

리튬 배터리 충,방전 사이클을 고려한 마이크로 그리드에서 ESS 운영 제안

박상준*, 김지영**, 신훈영**

*상명대학교 전기공학과

**상명대학교 일반대학원 에너지그리드학과

e-mail:sujun3214@naver.com

Energy Storage System Operation in a Microgrid Considering Li-ion Battery Charging and Discharging Cycles

Sang-Jun Park*, Jiyoung Kim**, Hunyoung Shin**

*Dept. of Electrical Engineering, Sangmyung University

**Dept. of Energy-grid, Graduate School, Sangmyung University

요약

마이크로 그리드는 전력 생산과 소비를 능동적으로 함으로써 회복력과 신뢰성 있는 전력시스템 운용을 가능하게 한다. 마이크로 그리드 운영에 핵심이 되는 장치인 에너지저장장치(ESS)는 아직 가격이 높기 때문에 ESS의 수명을 고려한 운영이 필요하다. 본 논문에서는 ESS 운영에 제한을 두어 배터리 소모를 줄이고 수명을 늘리는 방향으로 마이크로 그리드 전력원들을 운영하는 방법을 연구하였다. 정수 선형 계획법을 이용하여 최소 충전시간, 최소 방전 시간 등 장치의 수명과 관련된 조건을 ESS 운전 제약조건으로 두고 최적화 문제를 설계했으며 ESS 운전 제약조건을 고려하지 않는 문제와 비교를 하였다. 시뮬레이션을 통해 ESS 운전 제약조건이 마이크로 그리드 운영비용을 다소 증가시키지만 배터리 수명 연장에 상당한 효과가 있는 것을 확인하였다.

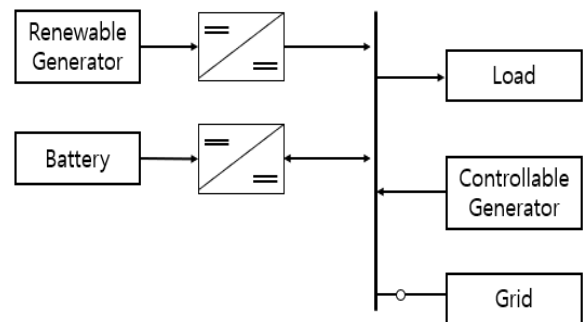
1. 서론

홍수, 지진, 태풍과 같은 강력한 자연재해는 전력시스템의 구성요소에 부정적인 영향을 줄 수 있으며 이는 심각한 정전 및 경제적 손실로 이어진다. 이에 따라 전력계통에 '회복성'이라는 개념이 도입되었으며 회복성 향상을 위한 마이크로 그리드의 도입 및 운영이 연구 중에 있다. [1] 마이크로 그리드는 신재생 발전원, ESS, 디젤발전기 등으로 구성되며 디젤 발전기와 ESS는 불안정한 재생 에너지의 발전량을 보완하여 수요와 공급 간의 전력균형을 달성하게 해주는 핵심적인 역할을 한다. 하지만 배터리의 높은 가격과 잦은 충,방전 패턴으로 인한 배터리의 수명 단축은 마이크로 그리드 유지보수 비용의 원인 중 하나이다. [2] 따라서 전력 수요와 공급의 균형, 배터리의 수명을 고려한 스케줄링이 필요하다. 본 논문에서는 ESS 운영에 제한을 두어 배터리 소모를 줄이면서 수명을 늘리는 방향으로 마이크로 그리드 전력원들을 운영하는 방법을 연구하였다. 배터리의 수명 연장을 위해 ESS 관련 제약조건으로 배터리의 최소 충전시간, 최소 방전시간을 제시하였으며 이를 정수 선형 계획법을 통해 풀이했다. ESS 제약조건을 고려한 시뮬레이션과 ESS 제

약조건을 고려하지 않은 시뮬레이션의 결과 비교를 통해 ESS 운전 제약조건이 마이크로 그리드 운영비용을 다소 증가시키지만 배터리 수명 연장에 효과가 있는 것을 확인하였다.

2. 본론

2.1 가상 마이크로 그리드 구성



[그림 1] 가상 마이크로 그리드 구성

마이크로 그리드의 구성을 [그림1]과 같이 가정했으며, Renewable Generator는 풍력, 태양광을 모두 포함하며 Controllable Generator는 디젤 발전기를 포함하여 제어 가능한 발전원을 의미한다.

2.2 마이크로 그리드 스케줄링 최적화

본 논문에서는 최적화 기반으로 배터리 소모를 줄이고 수명을 늘리는 방향으로 마이크로 그리드 스케줄링을 결정한다. 최적화 문제에 사용되는 파라미터와 변수들은 다음과 같다.

Index :

t	time(hour)
g	발전기 번호

Parameters :

P_g^{\min}, P_g^{\max}	g번째 발전기의 상/하한 출력
$P_g^{\text{ramp.down}} / P_g^{\text{ramp.up}}$	g번째 발전기의 ramp 증/감발
$T_{go1}(g)$	g번째 발전기 최소 기동시간
$T_{go2}(g)$	g번째 발전기 최소 정지시간
C_g^{CG}	g번째 발전기 발전가격
C_g^{SU} / C_g^{SD}	g번째 발전기 기동/정지 비용
$ESSc$	ESS 용량
$PCSmin / PCSmax$	최소/최대 충,방전량
$T_{\min.ch,dch}$	ESS 최소 충,방전 시간
P_g^{RG}	재생에너지 발전량 예측값
$P_c^{Subatation}$	변전소 용량
PR^{BUY} / PR^{Sell}	시장 가격
$Load$	부하 예측 값

Variables :

P_g^{CG}	g번째 발전기 발전량
P^{BUY} / P^{Sell}	Grid에서 구매/판매하는 전력
$P^{dischar}$	ESS 방전량
P^{char}	ESS 충전량
SOC	배터리 잔존 용량
u_g	g번째 발전기 상태 변수
y_g	g번째 발전기 기동 상태 변수
z_g	g번째 발전기 정지 상태 변수
u_{ch}	ESS 방전 상태 변수
u_{dch}	ESS 충전 상태 변수

계산을 위한 데이터는 [3]을 참조하였으며 발전기의 실제 물리적 특성 및 배터리 운전 제약조건을 고려하기 위해, 이진 상태 변수를 사용한 혼합 정수 선형 계획법을 사용하였으며, [4] 다음과 같이 정식화하였으며 배터리의 충,방전 효율은 0.95로 가정하였다.

$$\min \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T (C_g^{CG} * P_g^{CG}(t) + y_g(t) * C_g^{SU} + z_g(t) * C_g^{SD}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{t=1}^T (PR^{BUY}(t) * P^{BUY}(t) - PR^{Sell}(t) * P^{Sell}(t))$$

$$s.t. \quad u_g * P_g^{\min} \leq P_g^{CG} \leq u_g * P_g^{\max} \quad (2)$$

$$P_g^{CG}(t-1) - P_g^{\text{ramp.down}} \leq P_g^{CG}(t) \quad (3)$$

$$P_g^{CG}(t) \leq P_g^{CG}(t-1) + P_g^{\text{ramp.up}}$$

$$T_{go1}(g) - 1 \sum_{t_{go1}=0}^{t_{go1}(g)-1} (u_g(t+t_{go1})) \quad (4)$$

$$\geq T_{go1}(g) * (u_g(t) - u_g(t-1))$$

$$T_{go2} - \sum_{t_{go2}(g)=0}^{T_{go2}(g)-1} (u_g(t+t_{go2})) \quad (5)$$

$$\geq T_{go2} * (u_g(t-1) - u_g(t))$$

$$y_g(t) = \max\{(u_g(t) - u_g(t-1)), 0\} \quad (6)$$

$$z_g(t) = \max\{(u_g(t-1) - u_g(t)), 0\} \quad (7)$$

$$P_g^{CG} + P_g^{RG} + P^{BUY} - P^{Sell} - u_{ch} * P^{char} + 0.95 * u_{dch} * P^{dischar} \geq P^{Load}(t) \quad (8)$$

$$u_{ch} * PCSmin \leq P^{char} \leq u_{ch} * PCSmax \quad (9)$$

$$SOC * ESSc + 0.95 * P^{char} \leq 0.9 * ESSc \quad (10)$$

$$u_{dch} * PCSmin \leq P^{dischar} \leq u_{dch} * PCSmax \quad (11)$$

$$u_{dch} * P^{dischar} \leq SOC * ESSc \quad (12)$$

$$SoC(t+1) = SoC(t) + \frac{0.95 * P_{ch}(t) - P_{dch}(t)}{ESSc} \quad (13)$$

$$T_{\min.ch,dch} - 1 \sum_{t_{\min.ch,dch}=0}^{t_{\min.ch,dch}-1} (u_{ch,cdh}^{ref}(t+t_{\min.ch,dch})) \quad (14)$$

$$\geq T_{\min.ch,dch} * (u_{ch,dch}^{ref}(t) - u_{ch,dch}^{ref}(t-1))$$

$$1 \geq u_{ch}(t) + u_{dch}(t) \geq 0 \quad (15)$$

$$0 \leq P^{BUY}, P^{Sell} \leq P_c^{Subatation} \quad (16)$$

$$All Variable \geq 0 \quad (17)$$

(1)은 목적함수로서 최소화해야 할 비용을 고려한 비용함수이며 (8)은 전력 수요와 공급을 맞추기 위한 식으로 마이크로 그리드를 스케줄링하는데 필요한 핵심적인 식이다.

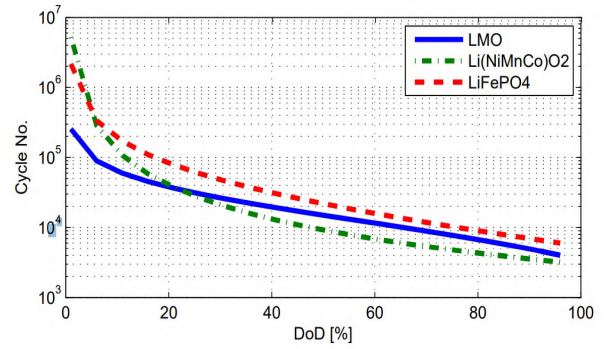
(2) ~ (5)는 발전기의 실제 물리적인 특성을 반영하기 위한 제약조건이다. 실제 발전기의 용량은 정해져 있기 때문에 발전기의 상한 출력을 고려해야 하며 출력이 너무 낮을 경우에는 발전기가 불안정해지고 비효율적일 수 있게 되므로 발전기의 출력은 최소 출력 이상을 유지해야 한다. 이를 반영한 제약조건이 (2)이다. 또한 발전기를 기동했을 때 최대 출력에 바로 도달할 수 없다. 단위 시간당 출력 증가분에 상한이 존재하기 때문이다. 마찬가지로 단위 시간당 출력 감소분의 상한도 존재한다. 이를 반영한 제약조건이 (3)이다. 발전기는 급격한 상태 변화가 발생할 때 기계적, 열적 스트레스가 나타난다. 이를 방지하기 위해 발전기는 최소 기동시간, 최소 정지시간을 가진다. 이를 고려한 제약조건이 (4) ~ (5)이다. (6) ~ (7)은 발전기의 기동 동작과 정지 동작을 나타내는 이진 변수로 목적함수의 비용을 계산하기 위해 필요하다.

(9) ~ (15)은 ESS에 충,방전되는 전류를 제약하고 ESS의 SoC를 결정하기 위한 식이다. PCS를 통해 ESS의 충,방전이 이루어지며 충,방전 되는 양은 PCS의 용량에 의해 제한된다. 발전기의 하한 출력과 마찬가지로 충,방전되는 전력의 최소 용량 또한 존재해야 한다. (14)식은 배터리의 최소 충,방전 시간을 적용하여 ESS의 운전을 제약하는 식이다. (14)식을 사용함으로써 SoC 패턴에서 잦은 충,방전으로 인한 리플을 제거할 수 있다.

(16)식은 외부 전력망으로부터 구매 및 판매 가능한 전력량의 한계를 정해준다. 이 한계는 변전소의 용량에 따라 결정된다.

2.3 배터리 수명 예측 방법

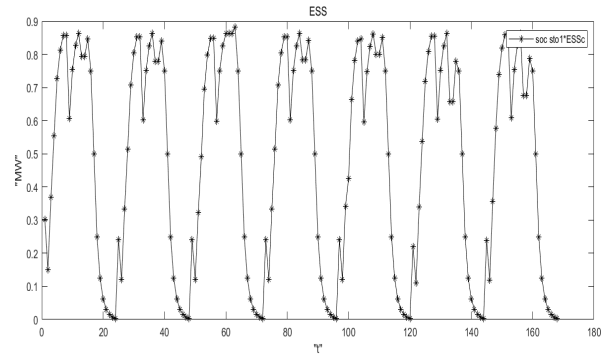
그림 2를 이용하여 DoD에 따른 한계 사이클을 계산할 수 있으며 [5], 배터리의 일일 평균 사이클 수를 알면 수명을 계산할 수 있다. 하지만 ESS를 운영할 때 방전 심도는 시간에 따라 달라지며 배터리가 항상 최대 충전 상태에서 방전되는 것이 아니기 때문에 사이클을 카운팅하는데 어려움이 있다. 따라서 rainflow counting algorithm 을 이용하여 사이클을 계산하였으며 [6], 이를 이용해 마이크로 그리드 스케줄링 기간 동안의 평균 DoD 및 수명을 계산하였다.



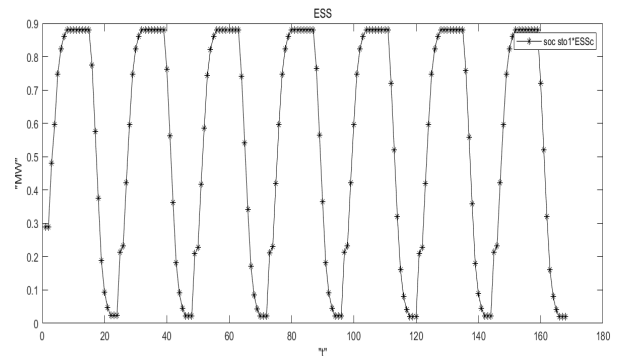
[그림 2] 방전 심도에 따른 배터리의 한계 사이클 [5]

2.4 시뮬레이션 결과

ESS 운전 제약조건이 배터리 수명에 영향을 미치는지 분석하기 위해 제약조건 유무에 따른 결과를 나타냈으며, 사용 배터리는 LMO로 가정하였다.



[그림 3] 제약조건을 고려하지 않은 경우의 SoC 패턴



[그림 4] 제약조건을 고려한 경우의 SoC 패턴

[표 1] 기대 수명 계산

최소 충,방전 시간	0	5
충,방전 사이클 수(7day)	26.5	7
평균 DoD	35.6	85.9
LMO 배터리 한계 사이클	2e+4	6e+3
기대 수명 (year)	14.51	16.43
비용 (\$)	75523	76089

제약조건 유무에 따라 사이클 수가 달라졌으며 이로 인해 LMO 배터리, 평균 DoD 가 다른 것을 확인하였다. DoD의 경우 제약조건이 존재할 때 85.9로 제약조건이 존재하지 않을 때보다 훨씬 높은 것을 확인할 수 있었지만 충,방전 사이클의 수 차이로 인해 기대 수명이 제약조건이 존재할 때 1.92 년이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

3. 결론

현재까지 배터리의 높은 가격으로 인해 배터리의 낮은 충방전으로 인한 수명 감소는 유지보수 비용의 상승으로 이어질 수 있다. 따라서 마이크로 그리드를 스케줄링할 때 배터리의 수명 역시 고려사항이 되어야한다. 본 논문에서는 마이크로 그리드의 수명을 고려하기 위해 ESS 운전 제약조건을 제시 및 적용하였다. 결과 비교를 통해서 ESS운전 제약조건이 마이크로 그리드 운영 스케줄링에 있어 비용을 증가시키지만, 배터리 사용의 리플을 제거하며 배터리 소모를 줄여 수명을 늘리는데 효과가 있는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030300230)

참고문헌

[1] Yi Wang, Anastasios Oulis Rousis, Goran Strbac, “On microgrids and resilience: A comprehensive review on modeling and operational strategies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 134, December 2020, 110313

[2] Guannan He & al., “Optimal Bidding Strategy of Battery Performance-Based Regulation and Battery Cycle Life,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 5, pp. 2359 - 2367, Sept. 2016.

[3] Amin Khodaei, “Microgrid Optimal Scheduling With Multi-Period Islanding Constraints”, *IEEE Transactions on Power Systems* (Volume: 29, Issue: 3, pp1383 - 1392 May 2014)

[4] Amin Khodaei, “Resiliency-Oriented Microgrid Optimal Scheduling”, *IEEE Transactions on Smart Grid*(Volume: 5, Issue: 4, pp 1584 - 1591 ,July 2014)

[5] Bolun Xu, Andreas Ulbig, Andreas Ulbig, Göran Andersson, Daniel Kirschen, “Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment”, 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting

[6] S. D. Downing “Simple rainflow counting algorithms”, *Int. J. Fatigue*, vol. 4, pp. 31-40, 1982.