림 3과 같이 작성할 수 있다. 표준편차가 커질수록 평균인 기대치에서 더 크게 변화하게 된다. 유사하게 풍력 발전의 확률적 특성을 고려한 시나리오가 그림 4에 보여져 있다. 또 부하의 확률적 특성을 고려한 시나리오가 그림 5에 보여져 있다. 이렇게 각각 선정된 시나리오에 대하여 이를 통합하여 시뮬레이션을 수행하게 된다. 이 경우 확률적인 특성을 갖고 있는 신재생에너지와 부하마다 각각의 변동범위의 상한치와 하한치를 결정하고 개별적으로 시나리오를 만들고 이를 모두 종합하여 시뮬레이션을 하고 가장 심각한 시나리오에 대해 최적운영해를 구하는 것은 번잡스럽고 시간이 많이 소요되는 일이다. 본 논문에서는 이 작업을 이론적으로 증명된 정리를 적용하여 동일한 효과를 내면서도 절차를 간단히 하고 해를 얻는 시간도 단축시키는 단순화된 강인최적화기법을 제시하는 것이다.

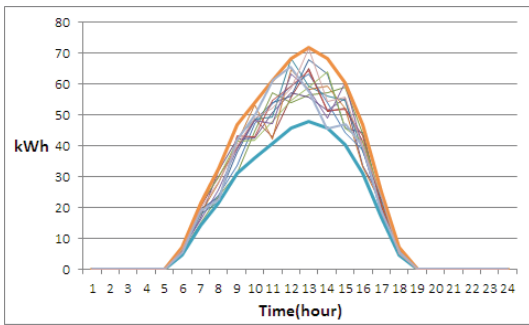


그림 3 강인 최적운영을 위한 태양광 발전의 시나리오 선정
 Fig. 3 Selection of scenarios of PV generation for robust optimal operation

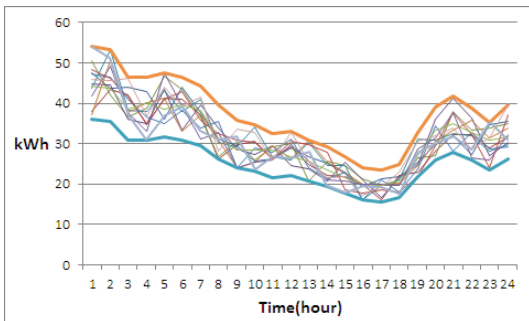


그림 4 강인 최적운영을 위한 풍력 발전의 시나리오 선정
 Fig. 4 Selection of scenarios of wind generation for robust optimal operation

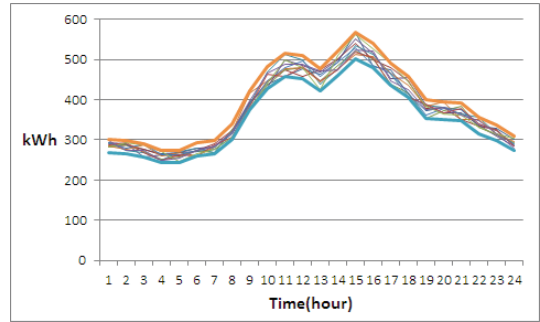


그림 5 강인 최적운영을 위한 부하의 시나리오 선정
 Fig. 5 Selection of scenarios of load for robust optimal operation

3.3 가상등가부하변동밴드를 이용한 단순화된 강인최적화의 시뮬레이션 결과와 분석

가. 가상등가부하변동밴드와 시나리오 선정

본 논문에서는 가상등가부하변동밴드의 상한치(Upper limit)와 하한치(Lower limit)로서 아주 평이하게 $\pm 2\sigma$ 의 범위를 적용한다. 앞서와 같이 부하와 태양광발전과 풍력발전의 확률분포는 각각 매 시간대마다 3%, 10%, 10%의 표준편차를 갖는 정규분포를 나타낸다고 가정한다. 실제로는 기존 운영데이터 등을 분석하여 매 시간대 별로 산정된 예측치 오차의 확률치를 확보하면 이를 적용하면 된다. Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 적용하기 위해 많은 시나리오(Scenario)들을 도출한다. 랜덤발생 함수를 통하여 수많은 랜덤한 시나리오들을 만들 때 허용되는 변동 범위인 '가상등가부하변동밴드'를 적용한다. 랜덤한 시나리오들을 발생시킬 때 각 시간대별로 '가상등가부하변동밴드'의 상한치와 하한치를 초과하는 경우는 그 시간대의 '가상등가부하변동밴드'의 상한한 경계 값을 취하는 것으로 시나리오를 구성한다. 이렇게 하여 강인한 최적운영을 위해 안정적인 전력공급이 되도록 많은 케이스의 시나리오에 대하여 검토하되, 너무 지나친 조건의 케이스는 피할 수 있도록 '가상등가부하변동밴드'의 상한치와 하한치의 허용된 변동범위 내에서 랜덤하게 변하는 많은 케이스의 시나리오들 중에서 가장 심각한 시나리오를 선정하고 이에 대하여 강인한 최적해를 구하게 된다.

주어진 표준편차를 갖는 부하와 태양광발전과 풍력발전에 대하여, 가상등가부하변동밴드의 상한치와 하한치로서 $\pm 2\sigma$ 의 범위를 적용하였을 때의 가상등가부하변동밴드와 이의 허용 변동 범위를 고려하여 발생시킨 시나리오들의 하나의 예에 대한 그림이 그림 6에 보여져 있다.

나. 시나리오에 따른 강인최적운영 시뮬레이션 결과

당일 급전 운영을 시행하기 1일 전에 발전계획을 세우고 이에 따라 당일에 마이크로그리드를 운영하는 것으로 가정하고 시뮬레이션을 수행한다. 1일 전에 기온, 습도, 풍속, 일조량 등 날씨의 일기예보와 요일, 계절, 산업경기, 절기, 특별행사 등과 지난 축적

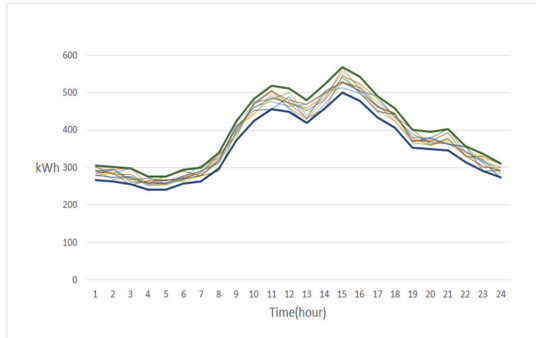


그림 6 마이크로그리드의 강인 최적운영을 위한 시나리오 선정
 Fig. 6 Selection of scenarios for robust optimal operation of a microgrid

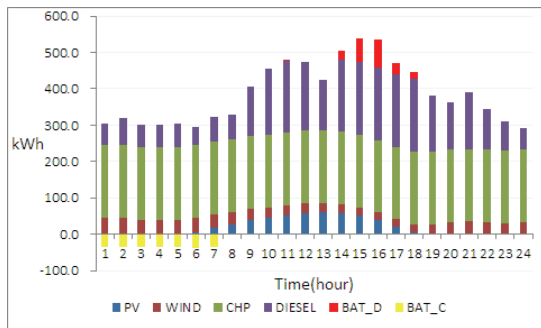


그림 7 마이크로그리드의 강인 최적운영
 Fig. 7 Robust optimal operation of the microgrid

된 데이터 등을 고려하여, 태양광발전, 풍력발전 및 부하를 예측한다. 이를 토대로 선정된 시나리오의 세트에 대하여 최적화 프로그램인 Lingo 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 수행하고, 가장 심각한 시나리오를 선정하여 이에 대하여 각 발전기들의 각 구간에서의 최적발전량을 구한 결과가 그림 7에 보여져있다. 그림 7의 범례에서 PV는 태양광 발전, WIND는 풍력발전, CHP는 열병합발전, DIESEL은 디젤발전, BAT_D는 BESS 방전, BAT_C는 BESS 충전을 나타낸다. BESS 충전인 BAT_C는 다른 발전원과 다르게 부하의 역할과 유사하므로 발전과 반대 부호인 음의 값으로 표시되어 있다. 태양광 발전과 풍력발전과 같은 신재생에너지 발전의 발전단가는 아주 낮으므로 이러한 신재생에너지 발전이 우선적으로 운전된다. 열병합발전의 발전단가는 디젤 발전이나 다른 화력발전에 비하여 상대적으로 저렴하기 때문에 기저부하를 담당한다. 이에 반해 디젤발전기의 발전단가는 상대적으로 비싸므로 부하곡선의 상위부분에 해당하는 피크부하를 담당한다. 이 경우에 BESS를 사용하여 피크 삭감의 기능이 수행되어 진다. 즉, BESS는 발전력에 여유가 있는 부하가 작게 걸린 기간이거나 전력공급에 여유가 있는 기간 중에 충전하고, BESS에 충전된 전력을 전력공급이 부족한 시간대의 피크부하 기간 중에 방전하여 필요한 전력을 안정적으로 공급한다.

구간 11, 14, 15, 16, 17과 18에서 약간의 전력 부족이 발생하

므로, BESS는 발전전력의 여유가 있는 구간에서 약간씩 충전하여, 전력 부족이 발생한 구간에서 충전된 전력을 방전한다. 이러한 동작으로 BESS는 전력이 부족한 시간대에서 피크부하를 삭감하는 역할을 수행함을 보여 준다.

3.4 마이크로그리드의 강인한 최적운영기법에 대한 검토 및 결정적 기법과의 비교

강인한 최적화 기법에서는 발생 가능한 많은 시나리오들을 선정하고 이들 중 가장 심각한 시나리오를 선정하여 이에 대해 안정적이고도 경제적인 최적운영이 되는 방안을 수립한다. 이 때 너무 가혹한 조건의 시나리오를 고려하면 안정적인 전력공급의 확률을 더욱 높일 수 있지만, 그만큼 이에 대한 대비를 해야 하므로 운영비용은 더 늘어나게 된다. 본 논문에서의 시뮬레이션에서는 표준편차의 2배인 $\pm 2\sigma$ 의 범위를 변동의 허용범위로 적용하였지만, $\pm 3\sigma$ 이거나 이 이상의 범위를 고려하는 경우가 이에 해당한다고 할 수 있다. 너무 안정적인 운영을 고려하면 거기에 맞추어 더 큰 비용을 수반하게 된다. 그렇다고 결정적 기법에서처럼 하나의 고정된 시나리오에 대해서만 방안을 세우는 것은 변화가 큰 신재생에너지와 부하의 불확실성을 고려할 때 심각한 시나리오가 실제로 발생했을 때 대처하는 강인한 그리드의 운영이 될 수가 없다. 따라서 이러한 점을 고려하여 서로 상반되는 특성인 신뢰도와 경제성을 적절한 수준에서 충족시키는 상호절충이 이루어져야 한다.

가장 심각한 시나리오를 선정하고 이에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 강인최적운영 방안을 도출한 것과 1일 전에 수립한 발전계획으로 강인최적운영 방안 결정에 사용된 동일한 시나리오 발생 시에 결정적 기법으로 최적운영 방안을 도출한 것을 함께 제시하면 표 2와 같다. 이 경우에 강인최적화기법에 의한 1일 간의 전체발전비용은 1,254,611.8[원]이고 결정적 기법에 의한 1일 간의 전체발전비용은 1,451,089.7[원]으로서 강인최적화기법에 의한 운영이 결정적 기법에 의한 운영보다 196,477.9[원] 더 이득임을 알 수 있다. 강인한 최적기법에서는 가장 심각한 시나리오에 대해서 안정적인 전력공급이 되도록 운영을 하므로 공급지장 전력이 발생되지 않으나 결정적 기법으로 하나의 시나리오에 대비하여 운영하는 경우에는 심각한 시나리오가 발생할 시에 발생 확률은 작고 일시적이라 할지라도 전력공급이 부족하여 정전이 발생하는 경우도 일어난다. 발생하는 공급지장전력의 단가는 정전비용으로서 최고발전단가인 디젤발전단가의 10배로 가정하여 적용하였으며, 이러한 비용들이 반영되어서 표 2의 결과가 나온 것이다. 정전은 경제적인 면뿐만이 아니라 이로 인한 육체적, 정

표 2 시뮬레이션 결과에 의한 전체발전비용 비교

Table 2 Comparison of total generation costs according to the simulation results

	강인한 최적화 기법[원]	결정적 최적화 기법[원]	기법 간의 차이[원]
전체발전비용	1,254,611.8	1,451,089.7	196,477.9

신적, 삶의 위협의 고통을 고려하면 경제적 사회적 손실이 아주 크므로 수용가의 종별과 정전시간에 따라 정전비용 단가에 큰 차이가 있지만 일반적으로 여기서 적용한 수치보다는 더 높은 비용으로 적용할 수 있을 것이다[13]. 이러한 관점에서 보면 강인최적화기법에 의하여 운영하는 것이 바람직할 것이다.

4. 결 론

신재생 에너지는 자연 친화적인 에너지라는 장점이 있지만, 전력계통 운영 측면에서 보면 간헐적으로 발전되는 에너지원이어서 정확도가 높게 예측하기가 어려우며 랜덤하게 변하는 확률적인 특성이 강하다. 이러한 특성을 제대로 분석하기 위하여 랜덤하게 변하는 신재생발전을 고려하는 확률적인 마이크로그리드의 운영 기법 연구가 필요하고, 이러한 점들을 고려하여 환경과 여러 조건들이 변하더라도 안정되게 마이크로그리드를 운영할 수 있는 강인한 최적운영기법이 요구되고 있다.

본 논문에서는 실제 현장에서 사용되고 있는 최적운영 해를 구하는 기존의 결정적 기법의 틀을 그대로 유지하면서 신재생에너지와 부하의 불확실성을 고려하여 확률적인 효과를 반영할 수 있도록 하기 위하여 확률적 해석기법으로서 Monte-Carlo method를 적용하였다. 신재생에너지와 부하의 불확실성을 고려하는 강인한 최적운영의 해를 보다 더 효율적이고 간편하게 구하기 위하여, 신재생발전의 불확실성을 등가의 부하의 불확실성으로 부하와 통합하여 고려하는 새로운 '가상등가부하변동밴드'의 개념을 도입하였다. '가상등가부하변동밴드'를 적용하여 이의 상한치와 하한치를 더 체계적으로 결정하고, 랜덤하게 변화하는 통합된 시나리오 중에서 가장 심각한 시나리오를 선정하여 이에 대해 강인한 최적해를 쉽게 구하는 단순화된 강인 최적 운영 기법을 제시하였다. 또한 목적함수에 공급전력이 불충분하여 공급장치가 발생하는 경우도 고려하기 위하여 페널티함수를 도입하여 정전비용을 목적함수에 반영하는 최적운영의 모델링이 제시되었다. 이러한 모델을 독립운전 모드의 가상의 마이크로그리드의 시스템에 적용하여 그 효과를 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2015년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

[1] Chih-Chiang Hua, "Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery", The 2010 International Power Electronics Conference, pp. 1478-1483, 2010.

[2] TAN Ying, LV Zhilin, LI Suchua, "Stand-alone micro-grid distributed generator optimization with different battery technologies", Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, pp.2651-2656, 2015.

[3] L. Xie and M. Ilic, "Model predictive economic/environmental dispatch of power systems with intermittent resources," in IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Jul. 2009.

[4] Hak-Ju Lee, Woo-Ku Cha, Il-Kun Song and Yoon Yong-Tae, "Development of Economic based Optimal Operation Program for Microgrid," Journal of KIEE, Vol.23, No.12, pp. 106-114, 2009.

[5] H.-M. Kim, and T. Kinoshita, "A Multiagent System for Microgrid Operation in the Grid-interconnected Mode," Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 246-254, 2010.

[6] W. Gu, Z. Wu, and X. Yu, "Microgrid Economic Optimal Operation of the Combined Heat and Power System with Renewable Energy," Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Jul. 2010.

[7] Byung Ha Lee, "A Study on Methodology of Optimal Operation of BESS and Diesel Generators in a Microgrid Considering Efficiency Characteristics according to the Power Ratios of Diesel Generators," Journal of KIEE, Vol.65, No.4, pp. 539-546, 2016.

[8] D. Ke, C. Y. Chung, and Y. Sun, "A novel probabilistic optimal power flow model with uncertain wind power generation described by Customized Gaussian Mixture Model," IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 7, No. 1, pp. 200-212, 2016.

[9] Miao Fan, "A Novel Optimal Generation Dispatch Algorithm to Reduce the Uncertainty Impact of Renewable Energy", Proceedings of 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-5, Jul. 2016.

[10] G. Liu, Y. Xu, and K. Tomsovic, "Bidding Strategy for Microgrid in Day-Ahead Market Based on Hybrid Stochastic-Robust Optimization", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, Vol. 7, No. 1, pp. 227-237, Jan. 2016.

[11] C. Peng, P. Xie, L. Pan, and R. Yu, "Flexible Robust Optimization Dispatch for Hybrid Wind/Photovoltaic/Hydro/Thermal Power System", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, Vol. 7, No. 2, pp. 751-762, Mar. 2016.

[12] R. Shi, C. Sun, Z. Zhou, L. Zhang, and Z. Liang, "A robust economic dispatch of residential microgrid with wind power and electric vehicle integration", Proceedings of 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 3672-3676, Jul. 2016.

[13] D. Cheng and B. Venkatesh, "Literature survey and comparison of consumer interruption costs in North America and Europe", 2014 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1-7, May. 2014.

저 자 소 개



이 병 하 (Byung Ha Lee)

1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1979년~1994년 한전 기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수. 2007년~2008년 University of Illinois(Urbana-Champaign) 초빙교수.

Tel : 032-835-8437

E-mail : bhlee@inu.ac.kr