

연료전지와 열병합 발전을 고려한 마이크로그리드의 최적 운용

Optimal Microgrid Operation Considering Fuel Cell and Combined Heat and Power Generation

이 지 혜* · 이 병 하†
(Ji-Hye Lee · Byung Ha Lee)

Abstract - The increase of distributed power generation is closely related to interest in microgrid including renewable energy sources such as photovoltaic (PV) systems and fuel cell. By the growing interest of microgrid all over the world, many studies on microgrid operation are being carried out. Especially operation technique which is core technology of microgrid is to supply heat and electricity energy simultaneously. Optimal microgrid scheduling can be established by considering CHP (Combined Heat and Power) generation because it produce both heat and electricity energy and its total efficiency is high. For this reason, CHP generation in microgrid is being spotlighted. In the near future, wide application of microgrid is also anticipated. This paper proposes a mathematical model for optimal operation of microgrid considering both heat and power. To validate the proposed model, the case study is performed and its results are analyzed.

Key Words : Microgrid, Optimal operation, Fuel cell, CHP (combined heat and power)

1. 서 론

생활수준의 향상으로 인하여 증가하는 에너지 수요를 충족시키기 위해서는 안정적인 전력수급에 따른 장기적인 대책이 필수적이다. 그러나 최근 기후변화에 따라 전력 수요가 불안정해지고 있으며 수력, 화력 원자력 발전과 같은 종래의 공급 방식만으로는 안정적인 전력 공급에 한계점을 보이고 있다. 따라서 송배전 손실을 저감함으로써 에너지 이용 효율 제고 차원에서 대두되고 있는 분산형 전원에 관심이 고조되고 있다. 또한 소규모 분산 전원이 주 전원으로 포함되는 소규모 전력 시스템인 마이크로그리드의 확대 보급이 예상된다.

마이크로그리드는 신재생 전원을 주 전원으로 하는 친환경 시스템으로서 환경뿐만 아니라 경제적, 사회적 가치에도 기여한다[1]. 향후 5년간 마이크로그리드의 용량은 연평균 성장률(CAGR) 22%로 확대되고 2017년에는 4.7GW에 달할 전망으로 마이크로그리드에 대한 수요는 전 세계적으로 증가하고 있으며 다양한 분야에서 도입이 예상된다[2]. 실제로 EU, 일본, 미국 등은 다양한 목적의 마이크로그리드 실증 단지를 구축, 운영하고 있으며 이를 통하여 이 기술의 실용화를 계획하고 있다. 특히, 운용측면에서 마이크로그리드를 경제적으로 운용하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있는데, 마이크로그리드의 운용계획에 관한 연구는 대부분이 최적화에 기반하며 다양한 최적 기법에 의하여 최적운용계획을 수립할 수 있다[3-10].

한편, 열병합 발전은 전력 생산과정에서 발생하는 폐열을 이용하여 수용가에 온수를 공급하기 때문에 효율이 높은 발전원이다[11,12]. 이러한 열병합 발전은 주로 집단에너지 사업에 활용되고 있지만, 추후 연료전지를 포함한 소형 열병합 발전이 마이크로그리드에 도입될 전망이다.

마이크로그리드의 핵심기술인 운용 기술은 에너지 공급 측면에서 열과 전기를 동시에 공급하는 것으로서, 최소한의 비용으로 에너지 공급과 수요의 균형을 맞추는 것이 필수적이다. 마이크로그리드 내의 열부하와 전력부하는 열 공급원과 전력 공급원에 의하여 각각 공급되고 있다. 그러나 마이크로그리드 내에는 열과 전력망이 서로 커플링되어 있기 때문에 열과 전력을 동시에 생산하는 열병합 발전을 고려한다면 에너지 이용 효율을 증가시켜 더욱 경제적인 운용계획이 수립되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 열과 전력을 동시에 고려하는 운용계획을 수립하기 위하여 일반적으로 사용되는 가스 기반의 열병합 발전과 온실가스 배출이 1%이하이면서 청정에너지 시스템으로 불리는 연료전지를 모델링하였다. 이를 신재생 전원, 분산저장장치 그리고 부하로 이루어진 기존의 마이크로그리드에 추가함으로써 마이크로그리드의 최적 운용을 위한 수리적 모델을 정식화하고 선형계획법에 의하여 최적해를 구하고자 한다. 이때, 마이크로그리드는 현재 상용화가 진행되고 있는 단계이기 때문에 마이크로그리드 내의 열과 전력 부하는 기존의 특정 집단의 수요와 비슷한 패턴으로 발생할 것이라 가정하고 시뮬레이션을 수행한다. 또한 사례 연구를 통하여 본 논문에서 제안한 수리적 모델의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 마이크로그리드의 운용

마이크로그리드는 그림 1과 같이 분산전원, 분산저장장치,

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

E-mail : bhlee@incheon.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University

Received : January 29, 2013; Accepted : April 2, 2013

부하로 구성되어 신재생 에너지를 주 전원으로 하는 소규모 전력시스템이다. 분산전원에는 연료를 사용하는 디젤 발전기, 열병합 발전과 풍력발전, 태양광발전과 같이 연료사용 없이 자연으로부터 에너지를 얻는 신재생 발전원으로 구성되며 부하는 전력부하와 열 부하로 구성된다.

마이크로그리드의 운용에 있어서 중요한 요구사항은 에너지의 공급과 수요의 균형을 유지하는 것이며 마이크로그리드는 두 가지 모드에 의해서 운전이 가능하다. 전력계통에 연계되어 운전하는 계통연계형모드와 계통상황에 따라 독립적으로 운전할 수 있는 독립운전모드가 있다. 독립운전모드는 공급 신뢰도 제고를 목적으로 운용하는 반면에 계통연계형 마이크로그리드는 에너지 비용을 줄이는 경제적인 운용이 주된 목적이다. 일반적으로, 계통연계형모드에서 경제적인 운용은 최적화에 기반하며, 이는 각 구간별로 전력거래가격과 분산전원의 발전단가를 고려하여 초과/부족전력은 계통과 거래가 가능하고 필요에 따라서는 전력저장장치로 충·방전함으로써 최적 운용계획을 수립할 수 있다.

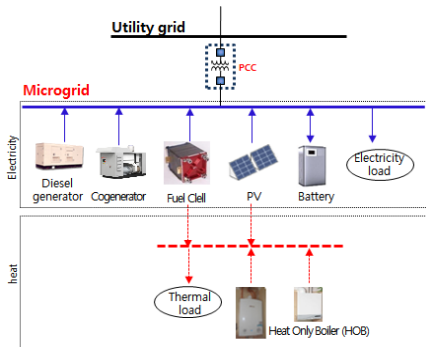


그림 1 마이크로그리드 구성
Fig. 1 Microgrid configuration

3. 열병합 발전과 연료전지

열병합 발전이란 하나의 에너지원으로부터 열과 전력을 동시에 발생시켜 에너지 이용 효율의 극대화를 추구하는 시스템이다. 열병합 발전설비는 용도에 따라 시스템의 종류가 다르며, 그 구성설비 또한 다르다[3]. 구성하는 주요기기에 따라 가스터빈, 증기터빈, 가스엔진, 디젤엔진, 연료전지 등이 있다. 열병합 발전 중 하나인 연료전지는 다른 열병합 발전과 달리 열역학적인 제한(Carnot cycle)을 받지 않기 때문에 기존 에너지원보다 효율이 높으며 직접 전기를 생산하기 때문에 고효율 발전이 가능하다. 또한, 연료전지는 일반 배터리와는 달리 재충전이 필요 없이 연료가 공급되는 한 계속해서 전기를 만들어낼 수 있으며 온실가스를 배출하지 않기 때문에 환경적인 측면에서 친환경 발전 시스템이다. 그림 2는 연료전지의 시스템을 나타낸 그림이다. 개질기(reformer)는 천연가스로부터 수소를 발생시키는 장치로서 시스템에 악영향을 주는 황, 일산화탄소 제어 및 시스템 효율향상을 위한 장치이다. 개질기를 통해 발생한 수소는 스택(stack)을 통해 원하는 출력으로 변환되어 부하에 공급하게 된다. 이 외에도 연료전지 시스템 내부에는 연료, 공기, 열회수 등을 위한 펌프류, blower, 센서 등과 같은 주변 보

조기기들이 있다[13-15].

본 논문에서는 간략 연료전지 모델을 이용하였으며, 보조 기기들에 대한 세부적인 모델링은 고려하지 않고, 전력과의 발생 관계를 선형적으로 모델링하였다.

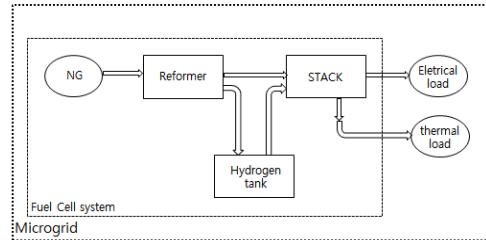


그림 2 연료전지 시스템
Fig. 2 Fuel Cell system

4. 최적운용 정식화

4.1 목적 함수

제시된 목적함수는 마이크로그리드의 운용비용에서 수익을 차감한 순이익이 최소화 되도록 식 (1)과 같이 정식화하였다. 본 논문에서는 최적화 기법 중 가장 널리 사용되는 선형계획법을 이용하여 최적해를 구하고자 한다. 식 (1)의 첫째 항은 디젤 발전기에서의 발전비용을 나타내고 둘째 항은 열병합 발전기에서의 발전비용, 셋째 항은 연료전지의 발전비용을 나타낸다. 연료전지의 운용비용은 대부분이 연료비용이며 연료가 전력으로 변환되는 경우의 효율을 포함시켜 비용함수를 계산한다[16]. 넷째 항은 전용보일러에서의 열 생산 비용을 나타내며, 다섯째 항은 전력을 구입하여 발생한 비용, 마지막 항은 전력을 계통에 판매하여 발생하는 수입을 나타낸다.

$$Min C = \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^M C_i \cdot P_{DSG-i} + \sum_{j=1}^N C_j \cdot P_{COG-j} + \sum_{k=1}^K C_k \cdot \frac{P_{FC-k}}{\eta_{FC}} + \sum_{q=1}^Q C_q \cdot P_{HOB-q} + PR_{B-t} \cdot P_{B-t} - PR_{S-t} \cdot P_{S-t}) \quad (1)$$

여기서,

- t = 일일 운용구간을 나타내는 식별자
- T = 일일 운용구간 수
- i = 디젤 발전기를 나타내는 식별자
- M = 디젤 발전기 수
- j = 열병합 발전기를 나타내는 식별자
- N = 열병합 발전기 수
- k = 연료전지를 나타내는 식별자
- K = 연료전지 수
- q = 전용보일러를 나타내는 식별자
- Q = 전용보일러 수
- C_i = i번째 디젤 발전기의 발전단가[원/kWh]
- P_{DSG-i} = i번째 디젤 발전기의 발전량[kWh]
- C_j = j번째 열병합 발전기의 발전단가[원/kWh]
- P_{COG-j} = j번째 열병합 발전기의 발전량[kWh]
- C_k = 천연가스의 가격[kWh]

$$\begin{aligned}
 P_{FC-k} &= k\text{번째 연료전지의 발전량[kWh]} \\
 \eta_{fc} &= k\text{번째 연료전지의 발전 효율[\%]} \\
 C_q &= 전력량으로 환산된 q번째 전용보일러의 열 생산 단가[원/kWh]} \\
 P_{HOB-q} &= 전력량으로 환산된 q번째 전용보일러의 열 생산량[kWh]} \\
 PR_{B-t} &= t\text{번째 구간의 전력구입 가격[원/kWh]} \\
 P_{B-t} &= t\text{번째 구간의 전력구입량[kWh]} \\
 PR_{S-t} &= t\text{번째 구간의 전력판매 가격[원/kWh]} \\
 P_{S-t} &= t\text{번째 구간의 전력판매량[kWh]}
 \end{aligned}$$

4.2 제약 조건

최적화 제약조건은 다음과 같다. 마이크로그리드의 분산 전원은 각 발전기의 최소출력 이상, 최대 출력 이하의 범위 내에서 운전하여야 하는데, 이는 식 (2)-(5)와 같다.

디젤 발전기의 출력 범위:

$$P_{DSG-i}^{MIN} \leq P_{DSG-i} \leq P_{DSG-i}^{MAX} \quad (2)$$

열병합 발전기의 출력 범위:

$$P_{COG-j}^{MIN} \leq P_{COG-j} \leq P_{COG-j}^{MAX} \quad (3)$$

연료전지의 출력 범위:

$$P_{FC-k}^{MIN} \leq P_{FC-k} \leq P_{FC-k}^{MAX} \quad (4)$$

전용보일러의 출력 범위:

$$P_{HOB-q}^{MIN} \leq P_{HOB-q} \leq P_{HOB-q}^{MAX} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 P_{DSG-i}^{MIN} &= i\text{번째 디젤 발전기의 최소출력량[kWh]} \\
 P_{DSG-i}^{MAX} &= i\text{번째 디젤 발전기의 최대출력량[kWh]} \\
 P_{COG-j}^{MIN} &= j\text{번째 열병합 발전기의 최소출력량[kWh]} \\
 P_{COG-j}^{MAX} &= j\text{번째 열병합 발전기의 최대출력량[kWh]} \\
 P_{FC-k}^{MIN} &= k\text{번째 연료전지의 최소출력량[kWh]} \\
 P_{FC-k}^{MAX} &= k\text{번째 연료전지의 최대출력량[kWh]} \\
 P_{HOB-q}^{MIN} &= q\text{번째 전용보일러의 최소출력량[kWh]} \\
 P_{HOB-q}^{MAX} &= q\text{번째 전용보일러의 최대출력량[kWh]}
 \end{aligned}$$

마이크로그리드내의 전력 부하의 수요량은 신재생 전원 및 연료를 사용하는 발전원의 발전량, 계통으로부터 구입한 전력량 그리고 운용구간 t에서 저장장치로부터 방전된 전력량의 합과 같으며 제약조건 (6)과 같이 수요공급의 법칙에 의하여 성립된다. 또한, 마이크로그리드의 운용비용을 최소화시키기 위하여 각 구간별 운용조건에 따라서 저장장치의 충전량, 계통으로 판매 가능한 전력량이 발생할 수 있으며, 이 경우에는 각 발전기와 구간별 운용조건에 따라 최적 운용하여 식 (6)을 만족시킨다.

$$\begin{aligned}
 P_{RDG-t} + \sum_{i=1}^M P_{DSG-i} + \sum_{j=1}^N P_{COG-j} + \sum_{k=1}^K P_{FC-k} + P_{B-t} + B_{disch-t} \\
 - P_{S-t} - B_{ch-t} - P_{LOAD-t} = 0
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 P_{RDG-t} &= t\text{번째 구간에서 신재생 전원에서의 발전량[kWh]} \\
 B_{disch-t} &= t\text{번째 구간에서 저장장치의 방전량[kWh]} \\
 B_{ch-t} &= t\text{번째 구간에서 저장장치의 충전량[kWh]} \\
 P_{LOAD-t} &= t\text{번째 구간에서 전력 수요량[kWh]}
 \end{aligned}$$

마이크로그리드내의 열 부하의 수요량은 열병합 발전기와 연료전지에서 발생한 출력 그리고 전용보일러에서 발생한 열 생산량과 같으며 이 관계는 식 (7)과 같다.

$$\sum_{j=1}^N H_{COG-j} + \sum_{k=1}^K H_{FC-k} + \sum_{q=1}^Q H_{HOB-q} = H_{LOAD-t} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 H_{COG-j} &= \text{전력량으로 환산된 } j\text{번째 열병합 발전기의 열 생산량[kWh]} \\
 H_{FC-k} &= \text{전력량으로 환산된 } k\text{번째 연료전지의 열 생산량[kWh]} \\
 H_{HOB-q} &= \text{전력량으로 환산된 } q\text{번째 전용보일러의 열 생산량[kWh]} \\
 H_{LOAD-t} &= \text{전력량으로 환산된 } t\text{번째 구간에서의 열 수요량[kWh]}
 \end{aligned}$$

열병합 발전기에서 발생한 열은 식 (8)에 의해서 열과 전력을 정해진 비율 내에서 생산이 가능하다[11].

$$H_{COG-j} \leq (1/E_j) \cdot P_{COG-j} \quad (8)$$

여기서,

$$E_j = j\text{번째 열병합 발전기의 1kWh의 발전량에 대한 열 생산량의 비율}$$

각 운용구간 동안 연료전지에서 생산된 열은 식 (9)에서 표현된 바와 같이 생산이 가능하다[16].

$$H_{FC-k} = P_{FC-k} \left(\frac{1}{\eta_{stack}} - 1 \right) \quad (9)$$

여기서,

$$\eta_{stack} = k\text{번째 연료전지의 1kWh의 발전량에 대한 열 생산 비율}$$

저장장치에서 방전 가능한 전력은 저장장치에 남아있는 전력량 내에서 방전이 가능하며 이는 제약조건 (10)과 같다[17].

$$0 \leq B_{disch-t} \leq B_{(t-1)} \quad (10)$$

여기서,

$$B_{(t-1)} = \text{저장장치에 남아있는 전력량[kWh]}$$

저장장치에서 충전 가능한 전력은 현재 충전되어 있는 전력량을 제외한 여분 범위 내에서 충전이 가능하며 이는 제약조건 (11)과 같다[17].

$$0 \leq B_{ch-t} \leq B^{MAX} - B_{t-1} \tag{11}$$

여기서,

$$B^{MAX} = \text{저장장치의 최대용량[kWh]}$$

저장장치의 최종 충전상태는 손실률을 고려하여 제약조건 (12)와 같이 나타낸다[17].

$$B_t = B_{t-1} - B_{disch-t} / (1 - L_d) + B_{ch-t} \cdot (1 - L_c) \tag{12}$$

여기서,

$$B_t = t\text{번째 구간의 충전상태[kWh]}$$

$$L_d = \text{저장장치의 방전 손실률[p.u]}$$

$$L_c = \text{저장장치의 충전 손실률[p.u]}$$

5. 사례 연구

5.1 운용 조건

본 논문에서 최적 운용계획을 수립하기 위하여 가정된 마이크로그리드 구성은 다음과 같으며, 각 운용구간은 1시간을 기준으로 24개 구간으로 나타내었다.

- 분산전원: 디젤발전기, 열병합 발전기, 연료전지시스템, 전용보일러, 신재생전원
- 분산저장장치: 전력저장장치
- 부하: 전력 부하, 열 부하

에너지원별 데이터는 표 1[18,19], 연료전지의 효율은 표 2[20], 전력에 대한 열 생산 비율인 열전비에 대한 데이터는 표 3, 전력저장장치의 데이터는 표 4, 각 운용 구간별 입력데이터는 표 5에 각각 나타내었다.

표 1 에너지원별 데이터

Table 1 Data of energy sources

Energy sources	DSG	COG	FC	HOB
Cost (Case 1) (₩/kWh)	150	85	200	70
Cost (Case 2) (₩/kWh)	150	85	100	70
Min. production capacity (kWh)	0	7	20	0
Max. production capacity (kWh)	200	120	250	50

표 2 연료전지시스템의 효율

Table 2 the efficiency of fuel cell system

Facility (kWh)	FC
efficiency	70.3%

표 3 전력에 대한 열의 비율(열전비)

Table 3 the heat and electric power ratio

Facility (kWh)	COG	FC
ratio	0.8	0.4

여기서, 신재생전원은 25kW 태양광발전시스템을 사용하였다. 신재생 전원은 시간, 장소에 따라 발전량이 일정하지 않기 때문에 구간별 발전량을 예측하기에는 어려움이 있다. 그러나 기상 예측 모델과 특정 단지의 과거 실적, 발전 설비 특성 등을 고려한 통계 모델에 기반을 두어 신재생 에너지 출력 시스템을 개발할 수 있으며, 이를 활용하여 전달 신재생 전원을 예측하여 다음날의 입력 데이터로 사용하는 것으로 가정한다.

현재 마이크로그리드는 상용화가 진행되고 있는 단계이다. 이러한 이유로 마이크로그리드 내 부하는 인천광역시 송도동의 아파트 단지의 수요를 조사하여 반영하였으며, 향후 마이크로그리드 내의 부하는 이와 같은 특정 집단의 패턴과 유사하게 발생할 것이라 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 한국전력공사에서 통계된 연간 평균 전력 부하량을 나타낸다. 이를 향후 마이크로그리드의 전력 부하로 가정하고, 평균 데이터를 제안하는 모델에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 또한 열 부하는 하루 동안 그림 4와 같은 패턴으로 수요량이 발생하였다. 열 부하의 경우에는 이를 기반으로 수요량을 예측하여 제안하는 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

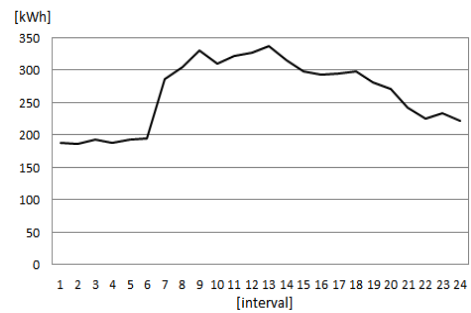


그림 3 전력 부하 패턴

Fig. 3 Pattern of power load

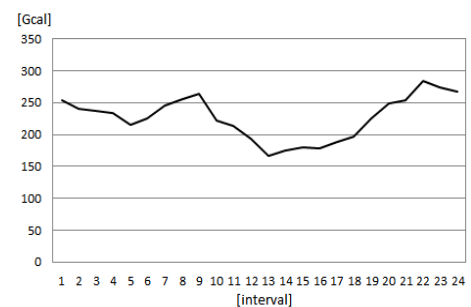


그림 4 열 부하 패턴

Fig. 4 Pattern of heat load

표 4 전력저장장치의 데이터

Table 4 Data of electric energy storage system

Initial apacity (kWh)	Min.capacity (kWh)	Max.capacity (kWh)	L_c (p.u)	L_d (p.u)
30	0	100	0.05	0.05

표 5 입력데이터

Table 5 Input data

Int.	P_{RDG} (kWh)	P_{LOAD} (kWh)	H_{LOAD} (kWh)	PR_B (원/kWh)	PR_S (원/kWh)
1	0	187	254	139	138
2	0	186	251	136	135
3	0	192	237	131	130
4	0	188	233	129	128
5	5	192	216	134	133
6	7	194	226	138	137
7	10	276	246	146	145
8	13	305	256	151	149
9	15	330	264	156	155
10	17	309	222	159	158
11	20	322	214	161	160
12	22	327	193	152	149
13	25	337	166	151	148
14	23	315	175	163	162
15	20	298	180	162	161
16	14	293	179	161	160
17	10	294	188	161	160
18	8	297	196	160	159
19	0	280	225	159	158
20	0	270	248	161	160
21	0	244	254	158	157
22	0	225	284	156	155
23	0	233	274	151	149
24	0	221	267	149	148

5.2 Case 1

그림 5은 제시된 수리적 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 마이크로그리드가 최적 운용되었음을 보여주고 있다. 기저부하 공급원으로는 장기적인 경제성과 연료조달의 안정성 모두 고려하여야 하는데, 발전단가가 낮은 열병합 발전기가 기저부하를 담당하여 24구간 모두 운전하고 있으며, 반면 열병합 발전에 비해 발전단가가 높은 디젤 발전기는 침두 부하 구간에만 운전하는 것이 경제적이다. 이때, 디젤 발전기의 발전 단가가 전력판매 가격 보다 낮은 구간에는 발전기가 수요량보다 더 많은 전력을 생산하여 계통에 판매함으로써 이익을 얻는다. 그러나 운용구간 12,13에서는 전력판매 가격이 디젤 발전기의 발전단가보다 낮기 때문에 생산한 전력을 계통에 판매하여도 이익이 발생하지 않는다. 그러므로 발전 단가가 가장 낮은 열병합 발전기를 제외한 나머지 발전기들은 수요를 충족시키기 위하여 최소한으로 운전하기 때문에 디젤 발전기 또한 발전량이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

그림 6, 7는 운용 구간별 최적화된 구매전력량과 판매 전력량을 각각 나타낸 것이다. 구간별 전력가격이 발전기의 발전 단가보다 낮으면 전력계통으로부터 전력을 구매하여 부하를 충족시키고, 구간별 전력가격이 발전기의 발전단가보다 높으면 자가 발전량으로 전력의 수요를 해결하고, 잉여전력은 계통으로 판매되어 이익이 발생한다. 그림 4에서 전력 구매 가격이 가장 낮은 운용구간 4는 발전기들이 최소로 운전하기 때문에 계통으로부터 가장 많은 양의 전력을 구입하는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 7에서는 부하량이 높은 구간임에도 불구하고, 전력이 판매되고 있으며 이는 전력판매 가격이 발전기의 생산단가보다 높기 때문에 전력을 계통에 판매함으로써 이익을 얻고 있음을 알 수 있다. 그러나 부하량이 높더라도 전력판매 가격이 상대적으로 낮은 구간 12,13

에서는 전력을 판매하지 않는 것을 볼 수 있는데 이는 거래 계획이 부하량이 아닌 거래가격과 발전단가를 고려하여 결정됨을 알 수 있다.

그림 8은 수요공급의 법칙에 따라 열에너지를 생산하는 설비들의 출력량을 나타낸 것이다. 열 수요를 충족시키기 위해서 연료전지와 열병합 발전기가 24시간 가동하여 기저 부하 및 전반적인 열 수요를 충족시키고 있으며, 부하량 상승에 따라 피크 부하 시에는 전용보일러가 가동한다. 연료전지와 열병합 발전의 경우 전력을 생산하는 과정에서 배출되는 열을 회수하여 수용가에 공급할 수 있기 때문에 생산 단가 측면에서 비용이 발생하지 않으므로 목적함수에 포함되지 않는다. 즉, 열 부하량을 충족시키기 위해서는 연료전지와 열병합 발전에서 발생하는 열을 우선적으로 수용가에 공급하고 그 외에 공급이 부족한 구간에서만 전용보일러가 가동하는 것을 볼 수 있다. 따라서 전용보일러를 별도로 설

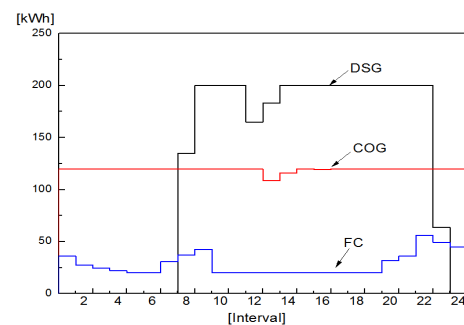


그림 5 발전량
Fig. 5 Generation amount

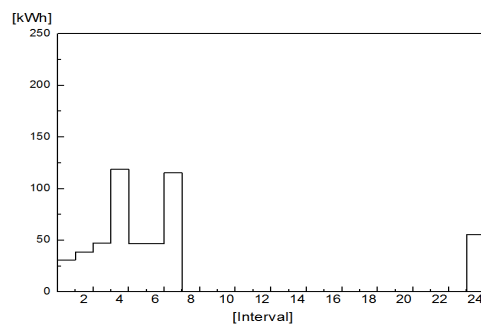


그림 6 구매전력
Fig. 6 Buying power

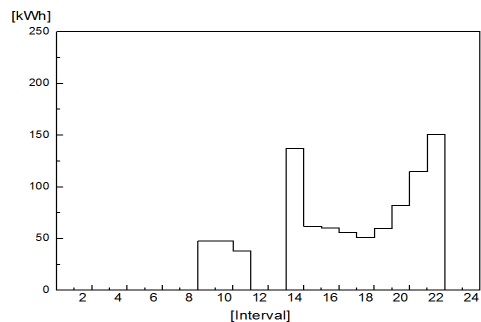


그림 7 판매전력
Fig. 7 Selling power

치하는 것보다 열과 전력을 동시에 생산하는 열병합 설비를 이용하여 열수요량을 충족시키는 것이 경제성을 확인할 수 있고 이는 마이크로그리드 내에 열병합 발전의 도입이 곧 경제성과 연관됨을 나타낸다.

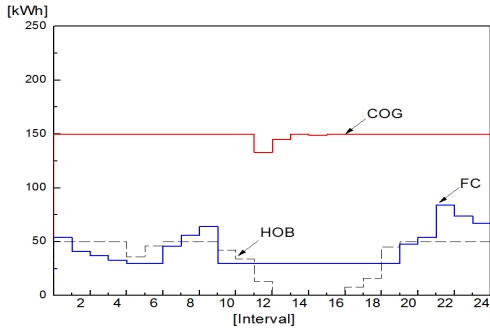


그림 8 열 생산량
Fig. 8 Heat generation

그림 9은 전력저장장치의 충·방전량을 구간별로 나타낸 것이다. 전력저장장치는 이용 가능한 전력에서 각 구간의 수요량을 제외하고 남는 전력을 저장할 수 있다. 또한 전력저장장치의 SOC (state of charge)에 따라 계통과 거래를 함으로써 마이크로그리드의 운영비용을 절감할 수 있다. 전력가격이 가장 낮은 운용구간 4에서는 많은 양의 전력을 구매하여 이를 전력저장장치에 충전하였다가 거래가격과 전력부하의 수요량 둘 다 높은 운용구간 14에서는 저장되어 있던 전력을 방전하는 것을 알 수 있다. 이는 거래가격에 의하여 전력저장장치의 충·방전량을 조절함으로써 전력거래량 뿐만 아니라 발전량에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며 최적운용계획이 전력 거래가격과 발전단가를 고려하여 계획된다는 것을 보여준다.

이는 열에너지 또한 전력과 마찬가지로 열에너지저장장치를 이용하여 제어할 경우 마이크로그리드의 운영비용이 더 낮아질 수 있는 가능성을 의미한다.

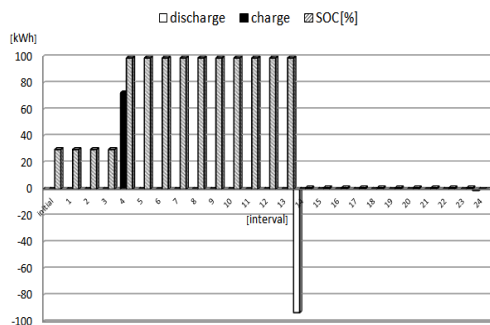


그림 9 전력저장장치의 충·방전량
Fig. 9 Charge and discharge of electric energy storage system

5.3 Case 2

Case 2에서는 추후 많은 기술 개발 및 상용화에 따라 표 1에서와 같이 연료전지의 발전단가가 낮아진다고 가정하여

최적운용계획을 수립하였다. 그 외의 입력데이터는 Case 1과 같다. 그림 10에서 디젤 발전기와 연료전지의 출력량은 Case 1과 비교하였을 때 디젤 발전기의 발전량이 감소하고 연료전지의 발전량이 증가하였음을 알 수 있다. 발전단가가 가장 높은 디젤 발전기는 침두부하만을 담당하며 최적 운전되고 있으며, 발전 단가가 가장 낮은 열병합 발전은 Case 1과 동일하게 최대 출력으로 운전하고 있다.

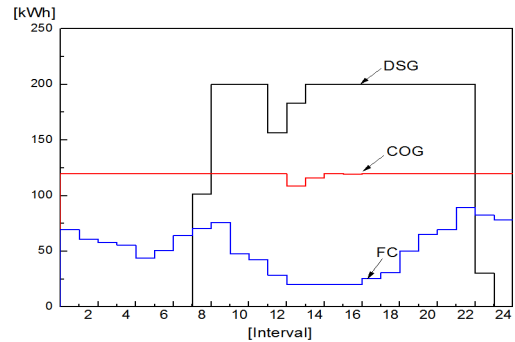


그림 10 발전량
Fig. 10 Generation amount

그림 11, 12는 Case 2에서의 운용 구간별 최적화된 구매 전력량과 판매 전력량을 각각 나타낸 것이다. 연료전지의 발전단가가 낮아졌기 때문에 연료전지에서 추가적으로 운전하여 발생하는 전력으로 인하여 구매 전력량이 줄어들었다. 또한, 계통으로 전력을 판매하는 부분에서는 연료전지의 발전단가보다 전력판매 가격이 상대적으로 높은 구간에서 전

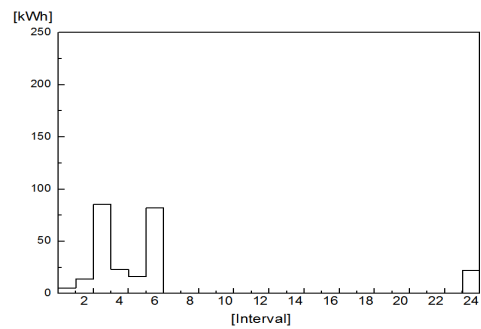


그림 11 구매전력
Fig. 11 Buying power

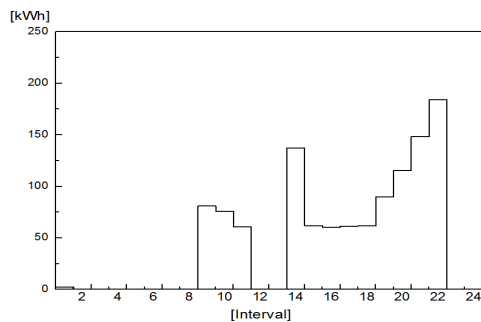


그림 12 판매전력
Fig. 12 Selling power

력을 판매하여 더 많은 이익이 발생하였다. 이는 추후 연료전지의 발전단가가 낮아질 경우 마이크로그리드 내에서 활발히 운전함으로써 마이크로그리드의 운용비용 절감에 많은 기여를 할 것이라 예상된다.

그림 13은 열에너지를 생산하는 설비들의 출력량을 나타낸 것이다. 연료전지의 발전단가가 낮아졌기 때문에 전용보일러가 운전하지 않고도 열병합 발전과 연료전지만으로 열 수요량을 충족시켰다. 이는 추후 연료전지의 상용화에 따라 발전단가가 낮아질 경우 전용보일러를 별도로 설치하지 않아도 열 수요에 충분히 대비할 수 있으며 경제적인 운용이 가능해짐을 알 수 있다.

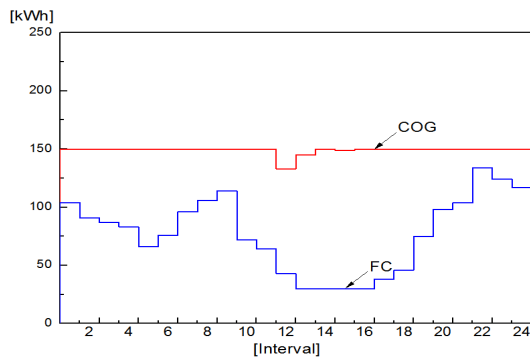


그림 13 열 생산량
Fig. 13 Heat generation

5.4 최적운용결과

본 논문에서 수립한 수리적 모델을 이용하여 사례연구를 한 결과, Case 2의 운용비용이 Case 1의 운용비용보다 더욱 절감되었다. 이는 디젤 발전기의 발전량이 감소함과 동시에 연료전지에서 증가한 전력량을 계통에 판매함으로써 발생 이익으로 볼 수 있다. 또한 열에너지의 경우, 전용보일러가 운전하지 않으면서 열 수요량을 열병합 발전과 연료전지만으로 충족시킬 수 있기 때문에 열 공급에 대한 별도의 비용이 발생하지 않았다. 이는 마이크로그리드 내에 연료전지와 열병합 발전을 고려함으로써 전력과 열에너지 두 가지 측면에서 모두 경제적인 운용이 가능함과 동시에 에너지 효율성 또한 증가할 수 있음을 의미한다.

6. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드의 최적운용을 위하여 기존의 마이크로그리드에 에너지 효율이 높은 연료전지와 열병합 발전을 고려하여 선형계획법에 근거한 수리적 모델을 정식화하고 사례연구에 적용함으로써 그 결과를 검토하였다.

열 에너지의 경우, 열과 전력을 동시에 생산하는 열병합 발전을 고려한다면 전력을 생산하는 과정에서 발생하는 폐열을 회수하여 수용가에 공급할 수 있기 때문에 별도의 보일러를 설치하지 않아도 수요량을 충족시킬 수 있어 경제적인 측면에서 열병합 발전을 고려하는 것이 경제성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 최소한의 비용으로 에너지의 수급 조건을 충족시키기 위하여 구간별 전력가격과 발전기의 발전단가를 고려하여 구간별 최적의 전력거래량을 결정하였

다. 이는 마이크로그리드의 최적운용이 발전단가와 거래가격을 고려하여 계획됨을 알 수 있는 것과 동시에 최적운용을 위하여 본 논문에서 제시한 선형계획법에 근거한 수리적 모델이 실제로 적용가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

추후 연구로는 마이크로그리드 내에 열에너지 저장장치를 고려하여 마이크로그리드의 최적운용계획을 수립할 계획이다. 열에너지 저장장치 도입이 마이크로그리드 내에 증가함으로써 에너지의 효율적 이용에 기여할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2012년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] R. Lasseter, A. Akh, C. Marnay, J. Stevens, J. Dagle, R. Guttromson, A. Sakis Meliopoulos, R. Yinger and J. eto, White Paper on Integration of Distributed Energy Resources - The CERTS Microgrid Concept, Office of Power Technologies of the US Department of Energy, Apr. 2002.
- [2] Pike Research. [Online]. Available: <http://www.navigantresearch.com>.
- [3] 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.
- [4] C. M. Colson, and M. H. Nehrir, "A Review of Challenges to Real-Time Power Management of Microgrids," Proceedings of 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-8, Jul. 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] H.-M. Kim, Y. Lim, and T. Kinoshita, "An Intelligent Multiagent System for Autonomous Microgrid Operation," Energies, Vol. 5, Issue 9, pp. 3347-3362, Sept. 2012.
- [7] H.-M. Kim, T. Kinoshita, and Y. Lim, "Talmudic Approach to Load-shedding of Islanded Microgrid Operation based on Multiagent System," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 6, No. 2, pp. 284-292, 2011.
- [8] H.-M. Kim, W. Wei, and T. Kinoshita, "A New Modified CNP for Autonomous Microgrid Operation based on Multiagent System," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 139 - 146, Jan. 2011.
- [9] H.-M. Kim, T. Kinoshita, and M.-C. Shin, "A Multiagent System for Autonomous Operation of

Islanded Microgrids based on a Power Market Environment, *Energies*, Vol. 3, Issue 12, pp. 1972-1990, Dec. 2010.

- [10] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, and G. G. Soma, "Optimal Participation of a Microgrid to the Energy Market with an Intelligent EMS," *Proceedings of 2005 IPEC Power Engineering*, Vol. 2, pp. 663-668, Dec. 2005.
- [11] H.-M. Kim, M.-C. Shin, C.-H. Kim, and C.-Y. Won, "Optimum Operation of Small Power Producing Facilities Interconnected with Power System," *Trans. KIEE*, Vol. 44, No. 4, pp. 409-417, Apr. 1995.
- [12] A. K. Basu, S. Chodhury, and S. P. Chowdhury, "Operational Management of CHP-based Microgrid," *Proceedings of 2009 IEEE Power System Technology*, pp. 24-28, Oct. 2009.
- [13] M. Shahverdi, and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Operation of Fuel Cell Power Plant with Thermal Recovery of PEM Using Free-Model Optimization," *European Journal of Scientific Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 521-533, 2009.
- [14] M. Y. El-sharkh, M. Tanrioven, A. Rahman, and M. S. Alam, "A Study of Cost-Optimized Operation of a Grid-Parallel PEM Fuel Cell Power Plant," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 1104-1114, 2006.
- [15] M. B. Gunes, Investigation of a Fuel Cell Based Total Energy System for Residential Applications, Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Apr. 2001.
- [16] J. I. San Martin, I. Zamora, J. J. San Martin, V. Aperribay, and P. Equia, "Performance Analysis of a PEM Fuel Cell", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2010.
- [17] J.-H. Lee, and J.-S. Park, "Optimal Microgrid Operation Considering Combined Heat and Power Generation with Variable Heat and Electric Ratio," *Trans. KIEE*, Vol. 61, No. 10, pp. 1548-1533, Oct. 2012.
- [18] Electric Power Statistic Information System [Online]. Available: <http://epsis.kpx.or.kr/>
- [19] Korea Gas Corporation [Online]. Available: <http://www.kogas.or.kr/>
- [20] VTT TIEDOTTEITA, Technical Features for Heat Trade in Distributed Energy Generation, 2005.

저 자 소 개



이 지 혜 (李 枝 漣)

1989년 10월 7일생. 2012년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2012년 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