

신재생에너지발전의 확률적인 특성과 탄소배출권을 고려한 마이크로그리드 최적 운용

A Study on Optimal Operation of Microgrid Considering the Probabilistic Characteristics of Renewable Energy Generation and Emissions Trading Scheme

김지훈* · 이병하*
(Ji-Hoon Kim · Byung Ha Lee)

Abstract - A microgrid can play a significant role for enlargement of renewable energy sources and emission reduction because it is a network of small, distributed electrical power generators operated as a collective unit. In this paper, an application of optimization method to economical operation of a microgrid is studied. 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, wind power systems. Both of thermal loads and electrical loads are included here as loads. Also the emissions trading scheme to be applied in near future, the cost of unit start-up and the operational characteristics of battery systems are considered as well as the probabilistic characteristics of the renewable energy generation and load. A mathematical equation for optimal operation of this system is modeled based on the mixed integer programming. It is shown that this optimization methodology can be effectively used for economical operation of a microgrid by the case studies.

Key Words : Microgrid, Optimal operation, CO₂, Monte-Carlo method, CHP, Wind power, PV, Emissions trading scheme

1. 서 론

국내 전력산업에서 산업발전과 생활수준의 향상으로 전력 수요는 급속히 증가하여 왔으나 전력설비의 건설은 순조롭게 진행되지 못함으로써, 현재는 전력이 부족한 상황으로 몰리고 있어서 안정적인 전력수급이 국가적인 주요 과제가 되고 있다. 기존의 대형발전소와 대규모송전선로의 건설은 밀양 송전탑 사태에서 보듯이 지역 이기주의와 환경문제 등과 맞물려 앞으로 갈수록 더 어려워질 것이다.

정부에서도 이의 심각성을 인지하고 대규모 발전단지 건설을 최소화하면서 분산형 발전소를 짓는 방향으로 전력공급 정책을 전환할 것이라고 밝혔다. 올 여름 같은 전력대란을 겪지 않으려면 장거리 송전탑을 건설해야 하는 대규모 발전 시설보다는 전력이 필요한 지역에서 직접 전력을 생산하는 분산형 발전소가 더 낫다는 것이다.

이런 관점에서 보면 신재생 전원 같은 분산전원을 주 전원으로 하는 친환경 시스템인 마이크로그리드는 이에 가장 부합하는 시스템으로 볼 수 있고, 앞으로 마이크로그리드의 확대보급이 예상된다.

마이크로그리드는 태양광발전, 풍력발전, 연료전지발전 등

의 신재생에너지와 소형열병합발전의 고효율발전기를 포함하는 소규모의 전력공급설비가 주류를 이루게 구성될 수 있으므로 친환경적이어서 수용가 가까이 설치될 수 있고, 전력손실도 줄이고 전력에너지를 효과적으로 얻을 수 있다. 마이크로그리드에서 중요한 역할을 수행하는 배터리 분야의 연구로서 분산전원에 에너지저장 배터리를 적용한 케이스에 대하여 배터리를 제어하여 주파수와 전압의 특성이 변화하는 특성을 연구하였다. 분산전원에 에너지저장 배터리를 적용하여 전력의 품질이 크게 향상될 수 있다는 것을 보여 주었다[1]. 배터리의 충전상태를 반영한 모델과 배터리의 효과적인 제어기법을 제시하고, PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션을 행하는 연구를 수행하였다[2]. 현재 전 세계적으로 다양한 목적에 따라 마이크로그리드의 실증단지를 구축하여 운영하고 있는 추세이다. 미국 오하이오주 콜럼버스에 위치한 CERTS 마이크로그리드의 실증단지, 일본과 캐나다와 유럽에서의 마이크로그리드의 실증단지와 관련한 자료들이 보고되었다[3]. 기존의 발전원과 신재생발전은 예측이 어렵고 변화가 크므로 이러한 신재생전원을 포함하는 분산발전 시스템에 대한 새로운 세대의 EMS의 개발을 위하여 고려할 사항들에 대하여 분석하여 발표하였다[4]. 저전압 보호를 위한 적절한 저전압보호장치의 세팅으로 분산전원시스템의 송전망에서 외란 발생 시 안전도를 유지하면서 열병합발전이 송전망으로부터 탈락하는 것을 예방하기 위한 연구가 수행되었다[5].

또한, 최근 마이크로그리드의 효과적인 운영과 관련하여 마이크로 그리드의 발전원의 특성과 연관된 선형·비선형 등 다양한 최적화 기법을 활용한 연구들이 많이 발표되었다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Incheon National University, Korea
E-mail : bhlee@incheon.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University, Korea

Received : September 6, 2013; Accepted : December 9, 2013

마이크로그리드와 연계된 배전망과의 전력수수의 최적화를 위한 모델링을 제시하고, 최적화를 위해 진화알고리즘을 적용하고 그 결과를 제시하였다[6]. 열병합발전과 가스엔진발전 등의 전원을 포함하는 마이크로그리드에서 그 지역의 열 수요와 전력수요를 모두 고려하여 연료소비를 최소화하는 기법을 연구하였다[7]. 제레의 발전원과 신재생전원으로 구성된 여러 조합의 경우에 대하여 마이크로그리드 에너지의 가격 메커니즘을 정식화하고 전력시장 분야의 연구를 위한 마이크로그리드 에너지 시장의 개념을 제시하였다[8]. 신재생전원과 같은 간헐적으로 발전하는 발전원을 포함하는 미래의 전력시스템에 대하여 경제적인 면과 환경적인 면을 함께 고려하는 급전문제를 해결하기 위하여 모델예측제어에 기반을 둔 기법을 제시하고, 간단한 시스템에서의 시뮬레이션을 통하여 그 가능성을 보여 주었다[9]. 열병합발전과 재생에너지와 배터리를 포함하는 마이크로그리드 시스템의 최적운용을 위한 정식화를 수행하고, 배터리의 피크부하 저감하는 효과를 반영하는 시뮬레이션 결과를 보여주었다. 향후의 연구로 실제 데이터와 예측 데이터 간에 에러가 존재하므로 확실적인 변수를 포함하는 연구가 수행되어야 함을 피력하였다[10]. 상위 시스템과 마이크로그리드의 연계 운전 모드에서 마이크로그리드의 운용을 위한 멀티에이전트 시스템을 제안하고, 계약망 프로토콜을 적용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 타당성을 보여주었다[11]. 기존 전원에 추가하여 연료전지와 열병합 발전을 포함하는 마이크로그리드의 최적운용을 위하여 선형계획법에 근거한 수리적 모델을 정식화하고, 사례연구를 통하여 제시한 모델의 타당성을 보여주었다[12]. 이탈리아에서 수행하는 GREAT 프로젝트의 첫 단계의 연구로서, DC 마이크로그리드의 일전 최적 발전계획 기법을 제시하고, 정수선형계획법을 적용하여 수행한 결과를 간단한 시뮬레이션을 통하여 보여 주었다[13]. 신재생에너지를 포함한 마이크로그리드의 최적운용을 위한 발전계획 방안을 DP를 이용하여 제시하고 그 효용성을 사례연구로 보여주었다[14].

그러나, 위에 기술한 마이크로그리드의 최적운영과 관련된 논문에서는 신재생 발전의 확률적인 특성과 탄소배출권 등이 고려되지 않았다.

본 논문에서는 태양광발전과 풍력발전의 예상하기 어려운 발전력에 대하여 확률적인 기법을 도입하여 분석을 한다. 또한, 정부에서 2012년에 제정한 ‘배출권거래제법’에 따라 2015년에는 온실가스 배출권 거래제가 도입될 예정이므로 탄소배출권을 고려하여 그 효과를 반영한다. 그리고, 발전기 기동정지비용과 배터리의 충전 특성 등을 마이크로 그리드에 반영하여 보다 더 실제에 부합하는 최적운영이 되도록 연구를 수행한다. 마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델을 정식화하고, 혼합정수계획법으로 최적 해를 구한다. 마이크로그리드는 현재 상용화가 진행되고 있는 단계이므로 마이크로그리드 내의 열과 전력 부하는 기존의 특정 집단의 수요와 비슷한 패턴으로 발생할 것이라 가정하고 시뮬레이션을 수행하며, 사례연구를 통하여 타당성을 검증한다.

2. 마이크로그리드 내 전원의 최적운용

마이크로그리드는 기존의 광역 전력시스템으로부터 독립

된 분산전원을 중심으로 하는 국소적인 전력시스템을 말하는 것으로, 신재생에너지와 소형열병합발전의 고효율발전기 등을 포함하는 소규모의 전력공급설비로 구성되는 소규모의 전력망이다. 분산전원과 수용가에 필요한 열 등의 에너지 공급원, 부하, 각종 전원 및 부하를 제어할 수 있는 제어설비 등을 그룹화 하여 독립적으로 운전이 가능한 시스템을 구성하게 된다. 마이크로그리드는 광역기반 분산전원과 연계되어 운전하는 계통연계형 모드와 독립적으로 운영하는 독립운전모드 2가지가 있으며 시스템운영은 신뢰성 확보 및 경제성을 고려하여 운전하는 것이 중요한 문제이다. 따라서 전력과 열 부하에 맞게 탄력적으로 최적운용이 되도록 해야 한다. 여기서는 분산전원으로 태양광발전, 풍력발전, 연료전지의 신재생에너지원과 소형 열병합발전과 디젤발전을 포함하며, 충전 특성 등을 반영하는 배터리를 고려하고, 부하는 전력부하와 열부하를 모두 포함한다.

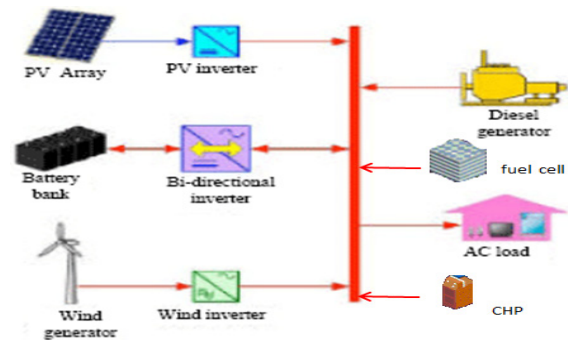


그림 1 마이크로그리드 구성
Fig. 1 Microgrid Diagram

2.1 배터리 특성

마이크로그리드의 최적운용을 위해서는 배터리의 요인도 작용한다. 배터리의 충전 및 방전을 통해 더 경제적으로 부하에 전력을 공급할 수 있기 때문이다.

전력계통에서 배터리의 주요 역할은 부하평활화(Load leveling), 전력제어(Power control), 피크 삭감(Peak shaving) 등이 있다. 아래의 그림 2는 배터리 충전 그래프이고, 그림 3은 배터리 방전 그래프이다. 배터리 충전 모드마다 충전량 및 충전 속도가 변하며 일반적으로 배터리는 짧은 시간에 약 70~80% 정도 충전된다. 본 논문에서는 배터리의 충전 특성 등을 시뮬레이션에 반영하기 위하여, 선택된 배터리의 충전 특성을 가로축과 세로축에 따라 양자화하여 표로 만들어 컴퓨터에 프로그램으로 입력시키고 배터리의 상태에 해당되는 표의 값을 사용하여 근사적으로 반영하였다. 이러한 배터리의 충전 특성을 이용하여 저렴한 심야전력에 전력을 충전하였다가 첨두부하 시간대에 방전하도록 설정하였다. 각 배터리의 특성과 용량 및 기타요인에 따라 충전·방전곡선은 달리 변할 수 있다.

2.2 탄소배출권 거래제도

EU는 2001년부터 ETS(Emissions trading scheme, 배출권 거래제)의 도입을 확정하고 국제적 탄소거래시장이라는

새로운 제도를 진행해 왔다. 정부에서 일정량의 탄소감축량을 할당한다. 그리고 감축시키지 못한 업체 및 기타 발전사업자의 경우 탄소배출권을 구입하여야 한다. 이 배출권의 거래가격은 1Ton당 약 10~15유로로 거래되며(그림 4), 온실가스배출량 감축을 위해 앞으로 전 세계적으로 필수적으로 실시해야 할 제도이다.

현재 국내에서는 2015년부터 정식으로 온실가스 배출권 거래제도가 도입될 예정이며, 1[Ton]당 약 12000원에 정부에서 구매하고 있다. 분산전원 중 신재생에너지원은 탄소를 배출하지 않기 때문에 마이크로그리드 내에서 많은 이점을 가진다. 최적 운용 시에 탄소배출권 거래가격에 따라 분산전원의 발전운용 측면이 변하게 될 것이다.

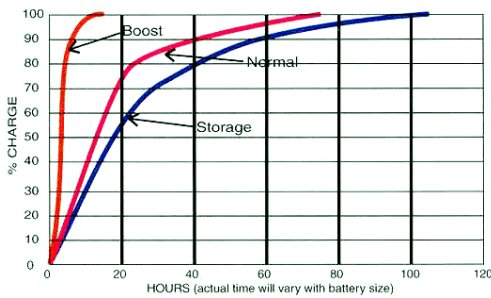


그림 2 배터리 충전 곡선[15]
Fig. 2 Battery charge curve

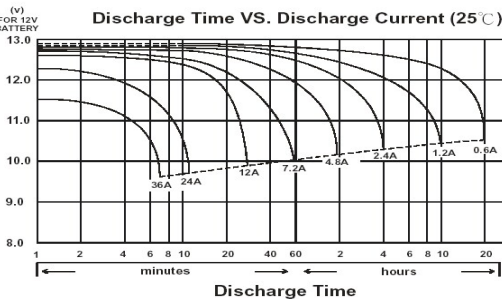


그림 3 배터리 방전 곡선[16]
Fig. 3 Battery discharge curve

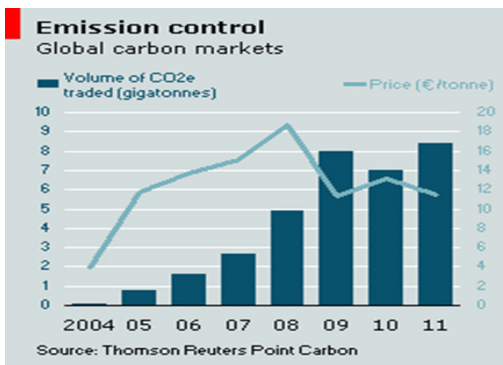


그림 4 탄소배출권 가격[17]
Fig. 4 CO2 Emission Price

3. 마이크로그리드 최적운용 정식화

3.1 목적 함수

$$\begin{aligned}
 Min C = & \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^J C_j \cdot P_{DG-j} \cdot u_{t,j} + SU_{j-t} \right. \\
 & + \sum_{k=1}^K C_k \cdot P_{CHP-k} \cdot u_{t,k} + SU_{k-t} \\
 & + \sum_{l=1}^L C_l \cdot P_{PV-l} \cdot u_{t,l} + \sum_{m=1}^M C_m \cdot P_{Wind-m} \cdot u_{t,m} \\
 & + \sum_{n=1}^N C_n \cdot P_{Fuel-n} \cdot u_{t,n} + SU_{n-t} \\
 & + \sum_{o=1}^O C_o \cdot P_{PLB-o} \cdot u_{t,o} + SU_{o-t} \\
 & + PR_{emi-t} \cdot CO2_{emi-t} \\
 & \left. + PR_{B-t} \cdot P_{B-t} - PR_{S-t} \cdot P_{S-t} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

마이크로그리드 최적운용 측면에서 운용비용을 혼합정수 계획법에 근거하여 위와 같이 수식화 하였다. 여기서 분산전원으로써 디젤발전, 열병합발전, 태양광발전, 풍력발전, 연료전지를 사용하였으며 또한 탄소배출권, 발전기의 기동정지비용과 수전 및 역송단가를 고려하였다. 배터리의 경우 목적함수에 추가되지 않는다. 발전기의 On/Off 상태는 정수형으로 처리하고 발전기의 출력 및 기타변수들을 실수형으로 처리하였다.

- T = 일일운용구간수
- t = 일일운용구간 변수
- j = 디젤발전기 변수
- J = 디젤발전기수
- k = 열병합발전기 변수
- K = 열병합발전기수
- l = 태양광발전모듈 변수
- L = 태양광발전모듈수
- m = 풍력발전기 변수
- M = 풍력발전기수
- o = 침두부하보일러 변수
- O = 침두부하보일러의 수
- C_j = j 번째 디젤발전기 발전단가 [원/kWh]
- C_k = k 번째 열병합발전기 발전단가 [원/kWh]
- C_l = l 번째 태양광발전기 발전단가 [원/kWh]
- P_{DG-j} = j 번째 디젤발전기의 발전량 [kWh]
- P_{CHP-k} = k 번째 열병합발전기의 발전량 [kWh]
- P_{PV-l} = l 번째 태양광발전기의 발전량 [kWh]
- C_m = m 번째 풍력발전기 발전단가 [원/kWh]
- C_n = n 번째 연료전지 발전단가 [원/kWh]
- C_o = o 번째 침두부하보일러의 발전단가 [원/kWh]
- P_{Wind-m} = m 번째 풍력발전기의 발전량 [kWh]
- P_{Fuel-n} = n 번째 연료전지의 발전량 [kWh]
- P_{PLB-o} = o 번째 침두부하보일러의 발전량 [kWh]
- PR_{emi} = CO2 배출거래가격 [원/tCO2]
- PR_{B-t} = t 번째 구간의 전력구입가격 [원/kWh]
- PR_{S-t} = t 번째 구간의 전력판매가격 [원/kWh]
- P_{B-t} = t 번째 구간의 전력구입량 [kWh]
- P_{S-t} = t 번째 구간의 전력판매량 [kWh]
- $CO2_{emi-t}$ = t 번째 구간 CO2 배출량 [tCO2]
- $u_{t,j}$ = 발전기 j 의 t 시간대 on/off 상태 (binary)
- $u_{t,k}$ = 발전기 k 의 t 시간대 on/off 상태 (binary)
- $u_{t,l}$ = 발전기 l 의 t 시간대 on/off 상태 (binary)
- $u_{t,m}$ = 발전기 m 의 t 시간대 on/off 상태 (binary)
- $u_{t,n}$ = 발전기 n 의 t 시간대 on/off 상태 (binary)
- $u_{t,o}$ = 발전기 o 의 t 시간대 on/off 상태 (binary)

SU_{j-t} = 디젤발전기동정지비용
 SU_{k-t} = 열병합발전기동정지비용
 SU_{n-t} = 연료전지기동정지비용
 SU_{o-t} = 첨두부하보일러기동정지비용

$$SU_{j-t}^{up/dn} = u_{t,j} \cdot I(x_{t-1,j} < 0)S_j + (1-u_{t,j}) \cdot (C_j^{fix} + I(x_{t-1,i} > 0)T_i) \quad (2)$$

$$SU_{k-t}^{up/dn} = u_{t,j} \cdot I(x_{t-1,k} < 0)S_j + (1-u_{t,k}) \cdot (C_k^{fix} + I(x_{t-1,k} > 0)T_k) \quad (3)$$

$$SU_{n-t}^{up/dn} = u_{t,n} \cdot I(x_{t-1,n} < 0)S_j + (1-u_{t,n}) \cdot (C_n^{fix} + I(x_{t-1,n} > 0)T_n) \quad (4)$$

$$SU_{o-t}^{up/dn} = u_{t,o} \cdot I(x_{t-1,o} < 0)S_j + (1-u_{t,o}) \cdot (C_o^{fix} + I(x_{t-1,o} > 0)T_o) \quad (5)$$

여기서 S,T는 분산전원의 기동 및 정지 시간당 단가, C_i^{fix} 은 고정비용, $u_{t,(j,o,k)}$ 는 시간구간 t에서의 분산전원 제어 유닛으로 "0"은 해당 분산전원의 Off를 "1"은 On을 의미한다. 또한 $x_{t,(j,o,k)}$ 는 분산전원이 운전, 정지된 누적시간을 나타내는 상태변수이다[14].

3.2 제약조건

분산전원은 각각 최소 출력 및 최대출력 사이의 범위 내에서 운전해야 한다. 따라서 마이크로그리드의 분산전원은 각 발전기의 최소출력 이상, 최대 출력 이하의 범위 내에서 운전하여야 하는 제약조건이 가해진다.

또한, 마이크로그리드 최적운용을 위해서 구간별 열 및 전기 수요량을 분석하여 부하에 일치하여 발전해야 하므로 수식화는 아래와 같이 할 수 있다.

부하의 전력 수요량은 신재생에너지 발전량, 열병합 발전량, 디젤발전량, 상위 계통으로부터의 전력 구입량 및 상위 계통으로의 전력판매량의 합과 같다. 또한 에너지저장시스템(배터리)의 전력저장 기능을 통하여 특정구간에 따라서 피크 부하를 담당하기 때문에 위와 같은 변수들을 고려하여 최적운용을 위한 특정 t 구간의 전력수요량은 아래의 식(6)과 같이 구성할 수 있다.

$$P_{LOAD-t} = P_{DG-t} + P_{CHP-t} + P_{PV-t} + P_{Wind-t} + P_{B-t} - P_{S-t} + P_{Cha-t} - P_{Dis-t} \quad (6)$$

P_{LOAD-t} : t번째 구간 전력수요량[kWh]

P_{DG-t} : t번째 구간디젤발전기 전력생산량[kWh]

P_{CHP-t} : t번째 구간 CHP의 전력생산량[kWh]

P_{PV-t} : t번째 구간태양광 전력생산량[kWh]

P_{Wind-t} : t번째 구간풍력발전 전력생산량[kWh]

P_{B-t} : t번째 구간 전력구입량[kWh]

P_{S-t} : t번째 구간 전력판매량[kWh]

P_{Cha-t} : t번째 구간배터리 충전량[kWh]

P_{Dis-t} : t번째 구간배터리방전량[kWh]

부하의 열 수요량은 열과 전력을 동시에 생산하는 열병합 발전과 첨두부하 보일러 그리고 연료전지에 의해 충족된다.

열병합 발전과 연료전지의 경우 전력과 열을 같이 생산하므로 설비의 열전비에 의하여 생산량이 정해진다. 따라서 t 구간의 열수요량 수식은 아래 식(7)과 같이 구성된다.

$$H_{Load-t} = (P_{CHP-t} \cdot CHP_rate + P_{Fuel-t} \cdot Fuel_rate) \times 0.86 + H_{PLB-t} \quad (7)$$

H_{Load-t} : t번째 구간열생산량[Mcal]

H_{PLB-t} : t번째 구간에서 첨두부하보일러의 열생산량[Mcal]

CHP_rate : 열병합발전의 열전비

$Fuel_rate$: 연료전지발전의 열전비

탄소배출량은 신재생에너지원의 발전에서는 발생되지 않고 열병합발전, 첨두부하 보일러, 디젤발전, 전력구입량에 의해 발생된다. 각 설비의 연료사용량을 가정하고 국제협약체인 IPCC의 탄소배출계수를 이용하여 탄소배출량을 산출한다. 즉, 열병합발전 및 첨두부하보일러는 LNG를 연료원으로 사용하고 디젤발전은 경유를 연료원으로 가정하여 수식을 구성한다.

따라서 탄소배출량은 식(8)과 같이 구성된다. 탄소감축량은 신재생에너지원의 발전량에 의해 식 (9) 만큼이 된다.

$$CO2_{emi-t} = [(S_{CHP-t} + S_{PLB-t}) \times CO2_{emif(1)} \times TOE_Conv_1] + (S_{DG,t} \times CO2_{emif(2)} \times TOE_Conv_2) \times \frac{44}{12} + (P_{B-t} \times CO2_{emif(3)}) \quad (8)$$

$$CO2_{red-t} = (P_{PV-t} + P_{Wind-t} + P_{S-t}) \times CO2_{emif3} \quad (9)$$

$$S_{CHP-t} = P_{CHP-t} \times 0.273 \quad (10)$$

$$S_{PLB-t} = P_{PLB-t} \times 0.273$$

$$S_{DG-t} = P_{DG-t} \times 0.11$$

$CO2_{emi-t}$: t구간탄소배출량[tCO2]

$CO2_{red-t}$: t구간탄소감축량[tCO2]

$CO2_{emif(1)}$: 탄소배출계수(LNG: 0.637)

$CO2_{emif(2)}$: 탄소배출계수(경유: 0.837)

$CO2_{emif(3)}$: 탄소배출계수(전력: 0.453)

$\frac{44}{12}$: 이산화탄소분자량

$\frac{44}{12}$: 탄소원자량

S_{CHP-t} : CHP연료사용량(Nm³)

S_{PLB-t} : 첨두부하보일러 연료사용량(Nm³)

S_{DG-t} : 디젤발전 연료사용량(L)

TOE_conv_1 : 석유환산톤(LNG : 0.955)

TOE_conv_2 : 석유환산톤(경유 : 0.845)

3.3 마이크로그리드 운용 최적화의 절차도

본 논문에서 수행한 최적화 과정에 관한 절차도는 그림 5에 제시되어있다. 상위 그리드와 마이크로그리드의 데이터들을 입력하고, 급전 당일의 전날 부하 및 신재생전원 발전을 예측하고, 이에 근거하여 급전당일의 발전계획을 수립한다. 이의 과정은 기존의 결정적 기법과 동일하다. 신재생 발전의 경우 날씨 및 기타 영향에 따라 예측치 못한 결과로 인해 발전량이 현격하게 낮아 질 수 있으므로, 확실적인 기법을 적용하여 표준오차와 신재생전원 발전의 임의의 캐이

스의 수인 n 의 값을 선택하도록 한다. 지정된 표준오차에 일치시켜 확률적인 표본의 케이스들을 무작위로 n 개 선정하고 Monte-Carlo Method를 사용하여 각 케이스들에 대한 최적해들을 구한다. 발전기기동정지비용 등의 목적함수를 고려하기 위하여 혼합정수계획법으로 정식화하고 이의 해를 구하는 알고리즘으로 분지한계기법(Branch-and-Bound Method)이 적용된다. Monte-Carlo Method를 사용하여 각 케이스들에 대하여 최적해들을 구한 후에 최종적으로 최소자승법을 적용하여 전 케이스들을 고려한 최적해를 구하여, 마이크로 그리드의 최적운영방안을 도출한다.

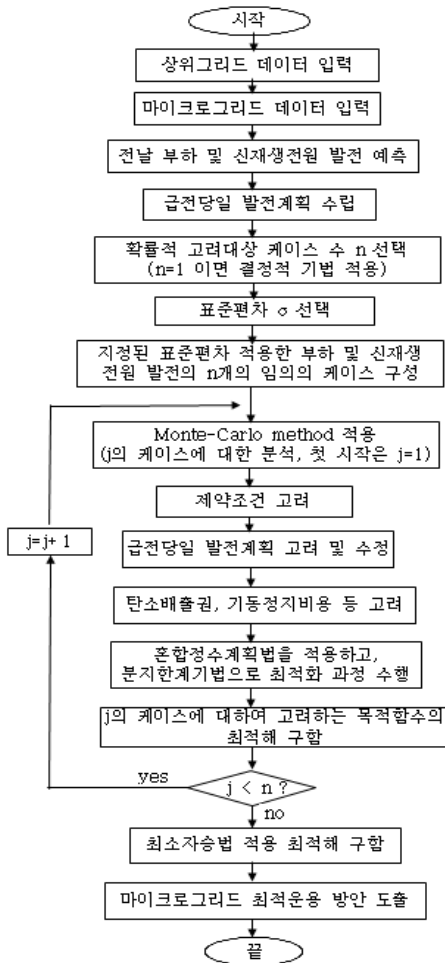


그림 5 마이크로그리드 운영 최적화의 절차도
Fig. 5 The procedure for determination of optimal operation of microgrids

4. 사례연구

본 논문에서는 비용 최소화를 통해 마이크로그리드의 경제적 최적운전을 위한 방안을 제시하고자 한다.

기존의 발표된 논문은 신재생 발전의 랜덤하게 변화하는 특성과 탄소배출권 거래비용을 포함한 최적화가 이루어져 있지 않았다. 따라서 본 논문에서는 이러한 점을 착안하여 신재생발전량의 확률적인 변화를 고려하고 탄소배출권을 고려하여 좀 더 실제와 부합하는 최적화를 실시하였다.

최적운영계획을 수립하기 위해 가상의 마이크로그리드를 고려하며, 이 마이크로 그리드는 1시간당 약1200[kWh]의 전력수요량과 약 0.9[Gcal]의 열 수요량을 가지는 소형 시스템이라고 가정한다. 총 24개의 구간을 구성하여 1시간 간격마다 최적 운영계획을 수립한다.

신재생발전량의 패턴으로는 태양광 발전량의 경우 평균적인 태양광 발전 이용률과 기상청의 풍속데이터의 패턴과 비슷하다고 가정하고, $\pm 20\%$ 의 표준오차를 가지는 발전량을 랜덤하게 산출한 후 Monte-Carlo Method를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

또한 가상의 부하 패턴을 설정한 후 확률적인 특성을 반영하기 위하여 일정 패턴에 난수를 곱하여 $\pm 10\%$ 의 표준오차를 가지는 부하량을 랜덤하게 산출하고 Monte-Carlo Method를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

아래의 그림 6과 7은 각각 전력과 열 수요량의 그래프를 나타내며, 진한 검은색 실선은 시간대별로 최소자승법을 이용하여 산출한 각 Case들의 평균값을 나타낸다.

고려한 마이크로그리드의 분산전원데이터와 열전비, 배터리의 관련 데이터들이 각각 표 1, 2, 3에 제시되어 있다.

본 연구에서는 열과 전력망이 커플링 되어 있는 마이크로 그리드에서 전력과 열부하를 동시에 고려하는 최적운영을 목표로 하기 때문에 3장에서 기술한 제약조건인 식 (6), 식 (7)을 모두 만족해야하므로 최적해를 구하는 것이 상당히 까다롭다.

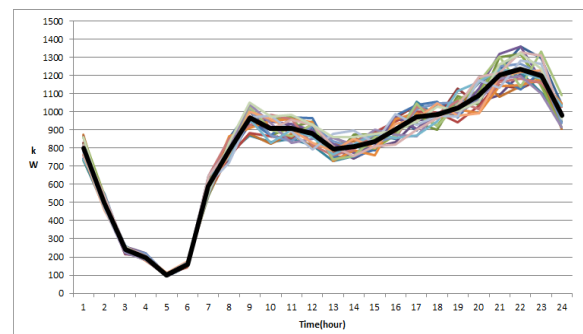


그림 6 전력 부하 패턴
Fig. 6 Pattern of power load

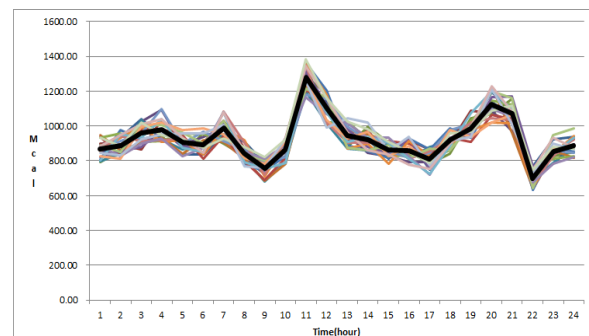


그림 7 열 부하 패턴
Fig. 7 Pattern of heat load

표 1 분산전원별 데이터

Table 1 Data of energy sources

Case A	Cost (원/kWh)	Min. production capacity (kWh)	Max. roduction capacity (kWh)
DG	170	0	300
CHP1	155	0	600
PLB	130	0	150

Case B	Cost (원/kWh)	Min. production capacity (kWh)	Max. production capacity (kWh)
DG	170	0	200
CHP2	145	0	400
CHP3	155	0	300
PV	0	0	200
Wind	0	0	150
Fuel	110	0	50
PLB	130	0	150

표 2 전력에 대한 열의 비율

Table 2 The heat and electric power ratio

Facility (kWh)	CHP1	CHP2	CHP3	Fuel
ratio	1.5	1.2	1.7	0.8

표 3 전력저장장치의 데이터

Table 3 Date of energy storage system.

Initial capacity (kWh)	Min. capacity (kWh)	Max. capacity (kWh)
5	0	100

5. 시뮬레이션 및 경제성 분석

5.1 디젤발전 및 열병합 발전만 고려하는 경우(경우A)

최적운영의 해를 구하는 기법으로 혼합정수계획법을 사용한다. 배터리 충전, 방전상태의 경우 정수형 변수로 지정하고 각 분산전원의 발전량 및 배터리 충·방전량의 경우 실수형 변수로 지정하여 최적화한다. 구간별 전력요금은 표 4에 제시되어 있다.

총 20개 Case의 전력 및 열부하 패턴을 각각 비용최적화하고 그 값의 평균치를 경우 A라고 나타낸다. 경우 A를 최적운영을 위한 모델링은 아래의 그림 8과 같이 산출되었다.

우선 열병합 발전의 경우 상대적으로 다른 발전에 비해 발전단가가 낮아 일일 전력생산량이 가장 많고 기저부하를 담당한다. 한 디젤발전의 경우 구간별 수전단가에 따라 발전량을 조절한다.

즉, 구입단가가 디젤발전기 발전단가보다 낮으면 수전량을 늘리고(1,20~24구간) 판매단가가 디젤발전기 단가보다 높으면 전력을 최대한 생산하여 오히려 상위전력계통에 판매함으로써 이익을 취한다.(11~16구간) 또한 기동정지비용과 탄소배출비용도 추가되었기 때문에 21~24구간의 경우

표 4 구간별 전력요금(SMP 단가)

Table 4 Power Price by section(SMP Price)

시간 (hour)	수전단가 [kWh/원]	역송단가 [kWh/원]
1	159	158
2	158	157
3	157	156
4	161	160
5	168	167
6	174	173
7	176	174
8	178	177
9	182	181
10	182	181
11	182	181
12	185	184
13	185	184
14	183	182
15	183	182
16	182	181
17	182	181
18	182	181
19	179	178
20	176	175
21	174	173
22	170	169
23	166	165
24	163	162

디젤발전단가가 수전단가보다 더 낮음에도 불구하고 발전을 하지 않거나 작게 발전하는 이유가 된다.

전력저장장치 운용의 경우 앞에 언급한바와 마찬가지로 심야에 전력을 충전하게 하고 피크부하때 부하 삭감을 위해 사용되게 하였다. 특히 구간3의 경우 일일 전력구입가격이 가장 낮으므로 계통을 효율적으로 운용하기 위해 3 구간에 충전하고 전력가격이 가장 높고 부하량도 큰 20~21구간에 충전했던 약 100kw를 방전하여 피크부하를 더욱 경제적으로 운용한다.

표 5에는 분산전원의 평균 일일 연료사용량이 제시되어 있다.

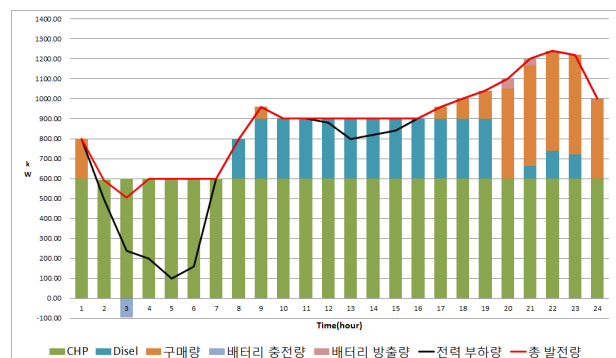


그림 8 전력 생산량 (경우 A)

Fig. 8 Power generation amount(Case A)

열 부하의 경우 상대적으로 열과 전력을 동시에 생산하는 열병합발전의 효율이 더 높으므로 기저부하를 담당하며 피크부하에서만 첨두부하 보일러를 운영 가능하다.

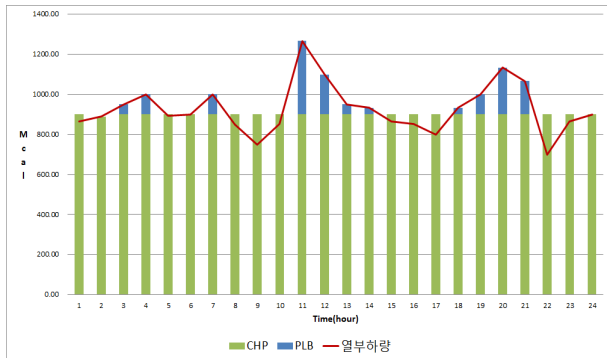


그림 9 열 생산량 (경우 A)
Fig. 9 Heat generation amount (Case A)

표 5 분산전원의 평균 일일 연료사용량
Table 5 Data of DG average daily consumption

분산자원	사용량
CHP1(Nm^3)	791.56
CHP2(Nm^3)	516.28
CHP3(Nm^3)	692.62
PLB(Nm^3)	350.61
Disel(L)	360.2

5.2 신재생에너지전원을 포함하여 고려하는 경우(경우B)

경우B에서는 신재생에너지를 포함하여 최적운영계획을 수립한다. 우선 경우A에 비하여 태양광발전, 풍력발전, 연료전지의 신재생에너지전원이 시설되어있다고 가정한다. 이에 따라 신재생전원 자체의 발전단가는 0원이기 때문에 신재생에너지전원이 우선적으로 발전된다고 가정한다.

신재생 발전량을 예측하기 위하여 태양광 발전량의 경우 평균적인 태양광 발전 이용률로부터 그리드 내의 태양광발전량을 산출하고(그림 12), 풍력발전량은 8월 평균 인천광역시 풍속데이터의 평균 풍속량을 통해 발전량을 예측한다(그림 13).

하지만 신재생에너지전원의 경우 환경적 요인 및 기타요인에 따라 발전량이 크게 변화를 받으므로 예측에 오차가 많이 발생하게 된다. 따라서 태양광 발전의 이용률과 풍력발전의 풍속에 표본오차 20%를 가지는 난수들을 설정하고 랜덤하게 변화하는 각 Case들을 구성하고 Monte-Carlo Method를 이용하여 시뮬레이션을 실행한 후에 최소자승법으로 기대값을 나타내었다. 이 기대값을 통해 태양광발전과 풍력발전에 대해 더 실제적인 현상에 부합하는 발전량을 산정할 수 있다.

신재생전원이 위에 언급한 바와 같이 발전량을 예측하고 나머지 열병합, 디젤, 연료전지의 최적운용을 통해 아래 그림 12와 같이 구간별 최적 전력생산량이 구성된다.

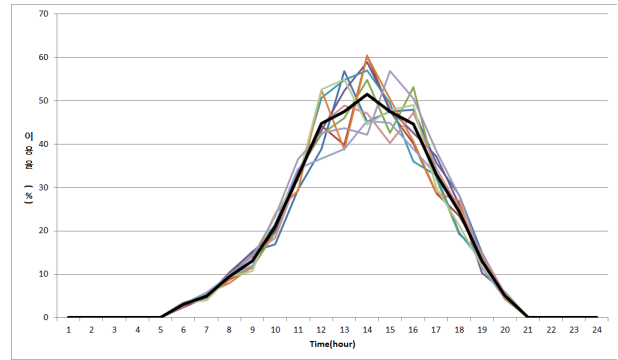


그림 10 태양광발전 이용률
Fig. 10 PV Utilization

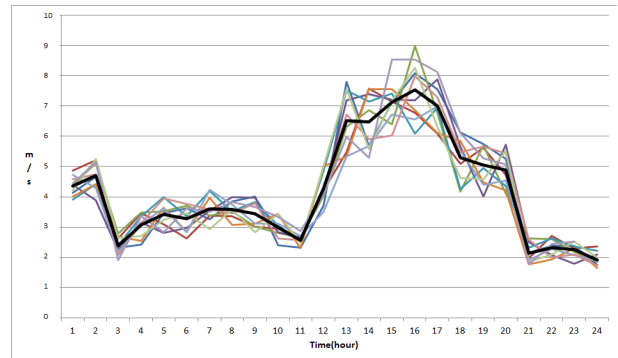


그림 11 풍력발전 평균풍속
Fig. 11 Average wind velocity of wind farm

경우 A와 비교해 보면 같은 전력량을 생산하더라도 추가된 신재생에너지원과 탄소배출량을 고려하여 최적운용을 실시하게 된다. 신재생발전의 경우 기동·정지 비용이 발생하지 않기 때문에 보다 탄력적으로 운전가능하다.

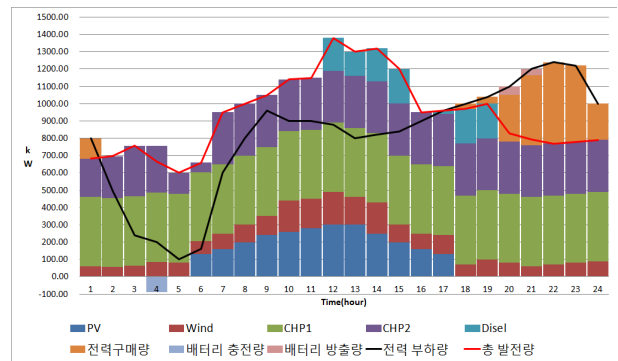


그림 12 각 구간별 전력생산량(경우 B)
Fig. 12 Power generation amount in each interval (Case B)

태양광, 풍력, 연료전지 추가에 따른 디젤 및 열병합발전의 전력생산량이 변화하였다.

또한 열 부하에서는 연료전지가 기저부하로 사용되게 되고 그 후 열병합발전을 통해 열수요를 충당하며 피크부하때 첨두부하 보일러가 부하를 담당하게 된다. 그림 13에서 각 구간별 열생산량이 제시되어 있다.

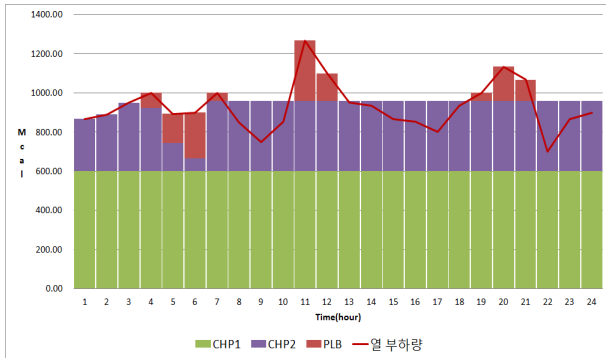


그림 13 각 구간별 열 생산량 (경우 B)
Fig. 13 Heat generation amount in each interval (Case B)

표 6에 시뮬레이션 결과가 제시되어 있다. 경우 A와 B를 비교해보면 일일 탄소배출량은 약 4[tCO₂] 만큼 차이가 나며 일일 발전비용의 차이가 약 60만원차이가 난다. 신재생 에너지 발전력을 전체설비의 약 30% 정도로 설정한 본 연구의 적용 사례에 대해서는 탄소배출권과 신재생에너지발전의 도입에 의해 전체 운영비용의 약 15%를 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

본 논문에서의 시뮬레이션 결과는 계통계획의 관점은 고려치 않고 마이크로그리드의 분산전원 설비들이 갖추어진 조건하에서 계통운영의 관점에서만 분석한 것으로서, 현재 신재생 전원의 설치비용이 기존의 타 전원의 설치비용에 비하여 상당히 비싸므로 설치비용을 고려하면 현 단계에서는 투자에 적합한 경제성이 나오기 어려우며, 이와 관련한 자세한 분석을 위해서는 추가 연구가 필요하다.

표 6 시뮬레이션 결과

Table 6 Simulation result

	경우 A	경우 B
총비용(원)	3,025,057	2,460,235
CO ₂ 배출량 (tCO ₂)	22.11	18.61

6. 결 론

앞으로 대규모 발전단지 건설보다 분산형 발전소를 짓는 방향으로 전력공급 정책이 전환될 가능성이 높아지고 있어서, 신재생 전원 같은 분산전원을 주 전원으로 하는 친환경 시스템인 마이크로그리드의 확대보급이 예상되고 있다.

본 논문에서는 신재생에너지 발전력과 부하에 대하여 확률적인 기법을 도입하여 분석하고 향후 적용될 탄소거래비용과 발전기 기동정지비용 및 배터리 충·방전 특성을 고려함으로써 보다 더 실제와 부합하는 마이크로그리드 최적운영 기법을 제시하였다. 사례연구를 통하여 확률적으로 변화하는 신재생에너지발전과 부하량을 기반으로 신재생전원이 포함된 마이크로그리드의 보다 실제와 부합하는 최적운영 방안을 구할 수 있음을 보여주었다. 이 결과로 신재생에너지 발전을 도입하는 경우 탄소배출권을 고려하면 총비용을 어느 정도 절감시키는 경제적 효과가 있는지를 확인할 수 있었다.

향후 이번 시뮬레이션 분석을 기반으로 신재생발전기의 건설비, 발전시설 운영비 및 기타 비용을 종합하는 마이크로그리드의 경제성평가에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] K. Yukita, K. Ichyanagi, Y. Goto and K.Hirose, "A Study of Electric Power Quality using Storage System in Distributed Generation", 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, pp.1-4, Oct. 2007.
- [2] Ling Xu, Zhixin Miao, Lingling Fan, "Control of a battery system to improve operation of a microgrid", Power and Energy Society General Meeting, pp.1-8, Jul. 2012.
- [3] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papathanassiou, and N. Hatziargyriou, "Making microgrids work," IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 3, pp. 40 - 53, May 2008.
- [4] Y. Zhang, M. Mao, M. Ding, and L. Chang. "A Study of energy management for distributed generation systems", IEEE International Conference on Electric Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 2465-2469, Apr. 2008.
- [5] E.J. Coster, J.M.A. Myrzik, and W.L. Kling, "Grid Interaction of MV-connected CHP-plants during Disturbances", Power & Energy Society General Meeting, pp.1-8, Jul. 2009.
- [6] M. Parol and T. Wojtowicz, "Optimization of exchange of electrical energy between microgrid and electricity utility distribution network", Modern Electric Power Systems(MEPS) 2010 Proceedings of the International Symposium ,pp.1-6, Sept. 2010.
- [7] C. A. Hernandez-Aramburo, T.C. Green, and N. Mugniot, "Fuel Consumption Minimization of a Microgrid,," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, Issue. 3, pp. 673-681 ,May/June 2005.
- [8] A. Sinha, R. Lahiri, S. Byabortta, S. Chowdhury, P. Crussley, "Formulation of pricing mechanism for Microgrid energy," SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar , vol., no., pp.1-4, Jun. 2008.
- [9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Ji-Hye Lee and Byung Ha Lee, "Optimal Microgrid Operation Considering Fuel Cell and Combined Heat and Power Generation" Trans. KIEE, Vol.62, No. 5, pp.596-603. 2013.

[13] G. Carpinelli, A. Bracale, and P. Caramia, "The GREAT project: Integer linear programming-based day-ahead optimal scheduling of a DC microgrid" Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 12th International Conference, pp.573- 578, May 2013.

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

[15] http://www.progressivedyn.com/prod_details/charge_wizard

[16] <http://scienceshareware.com/bicycle-generaator>

[17] <http://eiuviews.com/index.php/tag/carbon>

저 자 소 개



김 지 훈 (金知勳)

1987년 11월 8일생. 2012년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2013년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



이 병 하 (李丙河)

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년~1994년 한전 기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수. 2007년~2008년 University of Illinois(Urbana-Champaign) 방문교수.
Tel : 032-835-8437
E-mail : bhlee@incheon.ac.kr