

태양광 발전이 도입된 배전계통에서 날씨효과를 고려한 신뢰도 산정

배인수 · 이일룡 · 이준경 · 심현 · 김진오
 한양대학교 전기공학과

Reliability Calculation of Distribution System including Photovoltaics Generation

In-Su Bae · Il-Ryong Lee · Jun-Kyoung Lee · Hun Shim · Jin-O Kim
 Dept. of EE, Hanyang University

Abstract - This paper describes a time-sequential simulation technique for the reliability evaluation of a distribution system including Photovoltaics(PV) Generation. A three-state model of a PV is presented, considering variable radiation and the forced outage rate. A test distribution system is utilized to illustrate the proposed model. The effects on the distribution system reliability of the PV parameters are examined and illustrated.

지는 변수이기에 본 논문에서는 일사량에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

우선 실제 태양광 발전의 발전효율과 일사량의 관계를 살펴보면 그림 1과 같다.

1. 서 론

소규모 전력원의 기술이 발전함에 따라 다양한 분산전원이 배전계통에 연계되고 있고 이에 따라 각 수용가의 입장에서 바라보는 배전계통 신뢰도 지수의 중요성이 대두되고 있는 실정이다. 송전계통에 연계된 기존의 발전기와는 달리 배전계통에 연계된 발전기는 역조류 특성을 가지고 배전계통의 상황에 따라 운전여부를 결정하는 등 해석하는데 있어서 복잡성을 지니고 있다. 특히 기존의 디젤 분산전원과 같이 일정한 최대 출력을 보장하지 못하고, 태양광 발전은 일사량, 주위 온도 등 기상환경에 따라 출력이 틀려지는 특성을 지닌다.

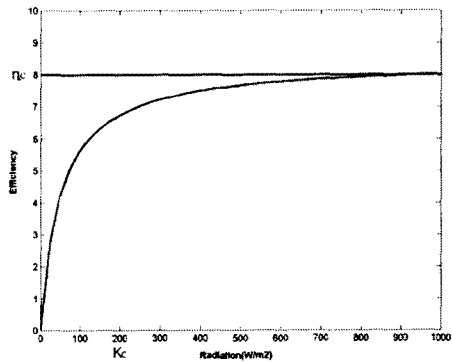


그림 1. 일사량에 따른 태양광 발전 효율

신뢰도를 구하는 과정에서 날씨효과를 고려하면 정상 날씨에 비해 기상 악화 상황에서 주로 많은 사고들이 발생함을 알 수 있다. 기상악화 상황에서 태양광 발전은 고장율이 증가함은 물론 운전상황에서도 그 출력량은 급속히 감소하기 때문에 디젤 분산전원이나 송전계통의 대규모 발전기와는 다른 방식의 접근이 필요하다.

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 일사량(K_C)을 지나면 효율의 증가가 둔화되는 포화특성을 보인다. 효율을 근사화할 경우, 일사량 0에서 K_C 까지

따라서 본 논문에서는 날씨효과를 고려한 배전계통의 신뢰도 계산에서 태양광 발전의 모델링 기법을 제안하고, 제안된 기법을 통해 태양광 발전이 배전계통의 신뢰도에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

범위에서는 $\frac{\eta_C}{K_C}$ 의 기울기를 가지는 일차함수로 표현할 수 있고, 일사량이 K_C 이상일 경우에는 상수 η_C 로 표현할 수 있다.

2. 본 론

2.1 태양광 발전의 출력특성

정격 출력 내에서 원하는 전력을 제공할 수 있는 연료형 발전기와 비교하면, 태양광 발전은 설치비용이 비싸고 운전비용은 저렴한 특성으로 인해 정격 출력 내에서 최대의 출력을 얻는 것이 이득이지만 주위 상황에 따라 출력 전력이 제한되는 특징을 보인다.

태양광 발전의 출력 전력(P_{PV})은 해당 시간(τ)에서의 일사량 (G_t)에 비례하기 때문에 앞에서 근사화한 효율과 함께 표현하면 해당 시간에서의 일사량에 대한 출력전력을 구할 수 있다.

태양광 발전의 출력 전력을 결정짓는 주요 변수로는 태양전지 어레이(Array)의 설치 경사각, 방위각, 경도, 위도, 주위온도, 일사량, 시스템 효율 등을 들 수 있다. 이런 여러 가지 변수 중에서 태양광 발전을 설치할 때 결정되는 변수들은 계통에 연계되어서 실제 운영단계에 돌입한 후에는 상수로서 고정되는 값으로서, 이동식 어레이 등 특별한 경우 외에는 더 이상 변수로써 취급하지 않기에 본 논문에서는 언급하지 않는다. 따라서 태양광 발전의 출력을 결정짓는 변수로는 일사량과 주위온도를 들 수 있고 그 중 일사량이 온도에 비해 우선순위를 가

$$P_{PV}(\tau) = \frac{\eta_C}{K_C} (G_t)^2 \quad 0 < G_t < K_C \quad (1)$$

$$P_{PV}(\tau) = \eta_C G_t \quad G_t > K_C \quad (2)$$

결국 일사량 K_C 이하의 날씨상황에서는 일사량의 제곱에 비례하여 태양광 발전의 정격출력이 결정되고 K_C 이상인 일사량을 가지는 날씨에서는 일사량에 비례하는 정격출력을 가진다.

2.2 날씨효과

강풍과 폭우, 뇌우 등을 동반하는 태풍이나 장마철 등 기상악화 상황(Adverse Weather)에서는 실내형 요소에 비해 외부에 노출되어 있는 계통 요소들의 고장율이 급속히 증가하게 되는데 도식적으로 표현하면 그림 2와 같다.

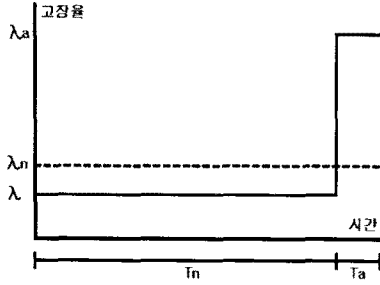


그림 2. 날씨효과를 고려한 고장율

날씨효과를 고려하면 기상악화 상황에서의 고장율이 증가하는 대신 정상날씨(Normal Weather)에서의 고장율은 감소하게 되는데, 이런 증감을 통해 날씨효과를 고려하기 전의 평균 고장율과 동일한 고장율 값을 가지게 된다. 일년 중 기상악화 시간은 총 정상날씨 시간에 비해 아주 짧은 편이기 때문에 평균 고장율과 정상날씨에서의 고장율은 거의 같은 값을 가진다. 그렇지만, 기상악화 상황에서의 고장율은 평균고장율에 비해 몇 십배를 상회하여 증가하며, 이로 인해 일년의 기간 중 기상악화 상황은 짧은 시간이지만 그 시간대의 고장 사고는 무시할 수 없는 수준의 비중을 차지한다[1].

한 예로, 일년 8760시간 중 기상악화 시간이 87.6시간 ($T_a : T_n = 1 : 99$)이라 가정하고 그때의 고장율이 10배라고 한다면, $\lambda = 0.1$ 인 선로($\lambda_n = 0.0909$, $\lambda_a = 1$)를 예로 들면 사고의 약 10%가 기상악화 상황에서 발생하게 된다. 계통요소 하나에 대해 이런 수치를 나타내지만, 실제로는 87.6시간이라는 집중적인 시간 동안 외부에 노출되어 있는 선로나 변압기 등의 사고가 빈번하게 발생하므로 다중사고의 경우에는 그 빈도수가 훨씬 높은 수치를 나타낸다. 전력계통의 특성상 다중사고로 인한 계통의 공급지장은 단일사고에 비해 그 사고여파가 큰 것이 사실이고 결국 수용가 입장에서는 정전사고 중 많은 부분은 기상악화 상황에서 겪게 된다.

배전계통에 태양광 발전시스템이 연계되어 있을 경우 기상악화 상황에서의 그 동작에 주목해야 한다. 기상악화 상황에서의 일사량은 정상날씨에서의 일사량에 비해 부족하며, 사고구간에 대한 예비전원으로서의 역할을 담당해야 하는 기상악화 상황에서 태양광 발전은 여타 다른 종류의 발전기에 비해 필요한 전력을 제공할 수 없는 상태에 빠지게 된다.

2.3 태양광 발전 모델링

태양광 발전이 전력을 공급하지 못하는 경우는 태양광 발전시스템 자체의 고장으로 인해 운전이 정지된 상태와 일사량이 0인 경우로 나눌 수 있다. 따라서 식 (1), (2)의 경우와 태양광 발전의 출력이 0인 경우 총 세 가지 경우로 상태를 분류하여 표현할 수 있는데 각 상태 간 관계와 이동경로를 표현하면 그림 3과 같은 3-State 모델로 나타낼 수 있다.

화살표는 각 상태간의 이동을 나타내고 λ 는 태양광 발전의 고장율(Failure Rate), μ 는 수리율(Repair Rate)

을 나타낸다. 결국, State 1은 일사량의 제곱에 비례하여 출력이 결정되고, State 2는 일사량에 일차적으로 비례하며, State 3은 출력이 0인 상태를 말한다. State 1이나 State 2인 상태에서 태양광 발전시스템의 고장이 발생하면 State 3의 상태로 가고, 고장이 수리된 후에는 일사량에 따라 State 1이나 State 2로 복귀하게 된다. 일사량이 0인 경우에는 고장으로 인한 운전정지는 아니지만 고장과 마찬가지로 전력을 공급하지 못하는 상황이므로 일사량의 감소에 따라 State 1 -> State 2 -> State 3의 순서로 상태를 천이하게 되고, 익일 아침 일사량이 다시 증가하면 반대의 순서로 상태를 옮기게 된다.

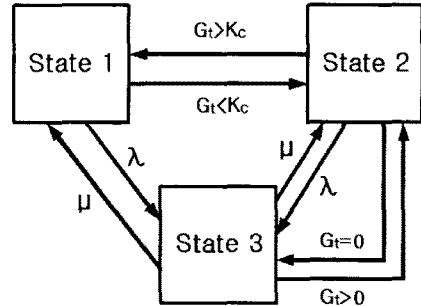


그림 3. 태양광 발전의 3-State 모델

2.4 사례연구

그림 4는 사례연구를 위한 간단한 배전계통의 구성도로서 4개의 부하점에 총 600가구의 수용가가 있는 배전계통을 나타낸다. Load 2와 Load 4 사이에 태양광 발전이 연계되어 있으면 양방향 선로를 따라 정력 출력 내에서 Load 2나 Load 4 혹은 두 Load 전부에서 전력을 공급하게 된다.

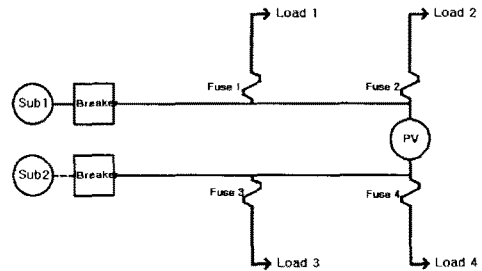


그림 4. 모델계통도

각 구성요소에 대한 고장율, 수리시간, 스위칭 시간 등 신뢰도 관련 수치는 RBTS[2]의 데이터를 적용하였으며, 부하곡선은 8760시간에 대한 IEEE-RTS[3] 부하모델을 이용하였다. 부하점 4곳의 최대 총 부하량은 20MW이고 태양광 발전의 정격출력은 10MW이며 Breaker와 Fuse의 동작은 100% 신뢰성을 가정하였다.

날씨효과를 고려하기 전(Case 1)과 날씨효과를 고려한 후(Case 2) 두 가지 경우에 대해 배전계통 신뢰도 지수 수용가당 평균 정전빈도(SAIFI)와 수용가당 평균 정전시간(SAIDI)를 구하는데, 이에 이용한 방법은 Monte-Carlo 시뮬레이션 기법이다. 고장발생 시간과 그때의 날씨상황 및 일사량, 부하량 등 비교조건들이 많은 관계로 순차적(Time-Sequential) 기법을 이용하였으며 이를 위해 가정하여 사용한 수치는 다음과 같다.

$$K_C = 200M/W^2$$

$$\eta_C = 0.02$$

$$\lambda_a = 10 \times \lambda$$

$$T_a : T_n = 1 : 99$$

기상악화 상황에서의 일사량은 정상날씨 일사량의 10%를 가정하였으며 기상악화 상황은 일년 중 4번 발생하는 것으로 가정하였다.

계통에서 사고가 발생시 태양광 발전은 일사량에 따른 발전가능한 최대 출력 내에서 인접한 부하점 순으로 전력을 공급하며 사고발생 지점과 그에 다른 Fuse 동작 상황에 따라 예비전력 투입 순서는 바뀌게 된다. 가령 Load 2 선로에서 사고가 발생할 경우, Fuse 2의 동작으로 인해 Load 2는 계통에서 분리되고 그 후 태양광 발전의 전력은 Load 4 -> Load 3 -> Load 1의 순서로 전력을 공급한다. 그렇지만 해당 시간대의 일사량과 부하량에 따라 공급가능 범위가 결정되며 태양광 발전시스템의 용량이 계통 전체 피크부하의 50% 수준이므로 모든 부하점에 대해 사고시 전력을 공급하지는 못한다.

각 Case 별 SAIFI와 SAIDI는 표 1과 같고, SAIDI가 수렴하는 그래프를 그림 5, 6에 나타내었다.

표 1. 두 가지 Case에 대한 신뢰도 지수

	SAIFI (회/수용가·년)	SAIDI (분/수용가·년)
Case 1	0.154981	51.9873
Case 2	0.169450	89.1293

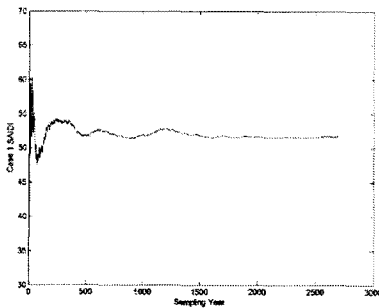


그림 5. Case 1의 SAIDI 수렴곡선

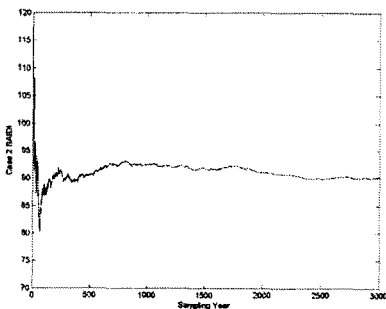


그림 6. Case 2의 SAIDI 수렴곡선

결과를 보면 날씨효과를 고려한 경우 계통의 신뢰도가 좀 더 악화되는 모양을 나타내는데 이는 계통에 대한 정

밀한 해석의 결과이며 날씨효과를 고려하지 않았을 경우 보다 계통의 실제특성을 반영했다고 할 수 있다. 이는 태양광 발전시스템이 없는 일반 배전계통에 대해서도 유사한 결과를 나타내며 날씨효과를 고려하는 것 자체만으로도 산출한 신뢰도 지수의 신뢰성을 좀더 높일 수 있다.

SAIFI의 경우 SAIDI에 비해 그 변화가 상대적으로 작게 나타난다. 날씨효과를 고려하는 것과는 관계없이 단일사고의 평균 횟수는 동일하게 나타나는 반면 다중사고 횟수는 날씨효과를 고려할 경우 기상악화 상황에서 급속히 증가하기 때문에 SAIFI가 증가하게 된다. 그렇지만 큰 규모의 계통에서 많은 구성요소를 고려한 경우에 비해 모의계통의 규모가 작고 스위칭 소자의 경우 100%의 신뢰성을 가정하였기 때문에 다중사고 발생률이 많이 증가하지 않아서 생긴 결과이다.

SAIDI의 경우에는 SAIFI에 비해 증가폭이 크게 나타나는데 이는 태양광 발전시스템의 영향이라 할 수 있다. 사고가 발생하고 사고 요소가 분리된 후 태양광 발전이 예비 전력을 공급할 수 있는 부하점에 공급하게 되는데, 기상악화 상황에서의 사고보다 낮아지기 때문에 사고 수용가에 대한 전력공급이 원활하게 이루어지지 못한다. 이는 날씨효과를 고려하지 않는 Case 1에서는 발생하지 않는 문제점으로, 날씨효과로 인한 태양광 발전의 신뢰도 영향을 잘 표현할 수 있는 지수는 정전횟수가 아니라 정전시간임을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전시스템의 출력특성과 외부 조건과의 관계, 특히 그 중 일사량과의 관계를 살펴보고, 날씨효과가 계통 구성요소 신뢰도 측면에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 배전계통의 신뢰도를 산정하는데 이용할 수 있는 태양광 발전시스템 3-State 모델을 제시하였으며 이를 통해 태양광 발전이 연계된 배전계통의 신뢰도를 순차적 Monte-Carlo 시뮬레이션 기법을 통해 산출하여 비교하였다. 날씨효과 도입 유무에 따른 결과를 통해, 태양광 발전의 신뢰도를 산정하는데 있어 날씨효과를 도입해야 그 영향을 제대로 판단할 수 있으며 날씨효과와 기상조건을 무시한 신뢰도 산정은 실제보다 더 좋은 신뢰도 결과가 도출될 수 있다는 문제점을 보여준다.

본 논문은 연구의 시작 단계로서 외부조건이나 좀더 규모 있는 모델계통, 해석적 기법 도입, 실제와 유사한 데이터 등 연구가 진행되어야 할 부분이 아직 많이 남아 있는데, 차후 연구를 통해 계속 진행해 나갈 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Math H. J. Bollen, "Effects of Adverse Weather and Aging on Power System Reliability", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.37, No.2, March/April 2001
- [2] R.N.Allan, R.Billinton, I.Sjarief, L.Goel, K.S.So, "A Reliability Test System for Educational Purposes", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.2, May 1991
- [3] R.Billinton, R.N.Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd Edition, Plenum Press, 1996