

온도와 풍속에 따른 태양광발전 효율 실증분석 연구

A Study on Solar Power Generation Efficiency Empirical Analysis according to Temperature and Wind speed

차 왕 철* · 박 정 호* · 조 옥 래* · 김 재 철†

(Wang-Cheol Cha · Jung-ho Park · Uk-rae Cho · Jae-Chul Kim)

Abstract - Factors that have influence on solar power generation are specified into three aspects such as meteorological, geographical factors as well as equipment installation. Meteorological factors influence the most among the three. Insolation, sunshine hours, and cloud directly influence on solar power generation, whereas temperature and wind speed have impacts on equipment installation. This paper provides explanation over temperature-wind speed equation by calculating influence of temperature and wind speed on equipment installation. In order to conduct a research, pyranometer, anemometer, air thermometer, module thermometer are installed in 2MWp solar power plant located in South Cholla province, so that real-time meteorological data and generating amount can be analyzed through monitoring system. Besides, if existing and new methods are applied together, accuracy of prediction for generating amount is improved.

Key Words : Solar power generation, Air temperature, Wind speed, Curve-fitting

1. 서 론

우리나라는 1960년대 초부터 추진했던 경제개발계획을 시작으로 국가경제 규모가 확대되었고 국민수준이 향상됨에 따라 에너지 소비량이 매년 급격히 증가하고 있다. 또한 국제 원유가격의 상승과 지구의 온난화 현상으로 인해, 에너지 절약을 통한 온실가스 감축의 필요성이 증대되고 있다. 그리고 필요한 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리로서는 에너지의 해외의존도를 낮출 수 있는 방안이 필요하며, 전 세계적으로 추진되고 있는 온실가스 감축정책을 수행하기 위해 신·재생에너지의 적극적인 개발과 보급 확대가 절실히 요구되고 있다. 특히, 원자력 및 화석연료의 대규모 발전소 건설이 어려운 현실을 감안하면 친환경적인 신·재생에너지의 개발이 더욱 필요한 실정이다.

신재생에너지 보급의 확대를 위하여 2012년부터 500MW 이상의 발전사업자들에게 일정비용 이상을 신재생에너지로 생산하도록 의무화하는 신재생에너지 의무할당제도(RPS)를 도입하여 시행하고 있다. 이로 인하여 신재생에너지의 보급이 크게 확대되었으며, 그중에서도 태양광발전은 눈에 띄게 증가하고 있다. 즉 태양광발전을 효율적으로 활용하여 최대 성능을 끌어내기 위한 다양한 연구가 필요한 실정이다.

태양광발전에 영향을 미치는 요소는 표 1과 같이 크게 기

상요소와 지리요소 그리고 설비요소로 구분할 수 있다. 여기서, 기상요소는 태양광발전에 직접적인 영향을 미치는 요소인 일사량, 일조시간, 운량과 태양전지 효율에 영향을 미치는 요소인 온도와 풍속으로 나눌 수 있다[1, 2].

표 1 태양광발전에 영향을 미치는 요소

Table 1 Factors that have influence on solar power generation

구분	태양광발전에 영향을 미치는 요소
기상 요소	태양광발전에 영향을 미치는 기상요소 (일사량, 일조시간, 운(雲)량 등)
	발전설비의 효율에 영향을 미치는 기상요소 (온도, 풍속 등)
지리 요소	태양광발전설비의 설치위치(위도 등)
	태양광발전설비의 설치높이(해발높이 등)
설비 요소	모듈의 설치형태(고정식, 고정가변식, 추적식)
	발전설비의 효율(변압기, 인버터, 모듈 등)
	선로손실 / 전압강하

일반적으로 여름철에는 모듈온도가 상승하여 발전효율이 저하되기 때문에 발전량이 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러나 기상청에서 제공하는 1988년부터 2007년까지의 20년 기상 자료를 분석해보면 여름철에는 봄철보다 일사량이 적다. 그리고 다른 계절에 비해 일조시간이 짧고 운(雲)량이 많다[3, 4]. 그림 1은 우리나라 월별 일사량과 일조시간, 운량을 표시한 그래프이다. 이렇듯 여름철 발전량 감소요인에는 모듈온도 상승에 따른 발전효율 저하와 일사량, 일조시간, 운량 등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 즉 복합적인 요인으로 인해 발생하는 태양광발전 효율 영향력을 분석하고, 이를 활용하여 최

* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2014년 10월 13일

수정일자 : 2014년 12월 1일

최종완료 : 2014년 12월 16일

대성능을 발휘할 수 있도록 설치 및 운영할 수 있는 방법이 필요하다.

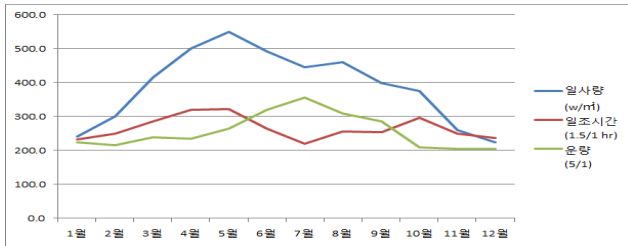


그림 1 우리나라 평균 월별 일사량, 일조시간, 운량
Fig. 1 Average insolation, sunshine hours, and amount of cloud per month in Korea

따라서 본 논문에서는 태양광발전설비의 효율에 영향을 미치는 요소인 온도와 풍속을 실험 데이터를 활용하여 분석하였으며, 두 요인이 태양광발전에 영향을 미치는 정도를 수식화하여 태양광발전 효율성을 분석하는 방법을 제안한다.

이를 위해 전라남도지역에 설치한 2,000kWp 태양광발전소에 대기온도계, 모듈온도계, 일사량계, 풍속계를 설치하여 모니터링시스템을 구축하여 실증 데이터를 분석하였다. 그리고 향후에 건설되는 발전소에 활용하기 위하여 실시간 기상데이터 및 발전량을 수집하였으며, 본 논문은 2014년 3월 27일부터 9월 30일까지 약 6개월간 수집한 데이터를 활용하였다. 수집한 데이터를 커브-피팅(Curve-fitting)법을 적용하여 각 요인에 따른 영향력을 분석하였다. 또한 제안한 효율성분석 방안을 적용하여 예측한 발전량을 계산하였으며, 기존의 방법과 비교하여 결과를 분석하였다.

2. 온도와 풍속에 따른 발전효율 분석

본 연구에 적용한 태양광발전소의 전경사진과 태양광발전소에 설치한 기상관측 장비 및 모니터링시스템을 그림 2와 그림 3에 나타내었다.



그림 2 태양광발전소 전경사진
Fig. 2 full picture of solar power plant

그림 3의 (a), (b), (c)는 발전소에 설치한 기상관측장비 사진이고, (d)는 실시간 발전량과 기상데이터를 수집하기 위한 모니터링 시스템이다. 데이터 수집은 시간별, 일별로 가능하



(a) 대기온도계 (b) 모듈온도계



(c) 일사량계 및 풍속계 (d) 모니터링 시스템

그림 3 태양광발전소에 설치한 기상관측장비 및 모니터링시스템
Fig. 3 Weather observation and monitoring system installed in solar power plant

며, 시간은 분단위, 시간위로 적용할 수 있도록 설계되어 있다.

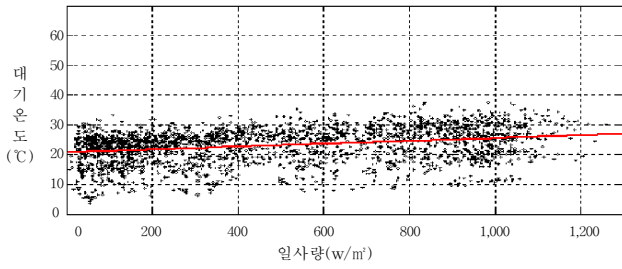
2.1 일사량에 따른 온도 및 발전량 분석

본 절에서는 태양광발전에 영향을 미치는 요소 중 온도와 풍속에 대해 분석하여 각 요소가 발전량에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 일사량계, 대기온도계 그리고 모듈온도계를 통해 각 요소 데이터를 획득하였으며, 커브-피팅 방법을 적용하여 일사량이 대기온도와 모듈온도 그리고 발전량에 미치는 영향을 그래프형태로 나타내었다.

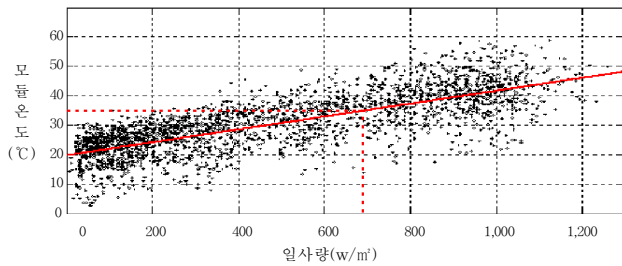
그림 4는 일사량에 따른 대기온도 및 모듈온도, 그리고 발전량의 분포를 나타낸 그래프이다. (a)는 일사량에 따른 대기온도 분포이고, (b)는 일사량에 따른 모듈온도 분포이다. 그리고 (c)는 일사량에 따른 발전량 분포이다. 그림 4의 결과에서 일사량이 증가함에 따라 대기온도와 모듈온도 그리고 발전량이 동시에 증가하는 것을 알 수 있다. 일사량이 증가함에 따라 대기온도는 미약하게 증가하지만 모듈온도는 일사량에 따라 온도변화가 크게 나타난다. 그리고 그림 4의 (c)에서 일사량과 발전량의 분포를 보면 일사량이 약 700w/m² 이상부터 발전량의 분포가 점점 폭이 넓어진다. 이는 700w/m²까지는 일사량이 증가함에 따라 모듈온도가 상승해도 발전에 영향을 미치는 온도까지는 도달하지 못하지만 700w/m² 이상에서는 모듈온도가 발전량에 영향을 미치는 온도에 도달하게 되어 이후부터는 발전량에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그림 4의 (b)에서 일사량에 따른 모듈온도 분포에서 일사량이 700w/m²일 때의 모듈온도는 약 35℃ 정도이다.

2.2 모듈온도에 따른 발전량 분석

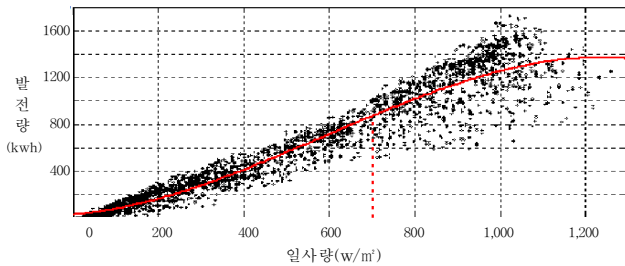
일사량이 증가함에 따라 발전량이 증가하지만 모듈온도 또한 상승하게 됨으로서 발전설비의 효율에 영향을 주게 된다. 이를 분석하기 위해 모듈온도에 따른 일사량과 발전량 분포도를 그림 5에 나타내었다.



(a) 일사량 - 대기온도 분포



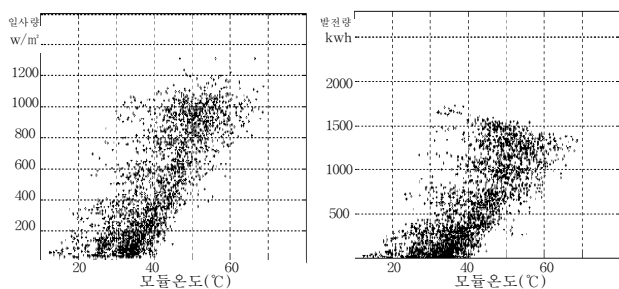
(b) 일사량 - 모듈온도 분포



(c) 일사량 - 발전량 분포

그림 4 일사량에 따른 온도 및 발전량 분포

Fig. 4 Distribution of temperature and generating amount according to insolation



(a) 모듈온도 - 일사량 분포 (b) 모듈온도 - 발전량 분포

그림 5 모듈온도에 따른 일사량 및 발전량 분포

Fig. 5 Distribution of insolation and generating amount according to module temperature

그림 5의 (a)는 모듈온도와 일사량의 분포를 나타낸 그림으로 일사량이 증가하면서 모듈온도가 증가하여 모듈온도가 약 40°C 이후에 최대일사량이 분포해 있다. (b)는 모듈온도와 발전량의 분포로 모듈온도가 30~40°C 사이에서 최대 발전량이 분포되어있고, 그 이후에는 최대 발전량 분포가 오히

려 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 모듈온도가 상승하게 되면 모듈의 효율이 저하되기 때문에 발전량이 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 일사량에 따른 발전량과 모듈온도의 관계를 종합하여 분석하면 태양광발전에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 일사량이다. 그리고 모듈온도는 발전설비의 효율에 영향을 미치게 되는데, 모듈온도가 약 35°C 이후부터 발전효율에 영향을 미치게 되고, 이때의 일사량은 약 700w/m²인 것으로 분석되었다.

2.3 모듈온도에 영향을 미치는 요소

2.2절에서 나타냈듯이 모듈온도가 발전량에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4의 (b)에서 일사량이 모듈온도 상승에 가장 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있지만 일사량에 완전 비례하여 모듈온도가 상승하지는 않는다. 이는 다른 기상요인에 따라서 변화할 수 있다는 것이다. 따라서 실제로 모듈온도에 영향을 미치는 다양한 요인을 분석하여 그 요소들이 발전량에 어떠한 영향을 주는지에 대한 분석이 필요하다. 본 절에서는 대기온도, 풍속에 따른 모듈온도의 변화 형태를 분석하였다. 일사량과 유사하게 대기온도 또한 그림 6에서와 같이 모듈온도 상승에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

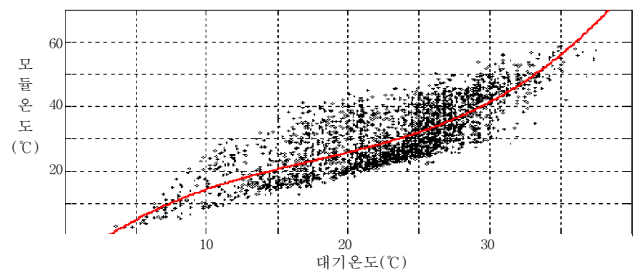


그림 6 대기온도에 따른 모듈온도 분포

Fig. 6 Distribution of module temperature according to air temperature

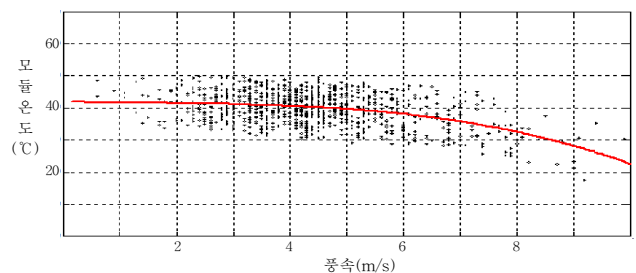


그림 7 풍속에 따른 모듈온도 분포

Fig. 7 Distribution of module temperature according to wind speed

그리고 풍속이 증가함에 따라 모듈온도는 감소하는 형태를 보인다. 그림 7은 일사량이 700w/m² 이상에서 풍속에 따른 모듈온도 분포를 나타내고 있다. 따라서 일사량과 대기온도 그리고 풍속이 모듈온도에 영향을 미치는 것을 확인할

수 있으며, 일사량과 대기온도의 상승은 모듈온도를 상승하게 하고 풍속의 증가는 모듈온도를 낮춰주는 역할을 한다.

이는 일사량과 대기온도 상승이 발전량을 증가시키지만, 모듈온도 또한 같이 높아지는 형태에서 어느 정도 이상으로 모듈온도가 상승하게 되면 발전효율이 떨어지게 된다. 여기서 풍속이 증가하게 되면 모듈온도를 낮춰주는 효과로 인해 최적의 발전효율을 나타내는 형태를 보인다.

2.4 대기온도와 풍속에 따른 발전량 분석

발전량에 영향을 미치는 일사량 700w/m² 이상에서 대기온도와 풍속에 따른 발전량을 분석하였다.

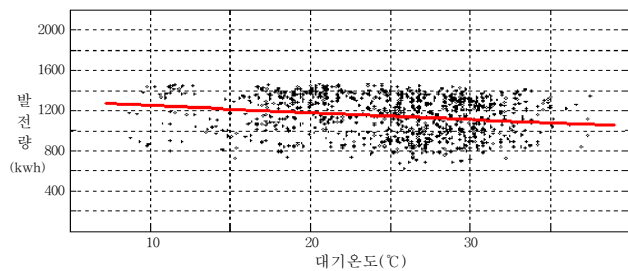


그림 8 대기온도에 따른 발전량 분포
Fig. 8 Distribution of generating amount according to air temperature

그림 8은 대기온도가 증가함에 따라 발전량이 감소하는 것을 나타내고 있으며 그림 9에서는 풍속이 증가할수록 발전량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 대기온도가 모듈온도에 영향을 주기 때문에 어느 정도 이상의 온도에서는 모듈의 발전효율이 저하되기 때문이다. 풍속은 그 반대로 모듈온도를 낮춰 효율을 상승시키는 작용을 하는 것을 알 수 있다.

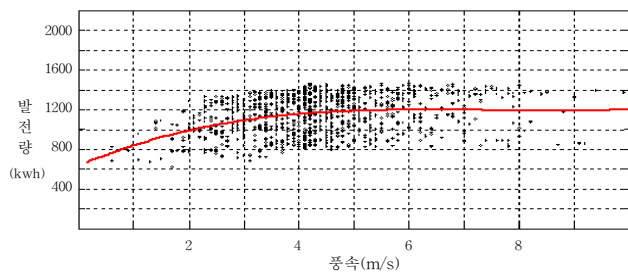


그림 9 풍속에 따른 발전량 분포
Fig. 9 Distribution of generating amount according to wind speed

3. 발전영향요소 방정식 설계

본 장에서는 2장에서 분석한 자료를 활용하여 온도와 풍속이 태양광발전시스템의 효율에 미치는 영향을 수식화하는 방안을 제안한다. 또한 설계된 방정식을 적용하여 특정 지

역의 발전량을 계산할 수 있는 방법을 설계하였다. 수식화를 위해 커브-피팅 방법을 활용하였으며 다항식 형태의 수식을 유도하였다. 이를 위해 MATLAB의 cftool을 활용하였으며, 그림 10에 그 결과를 나타내었다.

2.4절에서 적용한 전남지역 발전소에서 일사량이 700w/m² 이상일 때의 대기온도와 풍속을 1시간 간격으로 평균한 데이터를 바탕으로 하여 3차원 커브-피팅한 결과 그래프이다. h축의 값은 대기온도와 풍속에 따른 발전효율지수로 적용한 식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$h_{tem-win} = \frac{b}{a} \tag{1}$$

여기서, a는 전체 데이터의 1시간 발전량의 평균값(kwh)이고, b는 1시간 발전량(kwh)이다.

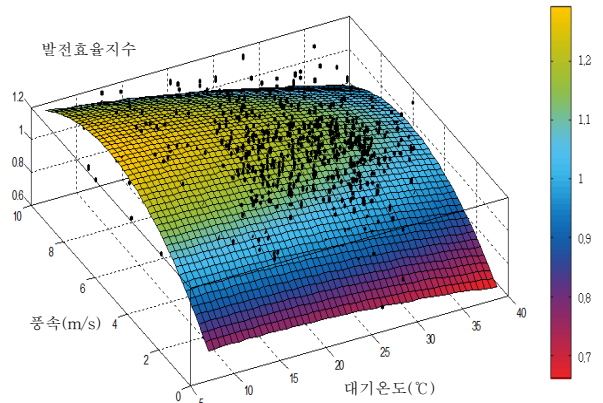


그림 10 온도와 풍속에 따른 발전량 커브-피팅 그래프
Fig. 10 Curve-fitting graph for generating amount based on temperature and wind speed

그림 10의 결과를 적용하여 다항식형태의 온도-풍속계수 방정식을 도출하면, 식 (2)와 같다.

$$h(x, y) = 742.9 + 176.5x + 3.562y - 13.14x^2 - 0.7466xy - 0.151y^2 \tag{2}$$

여기서, x는 대기온도이고, y는 풍속이다. 약 95% 정도의 Confidence bounds를 적용하였으며 RMSE(Root Mean Square Error) 값은 0.1802이다.

그림 10에서 보이듯이 대기온도가 증가하면 발전효율이 낮아지고 풍속이 증가하면 발전효율이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

4. 발전량 예측 결과 분석

본 장에서는 제안한 온도-풍속계수 방정식을 적용한 경우의 발전량 예측 결과의 성능을 확인하기 위하여 기존의 일사량에 의한 발전량 계산 방법과 비교분석하였다. 일사량만을 적용하는 일반적인 발전량 계산은 식 (3)과 같다.

$$E = S \times P_{out} \times k \quad (3)$$

여기서, S 는 일사량($kwh/m^2/day$)이며, P_{out} 은 태양광발전소 설비용량(kw_p/m^2)이다. 그리고 k 는 설비지수로 인버터, 모듈, 변압기 등의 효율을 의미한다.

본 논문에서 제안한 방법은 식 (3)에 식 (2)를 적용한 방정식으로 식 (4)와 같다.

$$E_N = S \times h(x, y) \times P_{out} \times k \quad (4)$$

비교 분석을 위하여 기상청에서 제공하는 2011년 일사량과 대기온도 및 풍속 데이터와 같은 해 전국 10개 지역의 태양광발전소에서 측정된 발전량을 비교하여 결과를 그림 11에 나타내었다.

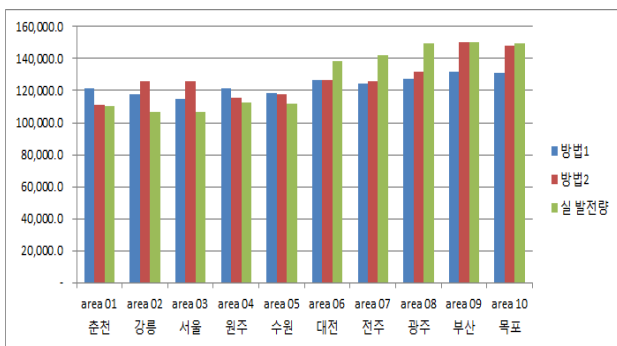


그림 11 제안한 모델 결과 그래프
Fig. 11 Prediction results using proposed model

그림 11에서 방법 1은 일반적인 태양광발전량 계산방법 [5-10]으로 식 (3)을 적용하여 계산된 발전량이고, 방법 2는 본 논문에서 제안한 온도-풍속계수 방정식을 적용한 방법으로 식 (4)를 적용한 발전량이다. 설비용량은 $100kW_p$ 로 하였고 설비지수 k 는 0.9로 설정하였으며 운영일수는 1년을 적용한 결과값이다. 각 방법에 따른 RMSE값과 평균오차율은 표 2와 같다.

그림 11에서 강릉과 서울지역은 제안한 방법이 기존방법보다 오차가 크게 나타났다. 이는 발전소가 위치한 지역의 위도 및 해발높이 등의 지리요소와 태양전지 모듈, 인버터, 변압기 등의 효율과 모듈의 경사각 등의 설비요소가 종합적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 전 지역을 종합하면 방법 1은 실제 발전량과 비교하여 약 8%정도의 오차를 보였고, 방법 2는 6%정도의 오차를 보였다. 즉, 온도-풍속계수를 이용하여 오차를 개선할 수 있음을 확인하였다. 결과에서 확인한 바와 같이 본 논문에서 제안한 온도-풍속계수를 태양광발전량 예측에 적용하게 되면 일반적인 일사량만을 적용한 계산 방법보다 더 정확한 발전량 예측이 가능하다. 이는 본 논문에서 제안한 온도-풍속계수를 태양광발전소 부지선정과 경제성 분석에 적용이 가능하다는 것을 의미한다.

그러나 본 논문에 적용한 데이터는 데이터 수집 기간이 약 6개월로 각 요인의 영향력을 정밀하게 분석하기에는 부

표 2 RMSE와 결과 오차율

Table 2 RMSE value and resulting error rate

발전량 계산 방법	RMSE	평균오차율(%)
방법 1	12714.87	7.95
방법 2	10817.16	6.03

족한 부분이 있다. 하지만 각 요인간의 영향성을 분석할 수 있는 방법을 제시하였으며, 그 결과를 발전량 계산에 적용할 경우, 기존 방법보다 정확한 성능을 발휘하는 것을 확인하였다. 향후, 태양광 발전에 영향을 미치는 다양한 기상요소와 위치에 따라 발생하는 지리요소 그리고 설비요소에 따른 발전효율 분석방법에 본 논문에서 제안한 온도-풍속계수를 함께 적용하면 더욱 정확한 발전효율 예측이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 태양광발전소가 설치된 지역의 온도와 풍속에 따른 발전설비의 효율을 실증 데이터를 분석하여 온도-풍속계수 방정식을 제안하였다. 실증을 위하여 해남지역 2,000kW_p 태양광발전소에 설치한 기상관측 장비와 모니터링 시스템을 통해 실시간으로 취득한 발전량과 일사량, 풍속, 대기온도, 모듈온도의 1시간 간격 평균 데이터를 커브피팅 알고리즘에 적용하여 대기온도와 풍속에 따른 발전효율지수인 온도-풍속계수 방정식을 도출하였다. 그리고 이 방정식을 적용하여 발전량 예측이 가능한 방법을 제안하였으며, 비교분석을 통해 제안한 방법이 기존의 방법에 비해 정확한 예측 성능을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 온도-풍속계수 방정식을 이용하게 되면 태양광발전소 건설시 보다 정확한 발전량 예측으로 경제성 분석에 도움을 줄 것이다.

향후에는 더욱 장기간의 발전 및 기상데이터를 활용하여 태양광발전에 영향을 미치는 일사량, 일조시간 운(雲)량의 기상요소와 지리요소, 설비요소를 종합한 발전량 예측모델을 설계할 수 있을 것이다.

References

- [1] Wang-Cheol Cha, Joung-Ho Park, Uk-Rae Cho, Jae-Cheol Kim, "A Study on Prediction of Photovoltaic Generation Amount through Utilizing Geography, Terrain, Weather Data", KIEE Annual Spring Conference 2014, pp 211-212, 2014.5
- [2] Wang-cheol Cha, Uk-rae Cho, Joung-ho Park, Jae-Cheol Kim, "A Study on Prediction of Photovoltaic Generation Efficiency through Utilizing Quantity of Solar Radiation Data", KIEE Summer Conference 2014, pp 1114-1115, 2014.7
- [3] Korea Meteorological Administration Seoul, Republic of Korea, 1981~2010 Climatological normals of Korea, 2011.
- [4] Korea Meteorological Administration Seoul, Republic

of Korea, Weather resource analysis report for optimal use of solar energy, 2008. 12. 3.

- [5] Kim, Dong Su, Shin, U Cheol, Yoon, Jong Ho, "Annual energy yield prediction of building added PV system depending on the installation angle and in Korea," KIEAE Conference 2014, Vol 4, No. 1, pp 67-74, 2014. 2.
- [6] Ju Jai-Wook, Kim Han-Soo, Oh Se-Jin, Lee Min-Suk, Choi Jeong-Min, "A Study on the Difference of Regional Electricity and Economic Comparative Valuation of the Photovoltaic System," KIAEBS Annual Spring Conference 2008, pp 137-140, 2008. 4.
- [7] A. Prastawa, R. Dalimi, "New Approach on Renewable Energy Solar Power Prediction in indonesia based on Artificial Neural Network technique: Southern region of Sulawesi island study case," 2013 International Conference on Quality in Research, pp 166-169, 2013. 6.
- [8] Nian Zhang, Behera, P.K "Solar radiation prediction based on recurrent neural networks trained by Levenberg-Marquardt backpropagation learning algorithm" Published in: Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES Date of Conference: 16-20 Jan. 2012 Page(s):1 - 7
- [9] Nian Zhang, Behera P.K, Williams C "Solar radiation prediction based on particle swarm optimization and evolutionary algorithm using recurrent neural networks" Published in: Systems Conference (SysCon), 2013 IEEE International Date of Conference: 15-18 April 2013 Page(s):280 - 286
- [10] Srivastava, S, Bhardwaj, S, Sastri, O.S "A novel hybrid model for solar radiation prediction" Published in: Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM), 2012 International Conference on Date of Conference: 13-15 Dec. 2012 Page(s):243 - 248

저 자 소 개



차 왕 철 (車 旺 哲)

1969년 4월 29일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료.
1995년~현재 국방부 근무
E-mail : chalsking@hanmail.net



박 정 호 (朴 廷 浩)

1968년 3월 9일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료.
1992년~현재 한국전기안전공사 근무
E-mail : pjh051i@kesco.or.kr



조 옥 래 (趙 昱 來)

1972년 6월 11일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 2000년~현재 한전KDN 근무
E-mail : ukrae@kdn.com



김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사) 현재 숭실대학교 전기공학과 교수.
E-mail : jckim@ssu.ac.kr