

계통 연계형 태양광 발전 시스템의 신뢰도 평가

서정민*, 배인수*, 심현*, 김진오*
*한양대학교 전기공학과

Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic systems

Jeong-Min Seo*, In-Su Bae*, Hun Shim*, Jin-O Kim
Dept. of EE, Hanyang University*

Abstract - 태양광 발전 시스템은 환경오염을 최소화하고 송·배전선에 손실을 줄이는 등 여러 가지 이점으로 많이 연구되고 있다. 지금까지의 태양광 발전 시스템에 대한 연구는 독립형 소규모 발전에 적용되어 연구되었다. 하지만 본 논문에서는 태양광 발전 시스템이 계통에 연계되었을 시 전체적인 신뢰도를 평가하고자 한다. 본 논문에서는 11년치(1992~2002) 일사량 데이터를 가지고 확률밀도 함수를 생성하여 배터리 저장상태에 따른 태양광 발전 시스템의 발전 확률을 계산하였다. 또한 태양광 발전 시스템이 계통 연계시에 대해 Markov Chain 모델을 적용하여 해석하였으며, 이 값을 모의법을 통해 비교 확인하였다.

데이터는 Sturge's rule을 이용하여 처리하였다[1]. 또한 일사량은 Weibull 분포를 따른다고 가정하여 확률밀도함수를 표현하였으며, 그것은 계절별 시간별에 따라 각각 생성하였다[1],[2]. 그림 1은 하나의 예로 가을철 오후 1시에 일사량에 따른 Weibull 확률밀도함수를 나타내었다.

1. 서 론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 출력이 가장 영향을 많이 미치는 요인인 일사량과 태양전지 효율로부터 일사량 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF) 및 태양광 발전 시스템의 출력을 계산하였다. 또한 소규모 태양광 발전을 설치한 일반 가정용 부하의 계절별 대표 부하모델을 선정하여 태양광 발전의 출력과 배터리 상태간의 상호작용을 판별하여 태양광 발전을 설치한 수용가에 전력을 공급할 수 있는 확률을 산출하였다. 또한 태양광 발전 시스템의 구성요소와 배전계통이 갖고 있는 고장률과 수리율을 Markov Chain 모델을 적용하여 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 신뢰도를 산출하는데 이용하였고, 이 값들은 모의법(Monte Carlo Simulation, MCS)를 통해 비교하는 것에 그 목적을 두고 있다.

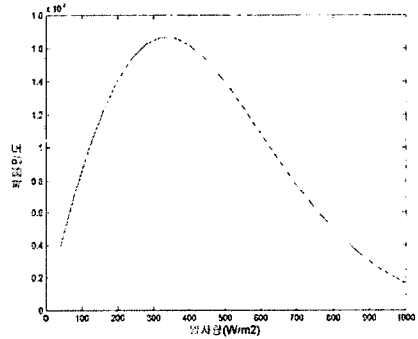


그림 1. 가을철 13시 일사량 확률밀도함수

2. 본 론

2.1 태양광 발전의 출력 특성

태양광 발전의 출력 전력을 결정짓는 주요 변수로는 태양전지 어레이(Array)의 설치 경사각, 방위각, 경도, 위도, 주위온도, 일사량, 시스템 효율 등을 들 수 있다. 그 중 태양광 발전의 출력을 결정짓는 기후 변수로는 일사량과 주위온도를 들 수 있고, 일사량이 온도에 비해 우선순위를 가지는 변수이기에 본 논문에서는 태양광 어레이의 출력이 일사량에 관한 함수로만 가정하여 연구를 진행하였다.

2.1.1 일사량 분포함수

본 논문의 일사량 분포함수 도출을 위해 최근 11년간 서울시 일사량 데이터를 사용하였는데, 1시간 단위의 데이터를 사계절로 분류하여 각 계절에 따른 시간별 일사량 분포함수를 구하였다.

일사량의 원본 데이터를 다루는데 있어 그 모양을 왜곡 시키지도 않고 과장하지도 않게 하기 위해 각

2.1.2 태양광 어레이 출력함수

태양광 어레이 출력은 태양광 어레이 주위의 온도와 일사량, 습도에 따라 그 출력을 달리한다. 태양광 주위의 온도와 일사량, 습도를 이용한 Kyocera modules의 태양광 어레이 효율은 회귀분석을 통해 온도와 일사량 그리고 기단의 특성에 따라 표현을 하였고, 본 논문에서는 일사량에 대한 함수로만 가정을 하여 나머지 변수에 대해서는 기본값과 동일하게 설정하였다[3].

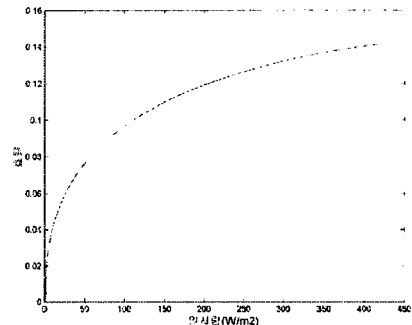


그림 2. 표준온도에서의 어레이 효율

실제 태양광 발전의 발전효율과 일사량의 관계를 살펴 보면 그림 2와 같다.

태양광 발전의 효율은 일정한 값을 가지는 것이 아니라 일사량의 변화에 따라 발전효율도 변하는 특징을 보인다. 여기서 효율이라 함은 단위 일사량에 대한 출력전력의 비를 말한다. 곡선의 모양에서 알 수 있듯이 특정 일사량을 지나면 효율의 증가가 둔화되는 포화특성을 보인다. 본 논문에서는 일사량에 따른 효율의 변화를 고려하여 태양광 발전의 출력을 고려하였다.

2.2 부하 모델

본 논문에서 태양광 발전의 부하를 일반가정용 부하로만 제한을 두고 그 특성을 하루 24시간에 대해 대표 모델을 선정하였다[4]. 주중 및 주말에 대한 부하구분은 없고 단위시간(1시간)에 대해서는 부하 변동은 없다고 가정하였다. 그림3은 우리나라 일반 가정용 부하의 대표 모델을 나타낸 그림이다.

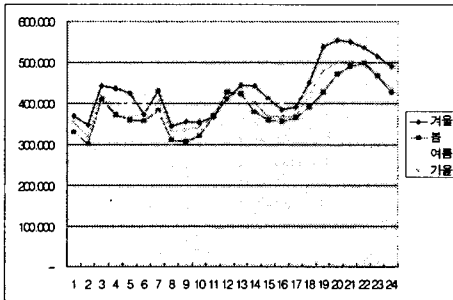


그림 3. 국내 가정용 주택의 계절별 부하곡선

2.3 태양광 발전 시스템의 출력 확률

단순히 모델링하기 위해서 그림 4에서 보듯이 어레이로부터 생산된 전력은 태양광 설치 수용가에서 우선적으로 사용하며, 잉여전력이 발생할 경우에는 배터리에 충전되며 전력이 부족한 경우에는 반대로 배터리의 방전으로 인해 수용가에 부족전력을 공급하게 된다. 더욱이 배터리의 충전용량이 없다면 계통에서 전력을 공급받게 되고 계통에서 배터리의 충전은 없다고 가정한다.

그림 4에서 보듯이 잉여전력 S_t 는 $S_t = G_t - L_t$ 라 생각하여 표현할 수 있고 태양광 발전의 양은 그 시간에 부하량을 고려한 잉여분의 전력만큼만 배터리에 저장된다. 즉 배터리에 저장되는 양을 기준으로 다음 시간에서의 배터리가 어느 저장상태에 있을 것인지에 대한 확률을 구할 수 있다.

임의의 시간 t 에서의 배터리 저장수준 B_t 에 따른 다음 시간 B_{t+1} 에 있을 확률은 다음과 같다[5-7].

$$B_{t+1} = \begin{cases} B_{\min} & \text{if } B_t + S_t \leq B_{\min} \\ B_t + S_t & \text{if } B_{\min} \leq B_t + S_t < B_{\max} \\ B_{\max} & \text{if } B_{\max} \leq B_t + S_t \end{cases}$$

(a) $B_{\min} < j < B_{\max}$

$$\begin{aligned} P_B(i, j) &= \Pr [B_{t+1} = j / B_t = i] \\ &= \Pr [B_t + S_t = j / B_t = i] \\ &= \Pr [S_t = j - 1 / B_t = i] \\ &= \Pr [S_t = j - 1] = \Pi_S(j - i) \end{aligned} \quad (1)$$

(b) $j = B_{\min}$

$$\begin{aligned} P_B(i, 0) &= \Pr [B_{t+1} = 0 / B_t = i] \\ &= \Pr [B_t + S_t = 0 / B_t = i] \\ &= \Pr [S_t \leq -i / B_t = i] \\ &= \Pr [S_t \leq -i] = 1 - H_S(-i) \end{aligned} \quad (2)$$

(c) $j = B_{\max}$

$$\begin{aligned} P_B(i, B_{\max}) &= \Pr [B_{t+1} = B_{\max} / B_t = i] \\ &= \Pr [B_t + S_t \geq B_{\max} / B_t = i] \\ &= \Pr [S_t \geq B_{\max} - i / B_t = i] \\ &= \Pr [S_t \geq -i] = H_S(B_{\max} - i) \end{aligned} \quad (3)$$

$$P_B(i, j) = \begin{cases} 1 - H_S(-i) & \text{if } j = B_{\min} \\ \Pi_S(j - i) & \text{if } j = 1, 2, \dots, B_{\max} - 1 \\ H_S(B_{\max} - i) & \text{if } j = B_{\max} \end{cases}$$

여기서 i, j 는 각각 배터리의 특정 상태를 말하고 H_S 는 잉여전력에 대한 생존함수를 말하고 Π_S 는 잉여전력이 특정 상태에 있을 확률을 표현하였다. 생존함수는 축적밀도함수와 상보관계에 있고 이것은 어떤 확률이 어느 특정 시간 t 이후에 생존할 수 있는 확률을 일컫는다.

위 식(1)-(3)에서 배터리의 어느 특정 상태 i 에서 j 로 천이할 확률만 계산된다면 다음 특정 시간에 태양광 발전 시스템에서 전력을 공급할 수 있는 확률을 계산할 수 있다.

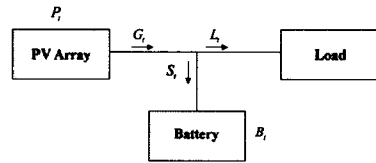


그림 4. 태양광 설비의 전력흐름

여기서 배터리의 충전상태를 구분할 시 배터리의 수명과 동작특성 및 효율 등 부과적인 특성들은 고려하지 않았다.

2.4 계통 연계형에서의 신뢰도 평가

태양광 발전 시스템의 계통 연계형에서 신뢰도는 본 논문에서 고려한 하나의 변수인 일사량에 따라 그 수명을 달리하지만 태양광 발전 시스템을 구성하고 있는 각 기기들이 갖고 있는 고장률과 수리율에 따라라도 달라진다. 본 논문에서는 태양광 발전 시스템을 구성하고 있는 인버터나 태양광 셀 그리고 배터리 등의 기기가 단순히 고장률과 수리율이 일정하다고 가정하고 그 특성은 지수분포적인 특성을 갖는다고 하자. 그림 이것은 그림 5와 같이 2-state Markov Chain 모델로 표현이 가능하다[1].

Up과 Down상태에 있을 확률은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{up} &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \\ P_{down} &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \end{aligned} \quad (4)$$

또한 배전 계통도 2-state Markov Chain 모델을 적용하여 해석할 수 있다. 그것 또한 위 식 (4)와 동일하게 표현가능하다.

태양광 발전 시스템이 계통에 연계되어 수용가에 전력

을 공급할 때 배전계통과 태양광 발전 시스템 그리고 일사량을 고려한 수용가에 전력을 공급할 수 있는 확률은 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$P_{power} = P_{dist} + (1 - P_{dist}) \cdot P_{PV} \cdot P_{irr} \quad (5)$$

여기서 P_{power} 는 배전계통이나 태양광 발전 시스템을 통해 수용가에 전력을 공급할 수 있는 확률을 나타내고, P_{dist} 는 배전계통이 Up인 상태에 있을 확률, P_{PV} 는 태양광 발전 시스템의 구성요소가 Up인 상태에 있을 확률, P_{irr} 는 일사량에 의해 출력을 제공할 수 있는 확률을 각각 나타낸다.

2.5 모의법

모의법을 구현할 때 어느 특정 날에 대해 일사량이 Weibull 분포를 따른다고 가정하고 그 확률밀도함수에서 임의의 일사량을 선택하여 위의 해석적 가정을 동일하게 적용하였다.

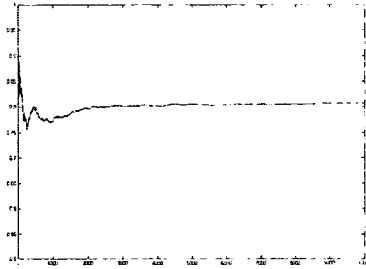


그림 5. 모의법을 이용한 신뢰도 값

모의법에서 구한 0.807과 해석적 방법을 통해 구한 신뢰도 값 0.832는 유사한 값을 갖는다고 볼 수 있다. 이 값은 식 (5)에서 보듯이 전체 신뢰도는 계통 신뢰도에 크게 영향을 받기 때문에 잦은 고장과 고장에 대한 수리 시간이 길다고 가정하여 그 값을 확인한 것이다.

2.6 사례연구

본 논문의 사례연구는 가을철에 대해 그림 6과 같은 계통에서 고려하였다. 전계통의 일반 가정용 지역은 25kV 급전선에 의해 공급된다고 하자. 절연체, 배전기, 변압기, 퓨즈 등은 100% 동작 신뢰를 보인다고 가정한다. 또한 부하지점에서 신뢰도 수준을 평가하기 위해 구간별 수리 시간은 평균 500h 그리고 절연, 스위칭 그리고 절체 활동에 있어서는 평균 6h 이라고 단순하게 가정했다. 일년에 100miles당 15번의 사고가 난다고 하자. 또한 본 논문에서는 다중 상정사고는 무시했고 B 부하점에 태양광 발전 시스템이 대단위로 구성되었다고 가정한다. 표1은 부하지점 B에서의 신뢰도 지수를 나타내었다. 계통만의 신뢰도 값을 고려하여 전체 신뢰도 값을 구하면 0.982이란 값을 얻을 수 있다. 그리고 모의법을 통해서 얻은 값은 그림 7에서 보여주고 있다.

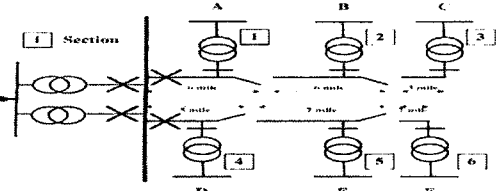


그림 6. 모의 배전 계통

표 1. 부하점 B의 신뢰도 지수

섹션	miles	λ	r
1	6	0.9	500
2	6	0.9	500
3	3	0.45	6
4	5	0.75	6
5	7	1.05	6
6	2	0.30	6
total		4.35	43.58

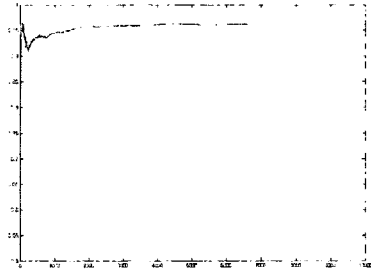


그림 7. 모의 계통에서 모의법을 이용한 신뢰도 값

3. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 계통 연계에 대한 신뢰도 평가를 위해 확률적 방법 및 모의법을 통해 그것을 검증 및 제시하였다. 위에서 보았듯이 배터리의 저장 수준에 따른 확률은 태양광 발전 시스템의 모듈에서의 출력에 부하를 고려한 나머지, 즉 잉여전력에 따라 표현하였고 기기적인 부분은 2-state Markov Chain모델을 적용하여 해석하였다.

감사의 글

본 연구는 기초전력연구원의 R 2004 B 220 사업의 연구비에 의하여 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", New York: Plenum, 1996
- [2] Wenyuan Li, "Incorporating Aging Failures in Power System Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, pp.918-923,2002
- [3] Wilhelm Durisch, Die가 Tille, A. Worz and Waltrung Plapp, "Characterisation of Photovoltaic Generator", Solar Energy, pp.273-284, 2000
- [4] 한국전력공사 전력거래처, "계약종별 산업별 부하곡선 자료집", 2000
- [5] A. G. Bakirtzis, "A Probabilistic Method for the Evaluation of the Reliability of Stand Alone Wind Energy Systems", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.17, pp.99-107,1992
- [6] M. K. C. Marwali, S. M. Shahidehpur, M. Daneshdoost, "Probabilistic Production Costing for Photovoltaics-Utility Systems with Battery Storage", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 12, pp.175-180, 1997
- [7] A. G. Bakirtzis, P. S. Dokopoulos, E. S. Gavanidou, M. A. Ketselides, "A Probabilistic Costing Method for the Evaluation of the Performance of Grid-Connected Wind Arrays," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 4, pp. 34-40, 1989