

신뢰도 기반의 유전자알고리즘을 활용한 독립형 마이크로그리드 내 분산형전원 최적용량 산정 방법

Optimal Sizing Method of Distributed Energy Resources for a Stand-alone Microgrid by using Reliability-based Genetic Algorithm

백 자 현* · 한 수 경* · 김 대 식** · 한 동 화** · 이 한 상*** · 조 수 환†

(Ja-Hyun Baek · Soo-Kyung Han · Dae-Sik Kim · Dong-Hwa Han · Hansang Lee · Soo-Hwan Cho)

Abstract - As the reduction of greenhouse gases(GHGs) emission has become a global issue, the microgrid markets are growing rapidly. With the sudden changes in the market, Korean government suggested a new business model called 'Self-Sufficient Energy Islands'. Its main concern is a stand-alone microgrid composed of Distributed Energy Resources(DERs) such as Renewable Energy Sources(RESSs), Energy Storage System(ESS) and Fuel Cell, in order to minimize the emission of GHGs. According to these trend, this paper is written to propose an optimal sizing method of DERs in a stand-alone microgrid by using Genetic Algorithm(GA), one of the representative stochastic methods. It is to minimize the net present cost with the variables, size of RESSs and ESS. In the process for optimization, the sunless days are considered as additional constraints. Through the case study analysis, the size of DERs installed in a microgrid system has been computed using the proposed method in MATLAB. And the result of MATLAB is compared with that of HOMER(Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), a well-known energy modeling software.

Key Words : Stand-alone microgrid, Genetic algorithm, Optimal sizing, Distributed energy resources

1. 서 론

2015년 12월 파리협정 채택 이후, 교토의정서의 뒤를 잇는 신 기후체제(post-2020)이 출범되었다. 신기후체제는 선진국뿐만 아니라 전 세계 온실가스 배출량의 90%를 차지하는 국가들이 참여하며, 국가별기여방안(Intended Nationally Determined Contribution, INDC)를 정하여 5년마다 상향된 감축목표를 제출하고, 감축목표 달성 결과를 보고하는 등 이행점검이 이루어진다는 점에 있어 이전 교토의정서와 차이가 있다. 한국은 온실가스 감축 목표를 2030년 배출전망치(Business As Usual, BAU)인 851백만 톤 대비 37% 감축을 목표로 하여 INDC를 제출하였다[1,2].

에너지신산업은 신기후체제에 대응해 기존 에너지 산업에 ICT, 자동차 등 다른 산업과 융합하여 새로운 비즈니스 모델을 제시하는 사업이다. 주요 사업모델로는 수요자원거래시장, ESS 통합서비스, 에너지자립섬 등이 있다[3].

마이크로그리드란 소규모의 지역에서 디젤발전기, 태양광발전,

풍력발전 그리고 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS) 등과 같은 독립된 분산형전원을 이용해 수용가에게 전력을 공급하는 전력망으로, 계통과의 연계 여부에 따라 계통연계형과 독립형 마이크로그리드로 분류된다. 계통연계형 마이크로그리드의 경우, 계통 정전 시 마이크로그리드 내 분산형전원을 이용해 일정 시간 동안 독립적인 계통운영이 가능하다. 반면, 독립형 마이크로그리드는 계통과 연계되지 않고 내부 발전원을 통해서만 계통 내 수요를 충족하며, 분산형전원을 활용해 온실가스를 효과적으로 저감할 수 있는 시스템이다.

에너지자립섬은 계통과 독립된 도서지역에 신재생에너지와 ESS로 디젤을 대체함으로써 독립형 마이크로그리드를 구성하는 사업이다. 사업모델로는 크게 소규모 지역의 디젤 발전을 신재생 에너지와 ESS로 완전히 대체하는 탄소제로 모델과, 중·대규모 도서 지역을 대상으로 디젤발전을 최소화하는 융합형 모델이 있다. 이처럼 도서 지역의 디젤발전을 신재생에너지와 ESS로 대체함으로써 에너지의 효율을 증대하고 큰 탄소 저감효과를 얻을 수 있다. 국내의 경우 120여 개의 섬에 마이크로그리드 적용이 가능하며, 한편에서 관리 중인 63개 도서 지역으로 마이크로그리드 구축산업을 민간에 개방하여 사업을 확대할 예정이다. 현재 울릉도, 가파도 그리고 가사도 등의 도서 지역에서 관련된 실증사업이 이뤄지고 있다[3,4].

이처럼 독립형 마이크로그리드가 확대되고 있는 상황에서 마이크로그리드의 분산형전원 구성용량 산정은 경제적인 문제와 직결된다. 이를 위해 경제성을 바탕으로 마이크로그리드 내 분산형

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Sangmyung University, Korea
E-mail : shcho@smu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Sangmyung University, Korea

** Lotte Chemical Research Institute, Korea

***Advanced Power Systems Research Center, Korea University, Korea

Received : October 12, 2016; Accepted : April 13, 2017

전원의 조합과 용량을 결정하는 HOMER, ES-Select 등 다양한 프로그램이 개발되어 왔으며, 최적화를 이용해 분산형전원의 구성과 용량을 산정하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 참고문헌 [5]에서는 차분 진화(Differential Evolution) 알고리즘을 이용한 DC 마이크로그리드 내 분산형전원 최적용량 산정 방안을 제시한다. ESS를 리튬배터리 단일로 구성하는 경우와 슈퍼캐패시터를 혼합하여 구성하는 경우에 대하여, 과충전, 과방전에 의한 배터리 수명 단축을 고려한 최적 분산형전원 구성을 제시한다. 참고문헌 [6]에서는 디젤발전기를 주 전원공급원으로 가정할 때, 유전자알고리즘을 이용해 산정한 분산전원 구성과 HOMER Pro의 시뮬레이션 결과를 비교분석한다. 이 외에도 HOMER Pro를 이용해, 디젤만을 사용하는 경우와 신재생에너지원만 사용하는 경우 및 디젤과 신재생에너지 두 가지를 혼합해서 사용하는 경우 등 4가지 경우에 대하여 마이크로그리드의 구성 및 용량을 산정하는 연구가 진행되었다[7].

본 논문에서는 국내 도서 지역 마이크로그리드에 보다 적합한 분산형전원의 구성과 용량을 산정하는 방법을 제시한다. 특히, 확률론적 최적화 기법 중 하나인 유전자알고리즘을 이용하며, 부조일로 인한 정전 등 계통신뢰도를 고려한다. 사례연구에서는 MATLAB으로 유전자알고리즘을 적용한 최적화 문제를 구현하여, 실제 국내 도서 지역의 데이터를 기반으로 분산형전원 최적용량을 산정하고, MATLAB을 이용해 도출한 결과와 HOMER Pro의 시뮬레이션 결과를 비교분석한다.

2. 유전자알고리즘

최적화 방법은 크게 선형계획법(Linear Programming, LP), 이차계획법(Quadratic Programming, QP) 등 기울기를 사용하는 결정론적인 방법과 유전자알고리즘, Simulated Annealing(SA) 등과 같은 확률론적인 방법이 있다.

유전자알고리즘은 함수값만을 이용해 최적해를 탐색하며, 자연선택원리를 바탕으로 개발되었다. 유전자알고리즘은 전통적인 비선형 계획법보다 효율적이며, 광역 최적해 탐색에 유리하다. 특히, 단일 설계점 대신 점들의 모집단을 사용해 넓은 범위에 대해 최적해 탐색을 수행하기 때문에, 국소 최적해에 포획될 확률이 낮다.



그림 1 의사결정변수 표현 예시
Fig. 1 Variable representation on GA

유전자알고리즘에서 결정변수는 이진 변수의 문자열로 표현된다. 예를 들어, 의사결정변수가 3개이고, 각 변수를 4개의 이진수로 나타낼 경우, 각 의사결정변수의 조합은 총 12개의 이진수로 나타낼 수 있다(그림 1). 이러한 특징으로 인해, 유전자알고리즘은 의사결정 혹은 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming,

MIP)에 적용이 유리하다.

목적함수는 비제약 적합도(Fitness) 최대화가 기본이다. 따라서 식 (1)과 같은 제약 최소화 문제는 식 (2)와 같이 패널티 함수를 이용해 비제약 최소화 문제로 변형한다. 이때, r_i 와 R_j 는 패널티의 정도를 결정하는 변수이다.

$$Min(f(\mathbf{X})) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &subject\ to \\ &g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ &h_j(\mathbf{X}) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

$$Min\ \phi(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^m r_i <g_i(\mathbf{X})>^2 + \sum_{j=1}^n R_j (h_j(\mathbf{X}))^2 \tag{2}$$

식 (3)은 부등식 제약조건의 값이 조건에 부합하지 않는 경우, 그 정도의 제곱에 비례하여 패널티를 추가하는 역할을 한다.

$$<g_i(\mathbf{X})> = \begin{cases} g_i(\mathbf{X}) & if, g_i(\mathbf{X}) > 0 \\ 0 & if, g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \end{cases} \tag{3}$$

마지막으로, 식 (4)를 이용하면 비제약 최소화 문제를 비제약 최대화 문제로 변형할 수 있다. 최적해의 탐색은 이렇게 정의된 적합도 함수 값을 개선하는 방향으로 진행된다.

$$F(\mathbf{X}) = \frac{1}{1 + \phi(\mathbf{X})} \tag{4}$$

최적해를 탐색하는 과정은 유전연산자를 이용해 새로운 모집단을 반복적으로 생산하며 이뤄진다. 유전연산자는 복제 및 도태(Reproduction), 교체(Crossover), 돌연변이(Mutation) 세 가지가 있다. 복제 및 도태 연산자는 모집단의 문자열 중 다음세대에 보다 적합한 문자열을 의 확률로 선택해 교체 풀에 삽입하는 역할을 한다. 이때는 식 (5)와 같이 적합도 값에 의해 결정된다. 즉, 적합도 값이 클수록, 선택될 확률이 높아진다.

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n F_j} \tag{5}$$

교체 연산자는 교체풀에서 두 개의 문자열을 임의로 선택하여 문자열의 일부분을 p_c 의 확률로 교체한다. 교체 후, 문자열의 적합도는 그 값이 커질 수도, 작아질 수도 있으므로, 문자열의 일부를 유지하는 것이 바람직하다. 또한 교체 후 적합도가 우수한 문자열 다음 세대에 선택될 것이므로, 전체적인 적합도가 우수해지는 방향으로 최적화가 이루어진다. 돌연변이 연산자는 임의의 위치의 문자 혹은 전체 문자열을 차례로 p_m 의 확률로 이진수를 변경한다. 이 과정을 통해 모집단의 다양성을 유지할 수 있으며, 국소 최적해의 탐색에 유리하다. 이때, 새로운 모집단을 생성하고 적합도 값을 이용해 수렴여부를 판단하는 과정을 한 세대라 하며, 수렴을 판단하는 기준으로는 모집단 내 결정변수들의 적합도 표준편차 값과 최대 세대 수 등이 있다[8,9].

본 논문에서 분산형전원의 용량은 태양광발전, 풍력발전 그리

고 ESS의 단위용량에 정수를 곱하여 산정된다. 따라서 최적화 문제는 혼합정수계획법 문제로, 결정변수는 각 분산형전원의 단위용량의 정수이다. 이를 위해 정수계획법에 유리한 유전자알고리즘을 이용해 마이크로그리드 내 분산형전원의 적정용량을 구하기 위한 최적화 모델을 제시한다.

3. 마이크로그리드 내 분산형전원 최적용량 산정

앞서 언급한 유전자알고리즘을 이용해 독립형 마이크로그리드 내 분산형전원의 구성을 결정하고자 한다. 대상으로 하는 마이크로그리드 시스템은 태양광발전, 풍력발전 그리고 ESS를 분산형전원으로 포함하는 시스템이다. 탄소제로를 목적으로 시스템을 구성했기 때문에 디젤발전기는 분산형전원에서 제외하였다. 전체적인 시스템 구성은 그림 2와 같이 AC-link 마이크로그리드를 대상으로 하며, 태양광발전, 인버터, 풍력발전, ESS, PCS 그리고 AC 부하로 구성된다.

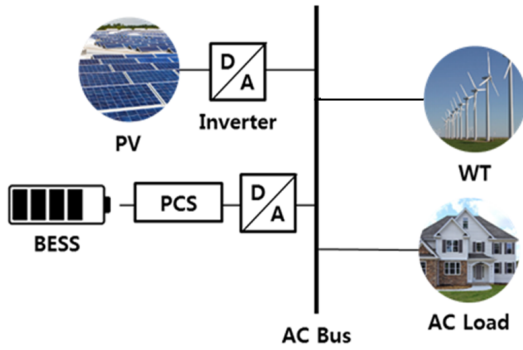


그림 2 마이크로그리드 시스템 구성도

Fig. 2 Microgrid system

3.1 분산형전원 용량산정 정식화

최적화 모델은 크게 의사결정변수, 목적함수 그리고 제약조건으로 이루어진다. 최적화 모델의 의사결정변수는 태양광발전기의 모듈 수(N_{PV}), 풍력발전기 대수(N_{WT}), ESS 용량(N_{ESS})이다.

목적함수는 전체기간의 순현재가치(NPV)의 최소화로, 이와 관련된 식은 아래 식 (6)과 같다.

$$Minimization(Cost) = \sum_{i=1}^{proj} [C_{cptl,i} + C_{rpl,i} + C_{om,i}] \times \left(\frac{1}{1+r}\right)^i \quad (6)$$

$$C_{cptl,i} = C_{cptl,PV} + C_{cptl,inv} + C_{cptl,WT} + C_{cptl,ESS}$$

$$C_{rpl,i} = (C_{rpl,PV} \times B_{PV}) + (C_{rpl,inv} \times B_{omv}) + (C_{rpl,WT} \times B_{WT}) + (C_{rpl,ESS} \times B_{ESS})$$

$$\begin{cases} B=1, & \text{if remainder}(i, \text{life time}) = 0 \\ B=0, & \text{else} \end{cases}$$

$$C_{om} = C_{om,PV} + C_{om,inv} + C_{om,WT} + C_{om,ESS}$$

위 식에서 C_{cptl} 은 자본비용, C_{rpl} 은 대체비용을 그리고 C_{om} 은

유지보수비용을 의미한다. $proj$ 는 프로젝트 수행기간을 의미하며, 이는 가장 긴 분산전원의 수명이하로 설정한다. r 는 실질이자율을 의미하며, 이는 식 (7)의 피셔방정식에 의해 계산된다. 이때, R 은 명목이자율을, $\pi(e)$ 는 인플레이션율을 뜻한다. B 는 이진함수로, 대체시점에 대체비용이 발생함을 의미한다.

$$r = \frac{1+R}{1+\pi(e)} - 1 \quad (7)$$

태양광발전, 풍력발전 그리고 ESS의 용량은 최적화 풀이를 통해 계산되며, 태양광발전 인버터의 정격출력은 태양광발전 설치용량과 동일하다고 가정한다. ESS의 전 전력변환장치(Power Conditioning System, PCS)의 정격출력은 배터리의 최대 방전률을 1C로 가정해, 배터리 용량과 동일한 값으로 정한다.

제약조건은 연간 정전시간(blackout)으로, 부하에서 필요한 전력을 마이크로그리드 내에서 공급하지 못할 경우, 정전으로 판단한다. 정전판단을 위한 수학적 모델은 다음과 같다. 우선, 시간대별 전력수요와 정규화된 신재생에너지원의 발전량을 이용해 ESS에서 충·방전해야 하는 전력량을 구한다. U 는 각 분산형전원의 단위용량을 의미한다.

$$G_i = (PV_i \times \eta_{inv}) + WT_i \quad (8)$$

$$PV_i = PV_i \times U_{PV} \times N_{PV}$$

$$WT_i = WT_{norm,i} \times U_{WT} \times N_{WT}$$

$$PCS_i = G_i - L_i \quad (9)$$

식 (9)의 PCS의 입·출력값(PCS_i)는 ESS의 충·방전량에 따라 비선형적으로 달라진다. 이를 고려해 그림 3의 과정을 거쳐 식 (10)의 계수 a , b 를 도출한다[10]. 이를 바탕으로 부하의 변동에 따른 ESS의 충·방전량은 식 (11)과 같다.

$$PCS_i = aESS_i^2 + bESS_i \quad (10)$$

$$ESS_i = \begin{cases} \frac{PCS_i \times \eta_{PCS} \times \eta_{ESS}}{2a} & , PCS_i \geq 0 (\text{충전}) \\ \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(-PCS_i)}}{2a} \div \eta_{PCS} & , PCS_i < 0 (\text{방전}) \end{cases} \quad (11)$$

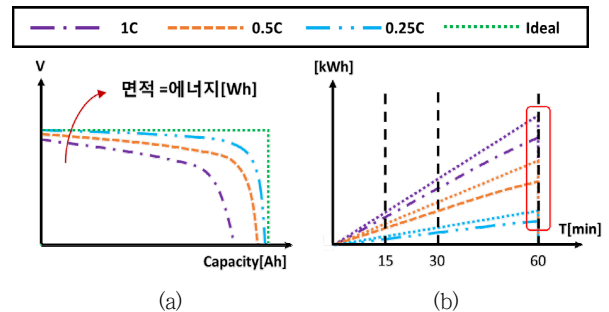


그림 3 C-rate별 출력효율 곡선접합과정 (a) 방전곡선에서, (b) 방전 전력량

Fig. 3 Curve-fitting of output efficiency for various C-rates (a) Example for discharge curves, (b) Discharge energy

시간대별 ESS의 충·방전량이 결정되면 해당 값과 ESS의 용량을 이용해 SoC(State of Charge)를 계산한다. SoC는 ESS의 현재 충전상태를 나타내며, 계산된 SoC값과 필요한 ESS의 충·방전량을 기준으로 정전여부를 판단해 연간 정전시간을 계산한다. 계산된 정전시간에 대한 제약조건은 식 (18)과 같다.

$$ESS_{cap} = N_{ESS} \times U_{ESS} \tag{12}$$

$$SoC_{ck} = \frac{(SoC_{i-1} \times ESS_{cap}) + ESS_i}{ESS_{cap}} \times 100[\%] \tag{13}$$

$$op_i = \begin{cases} (1 - SoC_{i-1}) \times ESS_{cap}, & 100\% < SoC_{ck} \\ ESS_i, & 0\% \leq SoC_{ck} \leq 100\% \\ (-SoC_{i-1}) \times ESS_{cap}, & SoC_{ck} < 0\% \end{cases} \tag{14}$$

$$SoC_i = \frac{(SoC_{i-1} \times ESS_{cap}) + op_i}{ESS_{cap}} \times 100[\%] \tag{15}$$

$$blackout_i = \begin{cases} 1, & PCS_i < 0 \text{ and } SoC_i = 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{16}$$

$$blackout\ time = \sum_{i=1}^{8760} blackout_i \tag{17}$$

$$blackout\ time = 0 \tag{18}$$

추가적으로, 본 논문에서 제시하는 최적화모델은 혼합정수계획법으로이므로 결정변수를 정수로 제약한다(식 (19)). 또한, 유전자알고리즘을 이용하므로 식 (20)과 같이 상한, 하한조건을 설정한다.

$$N_{PV}, N_{WT}, N_{ESS} = integer \tag{19}$$

$$lb \leq N_{PV}, N_{WT}, N_{ESS} \leq ub \tag{20}$$

3.2. 부조일로 인한 계통 신뢰도 저하

부조일이란 해가 비치지 않은 날의 수를 뜻한다. 연간 정전시간을 0으로 만드는 분산전원의 구성 및 용량은 부조일 까지 모두 고려해 산정되는데, 이는 특정 며칠로 인해 과도한 용량이 산정될 가능성을 내포한다. 그림 4의 연간 SoC 변화를 살펴보면 평균 SoC는 86.1%이며, 20% 이하로 떨어지는 것은 두세 번

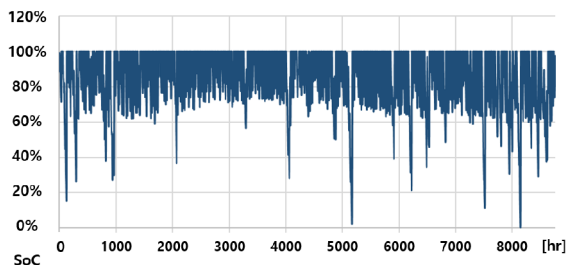


그림 4 정전시간이 0시간일 경우의 연간 SoC

Fig. 4 Yearly SoC trend(Balckout time=0)

정도밖에 안 되는 것을 확인할 수 있다.

이러한 점을 고려하여, 부조일로 인해 발전량이 부족할 경우를 정전으로 판단하고, 이로 인한 계통신뢰도저하를 감안하는 경우에 대한 최적화 모델을 추가로 제시하고자 한다. 정전으로 판단된 시간에 대해서는 기존에 설치된 디젤발전기를 가동하거나 다른 종류의 ESS를 추가로 설치하는 등의 방법으로 대처하는 것을 권장한다.

부조일로 인한 계통 신뢰도 저하를 고려할 때, 본 논문에선 SAIDI(System Average Interruption Duration Index) 측면에서 전체 정전시간을 고려한다. SAIDI란 전력계통의 신뢰도를 평가하는 일반적인 지표로, 연간 정전을 느낀 고객의 수와 고객이 경험한 정전시간을 기준의 곱에 대한 전체 고객의 수의 비로 나타난다. 본 논문은 독립형 마이크로리드를 대상으로 하며, 부조일로 인해 발전량이 부족하고, ESS 내에 저장된 전력이 없을 경우 마이크로그리드 내 전체 수용가가 정전을 경험하게 된다고 가정해, 신뢰도의 지표를 연간 정전시간에 대한 전체시간의 비로 정한다. 이를 반영한 제약조건은 식 (21)과 같이 표현 가능하다.

$$0 \leq blackout\ time \leq limit\ of\ allowance \times 8760hr \tag{21}$$

4. 사례연구

사례연구에서는 실제 국내 도서 지역의 기상정보와 전력수요 데이터를 바탕으로 앞서 구성한 최적화 모델을 이용해, 독립형 마이크로그리드 내 분산형전원의 최적용량을 산정한다. 또한, 정전시간 0시간을 목표로 계통신뢰도를 확보하는 방안과 일정 수준의 정전시간을 감안해 경제성을 확보하는 방안에 대한 용량산정 결과를 비교한다. 최적화 연산은 MATLAB의 'ga' 함수를 이용하며, 정수제약조건을 추가해 시뮬레이션을 진행하였다. 추가로 HOMER Pro를 통해 디젤발전기가 포함되지 않는 경우에 대한 마이크로그리드 분산형전원 구성용량 산정결과와 최적화를 이용해 산정한 결과를 비교분석한다.

HOMER Pro는 경제성과 탄소배출량을 고려해 마이크로그리드 내 분산형전원의 구성용량을 계산하는 프로그램으로, 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에 의해 개발되었다. 기본적인 시스템은 AC/DC 하이브리드 마이크로그리드로 구성되며, 시스템 구성요소로는 태양광발전, 풍력발전, 디젤발전 그리고 ESS 등이 있다. 또한, 시뮬레이션 대상이 되는 지역을 지정하면 NASA에서 제공하는 해당 지역의 일사량과 풍속 데이터를 참고해 연간 태양광발전, 풍력발전량을 추정할 수 있다. 경제성분석은 사용자가 입력한 자본비용(Capital), 대체비용(Replacement), 유지보수비용(O&M)을 기반으로 이루어지며, 시뮬레이션 결과에 대한 순현재가치(NPV), 투자회수기간(Payback) 그리고 내부수익률(IRR) 등을 확인할 수 있다[11,12].

HOMER Pro는 마이크로그리드 내 분산형전원 구성용량 산정을 위해 사용되고 있는 상용 프로그램이다. 본 논문에서 제시하는 방법론을 통해 산정된 결과와 HOMER Pro의 시뮬레이션 결과를 비교해 알고리즘의 정합성을 판단하고자 한다.

4.1. 사례연구 배경

사례연구 대상 지역은 국내 도서 지역으로, 연간 최대수요전력은 167kW, 하루 평균 부하량은 약 2,165kWh이다. 연간 시간대별 평균 수요를 나타내는 그림 5를 통해 대상 부하가 일반적인 도서 지역 가정의 전력수요 패턴을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 명목이자율은 3%로, 인플레이션율은 2015년을 기준으로 0.7%로 설정하였으며, 이에 따른 실질이자율은 연 2.28%로 가정한다. 신재생발전량에 데이터의 경우, 실적데이터를 정규화하여 연간 발전량 패턴을 생성하였다.

ESS는 Zr-Br 레독스흐름전지를 대상으로 하며, 방전량에 따라 실제 출력이 달라지는 특성을 비선형 함수로 추정해 적용한다. 그림 3의 과정을 통해 추정된 1MWh급 ESS의 방전특성은 그림 6과 같다. 일반적으로 알려진 레독스흐름전지의 효율인 75%와 비교할 경우, 방전량이 작을수록 우수한 효율을 보인다. ESS를 충전하는 상황에서는 충전전류량에 따른 전압강하 폭이 크지 않으므로, 97%의 일관된 효율로 가정한다. 이 외에 태양광발전기의 인버터 효율은 95%, PCS의 효율은 96%로 가정한다.

각 분산형전원의 자본비용, 대체비용, 유지보수비용과 수명은 표 1과 같다[13]. 사례연구의 프로젝트 기간은 25년으로 설정하고, 태양광발전원일 단위용량은 1kW, 풍력발전기는 1기당 100kW, ESS는 1kWh로 설정한다.

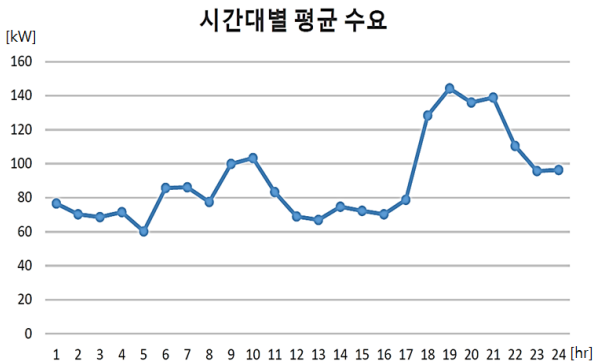


그림 5 시간대별 평균 전력수요
Fig. 5 Average power consumption

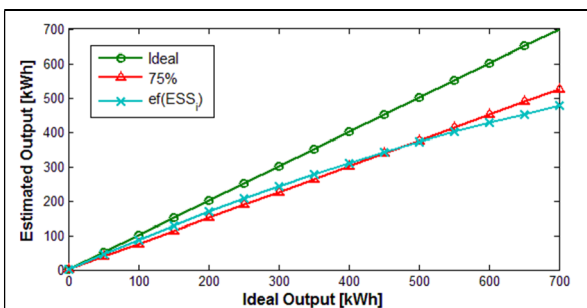


그림 6 이상적인 출력 대비 실제 출력 추정결과
Fig. 6 Ideal output vs. Estimated output

표 1 분산형전원 가격 및 수명 정보

Table 1 Cost and lifetime of DERs

	기본 용량	자본비용 (\$/kW-yr)	대체비용 (\$/kW-yr)	유지보수비용 (\$/kW-yr)	수명 (년)
풍력 발전	100kW	5,297	3,920	35	33
태양광 발전	1kW	3,065	2,452	22	15
태양광 인버터	1kW	380	380	0	18
ESS	1kWh	500	270 (5년마다)	6.5	15

4.2. 수급균형을 고려한 분산형전원 용량 산정

표 1의 정보와 식 (12)~(17)의 과정을 이용해 정전시간을 제약조건으로 설정하여 최적해를 구하였다. 결과는 표 2와 같으며, 이때의 SoC 변동은 그림 4와 같다. 해당 결과의 연 평균 SoC는 86.1%로 높은 경향을 보이며, ESS의 용량이 충분히 활용되지 않고 있음을 알 수 있다. 총 비용을 현재가치로 환산한 금액은 3,110,701달러로, 한화 약 150억 원에 해당한다.

표 1의 분산형전원 비용 및 수명정보를 동일하게 적용하여, HOMER Pro(3.7.4ver) 시뮬레이션을 진행하였다. 본 논문에서 제시한 최적화 문제와 동일하게 풍력발전기, 태양광발전기, ESS 그리고 태양광발전 인버터를 구성요소로 고려하였다. HOMER Pro의 경우, 기본적으로 AC/DC 하이브리드형 계통으로 구성되는 점을 고려할 때, 마이크로그리드의 구성도는 그림 7과 같으며, HOMER Pro를 이용해 분산형전원의 구성용량산정 결과는 표 2에 제시되어 있다.

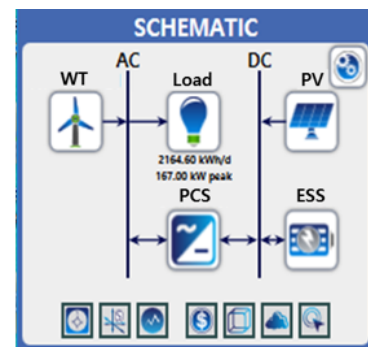


그림 7 HOMER Pro 계통 구성도
Fig. 7 Schematic of HOMER Pro

결과적으로, 앞서 제시한 방법을 통해 산정한 결과와 HOMER Pro를 이용한 결과는 풍력발전기 200kW, ESS 약 3MWh로 유사한 양상을 보인다. 본 논문에서 제시하는 AC-link 상황으로 HOMER Pro의 결과를 변형한 결과, 22시간 동안의 정전이 발생한다. 태양광발전용량에서 약 400kW의 차이가 나지만, 22시간의

표 3 계통 신뢰도저하를 고려한 분산전원 최적용량 산정 결과

Table 3 Optimization results considering reduction of system reliability

정전허용 비율		PV(kW)	WT(kW)	ESS(kWh)	NPV(\$)	정전시간(hr)	SOC
비율	시간(hr)						
0%	0	1,637	200	3,016	13,110,701	0	86.10%
1%	87.6	1,046	200	2,653	10,138,800	87	79.47%
2%	175.2	807	300	2,061	9,075,873	175	77.49%
3%	262.8	840	200	2,077	8,390,018	262	71.25%
4%	350.4	719	300	1,589	7,970,463	350	71.19%
5%	438	669	300	1,502	7,629,755	437	68.91%
6%	525.6	763	200	1,592	7,308,588	525	64.25%
7%	613.2	706	200	1,553	7,015,630	612	62.09%
8%	700.8	672	200	1,475	6,754,066	699	59.98%
9%	788.4	640	200	1,435	6,560,883	788	58.40%
10%	876	595	200	1,441	6,387,950	875	56.89%
15%	1,314	514	200	1,249	5,755,019	1,314	51.35%
20%	1,752	458	200	1,092	5,278,959	1,752	47.31%

표 2 수급균형만 고려한 경우의 최적 용량 산정 결과

Table 2 Optimization results with balancing

		GA	HOMER Pro
태양광발전 (kW)		1,637	1,233
풍력발전 (kW)		200	200
ESS(kWh)		3,016	3,051
연간 정전시간(hr)		0	22
총 비용 (\$)	AC-link	13,110,701	11,528,228
	HOMER Pro	-	10,036,438

정전이 발생한다.

이는, HOMER Pro에서는 전력수급의 제약조건을 정전시간이 아닌 전체 부하량에 대해 부족한 발전량에 대한 조건으로 주어 발생한 차이로 보인다.

본 논문에서 산정한 총 비용과 HOMER Pro의 총 비용이 다른 이유는 크게 두 가지가 있다. 우선, HOMER Pro에서는 분산형전원의 잔존가치가 포함된 금액을 기준으로 분산형전원의 용량을 산정한다. 즉, 총 비용인 10,036,438달러에는 잔존가치 728,444달러가 포함된 금액이다. 또한, 계통의 구성형태가 달라 인버터의 정격출력이 다르게 산정되어, 이로 인한 비용차이가 발생해 총 비용이 다르게 계산된 것으로 보인다. AC-link 상황으로 HOMER Pro의 결과를 분석한 결과, 총 비용은 11,528,228달러, 한화 약 130억 원으로 계산되었다.

4.3. 계통 신뢰도 저하를 고려한 분산형전원 용량 산정

계통 신뢰도의 측면에서 연간 정전시간이 연간 총 시간의 0~10%(0~438시간), 15%(876시간), 20%(1,314시간)인 경우를 고려하여, 식 (21)의 제약조건을 적용해 각각의 결과를 도출하였다. 정전허용비율이 높아질수록 태양광발전량과 ESS의 용량이 점차 감소하는 동시에 연 평균 SoC와 총 비용도 감소함을 확인할 수 있다(표 3).

표 4 정전시간이 부조일 수준일 경우의 용량 산정 결과

Table 4 Optimization results considering sunless day

태양광발전 (kW)	풍력발전 (kW)	ESS (kWh)	연간 정전시간 (hr)	순현재가치 (\$)
694	200	1,562	623	6,981,251

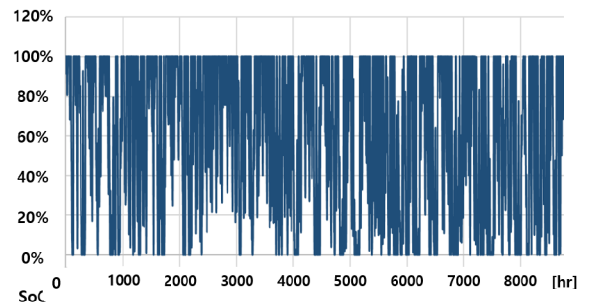


그림 8 부조일을 고려한 경우의 연간 SoC

Fig. 8 Yearly SoC trend considering sunless day

기상청에서 제공하는 사례연구 대상지역의 부조시간정보를 통해 해가 충분히 비치지 않은 날의 수를 구하고, 이를 이용해 연간 부조시간을 구함으로써, 적정 정전 허용수준을 설정할 수 있다. 실제 2010년부터 2015년까지 5년간의 정보를 이용해 평균적인 연간 부조시간을 구한 결과, 부조시간은 624시간으로 계산되었다. 이는 8,760시간 중 약 7.1%에 해당하는 값으로, 이를 정전허용 시간으로 설정해 산정한 최적 구성 및 용량 결과는 표 4와 같다.

해당 결과를 살펴보면, 프로젝트기간 동안의 총 비용을 현재가치로 환산한 비용은 6,981,251달러로, 한화 약 80억 원에 해당한다. 연간 SoC변화를 나타내는 그림 8을 살펴보면, 연 평균 SoC는 61.8%이고, 20% 이하로 SoC가 떨어지는 경우는 정전시간을 0으로 설정한 경우에 비해 증가되었음을 확인할 수 있다. 이는

ESS가 충분히 효율적으로 사용되고 있음을 의미한다.

정전시간을 0시간으로 설정한 경우와 부조일 수준으로 설정한 경우의 결과를 비교해보면, 부조일을 고려할 경우 정전시간은 623시간으로 약 26일에 해당하는 시간이라 할 수 있다. 비용적인 측면에선 약 46.75%의 금액인 6,129,450달러가 절감되었는데, 이는 한화 약 70억 원에 해당하는 금액이다. 연 평균 SoC는 86.1%에서 61.8%로 감소했음을 통해, 부조일을 고려할 경우 ESS를 더 효율적으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 확률론적으로 함숫값을 이용해 최적해를 탐색하는 유전자알고리즘을 활용해 독립형 마이크로그리드 내 분산형전원의 최적구성용량을 산정하는 방법을 제시하고, 실제 국내 도서지역의 부하데이터와 기상데이터를 이용해 사례연구를 진행하였다. 유전자알고리즘을 이용해 산정한 분산형전원의 용량 산정 결과와, 일반적으로 널리 이용되는 HOMER Pro의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 또한, 해가 비치지 않는 날인 부조일의 가능성을 일정부분 고려하여, 연간 정전시간을 0시간으로 설정하는 경우와 부조일 수준으로 고려하는 경우에 대한 결과를 비교하였다. 사례연구 결과, 정전 허용시간을 부조일 수준인 624시간으로 설정할 경우, 약 70억에 해당하는 금액을 절감할 수 있었다. ESS의 연 평균 SOC는 61.8%로, ESS를 보다 효율적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 따라서 비용적인 측면에서 정전이 예상되는 시점에 디젤발전기를 가동하는 것이 경제적인 것으로 예상되며, 향후 디젤발전기 기동 비용이나 정전비용 혹은 다른 종류의 ESS 등을 이용해 정전시간을 감당하는 방법에 대해 연구할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지수요관리핵심기술사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20152010103390).

References

[1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Press Releases", December 2015.
 [2] Won Dong-kyu, "Special Report - Paris Agreement and Major Issues for Electricity Sector," KEMRI Electricity Economy Review, Vol. 2, January 2016.
 [3] "Energy&New Industry Website", <http://www.energynewbiz.or.kr>
 [4] Yong-Gun Kim, "Global Carbon Market Trends and

Insights", Journal of Green Technology Policy, Vol. 2, No. 1, pp. 23-39, June 2016.

[5] Nina Meng, Panbao Wang, Hui Wu, Wei Wang, "Optimal Sizing of Distributed Generations in a connected DC Micro-grid with Hybrid Energy Storage System", 2015 European Conference on Circuit Theory & Design, pp. 3179-3183, 2015.
 [6] Xiang Chen, Yanbin Li, Junming Xiao, Xuehui Wei, "Optimal Configuration for Distributed Generations in Micro-grid System Considering Diesel as the Main Control Source", Power Engineering, Vol. 2015, No. 9, pp. 493-499, March 2015.
 [7] Omar Hafez, Kankar Bhattachary, "Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids", In Renewable Energy, Vol. 45, pp. 7-15, September 2012.
 [8] Darrell Whitley, A genetic algorithm tutorial, Statistics and Computing, Vol. 4, Issue. 2, pp. 65-85, June 1994.
 [9] Singiresu S. Rao, "Engineering Optimization: Theory and Practice", John Wiley & Sons, July 2009.
 [10] Ja-hyun Baek, Eun-young Ko, Tae-Hyuk Kang, Han-Sang Lee, Soo-Hwan Cho, "Analysis of Electricity Cost Saving Effect by the Optimal load shifting Operation with 1MWh Redox Flow Battery", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 7, pp. 1151-1160, July 2016.
 [11] "HOMER Energy Website", <http://www.homerenergy.com/>
 [12] T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal, "Micropower system modeling with Homer", John Wiley & Sons Inc., 2006.
 [13] Susan Schoenung, "Energy Storage Systems Cost Update A Study for the DOE Energy Storage Systems Program", SANDIA REPORT, April 2011.

저 자 소 개



백자현(Ja-Hyun Baek)

1992년 12월 13일생. 2015년도 상명대학교 에너지그리드학과 졸업(공학사). 2017년 동대학원 에너지그리드학과 졸업(공학석사). 2017년~현재 한전전력연구원 에너지신산업연구소 연구원.
 E-mail : hyunee100@naver.com



한 수 경 (Soo-Kyung Han)

1994년 11월 1일생. 2017년 상명대학교 에너지그리드학과 졸업(공학사). 2017~현재 상명대학교 전기공학과 재학(석사과정).

E-mail : 201311047@sangmyung.kr



김 대 식 (Dae-Sik Kim)

1971년 8월 25일생. 2005년 한양대학교 화학공학과 졸업(공학박사). 2005~ 2008년 캐나다 국립연구소(NPC) 근무. 2009~현재 롯데케미칼 연구6부문 에너지저장 파트장.

Tel : 042-879-1140

E-mail : dskim71@lottechem.com



한 동 화 (Dong-Hwa Han)

1982년 11월 17일생. 2008년 건국대학교 전기공학과 졸업(공학사). 2014년 건국대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 2014년~현재 롯데케미칼 연구 6부문 에너지저장 파트, 전력 변환부.

Tel : 042-879-1134

E-mail : pwele@lottechem.com



이 한 상 (Hansang Lee)

1980년 1월 17일생. 2003년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업(공학사). 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2010년~2012년 고려대학교 BK21정보통신사업단 연구교수. 2012년~2017년 경일대학교 전기철도공학부 조교수. 2017년~현재 고려대학교 전력시스템기술연구소 연구교수.

Tel : 02-3290-3803

E-mail : hansang80@korea.ac.kr



조 수 환 (Soo-Hwan Cho)

1976년 10월 28일생. 2002년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사). 2002년~2004년 삼성전자 무선사업부 근무. 2009년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2009년~2011년 한국원자력연구원 선임연구원. 2011년~현재 상명대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 02-781-7503

E-mail : shcho@smu.ac.kr