

독립운전 시나리오를 고려한 마이크로그리드의 최적 발전기 기동정지 계획

Unit Commitment of a Microgrid Considering Islanded Operation Scenarios

이 시 영*
(Si Young Lee)

Abstract - Islanded operation of a microgrid can ensure the reliable operation of the system when a large accident occurs in the main grid. However, because the generation capability of a microgrid is typically limited, a microgrid operator should take islanded operation risk into account in scheduling its generation resources. To address this problem, in this paper we have proposed two unit commitment formulations based on the islanding scenario that reflect the expected and worst-case values of the islanded operation risk. An optimal resource scheduling strategy is obtained for the microgrid operator by solving these optimization problem, and the effectiveness of the proposed method is investigated by numerical simulations.

Key Words : Microgrid, Islanded operation, Unit commitment, Stochastic optimization, Worst case optimization

1. 서 론

최근, 배전 레벨에서 소형 디젤발전기, 태양광 발전, ESS 등 다양한 분산전원(Distributed Generator, 이하 DG)들이 도입되면서, 계통을 안정적으로 운영하기 위한 계통운영자(System Operator, 이하 SO)의 부담이 커지고 있다. 마이크로그리드는 DG 및 제어 가능한 수요 등의 서브시스템으로 이루어진 독립된 계통운영의 단위로서, 마이크로그리드 기반의 계통운영 기술은 다수의 DG들을 안정적이고 효율적으로 제어하여 상위 SO의 부담감을 경감시킬 수 있을 것으로 기대된다[1]. 마이크로그리드의 가장 큰 특징 중 하나는 상위 계통에서 치명적인 사고가 발생한다 하더라도, 독립운전을 통해 독자적으로 마이크로그리드 내 수요공급을 유지할 수 있다는 점이다[2]. 이러한 마이크로그리드의 독립운전 기능은 전통적인 전력계통에서는 불가능했던 기능으로, 최근 이와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다.

[3], [4]에서는 마이크로그리드 내 다양한 장비들을 모델링하고, 독립운전이 발생할 경우 해당 모델들을 안정적으로 제어하는 방법론에 대해 살펴보았다. [5]에서는 독립운전 중인 마이크로그리드가 상위 계통과 안정적으로 동기화하기 위한 제어 방법에 대해 연구하였다. 이처럼 기존의 마이크로그리드 독립운전과 관련한 대부분의 연구들은 마이크로그리드의 독립운전을 하나의 상정 사고(contingency)로 바라보고 있다. 즉, 기존 연구들은 마이크로그리드가 새롭게 정의된 "독립운전"이라는 상정사고가 발생한 후

에도 안정적인 운영을 유지할 수 있는 제어방안 및 대비책 마련에 집중하고 있다.

한편, 독립운전이라는 상정사고가 발생하기 이전에 발전기 기동정지 계획(Unit Commitment, 이하 UC)와 같은 계통운영계획에 이를 반영하여 마이크로그리드 내 발전자원의 스케줄을 비용 측면에서 효율적으로 결정하는 연구들도 있어 왔다. 예를 들어, [6]에서는 마이크로그리드 독립운전 발생의 위험(risk)을 분석하여, 이를 바탕으로 발전출력 및 예비력의 스케줄을 결정해 마이크로그리드의 일간 에너지 공급비용의 기댓값을 최소화하였다. 그리고 [7]에서는 마이크로그리드의 UC문제를 마이크로그리드의 모든 독립운전 시나리오에 대해 대처가 가능하면서 비용을 최소화할 수 있도록 정식화 하였다.

본 논문은 기본적으로 [7]의 연구 결과를 확장 진행한 연구로서, [7]에서 제시된 독립운전 정식화 모형의 오류를 개선하고 목적함수에 독립운전 발생비용 분석을 추가하였다. 즉, 통상적인 확률론적 UC(Stochastic UC)를 기반으로 마이크로그리드의 독립운전비용을 반영한 최적 스케줄링 모형을 수립하였으며, 수립된 모형에 독립운전 발생 시 이에 대응하는 발전계획 수정 전략을 반영하여 보다 효율적으로 마이크로그리드가 자신의 발전자원을 운영할 수 있는 방법을 살펴보았다.

2. 마이크로그리드 독립운전 시나리오를 반영한 UC 문제의 정식화

2.1 선행연구 비교분석

마이크로그리드 내 발전자원의 불확실성으로 인해, 확률론적 UC의 형태로 마이크로그리드 내 발전자원의 스케줄링 문제에 접

* Corresponding Author : Department of Energy and Electrical Eng, Korea Polytechnic University, Korea.
E-mail : slee0519@kpu.ac.kr

Received : March 12, 2018; Accepted : May 8, 2018

근하는 많은 선행연구들이 존재한다. 이들은 [8]와 같이 주로 신재생 발전자원의 출력 변동 시나리오에 대해 마이크로그리드의 발전자원 스케줄링 문제를 확률론적 UC문제로 정식화하였다. 하지만, [7]에서 언급된 바와 같이 이렇게 고려되는 확률론적 모형에 독립운전 시나리오를 포함하는 연구는 거의 없으며, [7]은 독립운전을 고려한 마이크로그리드 스케줄링 연구의 좋은 초기연구로 볼 수 있다. 구체적으로 [7]에서는 N-1 상정사고와 유사한 형태로 마이크로그리드의 독립운전 발생시간에 대한 확률론적 시나리오 모형을 정의하였고, 이를 바탕으로 확률론적 UC문제를 정식화 하였다. 하지만, [7]의 연구에서는 다음과 같은 두 가지 문제점이 존재한다.

- ① 발전자원 스케줄 수립 시 독립운전 발생비용에 대한 고려 미비
- ② 수립된 발전자원 스케줄에 대한 독립운전 발생 시 에너지 공급 가능성(feasibility) 확인의 오류

본 논문은 위의 두 가지 문제점에 착안하여 연구를 진행하였으며, 결과적으로 위 문제들을 해결하여 [7]의 연구결과를 개선할 수 있었다. 구체적으로, 지적인 ①에 대해 본 논문은 [6]의 연구와 같이 독립운전 발생 시 마이크로그리드에 추가적으로 발생하는 비용을 2.2에서 소개하는 정식의 목적함수에 반영하였다. 다음으로 ②와 관련하여 [7]에서 독립운전에 대한 대응전략을 정식화하는 과정에서 오류가 있음을 보이고 2.2에서 이를 바로잡도록 할 것이다.

2.2 대상문제의 정식화 I - 기댓값 최소화

본 논문의 마이크로그리드의 독립운전 발생 모형은 [7]의 $T-\tau$ criterion을 따르기로 한다. 여기서 T 는 UC 스케줄을 계획하는 전체 대상기간의 길이이며, τ 는 대상기간 중 독립운전이 발생하는 기간의 길이이다. 이 독립운전 모형을 기반으로 다양한 마이크로그리드의 독립운전 시나리오 s 를 생성할 수 있으며, 모든 독립운전 시나리오 발생에 따른 마이크로그리드 에너지공급비용의 기댓값을 UC문제의 목적함수로 할 경우 시나리오 s 의 발생확률 α_s 와 해당 시나리오에서의 에너지공급비용 f 의 곱으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\min \sum_{s \in S} [\alpha_s \cdot f(P_{i,t}^s, P_{Mt}^s, LS_t^s)] \quad (1)$$

여기서 마이크로그리드의 에너지공급비용 f 는 전통적인 UC와 유사하지만, 다음과 같이 상위계통과의 전력거래 및 독립운전 시 필요할 수 있는 부하차단이 포함되어야 한다.

$$\sum_t \left[\sum_{i \in G} F_i(P_{i,t}^s) I_{i,t}^s + \rho_t P_{Mt}^s + \phi_t LS_t^s \right] \quad (2)$$

위 함수의 결정변수들은 독립운전이 전혀 발생하지 않는 시나리오 $s=0$ 에서는 다음과 같은 제약조건을 갖는다.

〈수급균형 제약조건〉

$$\sum_i P_{i,t}^0 + P_{Mt}^0 = D_t - LS_t^0 \quad \forall t \quad (3)$$

〈전력거래용량 제약조건〉

$$-P_M^{\max} \leq P_{Mt}^0 \leq P_M^{\max} \quad \forall t \quad (4)$$

〈발전기출력 제약조건〉

$$P_i^{\min} I_{i,t}^0 \leq P_{i,t}^0 \leq P_i^{\max} I_{i,t}^0 \quad \forall i \in G, \forall t \quad (5)$$

〈발전기 증감발출 제약조건〉

$$P_{i,t}^0 - P_{i,t-1}^0 \leq UR_i \quad \forall i \in G, \forall t \quad (6)$$

$$DR_i \leq P_{i,t}^0 - P_{i,t-1}^0 \quad \forall i \in G, \forall t \quad (7)$$

〈발전기 최소 기동/정지시간 제약조건〉

$$ST_{i,t}^0 + SP_{i,t}^0 \leq 1 \quad \forall i \in G, \forall t \quad (8)$$

$$ST_{i,t}^0 - SP_{i,t}^0 = I_{i,t}^0 - I_{i,t-1}^0 \quad \forall i \in G, \forall t \quad (9)$$

$$ST_{i,t}^0 + \sum_{n \in TN_{i,t}} SP_{i,n}^0 \leq 1 \quad \forall i \in G \quad (10)$$

$$\text{where } TN_{i,t} = \{n | t+1 \leq n \leq t + T_i^{on} - 1\}$$

$$SP_{i,t}^0 + \sum_{n \in TF_{i,t}} ST_{i,n}^0 \leq 1 \quad \forall i \in G \quad (11)$$

$$\text{where } TF_{i,t} = \{n | t+1 \leq n \leq t + T_i^{off} - 1\}$$

〈ESS출력 제약조건〉

$$P_{i,t}^0 \leq U_{i,t}^0 \cdot P_i^{Dch,\max} - V_{i,t}^0 \cdot P_i^{Ch,\min} \quad \forall i \in E \quad (12)$$

$$U_{i,t}^0 \cdot P_i^{Dch,\min} - V_{i,t}^0 \cdot P_i^{Ch,\max} \leq P_{i,t}^0 \quad \forall i \in E \quad (13)$$

$$U_{i,t} + V_{i,t} \leq 1 \quad \forall i \in E, \forall t \quad (14)$$

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + P_{i,t} \quad \forall i \in E \quad (15)$$

〈ESS저장용량 제약조건〉

$$E_i^{\min} \leq E_{i,t} \leq E_i^{\max} \quad \forall i \in E, \forall t \quad (16)$$

〈ESS 경계 제약조건〉

$$E_{i,0} = E_{i,T} \quad \forall i \in E \quad (17)$$

〈ESS 충/방전 상태전환횟수 제약조건〉

$$UV_{i,t} \geq U_{i,t} - U_{i,t-1} \quad \forall i \in E \quad (18)$$

$$UV_{i,t} \geq V_{i,t} - V_{i,t-1} \quad \forall i \in E \quad (19)$$

$$\sum_t UV_{i,t} \leq EN_i \quad \forall i \in E \quad (20)$$

위에서 〈ESS 경계 제약조건〉은 대상기간의 시작과 끝점에서 ESS의 저장에너지양이 동일해야 함을 가정한 것으로, 인벤토리 문제에서 일반적으로 적용되는 것이다. 그리고 〈ESS 충/방전 상태전환횟수 제약조건〉은 ESS의 사용수명을 위해 스케줄 대상기

간 중 충/방전의 상태전환을 EN_i 회 이내로 제한한다고 가정하는 것이다. 이처럼 $s = 0$ 에서의 제약조건은 [9]의 일반적인 UC문제의 제약조건과 동일하다.

다음으로, 독립운전이 발생하는 $s \neq 0$ 인 시나리오의 결정변수들은 독립운전 발생에 대한 마이크로그리드의 대응전략 및 물리적 한계를 반영하는 제약조건들을 갖게 된다. 즉, 마이크로그리드 SO는 독립운전이 발생할 경우 운영비용을 최소화하기 위하여 정상운전상태($s = 0$ 시나리오)에서 수립한 발전자원들의 스케줄을 변경하려 할 것이다. 하지만, 물리적인 제약조건으로 인해 정상운전상태에서 결정한 발전기의 기동정지 상태를 급작스럽게 바꾸는 것은 불가능하기 때문에, 마이크로그리드 SO는 발전자원의 기동정지는 유지하며 출력량만을 조정하여 독립운전에 대응할 수 있다. 이는 마치 전통적인 전력계통 운영에서 하루 전 UC를 통해 일간 스케줄을 결정하고, 이를 바탕으로 당일 경제급전을 수행하는 것과 유사하다. 물론, ESS와 같은 전력전자 설비의 경우 급작스러운 지령에도 운전상태를 변경할 수 있지만, 이러한 운영방식은 해당 설비의 수명에 큰 영향을 미치는 등 고려해야 할 다른 부수적인 문제점들이 발생한다. 이와 같이 전력전자 설비의 물리적 특성이 운영전략에 미치는 영향을 분석하는 것도 큰 연구적 가치가 있지만, 독립운전의 발생 비용을 UC스케줄 레벨에서 반영하는 본 연구의 주제를 생각해 볼 때 이번 논문에서 관련 내용을 모두 다루기에는 무리가 있다. 따라서, 본 논문에서는 독립운전이 발생한 경우 모든 발전자원들은 출력량만을 조정할 수 있다고 가정한다. 이처럼, 시나리오 s 에서 마이크로그리드 SO의 독립운전 발생에 대한 대응전략을 결정변수들의 제약조건 형태로 정식화 하면 다음과 같다.

〈수급균형 조건〉

$$\sum_i P_{i,t}^s + P_{Mt}^s = D_t - LS_t^s \quad \forall t \quad (21)$$

〈수요차단 조건〉

$$0 \leq LS_t^s \leq D_t \quad \forall t \quad (22)$$

〈발전기 on/off 및 ESS 충/방전 상태유지 조건〉

$$I_{i,t}^s = I_{i,t}^0 \quad \forall i \in G, \forall t \quad (23)$$

$$U_{i,t}^s = U_{i,t}^0 \quad \forall i \in E, \forall t \quad (24)$$

$$V_{i,t}^s = V_{i,t}^0 \quad \forall i \in E, \forall t \quad (25)$$

〈전력거래 용량제약 조건〉

$$P_{Mt}^s = P_{Mt}^0 \quad \text{for } t < T_s \quad (26)$$

$$P_{Mt}^s = 0 \quad \text{for } T_s \leq t \leq T_s + \tau \quad (27)$$

$$-P_M^{\max} \leq P_{Mt}^s \leq P_M^{\max} \quad \text{for } t > T_s + \tau \quad (28)$$

〈발전기 출력제약 조건〉

$$P_{i,t}^s = P_{i,t}^0 \quad \forall i \in G, t < T_s \quad (29)$$

$$P_i^{\min} I_{i,t}^s \leq P_{i,t}^s \leq P_i^{\max} I_{i,t}^s \quad \forall i \in G, t \geq T_s \quad (30)$$

〈ESS 출력제약 조건〉

$$P_{i,t}^s = P_{i,t}^0 \quad \forall i \in E, t < T_s \quad (31)$$

$$P_{i,t}^s \leq U_{i,t}^s \cdot P_i^{Dch,\max} - V_{i,t}^s \cdot P_i^{Ch,\min} \quad \text{for } \forall i \in E, t \geq T_s \quad (32)$$

$$U_{i,t}^s \cdot P_i^{Dch,\min} - V_{i,t}^s \cdot P_i^{Ch,\max} \leq P_{i,t}^s \quad \text{for } \forall i \in E, t \geq T_s \quad (33)$$

위 수식 (26), (29), (31)을 통해, 제안된 정식 모형에서 각 발전자원은 독립운전이 발생하는 T_s 시점 이전까지는 정상운전상태에서 결정한 출력량을 그대로 유지해야만 한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 [7]의 정식화 모형에는 존재하지 않는 제약조건으로, 독립운전 발생 시 에너지공급의 가능여부를 판단하는데 있어 매우 중요한 부분이다. 생각해보면 독립운전 발생이란 사건은 상정 사고로써, 마이크로그리드 SO가 사건이 발생하기 이전부터 해당 시나리오를 대비해 기 결정된 스케줄을 변경한다는 것은 불가능하다고 보는 것이 합리적이다. [7]에는 (26), (29), (31)와 같은 제약조건이 부재하기 때문에, 정상운전상태에서 결정한 T_s 시점 이전의 출력량도 변경하며 독립운전이 발생하는 시나리오의 에너지공급 가능여부를 판단하게 하였다. 이는 마치 마이크로그리드 SO가 독립운전이 언제 발생할지 사전에 알고 있는 상태로 운전을 하는 것이거나, 혹은 독립운전이 발생하면 자신이 과거에 수행한 의사결정을 변경하여 현재의 사건에 대처할 수 있다고 보는 것이다. 따라서, [7]의 연구결과로 도출된 발전자원의 스케줄이 주어진 모든 독립운전 시나리오에 대해 에너지공급이 가능하다는 것은 오류이다.

수식 (28), (30), (32), (33)을 통해 독립운전이 발생한 T_s 시점 이후에는 운영비용을 최소화하기 위하여 정상운전상태에서 수립한 발전자원들의 스케줄을 변경할 수 있음을 확인할 수 있으며, 독립운전이 발생하면 더 이상 상위 계통과 에너지교환을 할 수 없기 때문에 (27)의 조건이 추가되었다. 그리고 앞서 언급한 바와 같이 발전자원의 운전상태는 갑자기 변경할 수 없기 때문에, 수식 (23), (24), (25)에 나타난 것과 같이 발전자원들은 독립운전 발생시점과 상관없이 시나리오 $s = 0$ 에서 결정한 기동상태를 유지한다.

2.3 대상문제의 정식화 I - 기댓값 최소화

2.1에서 모든 독립운전 시나리오 발생에 따른 마이크로그리드 에너지공급비용의 기댓값을 UC문제의 목적함수로 하는 정식화 모형 및 운영전략을 제안하였다. 그런데 2.1의 정식화 모형의 경우 독립운전 시나리오 s 의 발생확률 α_s 의 값을 정확하게 알아야 한다는 문제가 있다. 하지만, 아직까지 현실세계에 존재하는 계통 연계형 마이크로그리드의 사례가 부족하고, 이와 더불어 독립운전과 관련한 데이터를 확보하기가 어려운 상황이다. 이처럼 시나리오의 발생확률 정보를 획득하기 어렵거나, 개별시나리오들의 발생확률은 매우 낮지만 그 파급효과(비용)가 큰 경우 [10]와 같이 모든 시나리오 중 최악의 경우를 최대로 개선하는 운영전략을

사용할 수도 있다. 이것을 2.1의 정식화 모형에 적용하면, UC문제의 목적함수가 다음과 같이 변경된다.

$$\min [w_1 \cdot f(P_{i,t}^0, P_{Mt}^0, LS_t^0) + w_2 \cdot M_s] \quad (34)$$

where $M_s = \max [f(P_{i,t}^s, P_{Mt}^s, LS_t^s)]$

위 (34) 수식의 w_1 과 w_2 는 각각 독립운전이 발생하지 않는 경우의 에너지공급비용과 모든 시나리오 중 최악의 경우의 에너지공급비용에 대한 가중치를 의미한다. 이처럼 목적함수가 (1) 수식에서 (34)로 변경된 점을 제외하면, 결정변수들에 대한 다른 제약조건식들은 모두 동일하게 유지된다. 다만, (34)는 M_s 항이 모든 시나리오 중 최댓값을 갖는 경우라는 비선형성을 갖게 된다. 이를 해결하기 위해 아래 수식과 같이 잉여 변수(slack variable)를 추가하여 목적함수를 (35)로 변경하고 (36), (37)의 제약조건을 추가하면, (34) 수식이 의도한 바와 동일한 최적 해를 찾을 수 있다.

〈잉여변수가 추가된 목적함수2〉

$$\min [w_1 \cdot f(P_{i,t}^0, P_{Mt}^0, LS_t^0) + w_2 \cdot \Phi_s] \quad (35)$$

〈잉여변수의 제약조건〉

$$\Phi_s \geq 0 \quad (36)$$

$$\Phi_s \geq f(P_{i,t}^s, P_{Mt}^s, LS_t^s) \quad \forall s \in S \quad (37)$$

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

UC 스케줄의 대상 기간은 1일이며, 하루는 시간당 수요값 24개를 갖는 것으로 가정한다. 수요값의 변화와 마찬가지로 독립운전 사건 역시 1시간 단위로 발생하며, 본 시뮬레이션 파트에서는 하루 1회, 1시간의 독립운전 시나리오만 발생한다고 가정하였다. 그리고 독립운전이 나타나는 24개 시나리오의 발생확률 $\alpha_s = 0.01$ 로 모두 동일하다고 가정했다. 즉, 독립운전이 발생하지 않는 경우의 확률 $\alpha_0 = 0.76$ 로 가정하였다. 다음으로 제안한 UC스케줄 방법의 효과를 확인하기 위하여, 제안한 스케줄 방법과 다른 스케줄 방법의 에너지 공급비용을 비교하였다. 5가지 스케줄 방법은 아래와 같다.

Method I : 독립운전 고려하지 않는 일반 UC방법

Method II : 독립운전 대비 내부예비용량 크기유지 방법

Method III : [7]에서 제안한 스케줄 방법

Method IV : 2.1에서 제안한 기댓값 최소화 방법

Method V : 2.2에서 제안한 최악 케이스 최소화 방법

($w_1 = 0$ & $w_2 = 1$ 로 가정)

Method II에서 언급된 내부예비용량 SR_t 는 독립운전 발생 시 순수 내부 발전자원만으로 조정이 가능한 잉여 발전용량을 말한다. 즉, 기동된 내부 발전자원의 최대출력량과 스케줄 된 발전자원의 출력량의 차이의 합을 의미하며, 이를 수식으로 표현하면 (38)과 같다. (38)의 SR_t 값을 크게 유지할수록 마이크로그리드 SO는 독립운전이 발생한 경우 값비싼 부하차단을 덜 시행할 수 있을 것이다. Method II에서 SR_t 는 5MW로 가정한다.

$$SR_t = \sum_{i \in G} [(P_i^{\max} \cdot I_{i,t}^0) - P_{i,t}^0] + \sum_{i \in E} [(P_i^{Dch, \max} \cdot U_{i,t}^0) - P_{i,t}^0] \quad (38)$$

발전기, ESS의 특성정보 및 마이크로그리드의 내부부하 정보, 마이크로그리드-상위계통 간 전력거래 가격정보는 [6]과 [7]을 참고하였으며 다음 표 1-3와 같다. 또한, 상위 계통으로부터 공급가능한 전력용량은 5MW로 가정한다. 그리고 부하차단 가격 $\phi_t = 300$ [\$/MWh]로 가정하였다. 최종적으로 세팅된 최적화 문제는 상용 최적화 소프트웨어인 FICO사의 Xpress-mp를 이용하여 해결하였다.

표 1 수요 및 시장정보 [단위: MW, \$/MWh]

Table 1 Demand and market data

시간	1	2	3	4	5	6
수요	11.03	10.38	9.97	9.73	9.76	10.16
가격	29.74	27.54	26.32	25.64	25.65	27.15
시간	7	8	9	10	11	12
수요	11.03	11.96	12.61	13.30	13.92	14.48
가격	29.44	30.79	34.97	38.52	43.33	46.3
시간	13	14	15	16	17	18
수요	14.69	14.94	14.99	15	14.92	14.56
가격	48	51.4	52.83	53.91	50.83	48.8
시간	19	20	21	22	23	24
수요	14.25	13.84	13.67	13.37	12.47	11.33
가격	43.09	39.26	38.65	37.43	32.21	30.56

표 2 발전기 특성정보

Table 2 Generator characteristics

발전기 NO.	가격계수 [\$/MWh]	출력범위 [MW]	최소기동/정지 [h]	증감발출 [MW/h]
G1	27.7	1-5	3	2
G2	35.1	1-4	3	2
G3	65.6	0.5-3	1	3

표 3 ESS 특성정보

Table 3 ESS characteristics

배터리 용량 [MWh]	충/방전 출력범위 [MW]	최대 충/방전 전환횟수	SOC 운영범위 [%]	시작-끝 경계조건 [MWh]
10	-3 ~ 3	3	0-100	5

표 4 UC전략별 독립운전 시나리오 발생에 따른 마이크로그리드의 일간 에너지공급비용

Table 4 Daily operating cost of a microgrid based on each UC strategy

	정상상황 운영비용[\$]	독립운전 기대비용[\$]	독립운전 최대비용[\$]
M-I	10,030	10,504	12,569
M-II	10,258	10,455	11,278
M-III	10,235	10,468	11,327
M-IV	10,386	10,398	10,572
M-V	10,433	10,437	10,523

3.2 시뮬레이션 결과분석

표 4은 3.1의 시뮬레이션 조건으로 계산한 각 UC전략별 독립운전 발생에 따른 마이크로그리드의 일간 에너지공급비용을 나타낸다. 표에서 나타난 바와 같이 독립운전을 전혀 고려하지 않은 Method I의 경우 독립운전 시나리오에 따른 기대비용이나 최악 케이스의 비용이 가장 크다. Method II의 경우 일정크기의 내부 예비용량을 유지하는 전략을 사용해 어느 정도 독립운전에 대비하였기 때문에, Method I에 비해서는 독립운전 발생에 따른 추가비용이 감소하였지만, 독립운전 발생 시나리오를 구체적으로 고려한 Method IV, V보다는 더 큰 비용이 든 것을 확인할 수 있었다. 또한 2.2에서 지적된 바와 같이 [7]의 Method III의 경우 정식화 오류로 실제 독립운전 시나리오 상황이 발생했을 때, [7]이 생각한 것보다 더 많은 부하차단을 수행하게 되어 Method IV, V에 비해 좋지 않은 결과를 보임을 확인할 수 있다. 구체적으로, 주어진 조건 하에서 독립운전 기대비용에 대해서 Method IV은 Method I, II, III, V에 비해 각각 1.02%, 0.55%, 0.67%, 0.38% 효과적이며, 독립운전 최대비용에 대해서 Method V는 Method I, II, III, IV에 비해 각각 19.44%, 7.17%, 7.64%, 0.47% 효과적이다. 독립운전의 발생확률과 독립운전 발생에 따라 필요한 수요차단의 비용이 커진다면 이 수치는 더욱 증가하게 될 것이다. 한편, 독립운전이 발생하지 않는 정상상황에서의 운영비용은 Method I의 경우가 가장 낮는데, 이는 당연한 것으로 Method I의 경우 독립운전에 대비하여 사전 준비를 전혀 하지 않기 때문이다.

다음으로 표 5에서는 정상상황에서 Method IV의 발전자원 스

표 5 정상상황($s=0$ 시나리오)에 대한 Method IV의 발전자원 스케줄 [단위: MW]

Table 5 Generation schedule of a microgrid based on Method IV for $s=0$ scenario [MW]

시간	1	2	3	4	5	6
G1	5	4.38	3.97	5	5	4.13
G2	1.03	1	1	2.23	1.26	1.03
G3	0	0	0	0.5	0.5	0
ESS	0	0	0	-3	-2	0
시장구매	5	5	5	5	5	5
시간	7	8	9	10	11	12
G1	5	5	5	5	5	5
G2	1.96	1.96	2.11	4	4	4
G3	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5
ESS	0	0	0	0	0	0
시장구매	4.06	5	5	3.80	4.42	4.98
시간	13	14	15	16	17	18
G1	5	5	5	5	5	5
G2	4	4	4	4	4	4
G3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ESS	0.19	0.84	3	3	0.42	0.26
시장구매	5	4.60	2.49	2.5	5	4.80
시간	19	20	21	22	23	24
G1	5	5	5	5	5	5
G2	4	4	4	4	4	2
G3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ESS	0	0	0	0	-2.03	-0.67
시장구매	4.75	4.34	4.17	3.87	5	4.5

케줄을 확인할 수 있다. 표를 통해, 마이크로그리드가 자신이 보유한 발전기의 단가보다 상위계통에서의 구매단가가 저렴함에도 독립운전에 대비하기 위해 비싼 G3발전기를 기동시켜 최소출력으로 유지하고 있음을 확인할 수 있다. ESS 역시 독립운전이 발생하면 공급에 차질이 생길 수 있는 오후 시간을 위해 오전 시간에 충전을 한 뒤 대기하고 있는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 [7]의 연구를 바탕으로 독립운전의 발생을 시나리오 기반으로 분석하여 마이크로그리드의 에너지 공급비용을 최소화하는 UC 스케줄에 대해 살펴보았으며, 이 과정에서 [7]에서 제시된 방법론의 오류를 개선하였다. 그 결과 독립운전 발생으로 인한 에너지공급비용의 기댓값을 최소화하거나, 모든 시나리오 중 최악의 경우를 최소화하는 두 가지 운영전략을 UC문제

로 정식화할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 뒤 두 가지 방법을 포함한 다섯 가지 UC스케줄링 방법에 대해 마이크로그리드의 운영비용을 비교하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 독립운전이라는 상정사고의 발생모델이 정확히 주어진다면, 마이크로그리드는 Method IV이나 V의 방법을 사용하여 자신의 일간 에너지공급비용을 최소화할 수 있음을 확인하였다.

제안한 방법을 통해 마이크로그리드 SO는 독립운전이라는 상정사고의 발생을 고려하여 최적의 발전자원 스케줄 및 상위계통과의 전력거래를 수행할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 제안한 방법을 현실 세계에 구현하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다. 첫째로, 독립운전 발생이라는 사건 자체에 대한 구체적이고 현실성 있는 모형화가 필요하다. 이를 통해 일반적으로 제시된 본 논문의 정식화 모형은 활용가치를 갖게 될 것이다. 두 번째로, 독립운전이 발생한 경우 마이크로그리드 SO의 운영전략에 대한 개선이 필요하다. 본문에서 언급한 바와 같이 ESS와 같은 전력전자 설비는 충/방전 상태의 변경이 수월하기 때문에 이를 고려할 수 있다면 보다 효과적으로 독립운전에 대응할 수 있을 것이다.

용어 정의(Nomenclature)

〈인텍스〉

- s 시나리오 ($s \in S$)
- i 발전자원 (발전기 $i \in G$, ESS $i \in E$)
- t 시간

〈상수〉

- α 독립운전 시나리오 발생확률
- ρ 마이크로그리드 - 상위 계통과의 전력거래 가격
- ϕ 마이크로그리드 내부수요 차단 가격
- F 발전비용 함수
- D 마이크로그리드 내부 수요값
- T_{on} 발전기 최소 기동 제한시간
- T_{off} 발전기 최소 정지 제한시간
- DR 발전기 증발출 제한
- UR 발전기 감발출 제한
- EN ESS 충/방전 상태전환 제한횟수

〈변수〉

- I 발전기 기동/정지 상태 (on:1 / off:0)
- ST 발전기 기동명령 여부
(기동명령 유(有):1 / 기동명령 무(無):0)
- SP 발전기 정지명령 여부
(정지명령 유(有):1 / 정지명령 무(無):0)
- U ESS 방전 상태 (방전 중: 1 / 방전 X: 0)
- V ESS 충전 상태 (충전 중: 1 / 충전 X: 0)
- UV ESS 충/방전 상태전환 횟수
- E ESS 저장 에너지량

- P 발전자원의 출력량 (발전기, ESS)
- P_M 마이크로그리드 - 상위 계통과의 전력거래량
(구매: $P_M > 0$ / 판매: $P_M < 0$)
- LS 마이크로그리드 내부수요 차단량

감사의 글

이 논문은 2018년도 한국산업기술대학교 학술연구진흥사업에 의하여 연구되었음(This work was supported by the Academic Promotion System of Korea Polytechnic University)

References

- [1] N. Hatziairgyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," IEEE Power Energy Mag., vol. 5, no. 4, pp. 78-94, Jul./Aug. 2007.
- [2] R. H. Lasseter, and P. Paigi, "Microgrid: A conceptual solution," in Proc. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf., Aachen, Germany, 2004, pp. 4285-4290.
- [3] J. Pecos Lopes, C. Moreira, and A. Madureian, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [4] Hossam A. Gabbar, and Abdelazeem A. Abdelsalam, "Microgrid energy management in grid-connected and islanding modes based on SVC," Energy Conversion and Management, vol. 86, pp. 964-972, Oct. 2014.
- [5] Changhee Cho, Jin-Hong Jeon, Jong-Yul Kim, Soonman Kwon, Kyongyop Park, and Sungshin Kim, "Active Synchronizing Control of a Microgrid," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 26, no. 12, pp. 3707-3719, Dec. 2011.
- [6] S. Lee, Y. Jin, and Y. Yoon, "Determining the Optimal Reserve Capacity in a Microgrid with Islanded Operation," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 31, no. 2, pp. 1369-1376, Mar. 2016.
- [7] Amin Khodaei, "Microgrid Optimal Scheduling With Multi-Period Islanding Constraints," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 29, no. 3, pp. 1383-1392, May 2014.
- [8] R. B. Hytowitz, and K. W. Hedman, "Managing solar uncertainty in microgrid systems with stochastic unit commitment," Electric Power Systems Research, vol. 119, pp. 111-118, Feb. 2015.
- [9] L. Wu, M. Shahidehpour, and T. Li, "Stochastic Security-Constrained Unit Commitment," IEEE Trans. on Power

Systems, vol. 22, no. 2, pp. 800-811, May 2007.

- [10] Pflugfelder D, Wilkens JJ, Oelfke U, "Worst case optimization: a method to account for uncertainties in the optimization of intensity modulated proton therapy," Physics in Medicine & Biology, vol. 53, no. 6, pp. 1689-1700, Feb. 2008.

저 자 소 개



이 시 영 (Si Young Lee)

서울대학교 전기공학부에서 2009년, 2011년, 2016년에 학·석·박사학위를 취득하였다. 2017년부터 한국산업기술대학교 에너지·전기공학과와 조교수로 재직 중이며, 주 연구 분야는 마이크로그리드의 운영 및 최적화이다.