



[2019-3-ES-007]

마이크로그리드에서 신재생에너지의 최적 용량 및 위치 선정

나문수¹⁾ · 김진오^{2)*}

Optimal Sizing and Location of Renewable Energies in a Microgrid

Moonsu Na¹⁾ · Jin-O Kim^{2)*}

Received 26 December 2018 Revised 13 March 2019 Accepted 14 March 2019

ABSTRACT Currently, with the increasing interest in renewable energy sources (RES), their penetration in the power system is expected to increase considerably. South Korea plans to increase the proportion of renewable energy to 20% by 2029 based on the 7th basic plan for long-term electricity supply and demand. On the other hand, expanding the penetration of renewable energy sources is a new challenge for conventional power systems. Most renewable energy sources, such as photovoltaic and wind power, are intermittent, and thus difficult to control without a loss of power. In addition, the intermittent characteristics leads to an imbalance of power and load. This can be solved by combining renewable energies because the output characteristics of wind power and solar are different. A reliability assessment is an appropriate method for achieving the optimal combination of renewable energy sources. Therefore, this paper proposes the optimal sizing and location of renewable energy sources in a microgrid based on a reliability assessment. In addition, a stochastic method for LOLE (Loss of Load Expectation) is also proposed to evaluate the reliability. In this case study, optimal sizing and locations are determined by the minimum LOLE and power loss in an IEEE 34-bus system.

Key words Optimal capacity(최적용량), Optimal location(최적위치), Renewable energy(신재생에너지), Reliability(신뢰성), Microgrid(마이크로그리드)

1. 서론

최근 국내 전력소비량은 2005년부터 2017년까지 연평균 4.1% 증가하였고 최대전력 연평균 증가율은 연평균 4.4%였다^[1]. 이런 증가율은 최근 몇 년간의 전력 위기를 초래하였고 특히 2011년 9월 15일 대규모 정전 사태가 발생하였

다. 부하의 증가에 따라 발전량이 증가하지 못한다면 전체적인 시스템의 신뢰도가 감소한다. 이렇게 감소하는 신뢰도를 일정한 수준으로 유지시켜야 하는데 기존 발전을 건설하기에는 환경오염, 화석연료의 고갈, 발전소 부지 선정 등과 같은 어려움이 있다. 기존 발전기에 대한 대안으로 신재생에너지가 주목 받고 있으며 일반적으로 풍력과 태양광의 경우 바람이 저녁과 새벽에 많이 불고 일사량은 낮에 강하여 저녁에는 풍력 발전의 전력 생산이, 낮에는 태양광 발전의 전력 생산이 활발한 경향을 가진다^[2]. 만약 이러한 특성을 이용하여 풍력발전과 태양광발전을 적절하게 조합할 수 있다면 신재생에너지의 고질적인 문제인 간헐적인 출력

1) Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Hanyang University

2) Professor, Department of Electrical Engineering, Hanyang University

*Corresponding author: jokim@hanyang.ac.kr

Tel: +82-2-2220-0347

Fax: +82-2-2220-1856

을 해결할 수 있을 것이다^[3]. 신재생에너지의 적절한 조합을 평가하기 위한 방법 중 신뢰도가 하나의 기준이 될 수 있다. 신뢰도 평가를 위해서 가장 많이 쓰이는 방법이 MCS (Monte Carlo Simulation)이다. MCS는 수많은 반복을 통하여 신뢰도를 산출한다. 그러나 이 방법은 정확한 값을 찾을 수 없고 시뮬레이션의 횟수가 많아질수록 기하급수적으로 많은 시간이 소요된다. 본 논문에서는 발전 COPT (Capacity Outage Probability Table) 행렬과 부하 행렬을 이용하여 새로운 신뢰도 평가 기법을 제안한다. 그리고 이 기법을 이용하여 풍력과 태양광 발전의 투입 최적 용량을 산정하고 IEEE 34-bus system에 적용하여 최소손실을 가지는 풍력 발전과 태양광 발전의 위치를 선정한다.

2. 신재생에너지의 출력 모델링

2.1 풍력 발전 출력모델링

풍력 발전기의 기술 발전으로 인해 출력 모델링이 어느 정도 정형화 되어있다. 본 논문에서는 간략한 계산을 위하여 풍력 발전의 출력을 식 (1)과 같이 풍속 구간에 따라 나타내었다.

$$\begin{cases} (i) v_{co} < v(t) < v_{ci} \\ P_W(t) = 0 \\ (ii) v_{ci} \leq v(t) \leq v_{rated} \\ P_W(t) = \frac{P_{rated}}{v_{rated} - v_{ci}}(v(t) - v_{ci}) \\ (iii) v_{rated} \leq v(t) \leq v_{co} \\ P_W(t) = P_{rated} \end{cases} \quad (1)$$

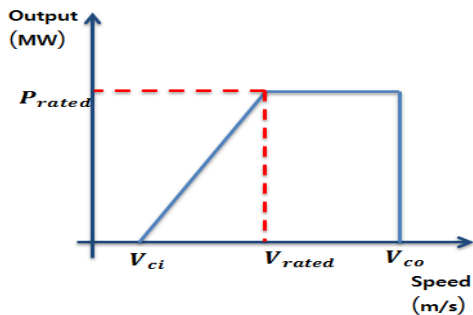


Fig. 1. Wind power output modeling

여기서, P_W 는 풍력의 출력, v 는 풍속(m/s)을 나타낸다. 아래 첨자 $ci, rated, co$ 는 각각 풍력 발전을 시작하는 구간, 정격출력을 발전하는 구간, 발전을 정지하는 구간을 의미한다. 위의 식을 그래프로 나타내면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 태양광 발전 출력 모델링

태양광 발전은 패널의 효율과 면적, 일사량의 함수로 나타낼 수 있다. 태양광 발전 출력은 식 (2)를 따른다^[4].

$$P_{PV}(t) = Ins(t) \times A \times Eff_{PV} \quad (2)$$

여기서 $Ins(t)$ 는 t 시간에서의 일사량 데이터(kW/m^2), A 는 단일 태양광 패널의 면적(m^2), Eff_{PV} 는 태양광 패널의 효율이다. 태양광 발전은 패널의 온도에 따라 발전 출력이 영향을 받는다. Fig. 2는 태양광 발전 패널의 모듈 온도에 따라 모듈 효율이 감소함을 보여주고 있다.

본 논문에서는 다음의 식 (3)과 (4)와 같이 패널의 온도 영향을 고려하여 태양광 발전의 출력을 모델링하였다^[5]. 식 (3)은 주위의 온도에 따른 태양광 패널의 온도를 산정하는 식이고, 식 (4)는 산정한 패널 온도에 따른 발전 출력식이다.

$$T_{cell} = T_{amb} + r \left(\frac{Insolation}{1kW/m^2} \right) \quad (3)$$

$25 \leq r \leq 35$

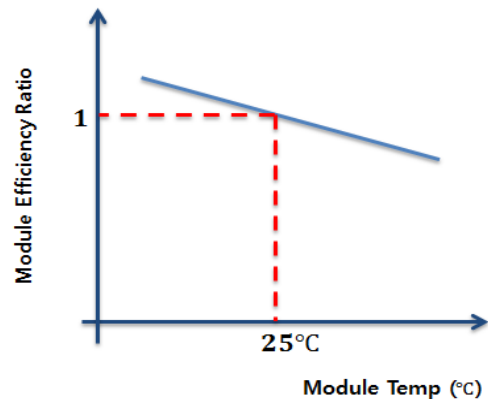


Fig. 2. Correlation between temperature and module efficiency

$$\begin{cases} \text{If } T_{cell} < 25^\circ\text{C}, P_{PV}(t) \times (1+0.005)^{(25-T_{cell})} \\ \text{If } T_{cell} > 25^\circ\text{C}, P_{PV}(t) \times (1+0.005)^{(T_{cell}-25)} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, T_{cell} 은 태양광 패널의 온도, T_{amb} 는 태양광 패널이 설치된 주변 온도, r 은 기준 온도(25°C)를 나타낸다.

3. 해석적 신뢰도 기법

신뢰도 평가 기법에는 MCS (Monte Carlo Simulation)과 같은 시뮬레이션 기법과 식의 계산을 통해 이루어지는 분석적인 기법이 있다. 일반적으로 대규모 전력망에서 시뮬레이션 기법이 사용하기 쉽고 간단하여 많이 사용되고 있으나 본 논문은 마이크로그리드라는 소규모 전력망을 가정하기 때문에 계산이 빠르고 정확한 분석적 신뢰도 평가기법을 적용하여 LOLE (Loss of Load Expectation)을 계산한다.

3.1 COPT 행렬

COPT (Capacity Outage Probability Table)란 전체 발전기가 동작할 확률을 그때의 출력과 함께 나타낸 것이다^[6]. 기존 발전기들의 단위 출력을 1MW라고 가정하고 발전기 출력에 따라서 COPT행렬을 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x)_n = [FOR_n, 0, \dots, 1 - FOR_n] \quad (5)$$

여기서 x 는 발전기의 용량(MW), n 은 발전기 번호, FOR (Forced Outage Rate)은 발전기의 고장 확률을 의미한다. 만약 용량이 3MW 인 발전기의 FOR이 0.01이라고 한다면 $f(x) = [0.01 \ 0 \ 0 \ 0.99]$ 인 행렬이 된다.

본 논문에서는 각 발전기 COPT 행렬의 컨볼루션을 통하여 전체 COPT 행렬을 식 (6)과 같이 정의한다^[7].

$$COPT_{Gen}^{Row} = f(x)_1 \cdot f(x)_2 \cdot \dots \cdot f(x)_n \quad (6)$$

여기서 아래 첨자 Gen 은 기존 발전기들에 대한 경우를 의미하고 위 첨자 Row 는 행벡터를 의미한다. 풍력 발전과

태양광 발전은 풍속과 일사량에 따라서 순간적으로 생산되는 전력량이 크게 변한다. 이러한 변동성을 고려하기 위해서 시간별 평균 풍속과 일사량 값을 이용하여 각 발전기의 변동되는 발전 용량도 고려한 COPT 행렬을 구해야 한다. 풍력 발전과 태양광 발전이 투입된 후, 마이크로그리드에서의 모든 발전기들에 대한 시간별 COPT는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} COPT_{Res}^{Row}(i; \alpha, \beta) \\ = [COPT_{Gen}^{Row} \cdot P_W^{Row}(i; \alpha) \cdot P_{PV}^{Row}(i; \beta)] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 아래 첨자 Res 는 신재생에너지가 포함된 모든 발전기들을 의미하고 $P_W(i; \alpha)$ 와 $P_{PV}(i; \beta)$ 는 i 시간에서 각각 α 용량(MW), 혹은 β 용량(MW)을 가지는 태양광 발전의 이산 출력 분포를 나타내는 행벡터이다. 24시간 동안에 대하여 신재생에너지를 포함한 모든 발전기의 COPT 행렬은 식 (8)과 같이 표현한다.

$$COPT_{Res}^{Mat}(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} COPT_{Res}^{Row}(1; \alpha, \beta) \\ \vdots \\ COPT_{Res}^{Row}(i; \alpha, \beta) \\ \vdots \\ COPT_{Res}^{Row}(24; \alpha, \beta) \end{pmatrix} \quad (8)$$

3.2 Load 행렬

시간대별 부하 행렬을 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$LOAD^{Mat} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & X \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 24 \end{matrix} \quad (9)$$

여기서 X 는 최대 부하-용량을 의미하며 부하행렬 $LOAD^{Mat}$ 의 행은 시간 구간을 나타내고 열은 해당되는 행(시간 구간)에서의 부하 크기를 나타낸다.

3.3 LOLE 행렬

LOLE는 발전기의 용량이 피크 부하에 부합하지 못해서 생기는 기대값을 hours 혹은 days로 나타내는 신뢰도 지수이다. 위에서 구한 COPT 행렬과 LOAD 행렬을 이용하

여 LOLE 행렬을 다음 식 (10)과 같이 산정한다.

$$LOLE^{Out} = LOAD^{Mat} \times (COPT_{Gen}^{Row})^T \quad (10)$$

위에서 구한 열벡터 $LOLE^{Out}$ 은 각 시간대에 대한 LOLE 값을 구한 것이다. 즉, 전체 LOLE는 $LLOLE^{Out}$ 의 모든 원소의 합으로 다음의 식 (11)에 의해 산정된다.

$$LOLE = \sum_{\forall i} LOLE^{Out}(i) \quad i = 1, 2, \dots, 24 \quad (11)$$

3.4 신재생에너지 최적용량을 위한 목적함수

본 논문의 목적은 투입되는 신재생에너지의 용량 한계 내에서 LOLE가 최소가 되는 풍력 발전과 태양광 발전의 용량 α 와 β 를 산정하는 것이다. 이에 대한 목적 함수는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min LOLE(\alpha, \beta) = \sum_{\forall i, j} (LOLE^{Mat} \times COPT_{Red}^{Mat}(\alpha, \beta)^T) \quad (12)$$

제약 조건으로 풍력과 태양광 발전이 투입될 수 있는 용량 한계 $P_{Res, Lim}$ 를 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha + \beta = \max P_{Res, Lim} \quad (13)$$

4. 전력손실평가

전력망에서 전력손실에 관한 비용은 전체 투입되는 비용 중 상당히 큰 부분을 차지한다. 특히 그물망처럼 퍼져있는 기존 전력망보다 단순하고 작은 마이크로그리드에서 전력 손실에 관한 영향이 더욱 커질 수 있다. 그러므로 마이크로그리드에서 정확한 평가를 통하여 전력손실을 계산할 필요가 있다.

4.1 전력조류 및 손실

일반적으로 조류 계산은 전력 시스템에서 매우 중요하고 기초적인 부분이다. 하지만 그 수식이 매우 복잡하기 때문에 컴퓨터를 이용하여 모선의 전압, 유효 전력, 무효 전력

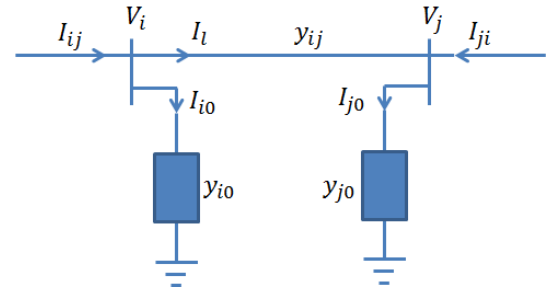


Fig. 3. Simple power grid bus model

을 구한 후 모선사이의 전력손실을 구할 수 있다^[8]. Fig. 3을 이용하여 모선 사이의 전력손실에 대해 계산해 본다.

위의 그림에서 모선 i 와 모선 j 사이의 피상 전력, 그리고 모선 j 와 모선 i 사이의 피상 전력은 다음 식 (14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (14)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (15)$$

위의 식을 이용하여 모선 i 와 모선 j 사이의 전력손실은 식 (14)과 (15)의 합으로 다음 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{L_{ij}} = S_{ij} + S_{ji} \quad (16)$$

모선이 n 개인 마이크로그리드에서 전력손실의 총합은 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{L_{total}} = \sum_{a=1}^{n-1} S_L(a) \quad (17)$$

4.2 최적위치를 위한 목적함수

손실이 최소가 되는 최적위치를 위한 목적함수는, 최소 LOLE가 되는 용량 α 인 풍력 발전과 용량 β 인 태양광 발전을 모선이 n 개인 마이크로그리드에 투입하였을 때 전력손실의 총합이 최소가 되는 각각 발전의 모선 위치 i 와 j 를 선정하기 위한 것이다. 이에 대한 목적함수는 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\min S_{L_{total}} = \sum_{a=1}^{n-1} S_L(a) \quad (18)$$

모선 1에는 기존 발전이 투입되기 때문에 신재생에너지는 위치할 수 없다. 또한 마이크로그리드는 기존의 전력망보다 크기가 작기 때문에 풍력 발전과 태양광 발전의 위치 결정은 투입될 수 있는 모선의 모든 경우의 수를 고려할 수 있다.

제약 조건으로 기존 발전기는 min, max 값을 고려한 정격 출력을 내고 마이크로그리드의 선로 평형을 고려하여 계산한다. 간단한 계산을 위해 선로 용량 제약은 고려하지 않는다.

5. 사례연구

사례연구를 위하여 간단한 마이크로그리드 환경을 다음과 같이 가정한다^[9]. Fig. 4와 같이 IEEE 34-bus에서 1번 모선에 기존 발전기 10MW 5기, 5MW 10기로 구성하였으며 모든 발전기의 FOR은 0.01로 가정한다. 일일 최고 부하는 100MW를 기준으로 Fig. 5와 같이 가정한다.

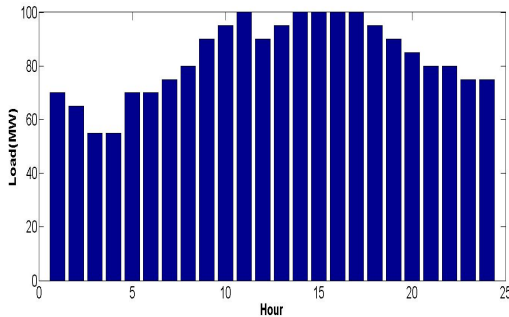


Fig. 4. IEEE 34-bus Microgrid

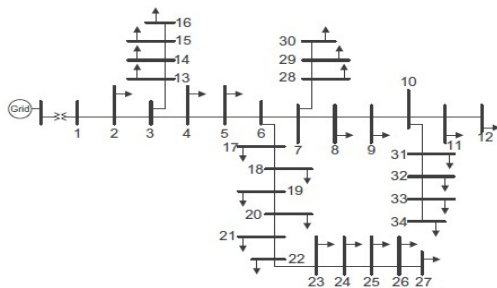


Fig. 5. Daily load data

5.1 최적 용량 선정

본 논문에서는 한 해(2011년) 동안 제주도 고산 지역의 시간별 평균 풍속과 일사량 데이터^[10]를 이용하여 풍력과 태양광 발전의 출력을 산정하여 Fig. 6과 Fig. 7로 나타내었다.

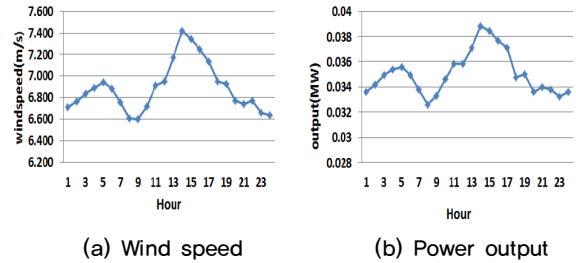


Fig. 6. Wind speed and power output of Gosan

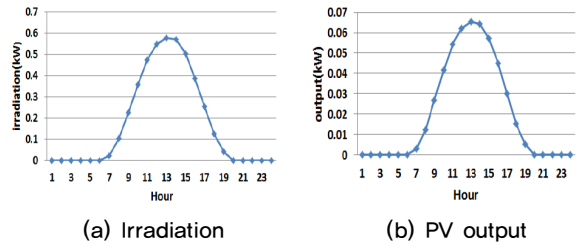


Fig. 7. Irradiation and power output of Gosan

위의 그림을 통하여 풍력 발전의 출력은 시간대별 풍속에 따라 분포되어 있으며, 태양광 발전의 출력은 낮 시간 동안에 집중되어 있음을 볼 수 있다.

풍력 발전과 태양광 발전은 시간대별 출력이 간헐적으로 변화하기 때문에 기존 발전기와 연계할 경우 출력변화의 불확실성을 고려하여야 한다. 고산의 실제 데이터를 바탕으로 각 풍력과 태양광 발전의 시간대별 출력 확률을 Fig. 8과 같이 이산 출력 분포로 나타낼 수 있다.

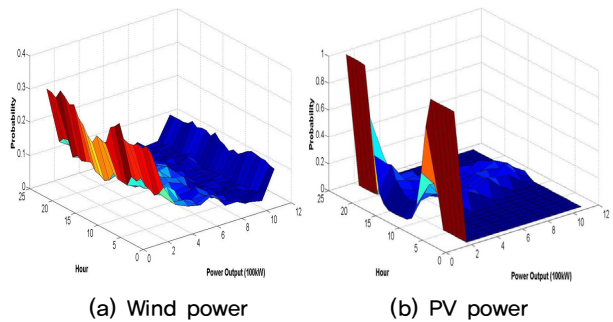


Fig. 8. Hourly output probability of the wind power and PV power

풍력 발전의 시간대별 출력 확률은 전체적으로 모양이 U자 모양이 나타남을 볼 수 있다. 이는 생산전력이 거의 없거나 정격출력으로 발전할 경우가 많다는 것을 의미한다. 태양광 발전은 낮시간 동안에 발전한다는 특성을 그대로 확인할 수 있다.

위의 신재생에너지를 바탕으로 풍력 발전과 태양광 발전이 투입될 수 있는 용량 한계 $P_{Res, Limit}$ 를 0MW 부터 1MW 씩 증가시키면서 50MW 까지 각각의 최적 용량 조합을 산정하여 다음 Fig. 9와 같이 나타내었다.

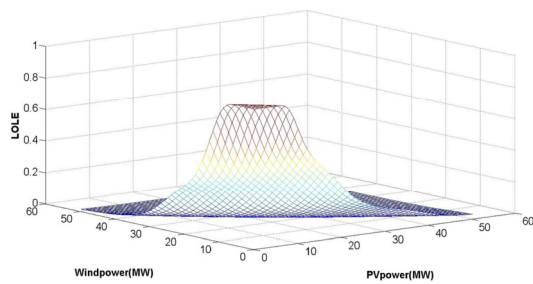


Fig. 9. LOLE based optimal capacity of the wind and PV power

투입 용량 한계 $P_{Res, Limit}$ 가 적은 용량일 경우는 모든 용량을 태양광 발전으로 투입하였을 때 최소 LOLE를 가진다. 이는 시간대별 부하 패턴이 태양광 발전 출력 패턴과 비슷하여 부하 증가량에 잘 부합하기 때문이다. 그러나 용량 한계 $P_{Res, Limit}$ 가 큰 용량일 경우는 태양광 발전이 저녁과 새벽에 출력이 없기 때문에 풍력 발전이 많이 투입될수록 더 작은 LOLE를 가진다. 그리고 태양광 발전의 용량은 특정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 다음 Table 1에 정리하였다.

Table 1. LOLE based optimal capacity of the wind and PV power

$P_{Res, Limit}$	Wind Power (α)	PV Power (β)	Min LOLE (hours/day)
10 MW	0 MW	10 MW	0.715066
15 MW	7 MW	8 MW	0.462459
20 MW	17 MW	3 MW	0.298801
25 MW	13 MW	12 MW	0.177359
30 MW	21 MW	9 MW	0.085353
35 MW	29 MW	6 MW	0.03959
40 MW	33 MW	7 MW	0.020481
45 MW	37 MW	8 MW	0.011035
50 MW	43 MW	7 MW	0.005937

5.2 최적 위치 선정

앞에서 투입 용량에 따른 풍력 발전과 태양광 발전의 최적 용량 조합을 산정하였다. 이를 바탕으로 IEEE 34-bus에서 전력손실이 최소인 풍력발전과 태양광 발전의 최적 위치를 선정한다.

먼저 고산 지역의 풍속과 일사량 데이터를 바탕으로 구한 최적 용량 조합을 통하여 최적 위치를 선정한다. $P_{Res, Limit}$ 이 10MW 에서 5MW 단위로 50MW 가 될 때 까지 그 최적 위치를 선정하였다.

아래 Fig. 10의 a, b, c, d는 $P_{Res, Limit}$ 이 10MW, 20MW, 30MW, 40MW 일때 각 발전의 모선 위치에 따른 전력손실 (MVA)를 나타낸 것이다.

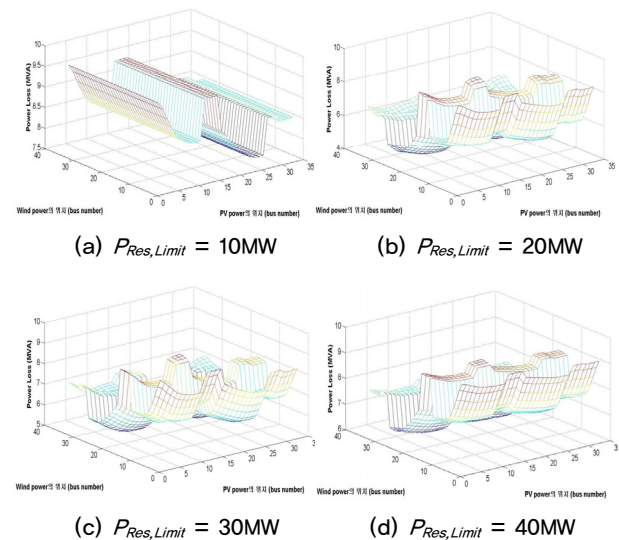


Fig. 10. Power loss of the located wind and PV power

$P_{Res, Limit}$ 가 10MW 일 경우 태양광 발전이 10MW 모두 투입되는 것이 가장 작은 LOLE를 가지게 되어 최소 전력 손실 또한 태양광 발전에 따라서 영향을 받는다. 다른 경우 일반적으로 풍력 발전이 모선 20과 25 사이, 태양광 발전은 모선 5와 10사이 또는 모선 20과 25 사이에 투입되었을 경우 낮은 전력손실이 된다는 것을 확인할 수 있었다.

이는 모선 6에서 시작되는 국부적인 망이 다른 어떤 국부적인 망보다 크고 많은 부하를 소비하고 있기 때문에 이곳에 신재생에너지가 투입되었을 경우 전력 분배를 통하여 낮은 전력손실이 발생한다.

또한 마이크로그리드에서 비교적 말단에 위치하고 있는 모선에 신재생에너지가 투입되어야 기존 망에서 투입되는 전력의 강하를 보상해 줄 수 있으므로 낮은 전력손실을 가진다는 사실을 알 수 있다^[11].

Table 2는 각 투입 용량에 대한 최소 전력손실을 가지는 신재생에너지의 모선 위치와 그 값을 나타낸 표이다.

Table 2. Bus number of the wind power and PV power with the minimum power loss

$P_{Res, Limit}$	Wind Power (bus number)	PV Power (bus number)	Min Power Loss (MVA)
10 MW	—	26	7.795014
15 MW	26	25	6.973711
20 MW	25	23	6.287704
25 MW	26	23	5.6994
30 MW	25	22	5.215095
35 MW	24	11	4.764232
40 MW	24	11	4.404373
45 MW	23	11	4.102214
50 MW	23	11	3.917828

6. 결론

본 논문은 마이크로그리드 환경에서 LOLE가 최소값을 가지는 풍력과 태양광 발전의 최적 용량 산정을 구하고 그 용량을 바탕으로 실제적인 마이크로그리드에 적용하여 최적의 위치를 선정하였다. 이를 분석적으로 계산하기 위해 발전기 COPT 행렬과 Load 행렬을 이용하였고 최적 위치를 선정하기 위해 전력손실을 고려하였다. 그 결과 풍력과 태양광 발전을 조합하였을 때 낮은 LOLE 값이 나타나는 것을 확인하였고 마이크로그리드에서 신재생에너지의 위치에 따라서 전력손실이 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 일환으로 수행되었습니다(No. 2017R1A2B1007520).

References

- [1] Ministry of Knowledge Economy, “7th Basic Plan for Electricity Supply and Demand”, 2015.
- [2] The Unofficial Morgan Solar Weblog, <http://morgansolar.wordpress.com/tag/solar-power/>
- [3] Micro Grid Optimization of Energy Independent Island, Korean Society for New & Renewable Energy, Korean Society for New & Renewable Energy journal, 2018.4.
- [4] D.B. Nelson, M.H. Nehrir, C. Wang, “Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems”, Renewable Energy, volume 31, Issue 10, pp.1641-1656, 2006.
- [5] Gilbert M. Masters, “Renewable and Efficient Electric Power System”, Wiley-Interscience, 2004.
- [6] A.H.Hasim, S.H.E. Chan, “A Combined Probabilistic and Deterministic Method for an Improved Capacity Outage Probability Table Synthesis Using Monte Carlo Methods, 2009 ICEE.
- [7] Roy Billington, Ronald N. Allan, “Reliability Evaluation of Power Systems”, 2nd ed., Plenum Press, 1994.
- [8] Hadi Saadat, “Power System Analysis”, 2nd ed., Mc Graw Hill, 2004.
- [9] Monica Alonso, Hortensia Amaris, Carlos Alvarez-Ortega, “Integration of renewable energy sources in smart grids by means of evolutionary optimization algorithms”, Experts Systems with Applications, volume 39, pp.5513-5522, 2012.
- [10] Korea Meteorological Agency, “Alpine – wind speed in 2011, solar radiation”, 2012.
- [11] Wang Bo, Lan Ka, “Analysis of the distributed generation system and the influence on power loss”, Power and Energy Engineering Conference, 2011 Asia-Pacific.