ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 4, pp. 539~546, 2016
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.4.539

디젤발전기의 출력비에 따른 효율을 고려한 마이크로그리드에서의 BESS와 디젤발전기의 최적 운영 기법에 관한 연구

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

이 병 하*
(Byung Ha Lee)

Abstract - With the growing interest of microgrid systems all over the world, many studies on microgrid operation are being carried out. The battery energy storage system(BESS) and the diesel generator are key equipments in the microgrid. In this paper, we analyze the characteristics of fuel consumption according to the power ratio of the diesel generator. Then, the formula to represent the unit cost of generation according to the power ratio of the diesel generator is derived. A new modeling of battery operation is presented considering the lifetime reduction according to increasing the cycles of charge/discharge operation of the battery. The methodology of determining the optimal operation of the battery and the diesel generator is presented by the use of the formula of fuel consumption of the diesel generator and the new modeling of battery operation. It is shown that this optimization methodology can be applied effectively for economical operation of the BESS and the diesel generator of a microgrid by case studies.

Key Words : BESS, Diesel generator, Power ratio, Optimal operation, Microgrid, Battery lifetime

1. 서 론

신재생에너지와 같은 간헐적인 발전 전원이 많이 사용되는 마이크로그리드에서는 배터리와 같은 전력저장장치가 시스템을 효율적으로 운전하기 위한 주요 설비가 된다. 또한 디젤발전기는 태양광발전과 풍력발전 등의 신재생 에너지에 의한 발전에 문제가 발생하는 경우의 예비 전원 또는 보조 전원으로 마이크로그리드에서 널리 활용되고 있는 설비이다. 따라서 마이크로그리드를 에너지 공급과 수요의 균형을 맞추며 최소발전비용으로 운전하기 위해서는 신재생 에너지를 운용 할 때 필수적으로 포함되는 배터리 에너지저장장치(Battery Energy Storage System: BESS)와 디젤발전기의 최적 운용 기법에 대하여 연구할 필요가 있다.

마이크로그리드(Microgrid)는 분산전원을 중심으로 하는 국소적인 전력시스템을 말하는 것으로, 신재생에너지와 소형열병합발전의 고효율발전기 등을 포함하는 소규모의 전력공급설비로 구성되는 소규모의 전력망이다. 향후, 마이크로그리드의 용량은 연평균 22%로 성장하여 2017년에는 4.7GW에 달할 전망으로 마이크로그리드에 대한 수요는 전 세계적으로 증가할 것으로 예상된다. 마이크로그리드의 핵심설비 중 하나가 배터리이므로 배터리에 대한 연구가 활발히 수행되어 오고 있다. 전력저장장치로 널리 사용되고 있는 납축전지와 리튬계열의 배터리의 충방전 특성들을 조사하고 자가 방전 효율, 배터리의 수명, 효율 그리고 환경적인 요인들에 대하여 분석하였다[1]. 현재 가장 널리 사용되고 있는 리튬계열 배터리의 수명은 3000 싸이클 정도로 개발되어 있으며, 향후에는 관련분야의 연구와 기술수준이 향상되어 수명이 더 늘어날 것으로 예상된다[2]. 마이크로그리드의 신재생에너지원들이 간헐적인 발전을 하는 경우가 많으므로, 이러한 특성의 발전원들을 효율적으로 운영하기 위한 여러 가지의 에너지저장장치인 납축전지, 리독스 배터리, 플라이휠 등의 최적화 운영방법에 대하여 논의하였다[3]. 또한, 운용측면에서 마이크로그리드를 경제적으로 운용하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 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[4]. 신재생에너지를 포함한 마이크로그리드의 최적운영을 위한 발전계획 방안을 DP를 이용하여 제시하고 그 효용성을 사례연구로 보여주었다[5]. 상위 시스템과 마이크로그리드의 연계 운전 모우드에서 마이크로그리드의 운용을 위한 멀티에이전트 시스템을 제안하고, 계약망 프로토콜을 적용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 타당성을 보여주었다[6]. 열병합발전과 재생에너지와 배

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University, Korea
E-mail : bhlee@inu.ac.kr
Received : February 4, 2016; Accepted : March 16, 2016

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

터리를 포함하는 마이크로그리드 시스템의 최적운용을 위한 정식화를 수행하고, 배터리의 피크부하 저감 효과를 반영하는 시뮬레이션 결과를 보여주었다[7]. 마이크로그리드와 연계된 배전망과의 전력수수의 최적화를 위한 모델링을 제시하고, 최적화를 위해 진화알고리즘을 적용하고 그 결과를 제시하였다[8]. 전기자동차의 전력수요와 발전량의 24시간 기대치를 확률적인 기법으로 계산하고, 전기자동차를 포함하는 마이크로그리드의 전압안전성을 고려하는 최적운영기법에 대하여 연구를 수행하였다[9]. 풍력발전과 부하의 불확실성을 고려하는 확률적인 최적조류계산 모델을 제시하고, 풍력발전의 확률밀도를 가우시안 혼합모델로 근사화하는 기법이 효율적인 분석을 위해 제안되었다[10].

위에 기술한 마이크로그리드의 최적운영과 관련되는 논문에서는 최적운영해를 구할 때 디젤발전기의 단가를 상수로 적용하였다. 그러나 디젤발전기가 저출력으로 운전될 때는 급격히 효율이 떨어지므로, 디젤발전기를 높은 효율을 갖는 출력까지 출력을 높여서 발전하고 남는 전력을 축전지에 저장한 후 필요시에 방전하여 운전하는 것이 더 경제적일 수 있다. 본 논문에서는 이와 관련한 정확한 분석을 위하여 디젤발전기의 출력비에 따른 연료소모량을 발전 효율의 관점에서 분석하고, 디젤발전기의 발전단가를 출력비의 함수로 유도한다. 또한 BESS의 충방전 횟수의 증가에 따르는 BESS의 수명감소의 영향을 고려하는 새로운 BESS 최적운영의 모델링이 제시된다. 이를 활용하여 BESS와 디젤발전기의 최적운영 방안을 구하는 기법을 제시하고, 독립운전 모드의 가상의 마이크로그리드의 시스템에 적용하여 그 효과를 검증한다.

2. BESS와 디젤발전기의 최적운영을 위한 마이크로그리드의 모델링

2.1 디젤발전기의 출력에 따른 발전단가 수식유도

디젤 발전기는 설치가 용이하고, 기동시간이 짧아 기동정지가 빈번히 일어날 수 있는 마이크로그리드의 피크부하 담당 전원으로 많이 사용되고 있다. 디젤 발전기의 60Hz 용 용량별 연료소모량을 보면 아래의 표 1과 같다.

이 중에서 마이크로그리드에서 많이 사용될 수 있는 수백kW급의 디젤발전기들의 연료소모량을 분석해 보면, 출력의 50%와 100% 사이에서는 발전 효율과 밀접한 관련이 있는 출력당 연료소모량이 거의 비슷하나, 50% 이하에서는 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 250kW급의 디젤발전기를 예로 들면, 출력의 50%와 75%와 100%에서는 출력당 연료소모량이 거의 비슷한 0.25[L/kWh] 부근의 값이지만 출력의 25%에서는 출력당 연료소모량이 0.293[L/kWh]로서 50%일 때보다 약 15%정도 상승함을 알 수 있다. 표 1의 출력의 25%, 50%, 75%, 100%에서의 연료소모량의 값들을 사용하여 가장 낮은 75%에서의 값을 기준으로 75%에서의 값을 1로 지정하고, 디젤발전기의 출력비에 따른 연료소모량비를 최소자승법으로 구하여 보면, 표 2와 같다.

이 값을 근거로 하여 디젤발전기의 발전단가를 최소자승법을 사용하여 아래와 같은 3차식을 유도한다.

$$y = (-0.9498x^3 + 2.3945x^2 - 1.9253x + 1.4978) \cdot C \quad (1)$$

여기서 x는 디젤발전기의 정격출력에 대한 출력비, C는 75% 출력에서의 디젤발전기의 발전단가, y는 해당 출력비 x에서의 디젤발전기의 발전단가를 나타낸다. 이를 그래프로 나타내 보면 그림 1과 같다. 그림 1에서 작은 점들은 표 2에서 제시되어 있는 값들로서 위의 식 (1)의 곡선이 이 점들을 지나고 있으므로 적절히 잘 근사화된 수식임을 알 수 있다.

표 1 디젤발전기 60HZ 용 용량별 연료 소모량
Table 1 Fuel consumption of 60Hz diesel generators according to the capacities

디젤발전기 모델	정격 출력 (kW)	연료소모량(L/hr)			
		25% 출력	50% 출력	75% 출력	100% 출력
EDG60D	60	6.4	8.4	13.1	18.1
EDG90D	90	8.9	13.6	19	24.7
EDG130D	130	11.4	18.1	24.9	32.5
EDG175D	175	15.1	24.9	34.9	45.8
EDG200D	200	13.8	25.1	37.7	50.6
EDG250D	250	18.3	32.6	47.1	63.3
EDG275D	275	20.3	36.2	52.3	70.3
EDG300D	300	20.6	37	56	73.8
EDG330D	330	23	41.5	61.3	84.1
EDG360D	360	24.5	46	68	93.3
EDG400D	400	28	50.6	74.7	102.5
EDG450D	450	33.5	56.7	84.6	115
EDG500D	500	34.9	63.3	93.4	128.2
EDG550D	550	39.1	69.1	106.2	144.4
EDG610D	610	41.9	75.9	112	153.9

표 2 디젤발전기의 출력당 연료 소모량비
Table 2 Fuel consumption ratios according to the power ratios of diesel generators

정격대비 출력비	25%	50%	75%	100%
출력당 연료소모량비	1.151	1.015	1.000	1.017

2.2 BESS의 모델링

2.2.1 목적함수에 추가되는 BESS 운영 모델링

전형적인 BESS의 역할인 발전력이 부족한 시간대의 전력을 그 전에 충전한 BESS전력으로 보충하는 방식에서 더 나아가 디젤발전기의 변화하는 효율을 고려하여 발전단가가 더 싸게 될 수 있는 경제운영까지를 고려한다. 안정적인 전력을 공급하는 것이 BESS의 당연한 목적이므로 간헐적으로 발전되는 신재생에너지원

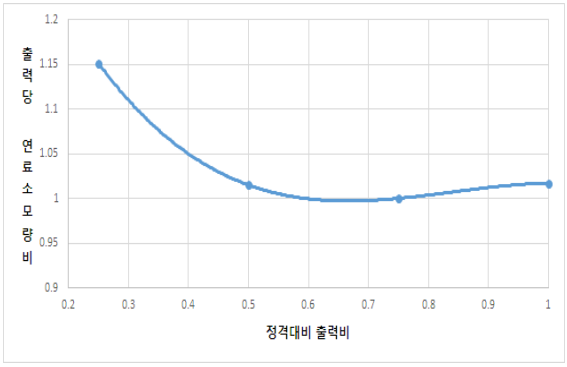

그림 1 디젤발전기의 출력당 연료 소모량비의 그래프

Fig. 1 Graph of fuel consumption ratio versus power ratio of the diesel generator

의 효율적인 운전을 위하여 전력의 여유가 있는 때의 신재생에너지원의 전력을 저장하였다가 전력이 부족한 시간대에 전력을 공급하는 역할을 담당한다. 그러나 안정적인 전력수급이 되도록 하면서, 전력이 남아도는 상황에서 생산단가를 싸게 할 수 있는 발전원이 있으면 부하의 수요보다 더 초과하여 발전을 하고 이 전력을 BESS에 저장하였다가 비싼 발전기를 더 돌려야 하는 상황에서 BESS의 저장된 전력을 방전시키는 운전방식을 채택할 수 있다. 그러나 이때 BESS의 운영의 영향을 검토해야 한다. 추가로 BESS를 더 사용함으로 인하여 BESS의 수명이 단축된다면 이에 대한 비용을 고려할 필요가 있다. BESS의 충방전 회수의 제약을 고려할 때, 사용하지 않더라도 발생하는 자연 열화에 의한 수명의 제약이 존재하므로 이에 해당하는 값은 감해주어야 된다. 또한 부하가 발전설비의 발전량을 초과하여 전력공급이 부족한 전력량은 경제적인 관점이 아닌 안정적인 전력공급의 차원에서 경제성과 상관없이 의무적으로 전력공급이 이루어져야 하므로 이러한 의무적으로 공급해야하는 발전량은 BESS의 수명단축 손실비용 산정 대상에서 제외되어야 한다. 이와 같은 BESS 운영조건들을 고려하기 위하여 목적함수에 추가될 항은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$Min\, C_{bat} = C_{red} \cdot \left(\sum_{t=1}^{T} B_{Dis-t} - P_{short}\right) \tag{2}$$

$Min\, C_{bat}$ = $BESS$의 추가 충방전에의한 수명단축손실을 고려하기 위한 목적함수의 추가항

T= 일일운용구간수

C_{red} = $BESS$의 추가 충방전에의한 수명단축에 따른 손실 비용[원/kWh]

B_{Dis-t} = t구간에서의 $BESS$의 방전량[kWh]

P_{short} = 부하가 발전설비의 발전량을 초과하여 부족한 전력량[kWh]

2.2.2 BESS의 제약조건

BESS에서 방전 가능한 전력은 BESS에 남아있는 전력량 내에서 방전이 가능하며 이는 아래의 제약조건 식 (3)과 같다.

$$0 \le B_{Dis-t} \le B_{acc-(t-1)} \tag{3}$$

여기서,

$B_{acc-(t-1)}$=$t-1$ 구간에서 BESS에 남아있는 전력량[kWh]

BESS에서 충전 가능한 전력은 현재 충전되어 있는 전력량을 제외한 여분 범위 내에서 충전이 가능하며 이는 제약조건 식 (4)와 같다.

$$0 \le B_{Cha-t} \le B^{MAX} - B_{acc-(t-1)} \tag{4}$$

여기서,

B^{MAX} = BESS의 최대용량[kWh]

B_{Cha-t} = t구간에서의 BESS의 충전량[kWh]

BESS의 최종 충전상태는 손실률을 고려하여 제약조건 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{acc-t} = B_{acc-(t-1)} - B_{Dis-t}/(1-L_d) + B_{Cha-t} \cdot (1-L_c) \tag{5}$$

여기서,

B_{acc-t} = t번째 구간의 BESS의 충전상태[kWh]

L_d = BESS의 방전 손실률[p.u]

L_c = BESS의 충전 손실률[p.u]

2.3 마이크로그리드의 최적 운영 모델링

마이크로그리드는 광역기반 분산전원과 연계되어 운전하는 계통연계형 모드와 독립적으로 운영하는 독립운전모드 2가지가 있는데, 분석의 효과를 보다 확실히 파악하기 위하여 여기서는 독립적으로 운영하는 독립운전모드의 마이크로그리드에 대하여 분석한다.

디젤발전기의 출력비에 따른 연료소모량을 효율의 관점에서 분석하고, 디젤발전기의 발전단가를 출력비의 함수로 유도한 수식을 목적함수에 포함시킨다. 여기서는 계획이 아닌 운영의 관점에서 분석하므로 전형적인 BESS의 역할인 발전력이 부족한 시간대의 전력을 그 전에 충전한 BESS전력으로 보충하는 것에서 추가하여, 디젤발전기의 변화하는 효율을 고려하여 발전단가가 더 싸게 될 수 있는 운영까지를 고려한다. 또한 BESS의 충방전 횟수의 증가에 따르는 BESS의 수명감소의 영향을 고려하는 새로운 BESS 최적운영의 모델링을 목적함수에 포함시킨다.

2.3.1 목적함수

디젤발전기와 BESS의 최적 운영을 위한 마이크로그리드의 목적함수는 아래의 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$Min\ C = \sum_{t=1}^{T}\Big(\sum_{k=1}^{K} C_k \cdot P_{CHPk-t} + \sum_{j=1}^{J} C_j \cdot (a_{j3}x_{j-t}^3 + a_{j2}x_{j-t}^2 + a_{j1}x_{j-t} + a_{j0}) \cdot P_{DSj-t} + \sum_{l=1}^{L} C_l \cdot P_{PVl-t} + \sum_{m=1}^{M} C_m \cdot P_{Windm-t} + \sum_{j=1}^{J} C_{stj} \cdot \delta_{stj-t}\Big) + C_{red} \cdot \Big(\sum_{t=1}^{T} B_{Dis-t} - P_{short}\Big) \quad (6)$$

T= 일일운용구간수
C_k = k번째 열병합발전기 발전단가[원/kWh]
K= 열병합발전기의 수
C_j = j번째 디젤발전기 75%출력에서의 발전단가[원/kWh]
J= 디젤발전기의 수
C_l = l번째 태양광발전 발전단가[원/kWh]
L= 태양광발전모듈의 수
P_{DSj-t} = t구간에서의 j번째 디젤 발전기의 발전량[kWh]
P_{CHPk-t} = t구간에서의 k번째 열병합발전기의 발전량[kWh]
P_{PVl-t} = t구간에서의 l번째 태양광발전의 발전량[kWh]
x_{j-t} = t구간에서의 j번째 디젤발전기의 정격출력에대한 출력비
$a_{j0}, a_{j1}, a_{j2}, a_{j3}$: j번째 디젤발전기의 발전단가함수의 상수
($a_{j0} = 1.4978$, $a_{j1} = -1.9253$, $a_{j2} = 2.3945$, $a_{j3} = -0.9498$)
C_m = m번째 풍력발전기 발전단가[원/kWh]
M= 풍력발전기의 수
$P_{Windm-t}$ = t구간에서의 m번째 풍력 발전기의 발전량[kWh]
C_{stj} = j번째 디젤발전기의 기동비용[원]
δ_{stj-t} = t구간에서의 j번째 디젤발전기의 기동변경 상태
(직전 상태가 정지에서 현 상태가 기동으로 바뀐 경우 1, 그렇지 않으면 0)

2.3.2 제약조건

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

전력공급과 전력수요가 동일하다는 전력방정식이 성립해야 하므로, 신재생에너지 발전량, 열병합 발전량, 디젤발전량과 에너지저장시스템(BESS)의 방전량의 합은 부하의 전력 수요량과 에너지저장시스템(BESS)의 충전량의 합과 같다는 전력방정식의 제약조건이 주어진다. 최적운영을 위한 특정 t 구간의 전력수요량은 아래의 식 (7)과 같이 구성할 수 있다.

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

P_{LOAD-t}: t번째 구간 전력수요량[kWh]
P_{DG-t}: t번째 구간 디젤발전기 전력생산량[kWh]
P_{CHP-t}: t번째 구간 CHP의 전력생산량[kWh]
P_{PV-t}: t번째 구간 태양광 전력생산량[kWh]
P_{Wind-t}: t번째 구간 풍력발전 전력생산량[kWh]
B_{Cha-t}: t번째 구간 배터리 충전량[kWh]
B_{Dis-t}: t번째 구간 배터리방전량[kWh]

이러한 제약조건들에 추가하여 위에서 기술한 BESS의 제약조건들이 포함된다.

3. BESS와 디젤발전기의 조합 운영에 의한 마이크로그리드의 최적운영 시뮬레이션 및 검토

3.1 BESS와 디젤발전기의 조합 운영 분석을 위한 마이크로그리드 시스템

BESS와 디젤발전기의 조합 운영 분석의 효과를 보다 확실히 파악하기 위하여 여기서는 독립적으로 운영하는 독립운전모드의 가상적인 마이크로그리드에 대하여 분석한다. 디젤발전기와 BESS의 조합 운영 분석을 위하여 적용하는 마이크로그리드 시스템은 태양광발전이 200[kW], 풍력발전이 100[kW]의 용량이고, 열병합발전과 디젤발전이 각각 250[kW] 용량이다. 여기서는 마이크로그리드의 계획이 아니라 마이크로그리드의 운영을 다루고 있기 때문에 태양광발전과 풍력발전의 발전단가는 아주 낮다. 발전단가는 태양광발전이 20[원/kWh], 풍력발전이 10[원/kWh], 열병합발전과 디젤발전이 각각 150[원/kWh], 170[원/kWh]이라고 가정한다. 배터리는 마이크로그리드 뿐만이 아니라 전기자동차, 모바일 기기 등의 다분야에서 주요설비로 부각됨에 따라 그 기술이 날로 발전하고 있고, 대량생산화 되고 있어 가격도 크게 떨어지고 있으며, BESS는 배터리의 특성과 가격에 크게 좌우된다. 따라서, BESS는 표 3에서 제시되는 용량과 특성을 가진다고 가정한다. BESS의 충방전 수명은 3000[cycle], BESS의 자연열화 수명은 30[년], BESS의 운용 C-rate는 0.5, BESS의 수명단축에 따른 손실비용 C_{red}는 38.6[원/kWh]이라고 가정하였다. 또, BESS의 SOC최소치와 SOC최대치는 각각 0.1과 0.9로 운전되고, BESS의 충전 손실률은 L_C =0.075 [p.u], BESS의 방전 손실률은 L_D =0.075 [p.u]이라고 가정하였다. 고려되는 태양광 발전 및 풍력발전과 부하는 표 4와 같다.

마이크로그리드의 급전 당일의 전날 부하 및 신재생전원 발전을 예측하고, 이에 근거하여 급전당일의 발전계획을 수립한다. 1일 동안의 최적운영계획을 수립하기 위해 하루의 시간을 총 24개의 구간으로 구성하여 1시간 간격의 최적 운영 해를 구한다.

표 3 BESS의 데이터
Table 3 Data of the BESS

정격 전력 (kW)	용량 (kWh)	운용 C-rate	L_C (p.u)	L_D (p.u)	가격 (원/kWh)
200	400	0.5	0.075	0.075	159,500
SOC 최소치	SOC 최대치	충방전 수명 (cycle)	자연열화 수명 (년)	C_{red} (원/kWh)	초기 충전량 (kWh)
0.1	0.9	3,000	30	38.6	40

표 4 마이크로그리드의 태양광 발전 및 풍력발전과 부하의 데이터

Table 4 Data of the photovoltaic generation, wind generation and load of the microgrid

시간 (hour)	태양광발전 (kWh)	풍력발전 (kWh)	부하 (kWh)
1	0.0	52.4	332.0
2	0.0	51.6	316.0
3	0.0	45.0	308.0
4	0.0	44.9	307.0
5	0.0	46.3	330.0
6	14.1	45.0	337.0
7	42.1	42.9	364.3
8	63.0	38.3	466.7
9	91.0	34.8	518.6
10	104.9	33.8	575.0
11	119.0	31.5	609.1
12	132.9	32.1	613.7
13	140.0	30.0	586.3
14	132.9	28.4	647.6
15	117.6	25.9	651.0
16	91.0	23.3	642.0
17	48.9	22.8	580.0
18	14.1	24.1	538.0
19	0.0	31.8	478.8
20	0.0	37.9	472.8
21	0.0	40.5	402.0
22	0.0	37.6	375.0
23	0.0	34.3	353.6
24	0.0	38.3	332.6

3.2 시뮬레이션 결과와 경제성 분석

3.2.1 디젤발전기의 효율이 출력에 상관없이 일정하다고 가정하는 경우(Case 1)

BESS와 디젤발전기의 조합 운영의 자세한 분석을 위하여 디젤발전기의 효율이 출력에 상관없이 일정하다고 가정하는 경우와 디젤발전기의 효율이 출력에 따라 변하는 경우의 두가지 경우에 대하여 분석한다. 디젤발전기의 효율이 출력에 상관없이 일정하다고 가정하는 Case 1의 경우에 각 구간에서의 최적발전량은 그림 2에 보여져 있다. 그림 2의 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. 열병합 발전의 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 기간 중에 충전하고, BESS에 충전된 전력을 전력공급이 부족한 시간대의 피크부하 기간 중에 방전하여 필요한 전력을 공급한다. 또한 디젤발전기의 효율이 출력에 상관없이 일정하다고 가정한 경우이므로 디젤발전기의 효율이 낮은 경우 효율이 높은 방식으로 더 발전을 하여 BESS에 충전할 필요가 없으므로 전력이 부족하게 되는 양만큼만 디젤발전기가 발전하고, 전력이 부족한 시간대의 부족한 전력을 보충하게 된다.

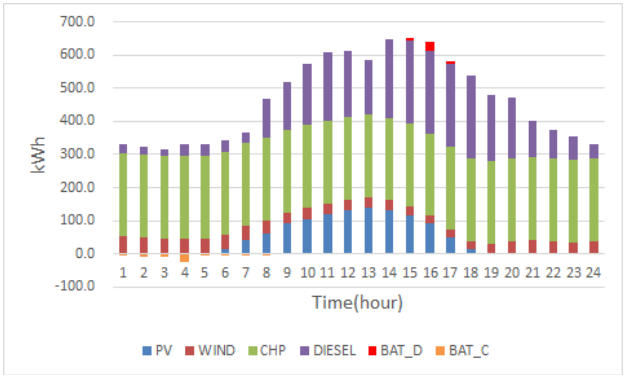

그림 2 디젤발전기의 효율이 출력에 상관없이 일정하다고 가정하는 경우의 마이크로그리드의 최적운영

Fig. 2 Optimal operation of the microgrid in the case that the efficiency of the diesel generator is assumed to be constant

1에서 7까지의 구간에서 디젤 발전기의 출력은 정격출력의 약 10% 정도의 수준으로 매우 낮다. 그러나 디젤발전기의 효율이 출력에 상관없이 일정하다는 가정에 의하여 그 효율은 모든 구간에 걸쳐 동일하다. 구간 15, 16과 17에서 약간의 전력 부족이 발생하므로, BESS는 발전전력의 여유가 있는 구간 1과 7에서 약간씩 충전하여, 전력 부족이 발생한 구간 15, 16과 17에서 충전된 전력을 방전한다. 이러한 동작으로 BESS는 전력이 부족한 시간대에서 피크부하를 삭감하는 역할을 수행함을 보여 준다.

3.2.2 디젤발전기의 효율이 출력에 따라 변하는 경우(Case 2)

(1) BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하지 않는 경우

BESS와 디젤발전기의 실제에 맞는 조합 운영의 자세한 분석을 위하여 디젤발전기의 효율이 출력에 따라 변하는 경우에 대하여 분석한다. 이 경우에 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하지 않을 때와 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려할 때로 나누어 수명단축에 따른 손실비용이 미치는 영향도 검토한다. 먼저 수명단축에 따른 손실비용을 고려하지 않는 경우에 대하여 분석한다. 디젤발전기의 출력비에 따른 연료 소모량은 앞

절의 표 1과 그림 1에 보여져 있다. 이 표와 그림에서 보면 정격 출력의 50%와 100% 사이의 출력에서는 발전효율과 밀접한 관련이 있는 출력당 연료소모량이 거의 비슷하나, 50% 이하에서는 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 정격 출력의 25%의 출력에서는 출력당 연료소모량이 정격 출력의 50%의 출력일 때보다 15%정도 상승하고 있다. 그러므로 정격 출력의 25% 수준에서 약 15% 정도의 효율저하를 나타내고 이보다 더 낮은 출력에서는 더 효율이 떨어지게 됨을 예견할 수 있고, 이를 고려하여 도출한 디젤발전기의 발전단가 수식 (1)을 적용한다. 디젤발전기의 기동정지 비용은 분석을 용이하게 하기 위하여 기동비용으로 통합하여 고려하고, 250kW급의 디젤발전기의 1회 기동비용을 970[원]이라고 가정한다.

디젤발전기의 효율이 출력에 따라 변하는 경우에 각 구간에서의 최적발전량은 그림 3에 보여져 있다. 디젤발전기의 효율이 출력에 따라 변하기 때문에 최적운영 결과가 앞의 결과와는 달라진다. 1에서 7까지의 구간에서 디젤 발전기의 출력은 정격출력의 약 10% 정도의 수준으로 매우 낮으므로, 디젤발전기의 효율이 상당히 낮아지게 된다. 그러므로 1구간과 2구간에서 디젤발전기는 효율이 높은 정격출력의 50% 정도의 수준으로 초과하여 발전을 하고 남는 전력을 BESS가 충전하며, 3에서 6까지의 구간에서 디젤 발전기가 정지되고 BESS가 충전한 전력을 방전하게 된다. 그리고 7구간과 8구간에서 디젤발전기는 효율이 높은 정격출력의 50% 정도의 수준으로 발전을 하고 남는 전력을 BESS가 충전하여 전력이 부족한 피크부하 구간에 대비하게 된다. 전력 부족이 발생하는 구간인 15, 16과 17 구간에서 BESS가 충전된 전력을 방전하여 전력부족을 해소하고 경제적 운영이 되도록 한다. 21과 22의 구간에서 디젤 발전기의 효율 감소가 비교적 미약한 범위 내에서 디젤 출력을 줄이는 대신 BESS의 충전전력을 방전하고, 구간 24에서는 낮은 효율에서 동작되던 디젤 발전기가 정지되고 이 구간에서 BESS가 충전된 전력을 방전하여 보다 더 경제적으로 운영하게 된다.

(2) BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하는 경우

BESS와 디젤발전기의 조합 운영의 자세한 분석을 위하여 디젤발전기의 효율이 출력에 따라 변하는 경우에 대하여 분석하면서, BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하는 경우에 대하여 분석한다. BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려할 때의 최적발전량은 그림 4에 보여져 있다. 이 때에는 여러 가지 요소들이 동시에 고려되므로 분석하기가 복잡하게 된다. 디젤발전기의 효율이 출력에 따라 변하는데 덧 붙여서 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하기 때문에 최적운영 결과가 앞의 결과와는 또 달라진다. BESS가 충방전하는 전력의 양이 커지면 BESS 수명단축 손실비용이 추가되므로 앞의 결과에 비하여 가능한 BESS가 충방전하는 전력을 줄이게 된다. 1에서 7까지의 구간에서 디젤 발전기의 출력은 정격출력의 약 10% 정도의 수준으로 매우 낮으므로, 디젤발전기의 효율이 상당히 낮으나, BESS의 수명단축에 따른 손실비용이 추가되어 디젤발전기를 필요발전량보다 더 발전시키고 BESS를 충전시켜 운영하는 방안의 이득이 크게 줄어들게 된다.

따라서 1에서 7까지의 구간에서 디젤 발전기의 출력은 정격출력에 비하여 낮지만, 1구간에서만 디젤발전기가 효율이 높은 정격출력의 50% 정도의 수준으로 발전을 하고 남는 전력을 BESS가 충전하고, 2에서 4까지의 구간에서 디젤 발전기가 정지된다. 5에서 7까지의 구간에서도 디젤 발전기의 출력은 정격출력에 비하여 낮지만, 수명단축에 따른 손실비용의 영향과 기동정지비용에 의한 디젤발전기 기동정지 횟수를 줄이려는 영향 등으로 디젤발전기가 더 높은 전력의 수준으로 발전하지 못하게 되는 상황을 그림 3에서 보여 주고 있다. 여러 가지 요인들이 포함된 고차방정식의 해가 구해져야 그 결과를 알 수 있게 된다.

전력 부족이 발생하는 구간 15, 16과 17에서는 BESS가 발전전력의 여유가 있는 구간 1에서 충전한 전력을 방전한다. 이러한 동작으로 BESS는 피크부하를 삭감하는 역할을 수행함을 보여 준다. BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하게 되니까, 그림 3과 다르게 그림 4에서는 BESS의 충방전 총량이 크게 줄어 들

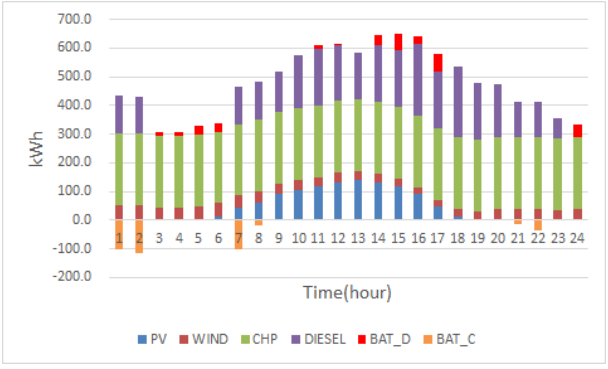

그림 3 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하지 않는 경우의 마이크로그리드의 최적운영

Fig. 3 Optimal operation of the microgrid in the case that the loss cost of life-time reduction of the BESS is not considered

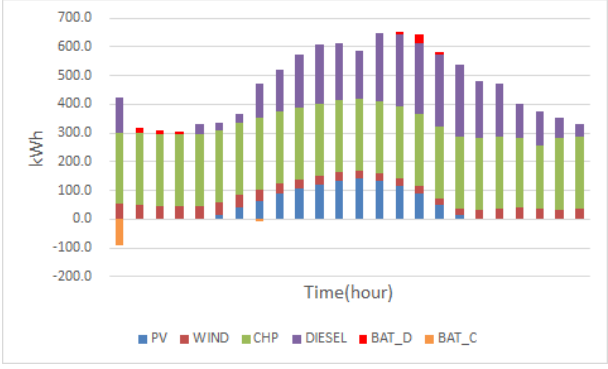

그림 4 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하는 경우의 마이크로그리드의 최적운영

Fig. 4 Optimal operation of the microgrid in the case that the loss cost of life-time reduction of the BESS is considered

었다.

이 경우의 시뮬레이션을 통하여 디젤발전기의 출력에 따라 변하는 효율의 영향과 BESS의 수명단축에 따른 손실비용의 영향이 BESS의 충방전 운영에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3.3 BESS와 디젤발전기의 조합 운영에 의한 마이크로그리드의 최적운영에 대한 검토

위의 시뮬레이션 해들의 경제적인 이득에 대하여 비교하기 위하여 전체발전비용을 제시하면 표 5와 같다. Case 1과 Case 2의 (1)과 (2)의 각 경우의 최적해에 대하여 전체발전비용을 나타낸 것이다. 각각의 해에 대하여 문제를 풀 때 적용한 발전단가가 아니라 실제의 발전단가를 적용하여 비교하였다. 단, BESS의 수명단축에 따른 손실비용은 바로 나타나는 발전단가가 아니라 감가상각비와 유사하게 누적되어 수명을 다하게 될 때 나타나게 되므로, 이를 구분하여 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 포함할 때와 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 포함하지 아니할 때를 나누어 비교하였다.

표 5에서 BESS의 수명단축 영향을 고려치 않는 경우에는 Case 2의 (1)이 가장 경제적인 방안으로 도출된다는 것을 알 수 있다. 이의 최적발전량이 앞에서의 그림 3과 같이 주어진다. 그러나 BESS의 수명단축 영향을 고려하는 경우에는 BESS의 수명단축에 따른 손실비용을 고려하기 때문에 BESS가 충방전하는 전력의 양이 커지면 비용이 추가되므로 앞의 결과에 비하여 가능한 BESS가 충방전하는 전력을 줄이게 된다. 이 경우에는 Case 2의 (2)가 가장 경제적인 방안으로 도출된다는 것을 알 수 있다. 이때의 최적발전량은 앞에서의 그림 4와 같이 주어진다. 이 그림을 통해서 알 수 있듯이 그림 4의 BESS가 충방전하는 전력은 그림 3의 BESS가 충방전하는 전력보다 많이 줄어든 상태임을 알 수 있다.

표 5 시뮬레이션 결과에 의한 전체발전비용 비교

Table 5 Comparison of total generation costs according to the simulation results

	Case 1 (디젤발전기 효율 일정) [원]	Case 2 (디젤발전기 효율 변화) [원]	
		(1) BESS 수명단축 미고려	(2) BESS 수명단축 고려
전체발전비용 (BESS의 수명단축 손실 미포함)	1,472,394.0	1,466,948.7	1,468,852.9
전체발전비용 (BESS의 수명단축 손실 포함)	1,474,356.4	1,481,817.4	1,472,597.1

디젤발전기의 효율이 출력에 따라 크게 변화하는 경우에 BESS와의 조합운영을 통하여 더 경제적인 운영이 되도록 운영할 수 있는 기법을 제시하고, 이 시뮬레이션을 통하여 이 기법이 적합하게 적용될 수 있음을 보여주었다. 하나의 예로 250kW급의 소형 디젤발전기의 경우에 정격 출력의 50%와 100% 사이의 운전에서는 효율이 거의 변화가 없으나 정격 출력의 50% 이하에서는 급격히 떨어지게 되는데, 이런 상황에서는 디젤발전기의 출력을 효율이 더 높은 정격 출력의 50% 이상으로 올리고 이 전력을 BESS에 충전하여 피크부하에 대비하여 운전하는 것이 더욱 경제적인 경우도 발생할 수 있음을 보여준다. 또한, BESS의 수명단축에 따른 손실비용의 영향이 BESS의 충방전 운영에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. BESS의 충방전 손실율과 디젤발전기의 기동정지비용도 영향을 미친다. 그러나 경제적인 편익의 크기와 범위는 디젤발전기의 출력비에 따른 효율변화량과 기동정지비용, BESS의 수명단축에 따른 손실비용과 충방전 손실율 등의 영향을 받아 각 케이스 마다 달라지고 부하와 발전량이 달라질 때마다 달라지게 되므로, 일반적인 결론을 도출하는 것은 힘들고, 특정한 조건과 환경에 따라서 시뮬레이션을 통하여 산정할 수 있다.

4. 결 론

마이크로그리드에서 가장 중요한 핵심설비들 중에 하나인 BESS와 디젤발전기의 최적운영과 관련한 정확한 분석을 위하여 디젤발전기의 출력비에 따른 연료소모량을 발전효율의 관점에서 분석하고, 디젤발전기의 발전단가를 출력비의 함수로 유도하였다. 또한 BESS의 필수책무인 전력부족 시 예비하여 충전시킨 전력을 공급하여 안정적인 전력공급이 되도록 하는 것 이외에 순전히 경제적인 목적으로 BESS를 활용하는 방안에 대한 정확한 분석을 위하여 BESS의 충방전 횟수의 증가에 따르는 BESS의 수명감소의 영향을 고려하는 새로운 BESS 최적운영의 모델링을 제시하였다. 이를 활용하여 BESS와 디젤발전기의 최적운영 방안을 구하는 기법을 제시하고, 독립운전 모드의 가상의 마이크로그리드에 적용하여 그 효과를 검증하였다. 이 시뮬레이션을 통하여 디젤발전기의 효율이 출력에 따라 크게 변화하는 경우에는 BESS와의 조합운영을 통하여 더 경제적인 운영이 되도록 운영할 수 있음을 보여주었다. 그러나 경제적인 편익의 크기와 범위는 디젤발전기의 출력비에 따른 효율변화량과 기동정지비용, BESS의 수명단축에 따른 손실비용과 충방전 손실율 등의 영향을 받아 각 케이스 마다 달라지고 부하와 발전량이 달라질 때마다 달라지게 되므로, 일반적인 결론을 도출하는 것은 힘들고, 특정한 조건과 환경에 따라서 시뮬레이션을 통하여 결정할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2014년도 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] Madeleine Ecker, "Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data", Journal of Power Sources, pp. 248-257, 2012.
[3] 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.
[4] L. Xie and M. Ilic, "Model predictive economic/ environmental dispatch of power systems with inter-mittent resources," in IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp.1-6, Jul. 2009.
[5] Hak-Ju Lee, Woo-Ku Cha, Il-Kun Song and Yong-Tae Yoon, "Development of Economic based Optimal Operation Program for Microgrid," Journal of KIEE, Vol. 23, No. 12, pp. 106-114, 2009.
[6] 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.
[7] 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.
[8] M. Parol and T. Wojtowicz, "Optimization of exchange of electirical energy between microgrid and electricity utility distribution network", Modern Electric Power Systems(MEPS) 2010 Proceedings of the International Symposium, pp. 1-6, Sept. 2010.
[9] B. Khorramdel, H. Khorramdel, J. Aghaei, A. Heidari, and V.G. Agelidis, "Voltage security considerations in optimal operation of BEVs/PHEVs integrated microgrids", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol 6, NO 4, pp. 1575-1587, 2015.
[10] D. Ke, C. Y. Chung, and Y. Sun,, "A novel pro-babilistic 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.

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(공박). 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@inu.ac.kr