

일사량 확률분포함수를 이용한 태양광 발전시스템 발전량 예측

이일룡* · 배인수* · 정창호* · 김진오* · 심헌**
*한양대학교 전기공학과 **주에스 에너지

Photovoltaic Generation System Output Forecasting using Irradiance Probability Distribution Function

Il-Ryong Lee* · In-Su Bae* · Chang-Ho Jung* · Jin-O Kim* · Hun Shim**
Dept. of EE, Hanyang University* S-energy**

Abstract - This paper suggests a methodology for calculation of photovoltaic(PV) generation system output using probability distribution function, PV array efficiency and PV system design parameters. Long term irradiance recorded for every hour of the day for 11 years were used. For goodness-fit test, several distribution functions are tested by Kolmogorov-Smirnov(K-S) test. And the calculated generation output is compared with that of CMS(Centered Monitoring System), which can monitoring PV generation output of each PV generation site.

1. 서 론

산업경제의 눈부신 발전으로 인한 전력수요 증가에 따른 발전설비의 공급예비율 부족 문제와 자원이 부족하여 에너지원의 대부분을 수입 화석 연료에 의존하고 있는 우리나라의 입장에서 에너지 자원의 안정적 공급을 바탕으로 지속적인 경제 성장을 이루기 위해서는 신·재생 에너지와 같은 대체 에너지의 개발이 주요 과제가 되고 있다. 지구환경 문제를 고려한 태양광 발전, 풍력발전 및 연료전지 개발과 같은 분산형 전원에 대한 평가를 하여 적극적으로 전력계통에 도입하고 보급시키려는 움직임이 고조되고 있다. 특히, 태양광은 무한청정 에너지 자원으로써 최근들어 우리나라에서도 그 설치 사례가 급격히 증가하고 있는 추세이다.

따라서, 본 논문에서는 태양광 발전시스템의 출력에 가장 영향을 많이 미치는 요인인 일사량과 태양전지 효율 및 시스템 설계 파라미터 등으로부터 일사량 확률밀도함수(PDF), 태양전지 변환효율 보정계수를 획득하여 태양광 발전시스템의 출력을 계산하였으며, 이 계산한 발전량을 중앙 모니터링 시스템(CMS: Centered Monitoring System)의 발전량 실측치와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 태양전지 어레이의 출력

각 시간대별 일사량에 대한 태양전지 어레이의 출력은 다음 식 (1)과 같다 [1].

$$P_{pv,ave} = \int P(S)f(S)dS \quad (1)$$

여기서, $P(S)$: 태양전지 어레이 출력
 $f(S)$: 확률밀도함수

또한 일사량에 따른 태양전지 어레이 효율 특성은 그림 1에 나타내었다.

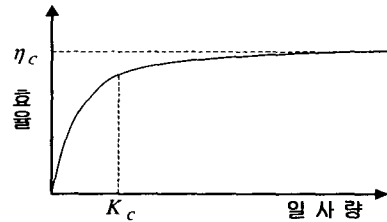


그림 1. 일사량에 따른 태양전지 어레이 변환효율

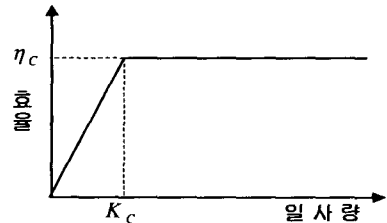


그림 2. 태양전지 어레이 효율 근사화

태양전지 어레이의 효율은 항상 일정한 값을 갖는 것이 아니라 일사량의 변화에 따라 발전효율도 변하는 물리적인 특성을 갖는다. 여기서, 변환효율은 단위일사량에 대한 태양전지 어레이의 출력전력의 비를 말한다. 그림 1에서 알 수 있듯이 특정 일사량지점(K_c)을 지나면 효율의 증가가 포화되는 특성을 보인다. 효율을 근사화 할 경우 그림 2에서처럼 일사량이 0에서 변곡점 K_c 까지 범위에서는 η_c/K_c 의 기울기를 가지는 일차함수로 표현될 수 있고 일사량이 K_c 이상일 경우에는 상수 η_c 로 표현될 수 있다.

태양전지 어레이의 출력전력(P_{PV})은 해당시간(τ)에서의 일사량(G_i)에 비례하기 때문에 앞에서 근사화한 효율과 함께 표현하면 해당시간의 일사량에 대한 출력 전력은 식 (2)-식 (3)과 같이 표현된다.

$$P_{PV}(\tau) = \frac{\eta_c}{K_c} (G_i)^2 \quad 0 < G_i < K_c \quad (2)$$

$$P_{PV}(\tau) = \eta_c G_i \quad G_i > K_c \quad (3)$$

결국 일사량 K_c 이하에서는 일사량의 제곱에 비례하여 태양전지 어레이의 정격출력이 결정되고, K_c 이상에서는 일사량에 비례하는 정격출력을 가진다 [2].

2.1.1 일사량 분포함수의 결정

본 논문의 연구수행을 위해 최근 11년간(1992-2002) 서울시 일사량 데이터를 사용하였으며, 일사량의 임의의

특성을 가장 잘 묘사하는 일사량 분포함수를 결정하기 위해 4개의 확률분포함수를 선택하고, 선택한 분포함수와 실제 일사량 데이터와의 적합도 평가(goodness-fit-test)를 매시간별로 수행하였다. 평가방법으로는 Kolmogorov-Smirnov(K-S) test를 이용하였다. 그림 3은 11월 9시 일사량분포의 히스토그램을 나타내고 있다. 표 1은 11월의 전형적인 날 오전 9시의 각 분포함수의 K-S Test 결과를 나타낸 것이다. K-S Test에서 유의수준은 1%로 했으며, 샘플의 크기는 340, 따라서 임계값 $D = 1.63/\sqrt{n} = 0.088$ 이 된다. 이 결과를 이용하여 각 시간대별로 적합도가 가장 우수한 분포함수를 결정하고, 그 함수들을 본 논문에 이용할 일사량 확률밀도 함수로 결정하였다 [3].

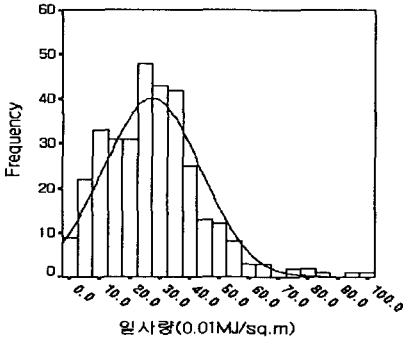


그림 3. 일사량분포 히스토그램과 정규곡선(11월09시)

표 1. 확률분포함수 K-S Test 결과

	Weibull	Laplace	IfGauss	Log-normal
7~8	-	-	-	-
8~9	0.082	0.068	0.150	0.119
9~10	0.065	0.086	0.127	0.139
10~11	0.079	0.077	0.211	0.239
11~12	0.081	0.069	0.191	0.200
12~13	0.072	0.096	0.181	0.185
13~14	0.079	0.095	0.182	0.195
14~15	0.077	0.065	0.129	0.133
15~16	0.073	0.054	0.122	0.125
16~17	0.071	0.077	0.114	0.134
17~18	-	-	-	-

K-S Test 결과에서 볼 수 있듯이, 본 논문에 사용될 확률밀도 함수는 Weibull과 Laplace분포함수이며 각각 식 (4) 및 식 (5)과 같이 주어진다.

$$f(r) = \frac{k}{c} \left(\frac{r}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{r}{c} \right)^k \right] \quad (4)$$

여기서, c : scale 파라미터
 k : shape 파라미터
 r : 시간대별 일사량

$$f(r) = \frac{1}{2} \lambda \cdot \exp(-\lambda r) \quad 0 < r < \infty \quad (5)$$

여기서, λ : Laplace 파라미터
 r : 시간대별 일사량

2.1.2 태양전지 변환효율 보정계수

태양전지 어레이 변환효율은 모듈표면의 오염정도, 태

양전지의 열화, 모듈온도, 어레이 회로의 불균형, 부하와 의 균형정도 등 외부상황의 영향에 따라 많은 변화를 보인다. 따라서 정확한 출력전력을 계산하기 위해서는 변환효율에 영향을 미치는 요소를 고려하여 변환효율을 보정해 줄 필요가 있다. 이를 태양전지 변환효율 보정계수 (K_p)라고 하고 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$K_p = K_{PD} \cdot K_{PT} \cdot K_{PA} \cdot K_{PM} \quad (6)$$

여기서, K_{PD} : 경시변화 보정계수

K_{PT} : 온도보정계수

K_{PA} : 어레이 회로 보정계수

K_{PM} : 어레이 부하정합 보정계수

경시변화 보정계수(K_{PD})는 모듈표면의 오염, 열화, 대기 중의 수분농도에 의해 입사광이 감소하는 정도를 평가한 것이지만, 지역에 따라 그 차이가 크다. 대부분지역은 깨끗한 주택지이므로 현저한 감소는 관측되지 않았다. 이러한 경우에는 일반적인 0.96-0.97 정도의 값을 이용한다 [4].

온도보정계수(K_{PT})는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$K_{PT} = 1 - \alpha_{P_{max}} \cdot (T_{CR} - T_S) \quad (7)$$

여기서, $\alpha_{P_{max}}$: 최대전력 P_{max} 의 온도보정계수($^{\circ}C$)

T_{CR} : 시스템의 운전상태를 대표하는 셀 온도($^{\circ}C$)

T_S : 표준상태의 셀 온도($^{\circ}C$)(=25)

어레이 회로 보정계수(K_{PA})는 어레이 회로 불균형 보정계수(K_{PAU})와 어레이 회로손실 보정계수(K_{PAL})로 구분된다.

$$K_{PAU} = 1 - 0.127 \times (\text{표준편차} / \text{표준편차평균})$$

$$K_{PAL} = 1 - (0.6 \times \text{정격시의 배선손실} + 1.0 \times \text{정격시다이오드손실률}) \quad (8)$$

여기서, K_{PAU} 는 모듈을 다수 직병렬로 결선하는 것에 의해 어레이 출력이 개개의 모듈의 출력결합보다 작게 되는 것을 평가하는 계수이고, K_{PAL} 은 직류회로에 발생하는 손실을 평가한 것이다.

어레이 부하정합보정계수(K_{PM})는 부하와의 균형으로 결정되는 어레이 전력의 동작점이 태양전지 어레이의 최적동작점에서 어느 정도 어긋나고 있는가를 나타내는 보정계수이다. 오차의 범위를 고려하여 시스템마다 구별하지 않고 일률적으로 0.89-0.91로 한다 [4].

2.2 태양전지 어레이 발전량 계산

태양광 발전시스템의 발전전력량은 식 (9)과 같이 계산된다.

$$P_{PV,ave} = P_{PV}(\tau) \cdot A \cdot Y_p \quad (kWh) \quad (9)$$

여기서, $P_{PV}(\tau)$: 태양전지 어레이 출력(kW)

A : 총 어레이 면적(m^2)

Y_p : 시스템 가동시간(hour)

식 (2)-(9)를 이용하면, 식 (10)에 의해 시간별 일사량에 따른 태양광 발전시스템의 전력량을 계산할 수 있다.

$$P_{system} = \int P(r_i)f(r_i)dr_i \quad (10)$$

3. 사례연구

그림 4는 지역별로 분산된 전국의 태양광 발전시스템에 대한 운전데이터를 인터넷을 통해 수집, 축적, 통합 관리하기 위해 현재 설치, 운영중인 중앙 감시 시스템(CMS)을 나타내고 있다.

표 2는 사례연구를 위한 현재 서울시 및 서울시 근교에 설치 운영되고 있는 3개의 태양광 발전시스템의 발전 용량(kWp)과 측정 파라미터를 나타낸다.

그림 5는 표 2의 3곳의 발전지역 중 어우학교 태양광 발전시스템의 실측데이터를 이용하여 일사량에 따른 태양전지 어레이 효율 특성을 나타낸 것이다. 그림 5와 같이 각 지역의 일사량에 따른 태양전지 어레이 특성곡선으로부터 η_c 와 K_c 를 알 수 있으며, K_c 값을 결정하기 위해 최소자승법을 이용하였다. 그림 6은 각 지역의 태양광 발전시스템의 발전량을 CMS를 설치하고 운전이 시작된 2003년 11월부터 현재 2004년 4월까지 6개월간의 CMS로부터 획득한 실측 발전량과 일사량 확률분포함수를 이용하여 계산한 발전량을 비교한 것이다.

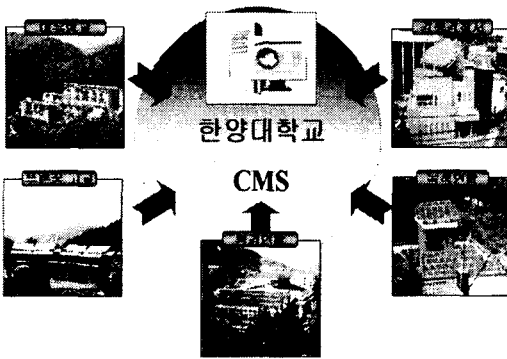


그림 4. 태양광 발전 중앙모니터링 시스템(CMS)

표 2. 각 지역 태양광 발전시스템 측정 파라미터

	kWp	η_c	$K_C(W/m^2)$	$A(m^2)$	K_p
어우학교	30	0.118	111.9	258.6	0.81
환경연합	15	0.116	124.6	194	0.78
녹색연합	3	0.116	119.9	38.8	0.76

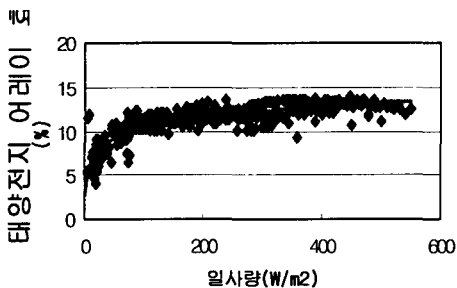


그림 5. 일사량에 따른 태양전지 어레이 효율

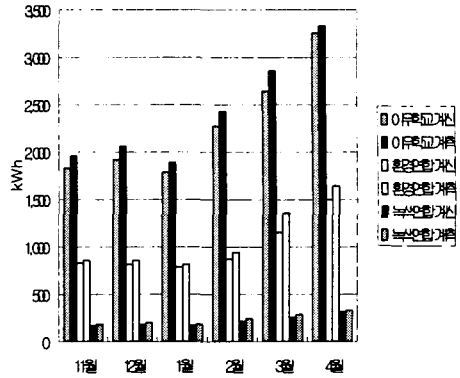


그림 6. 계산발전량과 계측발전량 비교

실측발전량과 계산된 발전량의 월별 오차율을 계산한 결과 약 2%~7%의 오차율을 보였으며, 보다 방대한 데이터를 분포함수에 적용한다면 보다 오차를 줄일 수 있을 것이다.

4. 결 론

화석연료의 고갈로 인하여 대체에너지의 개발이 본격 화됨에 따라 현재 우리나라는 태양광 발전시스템의 설치가 날로 증가할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 현재 태양광 발전시스템이 설치된 지역의 일사량 확률분포함수, 태양전지 효율, 시스템 설계 파라미터를 이용하여 해당 발전시스템의 발전량을 예측할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 소개한 방법을 이용하면 태양광 발전시스템 설계 시 단기간 또는 장기간동안 획득할 수 있는 발전량을 미리 예측할 수 있음은 물론 일사량 분포를 미리 조사하여 태양광 발전시스템의 설치지점을 결정하는데 유용하게 이용할 수 있다. 또한 일사량 이외에 주위온도를 함께 고려하여 발전량을 예측한다면, 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력연구원의 01-중-04 사업의 연구비에 의하여 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Bogdan S. Borowy, Ziyad M. Salam, "Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.9, No3, September 1994.
- [2] M. Shahidehpour, M. Marwali, "Maintenance scheduling in restructured power system", *Kluwer academic publishers norwell*, Massachusetts, pp.183-187, 2000.
- [3] Roy Billington, Ronald N.Allan, "Reliability evaluation of Engineering System", *PLENUM PRESS*, pp.205-208, 1992.
- [4] 黒川浩助 編: "太陽光発電システム 設計ガイドブック", 太陽光発電技術研究組合, pp.90-92, 1994.
- [5] Sheldon Ross, "A First Course in Probability", *Prentice hall, Inc.*, pp.248-250, 1998.