

태양광전원의 성능향상을 위한 상태진단 알고리즘 개발

최성식¹, 김태연¹, 박재범¹, 김병기¹, 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교 전기전자통신공학부

Development of State Diagnosis Algorithm for Performance Improvement of PV System

Sungsik Choi¹, Taeyoun Kim¹, Jaebeom Park¹, Byungki Kim¹ and Daeseok Rho^{1*}

¹Korea University of Technology and Education, Electrical Engineering

요 약 환경오염과 에너지위기 문제를 해결하기 위하여 세계적으로 태양광전원의 설치가 매년 증가하고 있다. 하지만, 설치된 태양광모듈은 경년열화로 인한 성능저하와 운용상의 다양한 장애요소로 발전량 손실이 발생하여, 태양광 모듈의 효율적인 운용을 위한 발전량예측과 상태진단 기술이 요구되고 있다. 기존의 발전량 예측 방법은 많은 파라미터를 고려해야하기 때문에 계산이 복잡하며, 표준시험 조건의 모듈 특성데이터를 사용하기 때문에 오차가 크게 발생한다. 따라서 본 논문에서는 태양광모듈에서 발생하고 있는 문제점을 분석하고 이에 대한 대책을 제시하기 위하여, 선형회귀분석법을 이용한 발전량 예측 알고리즘과 태양광모듈의 상태를 진단하는 알고리즘을 제안하였다. 또한, 이를 바탕으로 태양광모듈의 상태진단 평가시스템을 구현하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 기존의 방법에 비하여 제안한 방법이 계산하기 편리하고 예측 오차도 감소함을 확인하였으며, 이상모듈의 상태와 위치를 신속하게 파악할 수 있어, 태양광모듈의 운용효율 향상에 유용함을 확인하였다.

Abstract The installation of PV system to the power distribution system is being increased as one of solutions for environmental pollution and energy crisis. Because the output efficiency of PV system is getting decreased because of the aging phenomenon and several operation obstacles, the technology development of output prediction and state diagnosis of PV modules are required in order to improve operation performance of PV modules. The conventional methods for output prediction by considering various parameters and standard test condition values of PV modules may have difficult and complex computation procedure and also their prediction values may produce large error. To overcome these problems, this paper proposes an optimal prediction algorithm and state diagnosis algorithm of PV modules by using least square methods of linear regression analysis. In addition, this paper presents a state diagnosis evaluation system of PV modules based on the proposed optimal algorithms of PV modules. From the simulation results of proposed evaluation system, it is confirmed that the proposed algorithms is a practical tool for state diagnosis of PV modules.

Key Words : PV module, Aging phenomenon, Least square method, Output prediction algorithm, State diagnosis algorithm

1. 서 론

지구 규모적인 환경오염과 에너지 부족 문제를 해결하기 위하여, 태양광전원과 풍력발전 등의 신재생에너지 사업이 정부 주도하에 활발히 추진되고 있다. 우리나라에서

도 녹색성장 정책에 의하여 2030년까지 신재생에너지 전원의 비중을 11%까지 확대하는 정책이 적극적으로 추진되고 있어, 태양광전원의 설치도 매년 증가하고 있는 실정이다. 하지만 태양광모듈은 경년열화와 운용상의 다양한 장애요소에 의한 성능저하로 막대한 발전량 손실이

*Corresponding Author : Daeseok Rho(Korea Univ. of Technology and Education.)

Tel: +82-10-2306-2213 email: dsrho@kut.ac.kr

Received November 19, 2013 Revised January 23, 2014 Accepted February 5, 2014

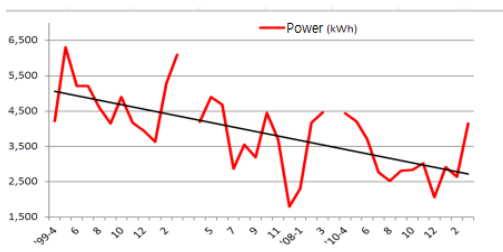
발생하여, 태양광모듈의 성능향상을 위한 발전량 예측기술과 이상모듈의 진단기술이 요구되고 있다[1-4].

기존의 태양광전원 유지보수는 전체 시스템의 인버터 출력만 계속(발전량)하고, 웹캠에 의한 단순 현장 모니터링만하고 있어, 운전 중 이상모듈의 상태(출력저하, 열화, 파손 등)와 위치 파악이 어려운 실정이다. 또한, 기존의 태양광모듈의 발전량 예측기술로는 AMPP(Approximate maximum power point), FFv(Variable fill factor with constant series resistance), Osterwald's 방법 등이 있지만, 온도, 일사량, 개방전압, 단락전류, 직렬저항 등 많은 파라미터를 고려해야하기 때문에 계산이 복잡하며, 표준 시험 조건의 모듈 특성데이터를 사용하기 때문에 오차가 크게 발생한다[5,6].

따라서 본 논문에서는 태양광모듈에서 발생하고 있는 문제점을 분석하고 이에 대한 대책을 제시하기 위하여, 선형회귀분석법을 이용한 발전량 예측 알고리즘과 태양광모듈의 상태를 진단하는 알고리즘을 제안하였다[7]. 또한, 이를 바탕으로 태양광모듈의 상태진단 평가시스템을 구현하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 기존의 방법에 비하여 제안한 방법이 계산하기 편리하고 예측 오차도 감소함을 확인하였으며, 상태진단 평가시스템으로 이상모듈의 상태와 위치를 신속하게 파악할 수 있어, 태양광모듈의 운용효율 향상에 유용함을 확인하였다[8,9].

2. 태양광모듈의 문제점 분석

태양광모듈은 20년 이상 반영구적으로 사용이 가능하지만, 외부환경에 노출되면서 경년열화와 운용상의 다양한 장애요소에 의한 성능저하로 막대한 발전량 손실이 발생하고 있다. Fig. 1과 Table 1은 한전전력연구원의 보고서에서 제시한 50kW급 태양광전원의 경년열화 시험결과 분석데이터이다. 따라서 국내 태양광모듈의 경년열화에 의한 출력감소는 설치 후 11년이 경과하면 초기발전량 대비 약 34%가 발생하여, 매년 기준 3.7% 정도씩 감소하고 있음을 알 수 있다[10].



[Fig. 1] Result of aged deterioration experiment

[Table 1] Cumulative Loss for aged deterioration(100%)

Annual	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Cumulative loss
Remains	96.3	92.7	89.3	86.0	82.8	79.7	76.8	73.9	71.2	68.5	66.0	-
Loss	3.7	7.3	10.7	14.0	17.2	20.3	23.2	26.1	28.8	31.5	34.0	216.8

3. 태양광모듈의 상태진단 알고리즘

3.1 기존의 발전량 예측 알고리즘

기존의 태양광모듈의 발전량 예측 방법은 AMPP, FFv, Osterwald's 등이 있다. 그중 많이 사용되는 AMPP의 발전량 예측 방법은 식 (1)과 식 (2)와 같이 기후조건에 따른 모듈의 단락전류(Isc)와 개방전압(Voc)을 계산하여 구한다. 여기서, 단락전류는 일사량과 표준시험 조건에서의 단락전류를 이용해서 계산되고, 개방전압은 모듈의 온도특성과 표준시험 조건에서의 개방전압으로 구해진다. 식 (1)-(4)에서 산출한 각 계산 값을 식 (5)와 식 (6)에 대입하면 모듈의 최대전류(I_m)와 최대전압(V_m)을 계산할 수 있고, 최대전압과 최대전류를 이용하여 식 (7)과 같이 발전량 예측치를 구할 수 있다.

$$I_{sc} = \frac{G_t}{G_t^*} \times I_{sc}^* \quad (1)$$

$$V_{oc} = V_{oc}^* - \beta \times (T_c - 25) \quad (2)$$

$$a = v_{oc} + 1 - 2 \times v_{oc} \times r_s \quad (3)$$

$$b = \frac{a}{1+a} \quad (4)$$

$$I_M = I_{sc} \times (1 - a^{-b}) \quad (5)$$

$$V_M = V_{oc} \times \left[1 - \frac{b}{v_{oc}} \times \ln a - r_s \times (1 - a^{-b}) \right] \quad (6)$$

$$P_{max} = V_M \times I_M \quad (7)$$

여기서, G_t : 측정된 일사량

G_t^* : STC조건에서의 일사량

I_{sc}^* : STC조건에서의 단락전류

V_{oc}^* : STC조건에서의 개방전압

β : 온도에 따른 개방전압계수

T_c : 모듈 후면 온도

v_{oc} : 일반화 개방전압

r_s : 직렬저항

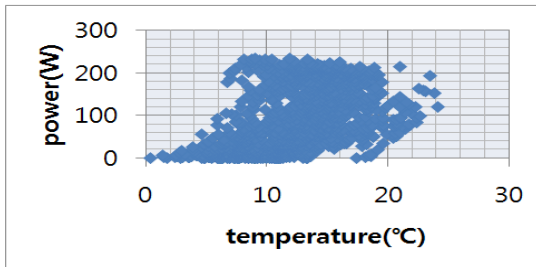
3.2 선형회귀분석법을 이용한 제안 알고리즘

기존의 발전량 예측방법은 상기에서 설명한 바와 같이 온도, 일사량, 개방전압, 단락전류, 직렬저항 등 많은 파라미터를 고려해야하고, 표준시험 조건의 모듈 특성데이

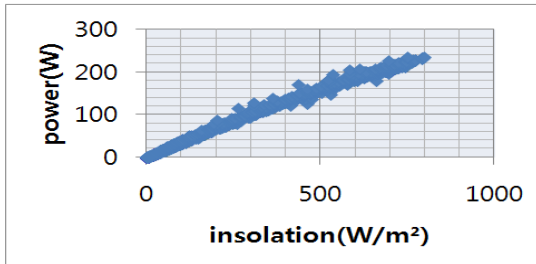
터를 사용하기 때문에 오차가 크게 발생 할 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 오차를 감소시키기 위하여, 실제 출력되고 있는 태양광모듈의 측정데이터와 기 후조건(온도, 일사량)을 사용하여 서로의 상관관계를 도출하였고, 이 상관관계를 통계적인 수법인 선형회귀분석법을 도입하여 태양광모듈의 발전량 예측 식을 제시하였다.

3.2.1 상관관계 분석

온도와 일사량에 따른 발전량의 상관관계를 분석하기 위해서 실제사이트에서 15분 간격으로 측정된 4월 한 달 동안의 데이터를 분석하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 모듈 후면 온도에 따른 모듈의 발전량과 경사일사량에 따른 모듈의 발전량을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 온도와 발전량은 서로 큰 상관관계를 나타내지 않았지만, 온도가 높을 때 발전량의 변동성이 작고 온도가 낮을 때는 변동성이 크다는 사실을 알 수 있다. 또한, 제조사에서 제공하는 모듈의 온도 특성을 통해 일사량 조건이 일정할 때 온도 상승에 따라 발전량이 감소하는 것을 알 수 있다[11]. Fig. 3의 그래프를 통하여 일사량과 발전량은 강한 상관관계를 가지며, 일사량증가에 따라 발전량이 증가하는 것을 알 수 있다.



[Fig. 2] Power of PV module with temperature



[Fig. 3] Power of PV module with insolation

3.2.2 정식화

위의 상관관계 분석에 위하면 온도와 발전량의 관계는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 예측치의 정확도를 향

상하기 위하여 시간 t에서 측정된 온도(T_t)와 온도효율계수 γ 를 고려하여 온도에 따른 발전량 예측치(P_t^*)를 구할 수 있다.

$$P_t^* = P_t + \gamma(T_t - 25) \quad (8)$$

여기서, P_t^* : 온도가보정된 출력량 예측치
 P_t : 모듈의 출력량
 γ : 온도에 따른 모듈의 전력계수
 T_t : 모듈의 후면온도

온도와 일사량을 고려한 발전량 예측치를 구하기 위하여 식 (8)을 이용해 산출한 출력량 예측치와 시간 t에서 측정된 일사량을 이차선형회귀분석 식으로 나타내면 식 (9)와 같다. 즉, 일사량에 따른 모듈의 선형계수 α, β 를 도출하면, 시간 t에서 측정된 일사량만 이용하여 온도까지 고려한 발전량 예측치를 쉽게 구할 수 있다.

$$P_t^* = \alpha X_t^2 + \beta X_t + e_t \quad (9)$$

여기서, P_t^* : 온도가보정된 발전량 예측치
 X_t : 일사량
 α, β : 선형계수
 e_t : 오차

발전량 예측치의 정확도를 보정하기 위하여 최소자승법 개념을 이용해 오차가 최소가 되도록 식 (9)의 양변을 제곱하여 나타내면 식 (10)과 같다.

$$S = \sum (P_t^* - \alpha X_t^2 - \beta X_t)^2 = \sum e_t^2 \quad (10)$$

선형계수 α, β 를 구하기 위해 식 (10)을 α, β 에 대해 각각 편미분하면 식 (11)과 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = \sum (\alpha X_t^4 + \beta X_t^3 - P_t^* X_t^2) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = \sum (\alpha X_t^3 + \beta X_t^2 - P_t^* X_t) = 0 \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)를 이용하여 모듈의 선형계수인 α, β 를 구하면 다음과 같다.

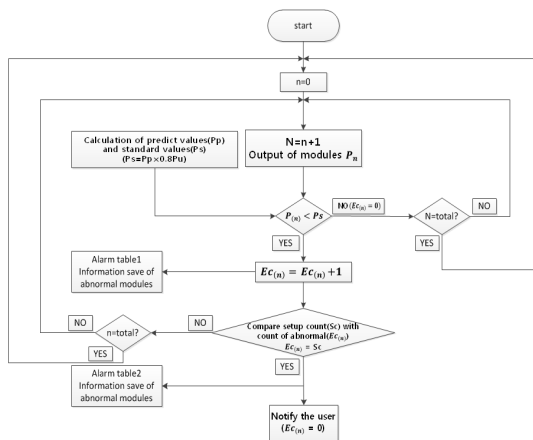
$$\alpha = \frac{\sum P_t^* X_t^2 \sum X_t^2 + \sum (P_t^* X_t) \sum X_t^3}{(\sum X_t^3)^2 - \sum X_t^4 \sum X_t^2} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\sum X_t^4 (\sum P_t^* X_t^2 \sum X_t^2 + \sum P_t^* X_t \sum X_t^3)}{\sum X_t^3 ((\sum X_t^3)^2 - \sum X_t^4 \sum X_t^2)}$$

$$- \frac{\sum P_t^* X_t^2}{\sum X_t^3} \quad (14)$$

3.3 태양광모듈의 상태진단 알고리즘

앞에서 제시한 발전량 예측 알고리즘을 사용하여 각 모듈의 상태를 진단하는 절차를 나타내면 Fig. 4와 같다. 이 그림과 같이 먼저 선형회귀분석법을 사용하여 발전량 예측치(Pp)를 산출하고, 이 예측치 크기의 0.8pu를 모듈의 이상상태 판단 기준치(Ps)로 설정한다. 이 기준치와 실제 출력되고 있는 각 모듈의 측정치($P_{(n)}$)를 비교하여, $P_{(n)}$ 이 Ps보다 큰 경우에는 정상적인 출력을 나타내므로 정상모듈로 판정한다. 한편, $P_{(n)}$ 이 Ps보다 작을 경우에는 비정상적인상태를 나타내므로 비정상모듈로 임시 판정하여 판정횟수($Ec_{(n)}$)를 누적시키고, 경고테이블 1에 비정상모듈로 저장한다. 상기에서 설명한 과정을 반복하여, 비정상 상태로 임시 판정된 해당 모듈의 판정횟수가 연속적으로 일정횟수(Sc , 여기에서는 3회로 설정함)를 초과하면 최종적으로 비정상모듈로 판정하며, 경고테이블 2에 저장하고 관리자에게도 통보하도록 한다. 또한, 구름, 그림자의 영향 등으로 일시적으로 낮은 발전량이 출력되는 정상모듈이 비정상모듈로 판정되는 경우를 피하기 위하여, 일정시간 후에 정상적인 값으로 판단되면 판정횟수($Ec_{(n)}$)를 초기화 한다.



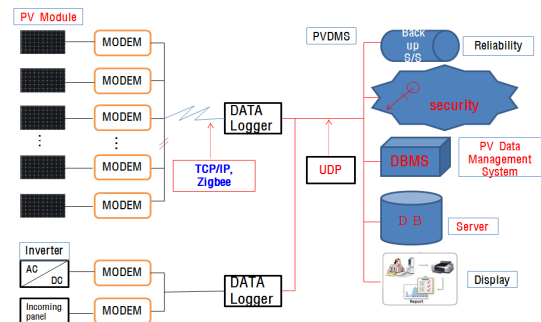
[Fig. 4] Flowchart of state diagnosis for PV module

4. 상태진단 평가시스템 구현

4.1 상태진단 평가시스템의 하드웨어 구성

Fig. 5는 본 연구에서 제시한 알고리즘을 바탕으로 구현한 태양광전원용 상태진단 평가시스템을 나타낸 것이다. 각 모듈의 데이터(전압, 전류, 온도)는 센서와 통신장치를 이용하여 데이터로거에 전송된다. 데이터로거는 수

집한 데이터를 DB(Database)서버로 전송하고, 전송된 데이터는 DB서버의 각 테이블에 저장된다. 이 데이터를 바탕으로 평가프로그램에서는 태양광전원의 발전량 예측과 각 모듈의 상태진단을 수행하여 사용자에게 알림기능을 제공한다. 또한, 사용자에게 트렌드 분석, 보고서 작성 등 다양한 기능을 제공하도록 구성하였다.



[Fig. 5] State diagnosis system of PV modules

4.2 상태진단 평가시스템의 소프트웨어 구성

통신장치와 데이터로거를 통하여 태양광전원에서 측정된 운용 데이터들을 체계적으로 관리하기 위하여, 본 연구에서는 MS-SQL 서버 2012 소프트웨어를 이용하여 태양광전원용 DB(Database)를 구성하였고, Autbase S/W를 이용하여 상태진단 평가 프로그램을 제작하였다.

4.2.1 태양광전원용 DB의 테이블 구성

태양광전원에서 측정된 운용 데이터와 사이트의 정보는 Table 2와 같이 크게 두 개의 속성으로 구성하였다. 하나는 태양광발전단지의 데이터로 환경데이터, 인버터데이터, 모듈데이터 등의 테이블항목으로 구성하고, 또 하나는 성능향상 데이터로 발전량 예측, 임시저장, 고장정보 등의 테이블항목으로 구성하였다.

[Table 2] Table item of database

	Table item	Usage(Save and Analysis)
PV Generation Site	Environment	Collected environment information
	Inverter	Inverter information data
	Modules	Modules data
Improve operation performance	Predict output	Predict values of PV modules
	Temporary	Temporary data of abnormal modules
	Fault information	Information of abnormal modules

4.2.2 DB 테이블의 데이터 구조 설계

앞에서 구성한 테이블항목을 토대로 각 테이블의 특성을 고려하여, Fig. 6과 같이 세부적인 항목과 데이터 형식을 지정하였다. 여기서 데이터형식은 숫자형, 문자형, 특수형 변수로 분류하고, 크기에 따라 tinyint, smallint, int 등의 변수를 설정하였다. 예를 들어, 모듈테이블은 datetime(전송시간)과 사이트번호(해당 발전단지ID), 모듈번호, 전압, 전류, 온도 등의 세부 항목으로 구성된다. 여기서 전송시간의 형식은 년, 월, 일, 시, 분, 초로 표현되는 특수형 변수인 datetime으로 설정되고, 전압, 전류, 온도는 숫자형 변수 smallint로 설정된다. 이와 같이 설계한 데이터구조를 바탕으로 각각의 테이블을 생성하여 태양광전원용 DB를 구현하였다.

Item	Type	Form	Item	Type	Form	
Environment	DateTime	datetime(8)	Predict	DateTime	datetime(8)	
	Site number	smallint(2)		Site number	smallint(2)	
	Solar radiation(0)	smallint(2)		Site number	smallint(2)	
	Solar radiation(45)	smallint(2)		Predict value	int(4)	
	Wind speed	tinyint(1)		Coefficient α	smallint(2)	
	Wind direction	smallint(2)		Coefficient β	smallint(2)	
	Humidity	smallint(2)		Temperature	datetime(8)	
Inverter	Temperature	smallint(2)	Temporary	DateTime	datetime(8)	
	Site number	smallint(2)		Site number	smallint(2)	
	Inverter number	smallint(2)		String number	tinyint(1)	
	Input voltage	smallint(2)		Module number	tinyint(1)	
	Input current	int(4)		Input vltage	smallint(2)	
	Input power	int(4)		Input current	smallint(2)	
	A phase voltage	smallint(2)		Temperature	tinyint(1)	
	A phase current	int(4)		Abnormal number	smallint(2)	
	B phase voltage	smallint(2)		Alarm	DateTime	datetime(8)
	B phase current	int(4)			Site number	smallint(2)
C phase voltage	smallint(2)	String number	tinyint(1)			
C phase current	int(4)	Module number	tinyint(1)			
Power factor	smallint(2)	Input vltage	smallint(2)			
Frequency	smallint(2)	Input current	smallint(2)			
Cumulative output	int(4)	Temperature	tinyint(1)			
Module	Datetime	datetime(8)	State	Char(8)	text	
	Site number	smallint(2)				
	Module number	tinyint(1)				
	Input voltage	smallint(2)				
	Input current	smallint(2)				
	Temperature	smallint(2)				
	Output current	smallint(2)				

[Fig. 6] Data structure of DB table

4.2.3 테이블 관계 설정

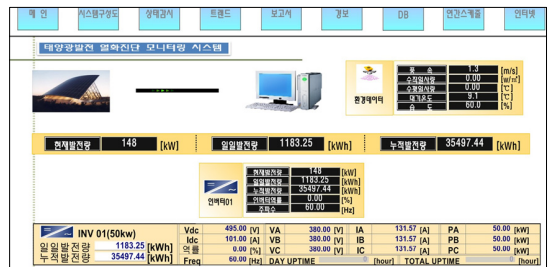
태양광전원용 DB에 저장된 데이터를 다양한 요구조건에 따라 검색하고 분석하기 위해서는 테이블간의 관계 설정이 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 테이블간의 연결을 위한 항목으로 발전단지번호와 데이터전송시간을 각 테이블에 추가하여 다양한 요구조건에 따른 정보검색이 용이하도록 관계를 설정하였다.



[Fig. 7] Setting of relation for DB table

4.2.4 태양광전원용 상태진단 평가프로그램 제작

앞에서 제안한 태양광모듈의 발전량 예측 알고리즘과 상태진단 알고리즘을 바탕으로 Autbase의 스크립트문을 이용하여 상태진단 평가프로그램을 제작하였다. 또한, 이 평가프로그램은 사용자에게 다양한 기능을 제공하기 위하여 원격지에 있는 DB서버와 연동시켜 서버에 저장된 데이터를 이용할 수 있도록 구성하였고, 상태진단 결과를 서버에 저장할 수 있도록 제작하였다. Fig. 8은 태양광 모듈의 모니터링 상태를 나타낸 메뉴로, 태양광전원의 운전 상태와 인버터 정보, 환경정보 등을 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 화면을 구성하였다. 또한, Fig. 9는 모듈의 이상상태 알림 기능을 나타낸 것으로, 모듈의 이상상태와 위치를 신속하게 파악하기 위하여 태양광전원 사이트의 어레이(직·병렬 모듈배열) 구조에 경고등을 배치하여 화면을 구성하였다. 따라서 상태진단 알고리즘을 통하여 비정상모듈이 검출되면, 적색 경고등과 동시에 경보창도 팝업되어 사용자에게 신속하고 정확하게 상태알림 기능을 제공한다.



[Fig. 8] Monitoring function of state diagnosis system



[Fig. 9] Warning function for abnormal state

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 발전량 예측 알고리즘 비교 분석

Table 3은 한국건설생활환경 시험연구원에 설치된

설정된 5개의 모듈은 Fig. 11과 같이 적색 경고등과 경보창이 팝업되어 모듈의 이상상태를 정상적으로 진단하였고, Fig. 12와 같이 해당 모듈의 정보가 경보테이블에 저장되는 것을 확인하였다. 한편, [1-5]번 모듈은 2회와 3회의 진단에서 각각이상상태로 판정되지만 4회의 진단에서는 정상적인 출력으로 정상모듈로 판정되어 판정횟수가 초기화 되고, [3-2]번 모듈은 1회와 2회의 진단에서 이상상태로 판정되지만 3회의 진단에서는 출력이 정상화되면서 판정횟수가 초기화된다. 즉, 본 연구에서 제시한 상태진단 평가시스템이 정상 모듈의 일시적인 출력저하를 비정상 모듈로 판정하지 않고, 정상모듈로 판정하는 것을 통하여, 상태진단 평가시스템의 알고리즘이 유용함을 확인하였다.



[Fig. 11] Result of status diagnosis



[Fig. 12] Fault information of PV module

6. 결론

본 논문에서는 태양광모듈에서 발생하고 있는 문제점을 분석하고 이에 대한 대책을 제시하기 위하여, 선형회귀분석법을 이용한 발전량 예측 알고리즘과 태양광모듈의 상태를 진단하는 알고리즘을 제안하였다. 또한, 이를 바탕으로 태양광모듈의 상태진단 평가시스템을 구현하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 기존의 방법에 비하여 제안한 방법이 계산하기 편리하고 예측 오차도 감소함을 확인하

였으며, 이상모듈의 상태와 위치를 신속하게 파악할 수 있어, 태양광모듈의 운용효율 향상에 유용함을 확인하였다. 주요 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 발전량 예측 방법(AMPP)은 실제 측정치와의 오차가 약 9.5%정도가 발생하였지만, 본 연구에서 제시한 방법은 가장 최근의 모듈 정보를 활용하여 예측하기 때문에 오차가 대략 2.3%정도 발생하여 정확도를 향상시킬 수 있었다.
- (2) 본 연구에서 제시한 상태진단 평가시스템이 정상 모듈의 일시적인 출력저하를 비정상 모듈로 판정하지 않고, 정상모듈로 판정하는 것을 통하여, 상태진단 평가시스템의 알고리즘이 유용함을 확인하였다.

향후에는 태양광모듈의 상태데이터 분석을 통하여, 다양한 열화원인에 따른 출력패턴과 열화진단 알고리즘을 추가해서 열화진단 평가시스템을 구축할 예정이다.

References

- [1] A. Molki, "Dust affects solar cell efficiency," Physics Education, vol. 45, pp. 456-458, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/45/5/F03>
- [2] A.R. Gxasheka, "Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors," Renewable Energy, vol. 30, pp. 611-620.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.06.005>
- [3] E.D. Dunlop, "Lifetime performance of crystalline silicon PV module," 3rd World conference on photovoltaic energy conversion, pp. 2927-2930, 2003.
- [4] E.L Meyer and E. Ernest van Dyk, "Assessing the Reliability and Degaadation of Photovoltaic Module Performance Parameters," IEEE TRAN-SACTIONS ON RELIABILITY, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TR.2004.824831>
- [5] J.G. Araujo and E. Sanchez, "A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell," Electron Devices, IEEE Transactions on, vol. 29, no. 10, pp. 1511-1513, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-ED.1982.20906>
- [6] K.A. Emery and C.R. Osterwald, "Solar Cell Efficiency Measurements," Solar Cells, vol. 17, pp. 253-374, 1986.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0379-6787\(86\)90016-5](http://dx.doi.org/10.1016/0379-6787(86)90016-5)

[7] C. Kao and C.-L. Chyu, "Least-squares estimate in fuzzy regression analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 148, no. 2, pp. 426-435, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00423-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00423-X)

[8] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Development of an integrated data acquisition system for renewable energy sources systems monitoring," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 1, pp.139-152, January 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00197-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00197-5)

[9] N. Forero, J. Hernandez, and G. Gordillo, "Development of a monitoring system for a PV solar plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 15-16, pp.2329-2336, September 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.11.012>

[10] "Result for Aging test of 50kW PV system, KEPCO Research Institute, 2011.

[11] http://www.s-energy.com/fcdata/product/SM-255_PC8

최 성 식(Sung-Si Choi) [준회원]



- 2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신 공학과 (공학사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 석사과정 재학중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

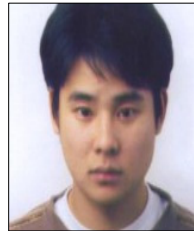
김 태 연(Tae-Yeon Kim) [준회원]



- 2012년 2월 : 한남대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 석사과정 재학중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

박 재 범(Jea-Bum Park) [준회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 박사과정 재학중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

김 병 기(Byung-Ki Kim) [정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2002년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 박사과정 재학중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

노 대 석(Dae-Seok Rho) [정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석