

太陽光發電源을 고려한 電力系統의 確率論的인 信賴度 評價에 관한 研究

논 문
58-3-9

A Study on Probabilistic Reliability Evaluation of Power System Considering Solar Cell Generators

박 정 제* · 오 량** · 최 재 석† · 차 준 민***
(Jeongje Park · Wu Liang · Jaeseok Choi · Junmin Cha)

Abstract - This paper proposes a new methodology on reliability evaluation of a power system including solar cell generators(SCG). The SCGs using renewable energy resource such as solar radiation(SR) should be modeled as multi-state operational model because the uncertainty of the resource supply may occur an effect as same as the forced outage of generator in viewpoint of adequacy reliability of system. While a two-state model is well suited for modeling conventional generators, a multi-state model is needed to model the SCGs due to the random variation of solar radiation. This makes the method of calculating reliability evaluation indices of the SCG different from the conventional generator. After identifying the typical pattern of the SR probability distribution function(pdf) from SR actual data, this paper describes modelling, methodology and details process for reliability evaluation of the solar cell generators integrated with power system. Two test results indicate the viability of the proposed method.

Key Words : Solar/Photovoltaic cell generator, Solar radiation, Probabilistic reliability evaluation, Multi-state model, Renewable energy

1. 서 론

근래 태양광발전원은 풍력발전원 다음으로 가장 급성장하고 있는 신재생에너지원을 이용한 발전원이다[1]. 더구나 최근에 출력이 MW급인 태양광발전원이 계통에 접속되어 운전될 전망이다[2],[3]. 일반적으로 태양광발전원과 같은 신재생에너지원을 이용한 발전원의 운전특징은,

- 1) 그 자원의 공급이 지형학적인 위치에 종속되므로 분산형 전원 형태로 계통에 투입된다는 점과,
- 2) 특히 그 에너지자원의 공급 및 이에 따른 출력제어가 기존의 원자력, 석탄 가스에너지원을 이용한 발전원과 비교할 때 불가능하거나 상대적으로 매우 어렵다는 점,
- 3) 에너지원의 불시공급중단은 갑작스런 전력공급중단을 가져오므로 전력공급 신뢰도측면에서는 발전기의 불시고장(Forced outage)과 동일한 결과를 발생시킨다는 점 등이다[4-8].

그러므로 그 특성상 기존의 원자력, 석탄화력, LNG화력등과는 달리 그 자원에 종속되어 분산형 전원의 형태를 나타내며 기존의 발전기의 운전모형을 2개의 운전상태로 나타낼

수 있는 것과는 달리 이들은 에너지원의 공급불확실성에 따른 다개상태(multi-state)의 운전특성을 가지게 되며 계통연계도 부하와 근접거리에 존재하여 배전계통의 신뢰도평가기술과 그 관계성이 매우 깊어 신뢰도측면에서 이들의 평가방법은 필연적으로 매우 복잡한 형태를 갖는다. 따라서 신재생에너지발전원의 확률론적인 신뢰도평가 기술은 기존의 신뢰도 평가 방법에 비하여 상대적으로 어렵고 발전계통이나 송전계통처럼 일률(Routine)적인 진단엘고리즘도 개발되어 있지 않은 실정이라서 선진국에서도 신재생에너지발전원의 신뢰도평가 기술은 아직 개발단계에 있다. 특히, 국내에서는 태양광발전원이나 풍력발전원처럼 자원의 공급불확실성이 매우 강한 신재생발전원을 고려한 확률론적인 신뢰도 평가 기술 연구는 거의 전무하다[4],[5].

본 연구에서는 신재생에너지를 이용한 전원들 중 최근 급격히 증가하고 있는 태양광에너지를 이용한 태양광발전원(SCG: Solar Cell Generator)의 계통투입에 따른 확률론적인 공급적정도 측면에서의 신뢰도 평가를 실시할 수 있는 기초 기술을 개발한다. 이를 위하여 기존의 전원과는 달리 에너지원의 공급의 불확실성이 매우 큰 태양광발전원의 운전모형을 다개상태 운전모형으로 모델링한다. 이의 다개상태의 상태확률과 각 상태의 공급가능용량(AP: Available Power)을 구하기 위하여 태양광모형과 태양광전원의 출력모형을 결합하는 방법을 제안하며 이를 바탕으로 확률론적인 신뢰도 평가 엘고리즘을 개발한다. 끝으로 간단한 모델계통을 통하여 제안하는 방법의 절차를 상세히 기술하고 나아가 우리나라 제주도계통크기의 모델계통에 적용하여 그 활용성을 살펴보았다.

* 정 회 원 : 경상대학교 공대 전기공학과 박사과정
경상대 공학연구원 연구원

** 준 회 원 : 경상대학교 공대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 경상대 전기공학과 정교수 · 공박
경상대 공학연구원 연구원

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

*** 정 회 원 : 대전대 공대 전기정보시스템공학과 정교수 · 공박

접수일자 : 2008년 12월 22일

최종완료 : 2009년 1월 30일

2. 태양광발전원의 출력모형

태양광발전원은 반도체의 성질을 이용하여 태양광을 직접 직류전기에너지로 변화하는 태양전지(Solar Cell)와 태양전지로부터의 직류전력을 교류전력으로 변환하는 전력변환 제어기술의 조합이라고 정의 할 수 있다. 그림 1은 태양전지의 실제 등가회로를 보인 것이다. 여기서, I_{ph} 는 광전류[A], I_D 는 다이오드 전류[A], V_D 는 접합전압, I_{sh} 는 누설전류, R_{sh} 는 병렬저항, R_s 는 직렬저항, I 는 태양전지의 출력전류, V 는 출력전압을 뜻한다. 이 등가회로를 통해 출력전류는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (1)에서 식 (2)와 같이 다이오드 전류(I_D)는 일반 다이오드 전류식을, 누설전류(I_{sh})에는 접합전압(V_D)과 병렬저항(R_{sh})으로 표현하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 최대출력전압은 개회로일때의 전압이므로 $I=0$ 이고 아주 작은 값인 누설전류(I_{sh})를 무시하였을 때 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 식(3)과 (4)로부터 출력전력($P=VI$)을 구할 수 있다[2].

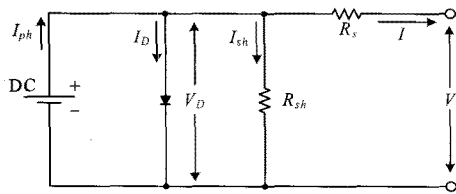


그림 1 태양전지의 실제 등가회로
Fig. 1 Practical equivalent circuit of solar cells

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_D = I_o \left\{ e^{\frac{qV_D}{Ak_B T}} - 1 \right\}, \quad I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$I = I_{ph} - I_o \left\{ e^{\frac{qV_D}{Ak_B T}} - 1 \right\} - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$V = V_D = \frac{AK_B T}{q} \log_n \left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (4)$$

여기서,

I_o : 다이오드의 포화전류 [A]

q : 전하량 [C]

A : 다이오드 계수

K_B : 볼츠만 상수

T : 온도 [K]

또한, 태양광발전원의 에너지변환 효율은 일반적으로 태양광량과 태양광발전원의 출력의 비를 말한다. 그림 2는 태양광발전원의 출력에 영향력이 큰 태양광량과 온도의 변화에 따라 태양광발전원의 효율의 변화를 보여준다[9]. 그림 2에서 알 수 있듯이 태양광발전원의 효율은 온도에 의해서 보다 태양광량에 의해 그 변화가 크게 나타나므로 온도의 변화는 없는 것으로 가정하기로 한다. 태양광량이 0에서 어느 특정 지점(R_c)에 이르기까지 효율은 큰 폭으로 상승하다가 이후에는 그 상승의 폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.

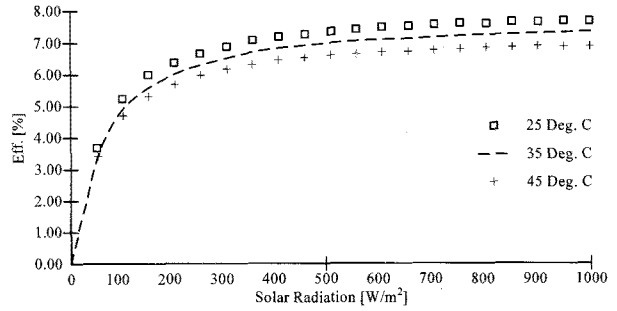


그림 2 태양광량의 변화에 따른 태양광발전원의 효율특성곡선
Fig. 2 The characteristic curve of PV efficiency varying solar radiation

그림 3과 식 (5)는 이를 근사화한 것이다. 일반적으로 태양광발전원의 효율은 태양광발전원의 출력/태양에너지(태양광량)로 나타낼 수 있다. 그러므로 태양광발전원의 출력은 태양광량과 효율의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉, 효율을 나타내는 근사식 (5)에서 식(6)과 같이 태양광발전원의 출력식을 구할 수 있으며[9],[12], 출력특성곡선은 그림 4와 같이 표현될 수 있다.

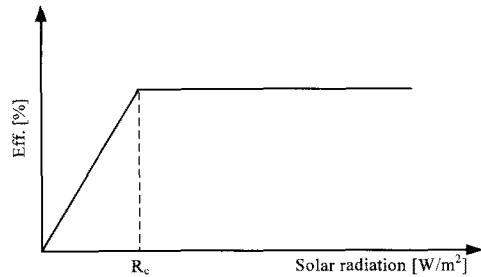


그림 3 태양광량의 변화에 따른 근사화된 태양광발전원의 효율특성곡선

Fig. 3 The approximation of the characteristic curve of PV efficiency varying solar radiation

$$Eff_{pv}(G_{bi}) = \frac{\eta_c}{R_c} G_{bi}, \quad 0 \leq G_{bi} < R_c$$

$$= \eta_c, \quad R_c \leq G_{bi} \quad (5)$$

$$P_{bi}(G_{bi}) = \frac{\eta_c}{R_c} (G_{bi}^2), \quad 0 \leq G_{bi} < R_c$$

$$= \eta_c G_{bi}, \quad R_c < G_{bi} \leq G_{std}$$

$$= P_{sn}, \quad G_{bi} > G_{std} \quad (6)$$

여기서,

i : 태양광밴드의 번호(=1,2,...,N_b)

N_b: 밴드의 총수

P_{bi} : #i 밴드의 태양광발전원(SCG)의 출력 [MW]

η_c : 태양광의 효율 (P_{sn}/G_{std})

G_{bi} : #i 밴드의 태양광량 [W/m^2]

G_{std} : 표준환경하에서의 태양광량 (통상 1,000[W/m^2])

R_c : 출력특성곡선의 변곡점 (통상 150[W/m^2])

P_{sn} : SCG의 정격출력 [MW]

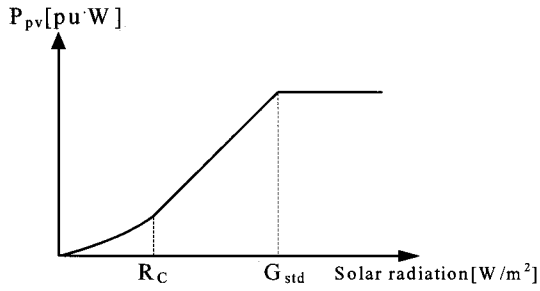


그림 4 태양광발전원의 출력특성곡선
Fig. 4 The solar radiation-power curve of SCG

3. 태양광 확률분포모형

일반적으로 태양광은 공간과 시간에 따라 크게 변화한다. 특히 신뢰도평가를 위해서는 임의의 지점에서의 광량의 시간연대기적인(chronological)인 분포자료가 필요하다. 아직까지 이를 위한 태양광의 확률분포함수에 대한 연구는 미미하며 다양한 편이 아니다[4-9]. 그림 5-8은 우리나라의 제주도에서의 사계절에 대한 태양광의 실제적인 확률분포함수(pdf)를 보인 것이다.

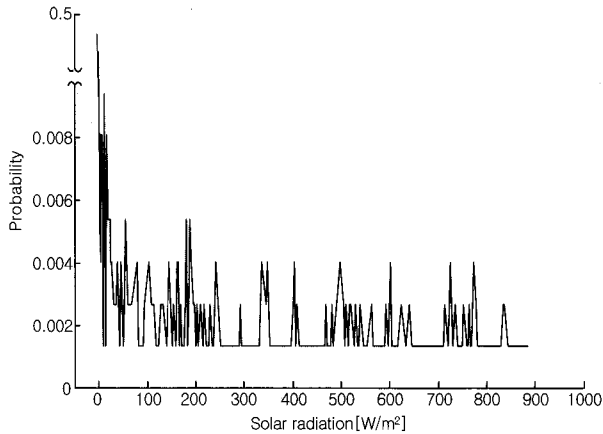


그림 5 2007년도 3월의 제주도에서의 태양광확률분포
Fig. 5 The solar radiation pdf at Jeju Island in March, 2007

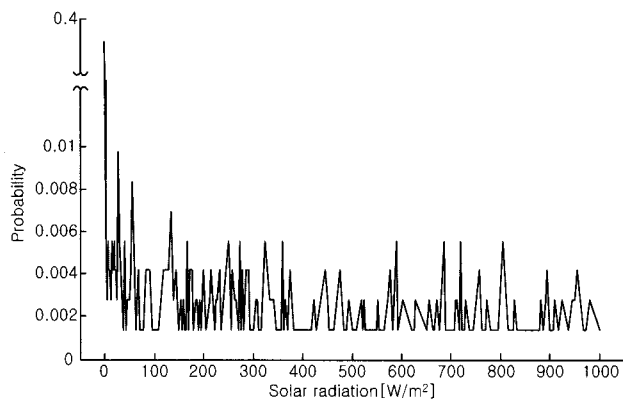


그림 6 2007년도 6월의 제주도에서의 태양광확률분포
Fig. 6 The solar radiation pdf at Jeju Island in June, 2007

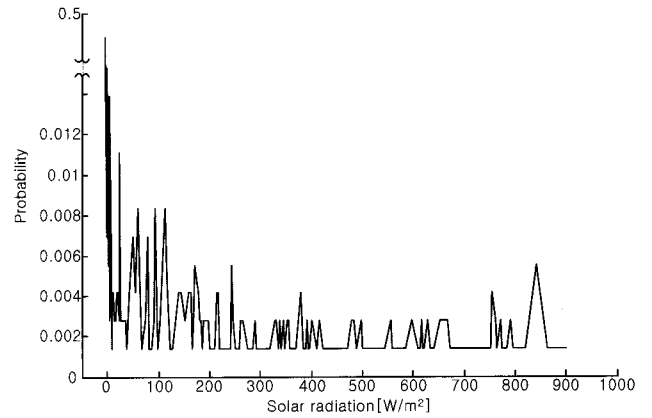


그림 7 2007년도 9월의 제주도에서의 태양광확률분포
Fig. 7 The solar radiation pdf at Jeju Island in September, 2007

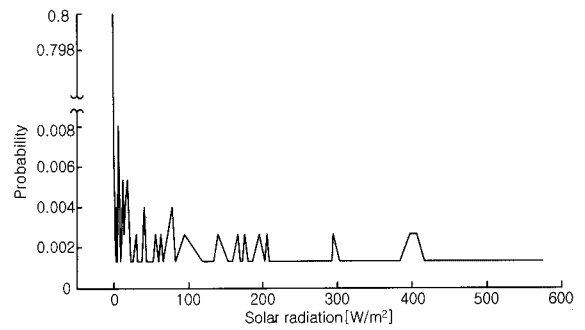


그림 8 2007년도 12월의 제주도에서의 태양광확률분포
Fig. 8 The solar radiation pdf at Jeju Island in December, 2007

본 그림에서 보다시피 태양광의 확률분포는 정규확률분포함수(normal pdf)보다 이항확률분포함수(binomial pdf) 내지 지수확률분포함수(exponential pdf)에 더욱 근접하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 태양광은 밤에는 방사되지 않으므로 광량이 "0"인 확률이 거의 1/2을 차지하며 나머지 확률은 낮에 분포되기 때문이다. 그러므로 태양광의 확률분포함수의 전형적인 패턴을 그림 9처럼 나타낼 수 있다. 그러나 여기서는 본 연구의 궁극적인 목표가 신뢰도 평가기술개발이므로 편의상 과거의 10년간의 태양광분포를 가공하여 그 데이터를 직접 입력자료로 이용하기로 하며 이의 분포함수를 만들어 적용하지는 않기로 한다.

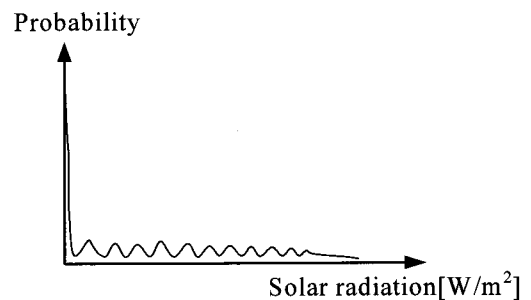


그림 9 태양광확률분포함수의 전형적인 패턴
Fig. 9 The typical pattern of the solar radiation pdf model

4. 태양광발전원을 고려한 전력계통의 신뢰도 평가

4.1 태양광발전원의 다개상태 운전공간모형

전력계통의 신뢰도평가에서 불확실성은 고장에 의한 불확실성(aleatory uncertainty)과 정보의 불확실성(epistemic uncertainty)등 크게 두 가지로 나누어 질수 있다[10]. 발전기의 고장에 의한 불확실성은 전자에, 부하 및 에너지자원의 공급의 불확실성등은 후자에 속한다. 그러므로 후자는 정보가 정확할수록 불확실성의 정도가 줄어든다[10]. 그림 10은 기존의 원자력, 석탄 및 LNG등과 같은 발전원과 신재생에너지원을 이용한 발전원들 중에서 풍력 및 태양광발전원과 같은 자원공급의 불확실성이 매우 큰 발전원의 불확실성의 차이점을 그림으로 보인 것이다.

기존의 발전기는 통상적으로 정상운전과 운전 중 고장이라는 2개상태 공간모형으로 모델이 가능하지만 태양광발전원은 공급 에너지원인 태양광의 크기가 시공간적으로 매우 크게 변화하므로 그 자체의 고장에 의한 것보다 에너지원의 공급에 의한 운전의 불확실성이 상대적으로 더욱 크다. 그러므로 태양광발전원의 상태공간모형에서는 풍력발전원등과 동일하게 에너지원의 공급에 의한 운전상태의 불확실성에 근거한 다개상태로 모형화하여야 한다[4-10].

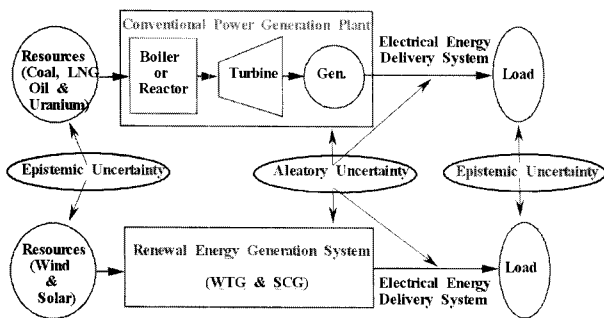


그림 10 기존 발전원과 신재생에너지발전원의 불확실성
 Fig. 10 Uncertainties of the renewable energy resource power and conventional plants

실제로 다개상태의 공간모형은 기존의 발전기의 운전모형을 보다 자세히 표현하고자 할 경우에도 많이 사용하고 있다. 그러나 태양광은 그 특성상 중간상태(derated state)를 거쳐서 또 다른 중간상태로 진행되는 연속성을 갖는다는 점이 기존의 일반적인 다개상태 공간모형과 다르다. 그러므로 이러한 연속적인 태양광에너지원을 공급받아 발전하는 태양광발전원은 연속적인 다개상태 공간모형으로 모델링이 되어야 한다[10].

본 논문에서는 태양광발전원이 고려된 계통의 신뢰도 지수를 얻기 위하여 다음의 절차를 제안한다.

- 단계 1. 태양광에너지원의 공급 불확실성을 고려한 태양광 분포모델을 구한다.
- 단계 2. 태양광발전원의 출력특성모델을 결합하여 얻어진 다개상태로된 태양광발전원의 가용용량확률분포함수를

를 구한다.

단계 3. 가용용량확률분포함수로부터 사고용량확률분포함수를 구한 후 이를 주어진 부하지속곡선과 상승적분하여 유효부하지속곡선을 구한다.

단계 4. 신뢰도지수를 산정한다.

그림 11은 태양광확률분포함수와 태양광발전원의 출력특성곡선을 결합하여 태양광발전원의 다개상태로된 가용용량확률분포함수(Available capacity probability distribution function)를 얻는 모습을 보인 것이다. 여기서, (P_i, PB_i) 는 i 번째 태양광패널의 광량이 SR_{br} 일 때의 태양광발전원의 출력 및 광량을 의미한다. 이로부터 태양광발전원의 사고용량확률분포함수를 얻을 수 있으며 이를 이용하여 후술하는 바와 같이 기존의 신뢰도평가방법을 그대로 이용하여 태양광발전원을 고려한 전력계통의 신뢰도평가를 실시할 수 있다.

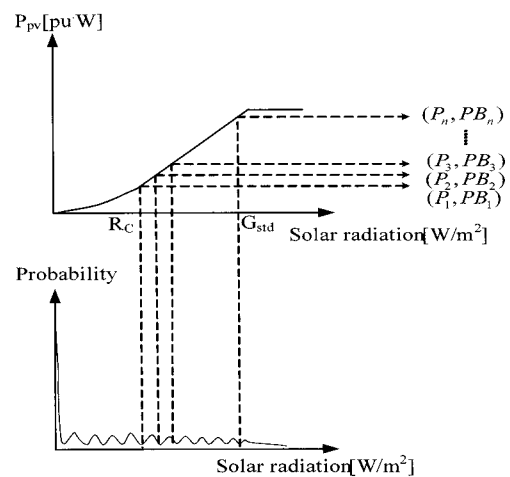


그림 11 태양광발전원의 가용용량확률분포함수를 얻기 위한 태양광분포모형과 출력특성곡선과의 결합모습
 Fig. 11 The combination of solar radiation model and SCG power output model to obtain the available capacity pdf of SCG

한편, 태양광모형과 태양광발전원의 발전출력특성곡선을 결합하여 얻어진 가용용량확률분포함수는 소수점이하의 용량을 갖는 상태가 얻어지는 등 일관성이 없다. 더구나 과도한 상개공간의 수는 정확도면에서 더 이상 효과를 가지고 오지 못하면서 오히려 계산시간만 소요될 뿐이다. 그러므로 본 논문에서는 실용상 효과적이라고 판단되는 미리 지정된 상태공간모형으로 등가화하기로 하며 그 상태확률값을 얻기 위하여 식 (7) 및 식(8)과 같은 널리 알려진 선형분할방법(linear rounding)을 사용하기로 한다. 그림 12는 이를 보인 것이다. 여기서는 이렇게 미리 지정된 다개상태공간으로 선형분할한 수정모형을 간략상태공간모형이라고 부르기로 한다. 본 논문에서는 이를 이용함으로써 보다 효율적인 상태공간모형을 이용하는 방법을 취하였다.

$$PB_k = \left(\frac{P_{k+1} - P_i}{\Delta P} \right) \times PB_i \tag{7}$$

$$PB_{k+1} = \left(\frac{P_i - P_k}{\Delta P} \right) \times PB_i \quad (8)$$

여기서,

$$\Delta P = P_{k+1} - P_k [\text{MW}]$$

i : 원래의 다개상태모형의 상태번호

k : 선형분할한 간략화한 다개상태모형의 상태번호

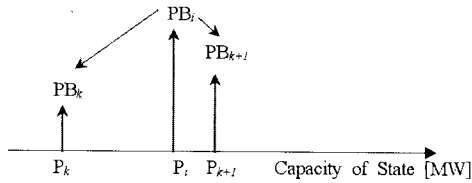


그림 12 태양광발전원의 가용용량확률분포함수의 선형분할 방법

Fig. 12 Rounding method of the available capacity pdf of SCG

그러므로 $\#i$ 태양광발전원의 사고용량확률분포함수는 식 (9)처럼 정식화된다.

$$f_{oi} = f(P_{oi}, PB_{oi}) \quad (9)$$

여기서,

f_{oi} : $\#i$ 태양광발전원의 사고용량확률분포함수

P_{oi} : $\#i$ 태양광발전원의 사고용량변수(= $P_{sni} - P_{ik}$) [MW]

P_{sni} : $\#i$ 태양광발전원의 정격용량 [MW]

PB_{oi} : $\#i$ 태양광발전원의 사고용량확률변수(= PB_i)

4.2 신뢰도평가

한편, 확률론적 신뢰도 평가를 위한 기법은 몬테카를로 모의(Monte Carlo simulation)방법과 해석적상태누적 (Analytical state enumeration)방법 등 크게 두 가지로 나눈다. 본 연구에서는 상대적으로 계산과정의 절차를 직접 수작업으로 수행한 것과 쉽게 파악하며 작성한 프로그램의 결과의 신빙성을 보다 용이하게 검증할 수 있는 후자의 방법을 토대로 한 유효부하지속곡선을 이용한 방법을 사용하기로 한다[6]. 상승적분식을 이용하여 다개상태를 갖는 $\#i$ 태양광발전원의 사고용량확률분포함수를 고려한 새로운 유효부하지속곡선인 Φ_i (ELDC:Effective Load Duration Curve)를 구하는 점화식은 식 (10)과 같다[8-10].

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \Phi_{i-1} \otimes f_{oi} \\ &= \left(1 - \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \right) \Phi_{i-1}(x) + \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \Phi_{i-1}(x - C_{ij}) \end{aligned} \quad (10)$$

단,

\otimes : 상승적분을 의미하는 연산자

Φ_0 : 원래의 부하지속곡선(LDC)

Φ_{i-1} : $\#1$ 에서 $\#i-1$ 발전기까지 고려한 유효부하지속곡선

f_{oi} : $\#i$ 태양광발전원의 사고용량확률분포함수

NS_i : $\#i$ 태양광발전원의 상태의 수

C_{ij} : $\#i$ 태양광발전원의 $\#j$ 상태의 사고용량[MW]

q_{ij} : $\#i$ 태양광발전원의 $\#j$ 상태의 사고확률(= PB_{oi})

그러므로 우선순위에 의해 첫 번째 발전기부터 $\#NG$ 발전기까지 상승적분하여 얻어진 유효부하확률분포함수 $\Phi_{NG}(x)$ 를 이용하여 신뢰도지수인 공급지장시간기대치(LOLE: Loss of Load Expectation) 및 공급지장에너지기대치(EENS: Expected Energy Not Served) 그리고 상대적 신뢰도지수인 EIR(Energy Index of Reliability)를 각각 식 (11), 식 (12) 및 식 (13)처럼 구할 수 있다.

$$\text{LOLE} = \Phi_{NG}(x) |_{x=IC} \quad [\text{hours/year}] \quad (11)$$

$$\text{EENS} = \int_{IC}^{IC+L_p} \Phi_{NG}(x) dx \quad [\text{MWh/year}] \quad (12)$$

$$\text{EIR} = 1 - \text{EENS}/\text{ED} \quad [\text{pu}] \quad (13)$$

여기서,

L_p : 최대부하[MW]

IC : 총설비용량 (= $\sum C_i$) [MW]

C_i : $\#i$ 발전기의 용량[MW]

ED : 총부하에너지[MWh]

그림 13은 본 연구에서 제안하는 다개상태를 갖는 태양광발전기를 고려한 신뢰도평가 방법의 흐름도를 보인 것이다.

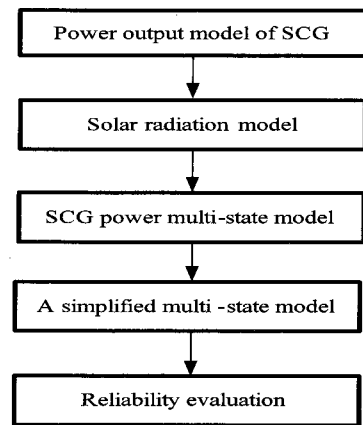


그림 13 태양광발전원의 신뢰도 평가를 위한 흐름도

Fig. 13 Flow chart for evaluating reliability of power system including the SCG

5. 사례연구

5.1 2개 발전기모델계통(모델계통 I)

본 연구에서 제안하는 방법을 기존발전기와 태양광발전원을 각각 1대씩 갖는 그림 14와 같은 2개 발전기모델계통에 적용하여 보았다.

본 모델계통의 부하는 그림 15와 같은 최대부하가 20MW 인 일부하지속곡선을 갖는다고 가정하였으며 기존발전기는 사고율이 0.1인 2개상태를 가지며 태양광발전원은 태양광확률분포모형과 태양광발전원의 출력모형에서 산정되어 5개의 사고상태공간모형을 갖는다고 가정하였다. 본 모델계통의 태양광의 분포는 그림 16과 같으며(이는 우리나라 진주시의 2007년도의 실제 태양광분포임.) 태양광발전기의 특성자료는 표 1과 같다고 가정하였다. 한편, 그림 17은 태양광의 확률분포함수를 보인 것이다. 더불어 그림 18은 0보다 큰 구간에서의 태양광의 확률분포특성을 보다 자세히 살펴보기 위하여 y축을 logarithm 스케일로 표시한 것이다.

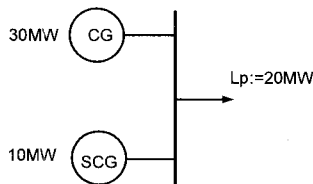


그림 14 모델계통 I
Fig. 14 The simple model system I

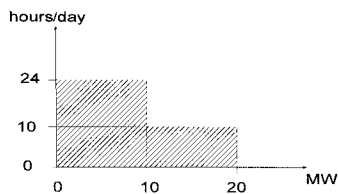


그림 15 모델계통 I의 부하지속곡선
Fig. 15 Load duration curve of model system I

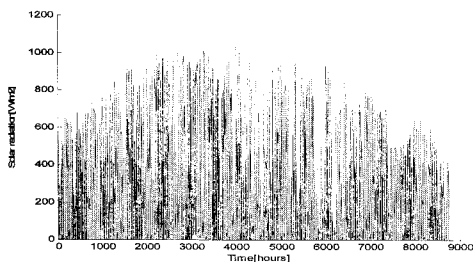


그림 16 모델계통 I의 태양광분포
Fig. 16 Solar radiation distribution of model system I

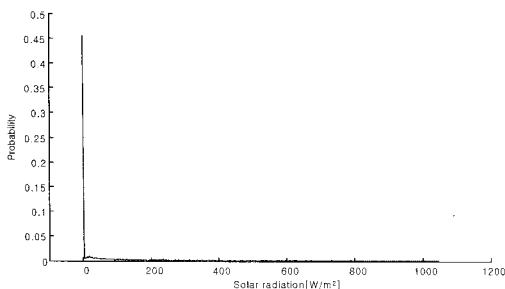


그림 17 모델계통 I의 태양광확률분포함수
Fig. 17 Semi-logarithmic probabilistic distribution function of solar radiation of model system I

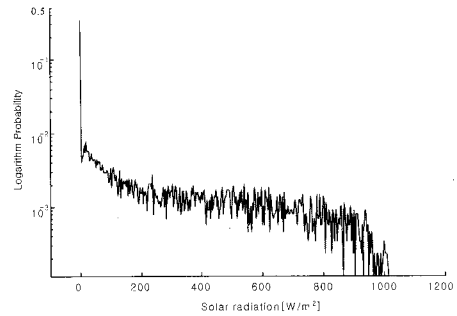


그림 18 모델계통 I의 semi-log 태양광확률분포
Fig. 18 Semi-logarithmic probabilistic distribution function of solar radiation of model system I

표 1 모델계통 I의 태양광발전원의 특성자료
Table 1 Data of SCG of model system I

R_c	150W/m ²
G_{std}	1,000W/m ²
P_{sn}	10MW

태양광밴드크기 ΔSW 를 100W/m²로 설정하면 최대광량을 포함하는 밴드의 개수 N_b 는 12개가 되며 각 밴드에 대한 태양광확률분포모형과 태양광발전원의 출력모형을 결합하여 가용용량(AP)별 확률값을 구하면 표 2와 같다. 다음으로 미리 상정한 0MW, 3MW, 5MW, 7MW 그리고 10MW라는 5개의 가용용량별 운전상태 공간으로 확률분포값을 선형분할 방법으로 분배하는 모습을 보이면 표 3과 같다. 여기서는 5개의 상태공간모형으로 설정하였지만 더욱 많은 상태로 모형화하면 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 그러나 상정하는 상태수가 어느 값 이상이 되면 그 효과는 더 이상 없다고 알려져 있다[5].

표 2 태양광발전원의 가용용량별 확률분포
Table 2 Solar radiation and available pdf of SCG

Solar Radiation [W/m ²]	SCG Power (P_{bi}) [MW]	State Probability (P_{Bi})
0	0	0.5501712
100	0.667	0.1151953
200	2.000	0.0653222
300	3.000	0.0529014
400	4.000	0.0463629
500	5.000	0.0447933
600	6.000	0.0393043
700	7.000	0.0335458
800	8.000	0.0275622
900	9.000	0.0193335
1000	10.000	0.0053716
1100	10.000	0.0001363
	Total	1.0000000

(여기서, $\Delta SW = 100W/m^2$)

참고로, 그림 19는 실제로 상태수의 변화 및 태양광밴드 크기의 변동에 따른 신뢰도 지수중 LOLE의 변화를 살펴본 것이다. 그림에서 보다시피 태양광밴드크기 100W/m²이하

및 상태공간수 6이상에서 신뢰도 지수 LOLE는 수렴하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 사례연구에서는 태양광의 밴드의 크기를 100W/m²로 설정하고 상태공간은 5개 정도로 설정한 간략모델을 이용하여 모의하였다.

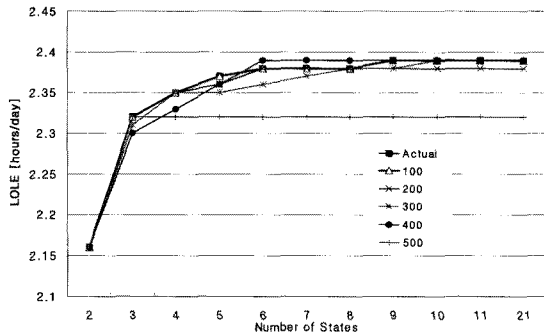


그림 19 모델계통 I의 태양광밴드크기 및 상태공간수의 변동에 따른 신뢰도지수(LOLE)의 변화

Fig. 19 Variation of the reliability index(LOLE) according to changing of SR band size and state number

표 3 태양광발전기의 가용용량확률분포의 선형분할배분

Table 3 Rounding of the SCG power and corresponding probability of model system I

P_i [MW]	P_k Prob.	0 MW	3 MW	5 MW	7 MW	10 MW
0.000	0.5502	0.5502	-	-	-	-
0.667	0.1152	0.0896	0.0256	-	-	-
2.000	0.0653	0.0218	0.0435	-	-	-
3.000	0.0529	-	0.0529	-	-	-
4.000	0.0464	-	0.0232	0.0232	-	-
5.000	0.0448	-	-	0.0448	-	-
6.000	0.0393	-	-	0.0197	0.0197	-
7.000	0.0335	-	-	-	0.0335	-
8.000	0.0276	-	-	-	0.0184	0.0092
9.000	0.0193	-	-	-	0.0064	0.0129
10.000	0.0055	-	-	-	-	0.0055
Total	1	0.6616	0.1452	0.0876	0.0780	0.0276

표 4는 표 3에서 얻어진 가용용량상태확률분포를 사고용량상태확률분포로 재정리하여 보인 것이며 그림 20은 이를 알기 쉽도록 그림으로 나타낸 것이다. 참고로 사고용량이 0MW일때의 확률값은 가용용량이 10MW일때의 확률값과 동일하며 본 모델계통의 태양광발전원의 최대가용용량의 확률은 0.0276이며 2개상태 등가사고율(EFOR: Equivalent Forced Outage Rate)은 0.8304이었다.

한편, 유효부하지속곡선을 작성하는 식 (10)를 이용하여 식 (11), 식 (12) 및 식 (13)에 따라 신뢰도를 평가하면 표 5와 같다. 여기서는 다개상태를 갖는 태양광발전원이 투입될 경우에 공급신뢰도측면에서의 신뢰도지수에 얼마나 영향을 미치는 가를 알아보기 위하여 (1) SCG가 없는 30MW인 기존의 발전기 한 대만 있는 경우(Case I)와 (2) SCG가 투입된 경우(Case II)의 두 가지에 대하여 신뢰도 평가를 실시한 결과를 비교하여 보인 것이다. 예상되는 것처럼 기존의 발전기들이 통상적으로 사고율이 0.1이하의 값을 갖는 것에 비하여 주어진 SCG의 2개상태 등가사고율(EFOR)은 0.8304

로써 매우 높았다. 그러므로 태양광발전원이 전혀 없는 경우보다는 계통의 신뢰도에 기여를 하고 있지만 사고율이 낮은 기존의 발전기가 투입되는 것에 비하면 신뢰도 기여가 매우 작음을 알 수 있다. 참고로 태양광발전원을 고려한 Case II의 각 발전기의 확률론적인 발전량 및 설비이용율을 보이면 표 6과 같다.

표 4 태양광발전원의 사고용량확률함수

Table 4 The outage capacity $pdf(f_{oi})$ of the simplified five-state model of the SCG of model system I

OC[MW]	10	7	5	3	0
FOR	0.6616	0.1452	0.0876	0.0780	0.0276

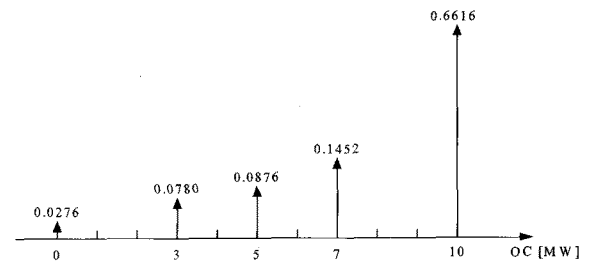


그림 20 태양광발전원의 사고용량 확률분포함수

Fig. 20 Outage capacity $pdf(f_{oi})$ of SCG of model system I

표 5 신뢰도평가 결과

Table 5 Reliability indices of the two case studies

	LOLE [Hours/day]	EENS [MWh/day]	EIR [pu]
Case I	2.4	34	0.9
Case II	2.36	29.93	0.91197
II-I	-0.04	-4.07	0.01197

표 6 Case II의 각 발전기의 확률론적인 발전량 및 설비이용율

Table 6 Probabilistic production energies and capacity factors of generators of Case II

	총발전량[MWh/day]	설비이용율[%]
CG1	269.37	37.41
SCG	40.70	16.96
Total	310.07	

5.2 제주도 계통크기의 모델계통(모델계통 II)

두 번째 사례연구로써 우리나라의 제주도 전력계통 크기의 모델계통(모델계통 II)을 상정한다. 표 7은 이의 발전계통의 입력자료를 보인 것이다. 본 모델계통에서는 당초의 세 군데의 풍력단지들 대신에 태양광발전원단지가 있다고 가정하고 이들을 표 7에서 태양광발전원(SCG)으로 나타내었다. 그리고 HVDC는 3개 상태를 갖는 하나의 등가발전기로 가정하였다. 한편, 여기서는 그림 21과 같은 2007년도 제주도의 일최대년부하지속곡선의 패턴을 그대로 사용하고 최대부하를 681MW로 가정하였다. 표 8은 세 군데의 태양광발전원의 발전특성자료를 보인 것이다.

표 7 모델계통 II의 발전기 입력자료

Table 7 Generators data of model system II

번호	이름	형식	용량 [MW]	발전기 대수	상태수	사고율
1	HWN	SCG	$P_{sn1}=50$	1	10	-
2	SSN	SCG	$P_{sn2}=30$	1	7	-
3	JCN	SCG	$P_{sn3}=20$	1	5	-
4*	HVDC	DC	75/150*	2	3	0.010/ 0.028*
5	NMJ3	T/P	100	2	2	0.012
6	JJU1	T/P	10	1	2	0.015
7	JJU2	T/P	75	2	2	0.012
8	HNM1	G/T	35	2	2	0.013
9	HNM1	S/T	35	1	2	0.013
10	JJU3	D/P	40	1	2	0.018
11	NMJ1	D/P	10	4	2	0.018
합계			945	18		

(*; HVDC는 3개 상태공간모형으로 모의함.)

표 8은 태양광발전원의 출력특성함수를 보인 것이며 그림 22, 23은 모델계통 II의 가정한 태양광발전단지(SF: Solar Farm)의 태양광분포의 특성을 보인 것이다. 그림 24는 세 군데의 태양광발전단지별 등가발전기의 사고용량확률분포함수(f_{oscc})를 보인 것이다. 이들 함수에 대하여 식 (10)을 사용하여 발전기를 부하담당 시키면서 유효부하지속곡선을 작성하고 식 (11), (12) 및 (13)에 따라 신뢰도를 구할 수 있다.

표 9는 태양광발전원의 투입유무에 따른 신뢰도지수의 결과를 비교하여 보인 것이다. 본 계통은 당초에 이미 총공급 용량(945MW)이 최대부하(681MW)를 크게 상회하는 바 높은 공급예비율을 유지한다고 추정되지만 태양광 발전원의 투입으로 더욱 신뢰도가 높아졌다.

표 8 모델계통 II의 태양광발전원들의 특성자료

Table 8 Data of SCGs of model system II

$R_{c1}=R_{c2}=R_{c3}$	150W/m ²
$G_{std1}=G_{std2}=G_{std3}$	1,000W/m ²
P_{sn1}	50MW
P_{sn2}	30MW
P_{sn3}	20MW

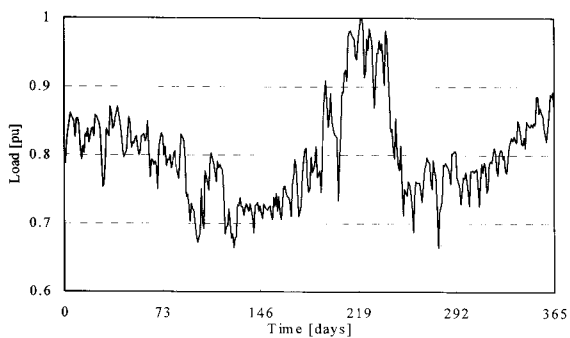


그림 21 모델계통 II의 일최대년부하변동곡선의 패턴
Fig. 21 Patterns of daily peak load variation curve of the model system II

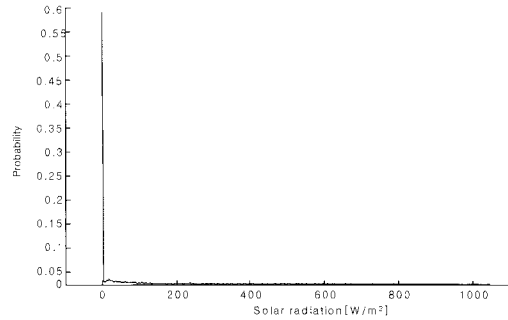


그림 22 모델계통 II의 태양광확률분포함수
Fig. 22 Probability distribution function of the solar radiation of model system II

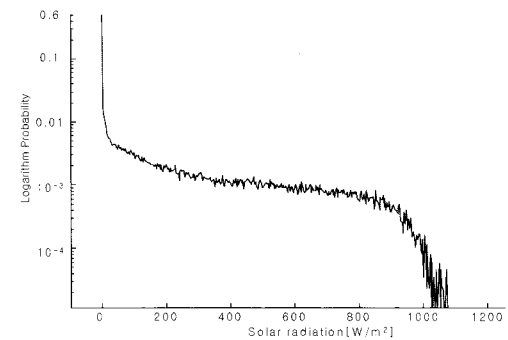
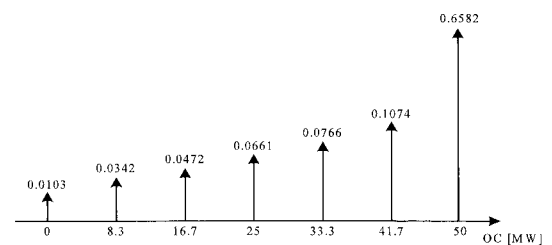


그림 23 모델계통 II의 semi-log 태양광확률분포함수
Fig. 23 Semi-logarithmic probabilistic distribution function of solar radiation of model system II

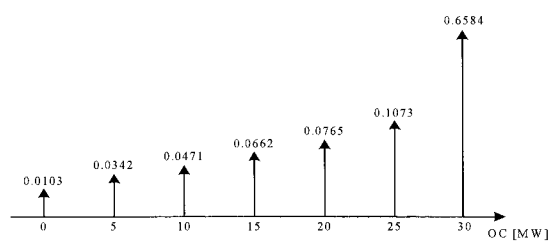
표 9 모델계통 II의 신뢰도 평가결과

Table 9 Reliability indices of model system II

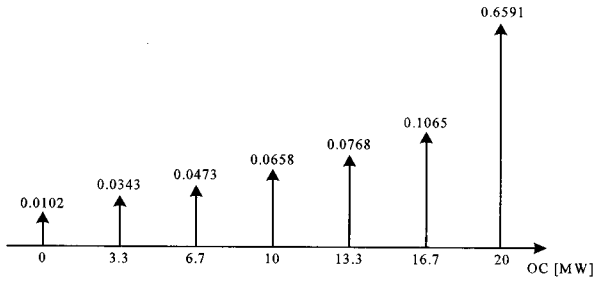
	Without SCGs (Case I)	With SCGs (Case II)	Case II - Case I
LOLE [days/year]	0.33	0.25	-0.08
EENS [MWD/year]	12.88	9.34	-3.54
EIR	0.99994	0.99995	0.00001



(a) HWN 태양광발전원의 사고용량확률분포함수(f_{o1})



(b) SSN 태양광발전원의 사고용량확률분포함수(f_{o2})



(c) JCN 태양광발전원의 사고용량확률분포함수(f_{oc})

그림 24 모델계통 II의 3개의 태양광발전단지별 사고용량 확률분포함수

Fig. 24 Outage capacity pdf(f_{owtg}) of SCGs of three solar farms in model system II

한편, 본 계통에서 SCG가 '동일한 계통신뢰도를 유지하면서 과연 실제적으로 부하를 얼마까지 공급할 수 있는가?'를 의미하는 등가부하전달능력(ELCC; Equivalent Load Carrying Capability)을 평가하기 위하여 최대부하를 변동시키면서 신뢰도를 평가하여보았다. 표 10은 이를 결과를 나타낸 것이며 그림 25는 우리나라의 신뢰도 기준인 LOLE* = 0.5days/year에서 바라본 ELCC를 추정하여본 것이다. 여기서 ELCC가 15MW로 얻어졌으며 이는 계통에 투입된 SCG가 동일한 신뢰도수준을 유지하는 조건에서 15MW의 부하를 더 담당할 수 있음을 의미한다. 이는 당초의 SCG의 총 용량이 100MW임을 감안하면 매우 낮은 수치이며 기존의 발전기와는 달리 태양광발전원은 자원인 태양광의 공급 불확실성의 정도가 그만큼 크다는 것을 의미한다. 근래 이와 같은 총 용량에 대한 ELCC의 백분율(여기서는 15%임.)을 용량신용도(capacity credit)라고 정의하여 자원공급의 불확실성이 매우 큰 신재생에너지발전원의 계통신뢰도측면에서의 신용도의 측도로 활용하고 있다. 따라서 본 연구에서 제시하는 방법을 이용하면 사례연구에서 보드시피 태양광발전원을 건설하고자 원하는 발전사업자가 신뢰도측면에서 그 기여도가 얼마인가를 정량적으로 추정하여볼 수 있다.

표 10 최대부하의 변동에 따른 모델계통 II의 신뢰도 평가결과

Table 10 Reliability indices of model system II according to changing of peak load

L_p	Without SCG			With SCG		
	LOLE [days/year]	EENS [MWD/year]	EIR [pu]	LOLE [days/year]	EENS [MWD/year]	EIR [pu]
631	0.1	3.54	0.99998	0.07	2.47	0.99999
641	0.14	4.69	0.99997	0.1	3.28	0.99998
651	0.18	6.16	0.99997	0.13	4.34	0.99998
661	0.22	7.97	0.99996	0.16	5.66	0.99997
671	0.26	10.16	0.99995	0.2	7.31	0.99996
681	0.33	12.88	0.99994	0.25	9.34	0.99995
691	0.41	16.23	0.99992	0.3	11.85	0.99994
701	0.6	20.85	0.9999	0.41	15.09	0.99993
711	0.97	27.87	0.99987	0.6	19.67	0.99991
721	1.38	38.84	0.99982	0.88	26.55	0.99987
731	1.68	53.33	0.99975	1.18	36.29	0.99983

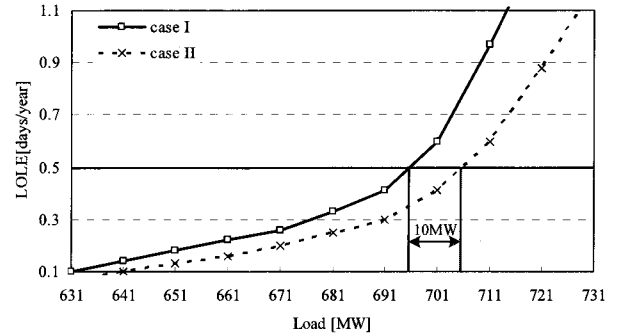


그림 25 모델계통 II의 태양광발전원의 등가부하전달능력

Fig. 25 ELCC(Equivalent Load Carrying Capability) of SCG of the modal system II

끝으로, 본 모델계통 II는 편의상 단지 제주도계통 크기와 비슷한 모델계통을 상정하고 본 연구가 궁극적으로 추구하고자하는 태양광발전원의 공급신뢰도 측면에서의 확률론적인 신뢰도평가를 위한 모형 및 방법론의 개발에만 중점을 두고 있음을 밝히고 싶다.

6. 결론

본 연구에서는 최근 전 세계적으로 급격히 증가하고 있는 신재생에너지원을 이용한 발전기들 중 하나인 태양광발전원이 전력계통에 투입될 경우의 확률론적인 신뢰도 평가에 관한 연구이다. 태양광발전원도 풍력발전기처럼 그 에너지원(태양광)의 공급이 언제 어떻게 변화할지 모르는 확률론적인 불확실성특성(Epistemic uncertainty)을 가진다. 그러므로 태양광의 출력변동의 불확실성은 기존의 발전기의 운전고장 모형처럼 모델화된다. 본 논문은 태양광발전원의 신뢰도 측면에서 기여도를 평가하기 위한 모형 및 툴의 기초기술개발에 초점이 맞추어져 있다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 태양광분포모형과 출력특성곡선과의 결합을 통해 태양광발전원의 다개상태로 된 사고용량확률분포함수를 구할 수 있다. 다개상태 모형은 2개상태 모형보다 보다 정확하게 태양광량의 불확실성의 공급변화를 고려할 수 있었다.
2. 보다 효율적인 계산을 위해 선형분할방법으로 간략화된 다개상태 모형을 제안하였다.
3. 다개상태 모형을 고려한 신뢰도 평가를 위해 상승적분식을 이용한 유효부하지속곡선법을 사용하였다. 그러므로 차후에 이미 확률론적인 발전시물레이션 방법으로 개발되어져있는 cumulant방법이나 푸리에변환법등과 같은 방법을 그대로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.
4. 실제 태양광량의 데이터를 바탕으로 태양광량의 확률분포함수는 정규분포보다 이항분포에 더욱 근접하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 여기서는 편의상 과거의 10년간의 태양광분포를 직접 입력자료로 이용하였으며 분포함수를 만들어 적용하지는 않았다. 이에 대한 보다 깊은 연구가 차후과제로 남는다.
5. 제안된 방법은 태양광발전원이 전력계통 신뢰도에 미치는 영향을 정량적으로 파악하는데 도움을 줄 수 있다.

이는 앞으로 태양광발전원의 건설계획이나 운영분석에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

본 연구에서는 태양전지판의 불시고장은 없는 것으로 가정하였으며 또한 태양광발전원의 효율은 온도에 의해서 보다 태양광량에 의해 그 변화가 크게 나타나므로 온도의 변화는 없는 즉, 표준온도에서만 특성만을 고려하는 것으로 설정하였지만 태양광발전의 전지판이 온도에 다소 변화하므로 이러한 것도 고려한 차후연구가 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R01-2008-000-10567-0) 및 지식경제부의 고급인력양성사업의 재원인 서울대학교에 소재한 미래형전력네트워크신뢰도연구센터의 지원하에 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] Nick Jenkins, Ron Allan, Peter Crossley, David Kirschen and Goran Strbac: EMBEDDED GENERATION, IEE, 2000.

[2] Mukund R. Patel: Wind and Solar Power Systems, CRC, 1999.

[3] 김수덕, "신재생에너지의 최근동향과 이슈" 2006년도 대한전기학회 전력기술부문회 전력경제연구회 춘계학술대회논문집 2006년5월.

[4] 오량, 박정제, 최재석, "풍력발전계통 고려한 신뢰도평가에 관한 기초연구", 2008년도 대한전기학회 전력기술부문회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 149-152, 2008년 5월 30일.

[5] Rajesh Karki and Roy Billinton, "Reliability/Cost Implications of PV and Wind Energy Utilization in Small Isolated Power Systems" IEEE Trans. Energy Conversion, vol.16, no.4, Dec. 2001, pp.368-373.

[6] 박정제, 오량, 최재석, 문승일, "풍력발전기를 고려한 전력계통의 확률론적인 신뢰도 평가에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제57권, 9호, 2008년9월, pp. 1491~1499.

[7] 박정제, 오량, 최재석, 차준민, "풍력발전기의 확률론적 발전비용 절감기여도 평가" 대한전기학회논문지, 제57권9호, 2008년12월, pp.2153-2160.

[8] 박정제, 오량, 최재석, "태양광발전원을 고려한 전력계통의 신뢰도평가에 관한 기초연구", 2008년 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 19-21, 2008년 11월 7일~8일.

[9] M. K. C. Marwali, H. Ma, S. M. Shahidepour, and K. H. Abdul-Rahman, "Short-term generation scheduling in photovoltaic-utility grid with battery storage" IEEE Trans. Power Syst., vol.13, no.3, Aug. 1998, pp.1057-1062.

[10] Roy Billinton and Dange Huang, "Aleatory and Epistemic Uncertainty Considerations in Power System Reliability Evaluation" PMAPS2008, Puerto Rico, May 25-29, 2008.

[11] L. L. Garver, "Effective load carrying capability of generating units,"IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-85, no. 8, Aug. 1966, pp. 910 - 919.

[12] Ruey-Hsun Liang, and Jian-HaoLiao, "A Fuzzy-Optimization Approach for Generation Scheduling With Wind and Solar Energy Systems" IEEE Trans. Power Syst., vol.22, no.4, Nov. 2007, pp.1665-1674.

[13] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg: Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, INC, 1996.

저 자 소 개



박정제 (朴正濟)

1981년 11월 9일생. 2007년 경상대 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 055-751-5347
Fax : 055-759-2723
E-mail : pakjan@hanmail.net



오량 (吳 量)

1984년 8월 29일생. 2007년 University of Science and Technology, Liao Ning 졸업. 2007년~현재 경상대 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 055-751-5347
Fax : 055-759-2723
E-mail : astdwxg@gmail.com



최재석 (崔在錫)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1991년~현재 경상대 교수
Tel : 055-751-5347
Fax : 055-759-2723
E-mail : jschoi@gnu.ac.kr



차준민 (車濬敏)

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996~현재 대전대학교 공대 전기공학과 정교수
Tel : 031-539-1915
Fax : 031-539-1910
E-mail : chamin@daejin.ac.kr