

## A Study on Probabilistic Production Costing for Solar Cell Generators

박 정 제\* · 최 재 석†  
(Jeongje Park · Jaeseok Choi)

**Abstract** - The application of renewable energy in electric power systems is growing rapidly in order to make provision for the inequality of the climate, the dwindling supplies of coal, oil and natural gas and a further rise in oil prices. Solar cell generators(SCG) is one of the fastest growing renewable energy. This paper presents a methodology on probabilistic production cost simulation of a power system including SCGs. The generated power by SCGs is variable due to the random variation of solar radiation. In order to solve this problem, the SCGs is modeled as multi-state operational model in this paper. Probabilistic production cost of a power system can be calculated by proposed method considering SCGs with multi-state. The results show that the impacts of SCGs added to a power system can be analyzed in view point of production cost using the proposed method.

**Key Words** : Solar/Photovoltaic cell generator, Probabilistic production cost, Multi-state model, Renewable energy

## 1. 서 론

전 세계적으로 기후변동대책, 에너지 고갈에 대한 위기감, 원유 가격 상승에 대한 대응 등으로 신재생에너지발전원에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 우리나라 또한 에너지 소비에 있어서 세계 10위인 반면 소비되는 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하고 있어 신재생에너지발전원의 개발이 절실한 실정이다. 유럽신재생에너지협회에 따르면, 이러한 신재생에너지발전원 중에서 태양광발전원이 2000년대 이후 연평균 38%의 설치 증가율을 보이면서 타 신재생에너지발전원(풍력 28%, 바이오매스 3.5%, 지열 3.5%) 대비 가파른 성장세를 보이고 있다. 우리나라는 2003년에 제 2차 신재생에너지 기술개발 및 이용, 보급 기본계획을 수립하여 에너지 자급률 증가, 기후변화에 대처, 재생에너지 기술기반 확충을 하고자 하였다. 이 계획에 따르면 태양광발전원의 보급이 2007년 약 70MW에서 2011년까지 1.3GW에 이를 것으로 전망하고 있다[1-4].

일반적으로 태양광발전원과 같은 신재생에너지발전원은 기존의 원자력, 석탄, 가스에너지원 등을 이용한 발전원과는 달리 그 에너지 자원의 공급과 이에 따른 출력의 불확실성이 매우 크다. 이러한 특성으로 인해 기존의 발전원 같은 경우 정상운전 및 발전기의 불시고장에 따른 운전정지의 2

개 상태로 나타낼 수 있지만 신재생에너지발전원은 그 에너지 자원의 변화에 따른 다양한 출력을 가지므로 다개상태(multi-state)로 고려되어야 한다[5-9].

본 연구에서는 신재생에너지를 이용한 전원들 중 최근 급격히 증가하고 있는 태양광에너지를 이용한 태양광발전원(SCG: Solar Cell Generator)의 계통투입에 따른 확률론적인 신뢰도 평가를 실시하고 이를 바탕으로 태양광발전원을 고려한 전력계통의 발전비용산정 기초기술을 개발한다. 계층수준(Hierarchical Level I; HLI)에서의 확률론적 신뢰도 지수 및 발전비 산정이 가능한 방법에 대해서는 45년 전부터 수많은 연구가 진행되었으며 Booth - Baleriaux법, 등가에너지함수법 및 Segmentation법 등과 같은 완전해석적 방법과 Cumulant법, MONA (Mixture of Normals Approximation)법과 같은 근사해석적방법으로 대별 될 수 있다[10]. 또한 본 연구에서는 기존의 전원과는 달리 에너지원의 공급의 불확실성이 매우 큰 태양광발전원의 운전모형을 다개상태 운전모형으로 모델링하여 다개상태의 상태확률과 각 상태의 공급가능용량(AP: Available Power)을 구하기 위하여 태양광모형과 태양광전원의 출력모형을 결합하는 방법을 제안하며 이를 바탕으로 발전비용 산정 알고리즘을 개발한다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 우리나라 제주도계통크기의 모델계통에 적용하여 그 활용성을 살펴보았다.

## 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],

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

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

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

접수일자 : 2009년 1월 12일

최종완료 : 2009년 2월 19일

$I_D$ 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 출력 전력( $P=VI$ )을 구할 수 있다[2].

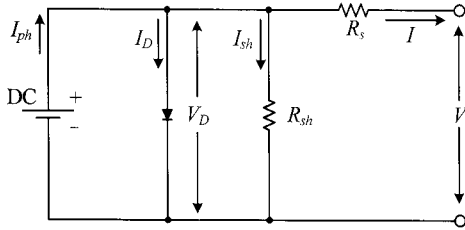


그림 1 태양전지의 실제 등가회로  
Fig. 1 Practical equivalent circuit of solar cells

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{1}$$

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

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

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

여기서,  
 $I_o$  : 다이오드의 포화전류 [A]  
 $q$  : 전하량 [C]  
 $A$  : 다이오드 계수  
 $K_B$  : 볼츠만 상수  
 $T$  : 온도 [K]

본 논문의 목적은 태양광발전원의 발전비용 산정에 있으므로 발전시물레이션의 효율성을 위하여 식(5)와 같이 태양광량의 변화에 따른 근사화된 출력식을 사용하였다. 이는 이미 수행된 태양광발전원의 출력에 영향을 미치는 태양광량과 온도의 변화에 따른 태양광발전원의 효율의 특성곡선을 근사화하여 구할 수 있다. 자세한 유도과정은 부록에서 소개하고 있다[9].

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

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

$$= P_{sn}, \quad G_{bi} > G_{std} \tag{5}$$

여기서,  
 $i$  : 태양광밴드의 번호(=1,2,...,N<sub>b</sub>)  
 $N_b$  : 밴드의 총수

$P_{bi}$  : #i 밴드의 태양광발전원(SCG)의 출력 [MW]

$\eta_c$  : 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]

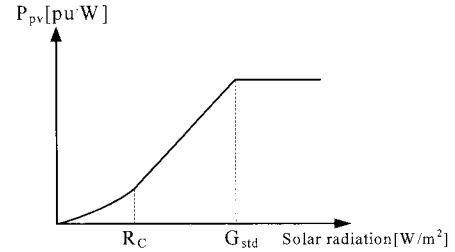


그림 2 태양광발전원의 출력특성곡선  
Fig. 2 The solar radiation-power curve of SCG

### 3. 태양광량 확률분포모형

일반적으로 태양광은 공간과 시간에 따라 크게 변화한다. 특히 신뢰도평가를 위해서는 임의의 지점에서의 광량의 시간연대기적인(chronological)인 분포자료가 필요하다. 아직까지 이를 위한 태양광량의 확률분포함수에 대한 연구는 미미하며 다양한 편이 아니다[6-12]. 본 연구에서는 태양광량의 확률분포함수를 1998년에서 2007년까지 10년간 제주지역 태양광량의 자료를 바탕으로 그림 3과 같이 실제적인 태양광량 확률분포함수를 이용하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 태양광은 밤에 방사되지 않으므로 태양광량이 "0"인 확률이 1/2를 넘어서고 있으며 나머지 확률은 태양광량의 세기에 따라 골고루 분포하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 태양광의 확률분포함수의 전형적인 패턴을 그림 4처럼 나타낼 수 있다. 그러나 여기서는 본 연구의 목표가 신뢰도 평가 및 발전비용 산정 기술개발이므로 편의상 과거의 10년간의 태양광분포를 가공하여 그 데이터를 직접 입력자료로 이용하기로 하며 이의 분포함수를 만들어 적용하지는 않기로 한다.

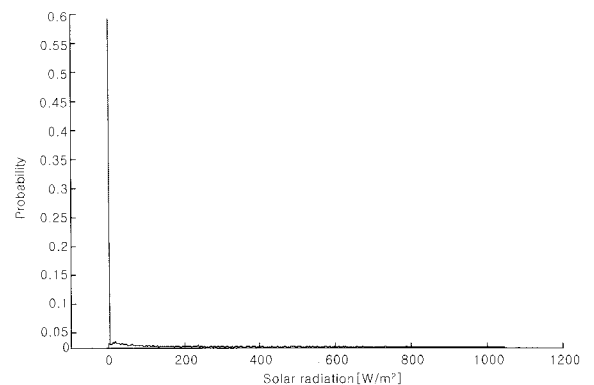


그림 3 10년간 제주지역의 태양광량 확률분포함수  
Fig. 3 Probability distribution function of the solar radiation of Jeju Island for 10years

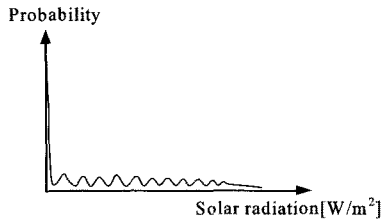


그림 4 태양광확률분포함수의 전형적인 패턴  
 Fig. 4 The typical pattern of the solar radiation pdf model

#### 4. 태양광발전원을 고려한 전력계통의 확률론적인 발전비용 산정

##### 4.1 태양광발전원의 사고용량확률분포함수

그림 5는 태양광발전원의 출력특성곡선과 태양광확률분포함수를 결합하여 태양광발전원의 다개상태로된 가용용량확률분포함수(Available capacity probability distribution function)를 얻는 모습을 보인 것이다. 여기서,  $P_i$ 와  $P_{Bi}$ 는  $i$  번째 태양광밴드의 광량이  $SR_{br}$ 일 때의 태양광발전원의 출력 및 광량을 의미한다. 이로부터 식 (6)와 같이 태양광발전원의 사고용량확률분포함수를 얻을 수 있으며 이를 이용하여 후술하는 바와 같이 기존의 신뢰도평가방법을 그대로 이용하여 태양광발전원을 고려한 전력계통의 신뢰도평가를 실시할 수 있다. 또한 실용상 효율적이라고 판단되는 상태공간수로 모의하기 위하여 선형분할방법(linear rounding)을 사용하였다[7].

$$f_{oi} = f(P_{oi}, PB_{oi}) \quad (6)$$

여기서,  
 $f_{oi}$  : # $i$  태양광발전원의 사고용량확률분포함수  
 $P_{oi}$  : # $i$  태양광발전원의 사고용량변수(= $P_{sni} - P_{ik}$ ) [MW]  
 $P_{sni}$  : # $i$  태양광발전원의 정격용량 [MW]  
 $P_{Bi}$  : # $i$  태양광발전원의 사고용량확률변수(= $P_{Bi}$ )

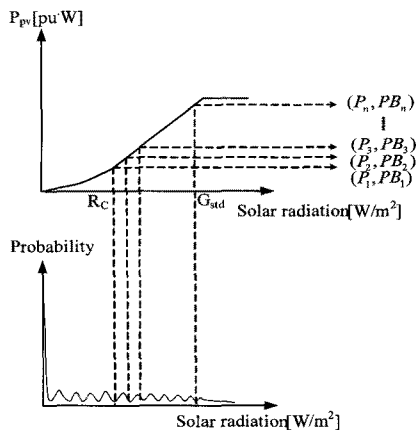


그림 5 태양광발전원의 가용용량확률분포함수를 얻기 위한 태양광분포모형과 출력특성곡선과의 결합모습  
 Fig. 5 The combination of solar radiation model and SCG power output model to obtain the available capacity pdf of SCG

#### 4.2 확률론적인 신뢰도 평가

태양광발전원의 출력특성곡선과 태양광확률분포함수를 결합을 통해 태양광발전원의 사고용량확률분포함수를 구할 수 있었다. 이를 식(7)과 같이 부하지속곡선과 상승적분을 하여 수정된 부하지속곡선, 즉 유효부하지속곡선인  $\Phi_i$ (ELDC: Effective Load Duration Curve)를 작성한다.[9-12].

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \Phi_{i-1} \otimes f_{oi} \\ &= (1 - \sum_{j=1}^{NS} q_{ij}) \Phi_{i-1}(x) + \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \Phi_{i-1}(x - C_{ij}) \end{aligned} \quad (7)$$

단,  
 $\otimes$  : 상승적분을 의미하는 연산자  
 $\Phi_0$  : 원래의 부하지속곡선(LDC)  
 $\Phi_{i-1}$  : #1에서 # $i-1$  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

그러므로 경제적 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 (8), 식 (9) 및 식 (10)처럼 구할 수 있다.

$$LOLE = \Phi_{NG}(x)|_{x=IC} \quad [\text{hours/year}] \quad (8)$$

$$EENS = \int_{IC}^{IC+L_p} \Phi_{NG}(x) dx \quad [\text{MWh/year}] \quad (9)$$

$$EIR = 1 - EENS/ED \quad [\text{pu}] \quad (10)$$

여기서,  
 $L_p$  : 최대부하[MW]  
 $IC$  : 총설비용량(= $\sum C_i$ ) [MW]  
 $C_i$  : # $i$  발전기의 용량[MW]  
 $ED$  : 총부하에너지[MWh]

#### 4.3 확률론적인 발전비용 산정 및 흐름도

확률론적 발전비용은 확률론적 발전력  $\Delta E$ 와 LOLE를 이용하여 계산할 수 있다.  $i$  번째 발전기의 확률론적 발전력  $\Delta E_i$ 는 식 (11)과 같이 그 발전기까지 고려한 전후의 EENS 차이와 같으며, 발전비용  $\Delta PC_i$ 는 식 (12)와 같이 발전기 입출력특성 곡선식  $H_i = \alpha P_i^2 + \beta P_i + \gamma$ 의 기울기와 열소비상수에 각각 연료비를 곱한 증분가격계수  $\lambda_a$ 와 가격상수  $\lambda_b$ 를 이용하여 구할 수 있다[8].

$$\Delta E_i = EENS_{i-1} - EENS_i \quad [\text{MWh}] \quad (11)$$

$$\Delta PC_i = \lambda_a \times \Delta E_i + \lambda_b \times (1 - \sum_1^i \text{FOR}) \times \text{LOLE}_{i-1} \quad [\text{Won}] \quad (12)$$

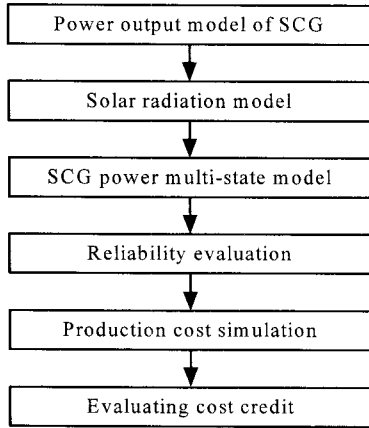


그림 6 태양광발전원의 신뢰도 평가 및 발전비용 산정을 위한 흐름도

Fig. 6 Flow chart for evaluating reliability of power system including the SCG

그림 6은 본 연구에서 제안하는 태양발전원의 확률론적인 신뢰도 평가 및 발전비용 산정을 위한 흐름도를 보인 것이다.

5. 사례 연구

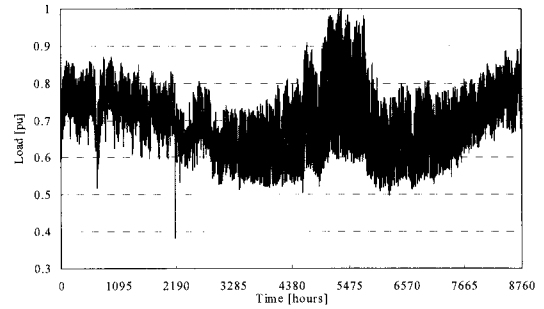
본 연구에서 제안하는 방법을 우리나라의 제주도 전력계통과 유사한 크기의 모델계통에 적용하여 보았다. 표 1은 이의 발전계통의 입력 자료를 보인 것이다. 본 모델계통에서는 세군대의 태양광발전원단지가 있다고 가정하고 이들을 표 1에서 태양광발전원(SCG)으로 나타내었다. 그리고 HVDC는 3개 상태를 갖는 하나의 등가발전기로 가정하였다.

표 1 모델계통의 발전기 입력자료

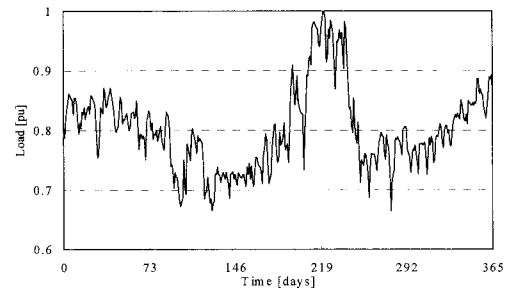
Table 1 Generators data of model system

번호	이름	유형	용량 [MW]	대수	$\alpha$ [Gcal/MWh]	$\beta$ [Gcal/MWh]	$\gamma$ [Gcal/hr]	연료비 [10 <sup>3</sup> won/Gcal]	FOR
1	HWN	SCG	$P_{sn1}=50$	1	-	-	-	-	-
2	SSN	SCG	$P_{sn2}=30$	1	-	-	-	-	-
3	JCN	SCG	$P_{sn3}=20$	1	-	-	-	-	-
4*	HVDC	DC	75/150*	2	0.004	1.512	45.207	43.3	0.010/0.028*
5	NMJ3	T/P	100	2	0.004	1.512	45.207	43.3	0.012
6	JJU1	T/P	10	1	0.062	2.100	5.971	43.599	0.015
7	JJU2	T/P	75	2	0.003	1.832	30.231	43.599	0.012
8	HNM1	G/T	35	2	0.004	2.401	20.32	77.909	0.013
9	HNM1	S/T	35	1	0.004	2.401	20.32	77.909	0.013
10	JJU3	D/P	40	1	0.025	0.364	28.484	43.599	0.018
11	NMJ1	D/P	10	4	0.006	1.999	1.36	43.3	0.018
합계			945	18					

(\*; HVDC는 3개 상태공간모형으로 모의함.)



(a) 시간별 최대년부하변동곡선



(b) 일최대년부하변동곡선

그림 7 모델계통의 시간별 및 일최대년부하변동곡선의 패턴  
Fig. 7 Patterns of hourly, daily peak load variation curve of the model system

본 모델계통의 부하는 그림 7과 같이 2007년도 제주도의 시간별 및 일최대년부하변동곡선의 패턴을 부하지속곡선으로 가공하여 사용하였으며 최대부하를 681MW로 가정하였다. 태양광량 확률분포함수는 앞서 언급한 10년간 제주지역의 태양광량 확률분포함수를 사용하였으며 표 2는 세 군대의 태양광발전원의 발전특성자료를 보인 것이다.

표 2 모델계통의 태양광발전원들의 특성자료

Table 2 Data of SCGs of model system

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

태양광밴드크기  $\Delta SW$ 를 100W/m<sup>2</sup>로 설정하고 각 밴드에 대한 태양광확률분포모형과 태양광발전원의 출력모형을 결합하여 가용용량(AP)별 확률값을 구할 수 있다. 여기서 태양광발전원의 상태공간모형으로 합리적으로 설정하기 위하여 상태수의 변화 및 태양광밴드크기의 변동에 따른 발전비용의 변화를 살펴보았다. 그림 8에서 보다시피 상태공간수가 7이상에서 발전비용은 수렴하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 사례연구에서는 태양광발전원의 상태공간수를 7개로 설정하여 모의하였다. 표 3은 태양광밴드크기  $\Delta SW$ 를 100W/m<sup>2</sup>설정하였을 때 태양광발전원을 각각 2개상태, 7개상태일 때의 발전비용을 나타내고 있다. 태양광발전원을 다개상태로 고려했을 경우 발전비용은 약 8천만원 정도의 차이가 나타난다.

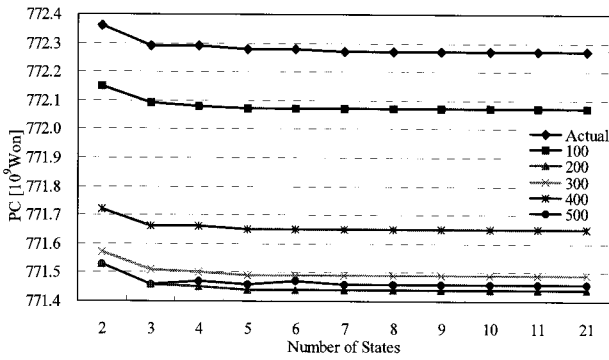


그림 8 모델계통의 태양광밴드크기 및 상태공간수의 변동에 따른 발전비용(Production Cost)의 변화

Fig. 8 Variation of the production cost (PC) according to changing of SR band size and state number

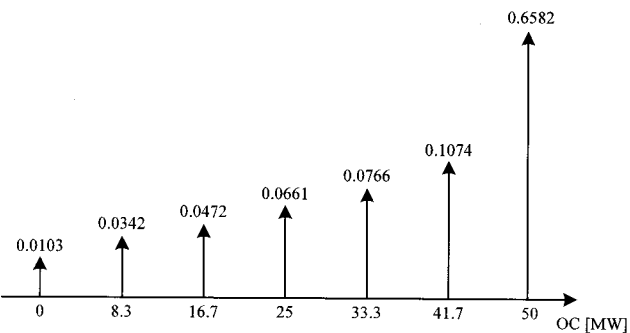
표 3 2개상태와 7개상태일때 모델계통의 발전비용

Table 3 Production cost of model system with 2 state and multi-state model

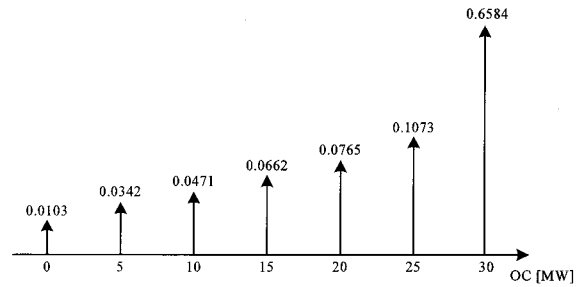
	2개상태	7개상태	차이
PC [10 <sup>9</sup> Won/year]	772.15	772.07	0.08

태양광발전원의 출력특성곡선과 태양광량의 확률분포함수의 결합으로 모델계통에 적합한 상태공간수인 7개상태로 고려된 세군 데의 태양광발전원의 가용용량상태확률분포함수를 구하고 식 (6)를 이용하여 이의 사고용량확률분포함수를 그림 9처럼 구하였다. 각각의 사고용량확률분포함수를 시간별부하지속곡선에 유효부하지속곡선 작성식 (7)를 이용하여 식 (8), (9) 및 (10)에 따라 신뢰도를 평가하고 식 (11)과 (12)를 이용하여 계통의 발전비용을 산정하였다.

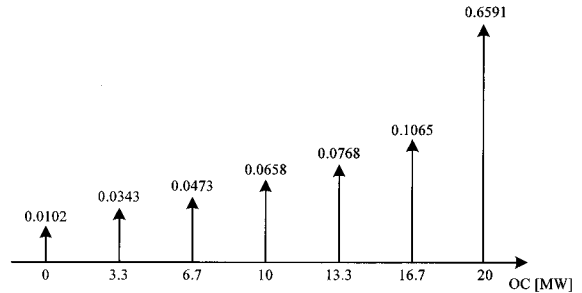
다개상태를 갖는 태양광발전원이 투입될 경우에 계통의 신뢰도 및 발전비용에 얼마나 영향을 미치는가를 알아보기 위해 태양광발전원(SCG)을 고려하기 전 경우(case I)와 SCG를 고려했을 때의 경우(case II)를 모의하였다. 각각의 경우에 대한 계통의 확률론적인 신뢰도 지수 및 발전비용의 결과는 표 4과 같이 산정되었다. 표 5 및 그림 10은 좀 더 자세한 결과를 나타낸 것으로 태양광발전원이 계통에 연계되고 난후에 각 발전기별 확률론적인 발전량 및 발전비용, 설비이용율이 어떻게 변동되었는지를 보여준다.



(a) HWN 태양광발전원의 사고용량확률분포함수( $f_{OI}$ )



(b) SSN 태양광발전원의 사고용량확률분포함수( $f_{O2}$ )



(c) JCN 태양광발전원의 사고용량확률분포함수( $f_{O3}$ )

그림 9 3개의 태양광발전단지별 사고용량 확률분포함수

Fig. 9 Outage capacity PDF( $f_{OUTG}$ ) of SCGs of three solar farms

표 4 모델계통의 신뢰도지수 및 발전비용 산정결과

Table 4 Reliability indices and production cost of model system

	Case I	Case II	Case I-Case II
LOLE [hours/year]	2.25	1.66	0.59
EENS [MWh/year]	83.92	59.99	23.93
PC [10 <sup>9</sup> Won/year]	796.98	772.07	24.91

표 5 각 발전기별 확률론적인 발전량 및 발전비용, 설비이용율

Table 5 Probabilistic production energies, cost and capacity factors.

발전기 번호	Without SCG			With SCG		
	발전량 [GWh/year]	발전비용 [10 <sup>9</sup> Won]	설비이용율 [%]	발전량 [GWh/year]	발전비용 [10 <sup>9</sup> Won]	설비이용율 [%]
1	-	-	-	64.26	0	14.67
2	-	-	-	38.55	0	14.67
3	-	-	-	25.7	0	14.67
4	2,541.2	497.78	96.70	2,541.2	497.76	96.70
5	1,424.8	257.35	81.33	1,334.6	240.48	76.18
6	29.41	7.68	33.57	24.24	6.33	27.67
7	161.77	30.46	12.31	130.89	24.65	9.96
8	7.26	3.10	1.18	5.61	2.4	0.92
9	1.17	0.5	0.38	0.9	0.38	0.29
10	0.6	0.08	0.17	0.41	0.05	0.12
11	0.16	0.03	0.05	0.12	0.02	0.03
합계	4,166.37	796.98		4,166.48	772.07	

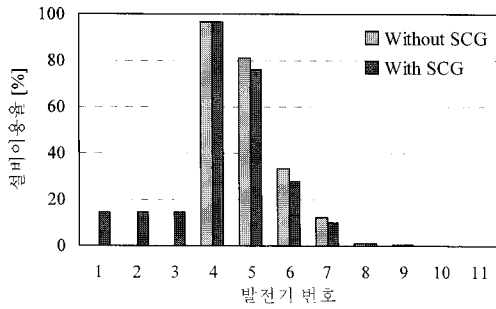


그림 10 각 발전기별 설비이용률의 변동  
Fig. 10 Variation of capacity factors of each generator

표 4에서 보듯이 SCG의 투입 후 기존발전기들(conventional generators)의 발전량 및 발전비용, 설비이용률이 전체적으로 조금씩 감소한 것을 볼 수 있다. 모델계통에 대하여 부하 681MW수준에서 태양광발전원이 계통의 총 발전비용에 미치는 영향, 혹은 경제성 측면에서 얼마나 기여하는지를 나타내는 비용기여도(cost credit)를 나타내면 아래와 같다.

$$\text{Cost Credit}_{SCG} = \frac{(796.98 - 772.07)}{796.98} \times 100 = 3.13 \quad [\%]$$

한편, 표 6은 태양광량의 평균치를 1W/m<sup>2</sup>씩 증가시키면서 발전모의 운전을 하여본 결과를 보인 것으로써 태양광량의 세기가 증가할수록 계통의 신뢰도는 더욱 좋아지며 발전비용은 감소하고 있다. 본 모델계통은 1W/m<sup>2</sup>당 대략 8천만원/년 정도로 비용절감이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이는 태양광량의 경제적 한계비용가치성(Solar radiation marginal cost credit)이라고 할 수 있을 것이다. 여기에 대한 보다 자세한 연구는 차후에 실시할 예정이다.

표 6 태양광량의 증가에 따른 모델계통의 신뢰도지수 및 발전비용 산정결과

Table 6 Reliability indices and production cost of model system according to increasing of peak load

SR Average [W/m <sup>2</sup> ]	LOLE [hours/year]	EENS [MWh/year]	PC [10 <sup>9</sup> Won]
540	1.66	59.99	772.07
541	1.66	59.93	772
542	1.66	59.86	771.91
543	1.66	59.79	771.83
544	1.66	59.72	771.74
545	1.65	59.65	771.66
546	1.65	59.58	771.58
547	1.65	59.51	771.5
548	1.65	59.44	771.42
549	1.65	59.37	771.33

또한 발전비용의 절감기여도 외에 동일한 계통신뢰도를 유지하면서 실제적으로 부하를 어느 수준까지 공급할 수 있는지를 의미하는 등가부하전달능력(ELCC: Equivalent Load Carrying Capability)을 평가하기 위하여 최대부하를 변동시

키면서 각 사례별 신뢰도 평가를 하여 보았다. 표 7은 이 모의실험의 결과를 나타낸 것이다.

그림 11은 우리나라의 신뢰도 기준인 LOLE\* =0.5days/year에서 바라본 ELCC를 추정하여본 것이다. 이를 위하여 일최대년부하지속곡선을 사용하였다. SCG의 ELCC는 10MW로 얻어졌다. 이는 case I의 경우 신뢰도 기준을 만족하면서 696MW의 부하를 공급할 수 있지만 총 용량이 100MW의 SCG를 건설하였을 경우 706MW까지 부하를 공급할 수 있다는 의미이다. 즉, 100MW의 SCG를 투입하였지만 계통의 용량측면에서는 실제 10MW정도를 기여하는 것으로 나타났다.

표 7 최대부하의 변동에 따른 모델계통의 신뢰도 평가결과

Table 7 Reliability indices of model system according to changing of peak load

L <sub>p</sub>	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

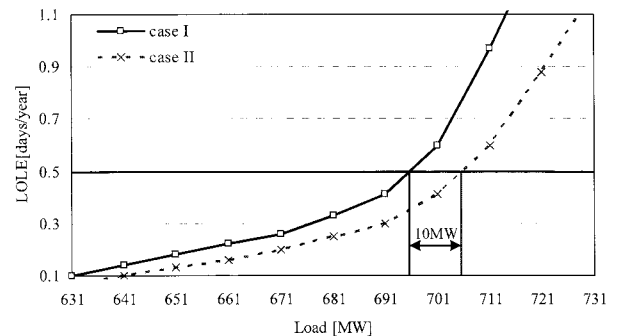


그림 11 모델계통 II의 태양광발전원의 등가부하전달능력  
Fig. 11 ELCC(Equivalent Load Carrying Capability) of SCG of the modal system II

따라서 본 연구에서 제시하는 방법을 이용하면 사례연구에서 보다시피 태양광발전원을 건설하고자하는 발전사업자가 계통의 총 발전비용 측면에서 그 기여도가 얼마인지를 정량적으로 추정하여볼 수 있다.

한편, 본 모델계통은 편의상 단지 제주도계통 크기와 비슷한 모델계통을 상정하고 본 연구가 궁극적으로 추구하고자 하는 태양광발전원의 확률론적인 발전비용 산정을 위한 모형 및 방법론의 개발에만 중점을 두고 있음을 밝힌다.

## 6. 결 론

최근 태양광발전원은 신재생에너지원 중에 매우 높은 설치증가율을 보이고 있으며 태양광발전원의 유형 중에 계통 연계형이 많은 비중을 차지하고 있다. 본 연구에서는 태양광발전원이 계통에 연계되었을 때 계통의 발전비용에 미치는 영향을 파악할 수 있는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 태양광발전기의 출력특성곡선을 유도하였으며 유도한 태양광발전원의 출력특성곡선과 태양광량의 확률분포함수를 결합하여 태양광발전원의 다개상태로 된 사고용량확률분포함수를 구하였다. 이는 태양광량의 불확실성을 보다 정확하게 고려할 수 있는 이점을 가지고 있다. 또한 선형분할방법을 이용하여 다개상태를 간략화 하였으며 적정상태공간수를 선정하여 보다 효율적이고 합리적으로 발전비용을 산정하고자 하였다.

본 논문에서는 제안된 방법을 이용하여 태양광발전원이 전력계통의 발전비용에 얼마나 영향을 미치는지를 알아보았다. 태양광발전원이 계통에 연계되고 난 후에 계통의 신뢰도가 더욱 좋아졌으며, 발전비용은 절감되었다. 더불어 태양광량의 평균을  $1W/m^2$ 씩 증가하면서 발전비용의 변화를 살펴봄으로써 태양광량의 경제적 한계비용가치성을 평가하여 보았다. 또한 태양발전원의 ELCC도 살펴보았다. 제안된 방법을 이용하여 위와 같이 다양한 결과를 추론할 수 있는 발전시물레이션이 가능함을 보였으며, 이는 태양광발전원을 건설하고자하는 발전사업자가 태양광발전원이 계통에 연계되고 난후 계통의 신뢰도 및 총 발전비용, ELCC등 다양한 관점에서 그 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있어 투자계획이나 운영분석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 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] 유진수, 유권중, 이준신, "전세계 태양광 시장 동향 및 향후 전망", 전자공학회지 제 35권, 6호, 2008년 6월, pp. 646-655.

[4] 김수덕, "신재생에너지의 최근동향과 이슈" 2006년도 대한전기학회 전력기술부문회 전력경제연구회 춘계학술대회논문집 2006년5월.  
 [5] 오량, 박정제, 최재석, "풍력발전계통 고려한 신뢰도평가에 관한 기초연구", 2008년도 대한전기학회 전력기술부문회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 149-152, 2008년 5월 30일.  
 [6] 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.  
 [7] 박정제, 오량, 최재석, 문승일, "풍력발전기를 고려한 전력계통의 확률론적인 신뢰도 평가에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제57권, 9호, 2008년9월, pp. 1491~1499.  
 [8] 박정제, 오량, 최재석, 차준민, "풍력발전기의 확률론적 발전비용 절감기여도 평가" 대한전기학회논문지, 제57권9호, 2008년12월, pp.2153-2160.  
 [9] 박정제, 오량, 최재석, "태양광발전원을 고려한 전력계통의 신뢰도평가에 관한 기초연구", 2008년 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 19-21, 2008년 11월 7일~8일.  
 [10] 최재석, "확률론적 발전시물레이션을 위한 효율적인 엘고리즘", 고려대학교 공학박사학위 논문 1990, 7.  
 [11] 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.  
 [12] Roy Billinton and Dange Huang, "Aleatory and Epistemic Uncertainty Considerations in Power System Reliability Evaluation" PMAAPS2008, Puerto Rico, May 25-29, 2008.  
 [13] J. Choi, R. Billinton, M. Futuhi-Firuzabed, "Development of A Nodal Effective Load Model Considering Transmission System Element Unavailabilities", IEE. G.T&D, pp.79-89, Vol.152, No.1, Jan. 2005.  
 [14] 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.  
 [15] J.M. Michaelides, P.P. Votsis, "Energy analysis and solar energy development in Cyprus", Computing & Control Engineering Journal, Volume 2, Issue 5, Sept. 1991, pp.211 - 215.  
 [16] 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.

# 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



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

**부록: 태양광발전원의 출력특성식**

그림 부1은 태양광발전원의 출력에 영향력이 큰 태양광량과 온도의 변화에 따라 태양광발전원의 효율의 변화를 보여준다[9].

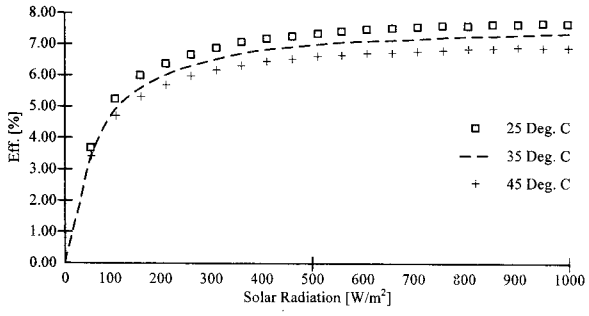


그림 부1 태양광량의 변화에 따른 태양광발전원의 효율특성 곡선

Fig. A1 The characteristic curve of PV efficiency varying solar radiation

그림 부1에서 알 수 있듯이 태양광발전원의 효율은 온도에 의해서 보다 태양광량에 의해 그 변화가 크게 나타난다. 태양광량이 0에서 어느 특정지점( $R_c$ )에 이르기까지 효율은 큰 폭으로 상승하다가 이후에는 그 상승의 폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 부2와 식 (부1)은 이를 근사화한 것이다. 일반적으로 태양광발전원의 효율은 태양광발전원의

출력/태양에너지(태양광량)로 나타낼 수 있으므로 태양광발전원의 출력은 태양광량과 효율의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉, 효율을 나타내는 근사식 (부1)에서 식 (부2)와 같이 태양광발전원의 출력식을 구할 수 있다[9],[16].

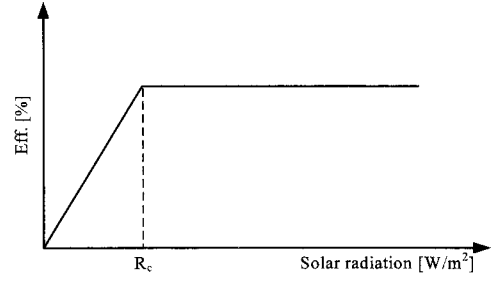


그림 부2 태양광량의 변화에 따른 근사화된 태양광발전원의 효율특성곡선

Fig. A2 The approximation of the characteristic curve of PV efficiency varying solar radiation

$$\begin{aligned}
 Eff_{pv}(G_{bi}) &= \frac{\eta_c}{R_c} G_{bi}, & 0 \leq G_{bi} < R_c \\
 &= \eta_c, & R_c \leq G_{bi}
 \end{aligned} \tag{부 1}$$

$$\begin{aligned}
 P_{bi}(G_{bi}) &= \frac{\eta_c}{R_c} (G_{bi}^2), & 0 \leq G_{bi} < R_c \\
 &= \eta_c G_{bi}, & R_c < G_{bi} \leq G_{std} \\
 &= P_{sn}, & G_{bi} > G_{std}
 \end{aligned} \tag{부 2}$$