

연료전지를 고려한 마이크로그리드의 최적운용에 관한 연구

이지혜, 김학만
 인천대학교 전기공학과
 e-mail : ljhsh5@naver.com

A Study on Optimal Microgrid Operation considering Fuel Cell

Ji-Hye Lee, Hak-Man Kim
 Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon

요 약

연료전지는 온실가스를 배출하지 않기 때문에 차세대 친환경에너지로 평가 받고 있으며, 추후 마이크로그리드에 많은 도입이 예상된다. 이에 본 논문에서는 전력과 열을 동시에 생산하는 연료전지를 고려한 마이크로그리드의 최적운용계획을 수립하고 사례연구를 통하여 제시된 수리적 모델의 타당성을 입증하고자 한다.

1. 서론

열과 전력을 동시에 생산하는 연료전지는 열역학적인 제한(Carnot cycle)을 받지 않기 때문에 폐열까지 고려한다면 총 발전 효율이 80~90%정도인 고효율 발전 시스템이다. 최근에는 전 세계적으로 온실가스 감축의무에 대비하여 온실가스의 배출이 1%이하인 연료전지에 대한 관심이 고조되고 있다[1-2]. 마이크로그리드의 운용에서 중요한 요구사항은 에너지의 공급과 수요의 균형을 맞추는 것이다. 따라서 최소한의 비용으로 에너지의 공급과 수요를 충족시키기 위해서 최적화에 기반한 마이크로그리드의 운용이 요구되고 있다.

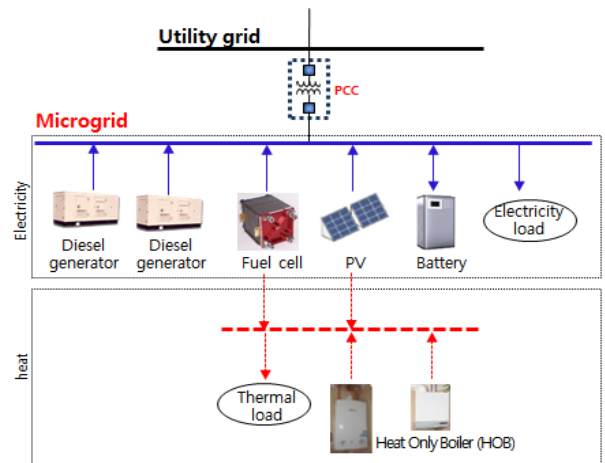
본 연구에서는 연료전지를 포함한 마이크로그리드의 최적운용계획을 수립함으로써 사례연구를 통하여 제시된 목적함수와 제약함수의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 마이크로그리드

마이크로그리드 시스템은 그림 1과 같이 전력공급망과 열공급망으로 구분할 수 있으며 분산형 전원, 분산저장장치, 부하로 구성되어 신재생 에너지를 주전원으로 하는 소규모 전력시스템이다[3-4].

3. 최적 운용 정식화 모델

본 논문에서는 연료전지가 포함된 마이크로그리드의 최적 운용을 위한 수리적 모델을 선형계획법에 의거하여 정식화하였다. 제시된 목적함수는 마이크로그리드의 발전비용에서 수익을 차감한 순이익을 최소화시키도록 식 (1)과 같이 나타내었다.



(그림 1) 마이크로그리드의 구성

$$\text{Minimize } C = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^M C_{-i} \cdot P_{DG-i} + \sum_{j=1}^N C_{-j} \cdot \frac{P_{FC-j}}{\eta_{FC}} + \sum_{q=1}^Q C_{-q} \cdot H_{HOB-q} + PR_{B-k} \cdot P_{B-k} - PR_{S-k} \cdot P_{S-k} \right) \quad (1)$$

여기서,

- k = 일일 운용구간을 나타내는 식별자
- K = 일일 운용구간 수
- i = 디젤 발전기를 나타내는 식별자
- M = 디젤 발전기 수
- j = 연료전지를 나타내는 식별자
- N = 연료전지의 수
- q = 전용보일러를 나타내는 식별자
- Q = 전용보일러 수

C_i = i 번째 디젤 발전기의 발전단가 [원/kWh]
 $P_{DG,i}$ = i 번째 디젤 발전기의 발전량 [kWh]
 C_{-j} = j 번째 연료전지의 발전단가 [원/kWh]
 $P_{FC,j}$ = j 번째 연료전지의 발전량 [kWh]
 $\eta_{FC,j}$ = j 번째 연료전지 효율 [%]
 C_{-q} = q 번째 전용보일러의 열 생산단가 [원/kWh]
 $H_{HOB,q}$ = q 번째 전용보일러의 열 생산량 [kWh]
 $PR_{B,k}$ = k 번째 구간의 전력구입 가격 [원/kWh]
 $P_{B,k}$ = k 번째 구간의 전력구입량 [kWh]
 $PR_{S,k}$ = k 번째 구간의 전력판매 가격 [원/kWh]
 $P_{S,k}$ = k 번째 구간의 전력판매량 [kWh]

각 운용구간의 제약조건들은 다음과 같이 수립하였다. 디젤 발전기에서의 발전량은 식 (2)와 같이 최소출력 이상, 최대출력 이하의 범위 내에서 운전되어야 한다.

$$P_{DG,i}^{MIN} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,i}^{MAX} \quad (2)$$

여기서,

$P_{DG,i}^{MIN}$ = i 번째 DG의 최소 출력량 [kWh]
 $P_{DG,i}^{MAX}$ = i 번째 DG의 최대 출력량 [kWh]

연료전지와 전용보일러에서 발생한 출력량도 식 (3), (4)와 같이 최소출력 이상, 최대출력 이하의 범위 내에서 운전되어야 한다.

$$P_{FC,j}^{MIN} \leq P_{FC,j} \leq P_{FC,j}^{MAX} \quad (3)$$

$$H_{HOB,q}^{MIN} \leq H_{HOB,q} \leq H_{HOB,q}^{MAX} \quad (4)$$

여기서,

$P_{FC,i}^{MIN}$ = i 번째 FC의 최소 출력량 [kWh]
 $P_{FC,i}^{MAX}$ = i 번째 FC의 최대 출력량 [kWh]
 $H_{HOB,q}^{MIN}$ = q 번째 HOB의 최소 열 생산량 [kWh]
 $H_{HOB,q}^{MAX}$ = q 번째 HOB의 최대 열 생산량 [kWh]

제약조건 (5)는 전력 수요와 공급의 법칙이 성립함을 나타낸다.

$$P_{RDG,k} + \sum_{i=1}^M P_{DG,i} + \sum_{j=1}^N P_{FC,j} + P_{B,k} B_{disch,k} - P_{S,k} B_{ch,k} - P_{LOAD,k} = 0 \quad (5)$$

여기서,

$P_{RDG,k}$ = k 번째 구간에서 신재생 전원에서의 발전량 [kWh]
 $B_{disch,k}$ = k 번째 구간에서 저장장치의 방전량 [kWh]
 $B_{ch,k}$ = k 번째 구간에서 저장장치의 충전량 [kWh]
 $P_{LOAD,k}$ = k 번째 구간에서 전력 수요량 [kWh]

각 운용구간 동안 연료전지에서 생산된 열은 식 (6)에 의해서 일정한 비율 내에서 생산된다[6].

$$H_{FC,j} = P_{FC,j} \cdot (1/\eta_{FC,j} - 1) \quad (6)$$

여기서,

$H_{FC,j}$ = j 번째 연료전지의 열 생산량 [kWh]

각 구간 동안 열 부하에서 필요로 하는 에너지는 연료전지와 전용보일러에서 발생한 열 생산량과 같으며 이 관계는 식 (7)과 같다[5].

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

여기서,

$H_{LOAD,k}$ = k 번째 구간에서 열 수요량 [kWh]

저장장치의 방전량은 저장장치에 남아있는 전력량 범위 내에서 가능하며 이는 제약조건 (8)과 같이 제약된다[5].

$$0 \leq B_{disch} \leq B_{(i-1)} \quad (8)$$

여기서,

$B_{(i-1)}$ = 저장장치에 남아있는 전력량 [kWh]

저장장치의 충전량은 저장장치용량에서 현재 충전되어 있는 전력량을 제외한 여분 범위 내에서 가능하며 이는 제약조건 (9)와 같이 제약된다[5].

$$0 \leq B_{ch} \leq B^{MAX} - B_{(i-1)} \quad (9)$$

여기서,

B^{MAX} = 저장장치의 최대용량 [kWh]

저장장치의 최종 충전상태는 손실률을 고려하여 식 (10)과 같이 나타낸다[5].

$$B_i = B_{(i-1)} - B_{disch} / (1 - L_d) + B_{ch} / (1 - L_c) \quad (10)$$

여기서,

B_i = 저장장치의 최종 충전상태 [kWh]
 L_d = 저장장치의 방전 손실률 [kWh]
 L_c = 저장장치의 충전 손실률 [kWh]

4. 시뮬레이션

4.1 운용조건

본 논문에서의 마이크로그리드 구성은 다음과 같다.

- 분산전원: 디젤발전기, 연료전지, 전용보일러
- 분산저장시스템 : 전력저장장치
- 부하: 전기부하, 열부하

각 운용 구간별 데이터는 표 1, 발전기 데이터는 표 2, 저장장치 데이터는 표 3에 각각 나타내었다.

<표 1> 입력 데이터

| interval | P_{RDG} (kWh) | P_{LOAD} (kWh) | H_{RDG} (kWh) | PB_B, PB_S (원/kWh) |
|----------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | 0 | 200 | 120 | 240 |
| 2 | 0 | 190 | 135 | 236 |
| 3 | 0 | 180 | 156 | 235 |
| 4 | 7 | 210 | 165 | 238 |
| 5 | 10 | 240 | 210 | 253 |
| 6 | 16 | 250 | 246 | 265 |
| 7 | 25 | 230 | 204 | 262 |
| 8 | 14 | 260 | 168 | 260 |
| 9 | 8 | 270 | 160 | 262 |
| 10 | 0 | 280 | 195 | 270 |
| 11 | 0 | 260 | 174 | 257 |
| 12 | 0 | 220 | 126 | 220 |

<표 2> 발전기 데이터

| 발전기 | 디젤발전기 | 연료전지 | 전용보일러 |
|-----------------|-------|------|-------|
| 발전단가 (원/kWh) | 250 | 235 | 120 |
| 최소출력량 (kWh) | 0 | 20 | 5 |
| 최대출력량 (kWh) | 100 | 250 | 50 |

<표 3> 전력저장장치 데이터

| 초기 용량 (kWh) | 최소 용량 (kWh) | 최대 용량 (kWh) | 충·방전 손실률 (%) |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 50 | 0 | 100 | 0.05 |

4.2 최적운용 결과

마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델을 이용한 운용 결과는 표 4와 같으며, 연료전지의 경우 디젤발전기보다 낮은 발전비용과 높은 효율로 우선 선택되는 발전원임을 보여 준다. 또한, 전력량은 발전기의 발전단가와 구간별 전력가격에 따라 차이가 있음을 확인할 수 있는데, 이는 최적운용계획이 전력 가격과 발전단가를 고려하여 계획된다는 것을 보여 준다.

<표 4> 결과 데이터

| INT | P_{DG} (kWh) | P_{FC} (kWh) | H_{FC} (kWh) | PB_B (kWh) | PB_S (kWh) | B_{disch} (kWh) | B_{ch} (kWh) |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| 1 | 0 | 76.67 | 115 | 123.33 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 86.67 | 130 | 103.33 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 100.67 | 151 | 129.33 | 0 | 0 | 50 |
| 4 | 0 | 106.67 | 160 | 98.83 | 0 | 0 | 2.5 |
| 5 | 100 | 136.67 | 205 | 0 | 6.67 | 0 | 0 |
| 6 | 100 | 160.67 | 341 | 0 | 26.67 | 0 | 0 |
| 7 | 100 | 132.67 | 299 | 0 | 27.67 | 0 | 0 |
| 8 | 100 | 108.67 | 163 | 37.33 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 100 | 103.33 | 255 | 58.67 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 100 | 126.67 | 290 | 0 | 41.55 | 94.88 | 0 |
| 11 | 100 | 112.67 | 169 | 47.33 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 100 | 80.67 | 121 | 39.33 | 0 | 0 | 0 |

5. 결론

본 논문에서는 연료전지를 고려하였을 경우 선형계획법에 의거하여 마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델을 정식화하였다. 시간구간에 따른 연료전지가 운전하는 경우를 고려한 확장된 모델을 제시함으로써 시스템 운용비용을 상당히 절감시키므로 경제성을 확인했고 시스템 구성에 따른 적용가능성을 검토하였다.

추후 연구로 최적해를 개선하기 위하여 잠재가 해석을 통하여 최적운용계획을 수립하고, 활용 방안을 검토할 계획이다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 20111020400220)

참고문헌

- [1] M. Shahverdi, 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.
- [2] M. Y. El-sharkh, M. Tanrioven, A. Rahman, 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.
- [3] S.-J. Choi, S.-J. Park, D.-J. Kang, S.-J. Han, H.-M. Kim, "A microgrid Energy Management System for Inducing Optimal Demand Response," Proceedings of 2011 IEEE on Smart Grid Communications, Oct, 2011.
- [4] H.-M. Kim and T. Kinoshita, "A multiagent system for microgrid operation in the grid-interconnected mode," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.5, No.2, pp.246-254, 2010.
- [5] 이지혜, 박재세, "가변열전비를 갖는 열병합 발전설비가 포함된 마이크로그리드의 최적운용," 대한전기학회, 제 61권, 제 10호, 2012. (게재예정)
- [6] J. I. San Martin, I. Zamora, J. J. San Martin, V. Aperribay, P. Equia, "Performance Analysis of a PEM Fuel Cell", International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2010.