

계통연계형 태양광발전 시스템의 고장유형별 손실 비교분석

소정훈 · 고석환[†] · 주영철

한국에너지기술연구원 태양광연구소

Losses Comparison and Analysis for Fault Modes of Grid-connected Photovoltaic System

So Jung-Hun · Ko Suk-Whan[†] · Ju Young-Chul

Photovoltaic laboratory, Korea Institute of Energy Research

[†]Corresponding author: korea19@kier.re.kr

Abstract

This paper presents losses comparison and analysis results for different types of fault modes of grid-connected photovoltaic system generated for long-term operation. The approach of losses comparison and analysis by faults is to identify relationship between measured and estimated values of five loss factors which are quantified from irradiance to system output power. This paper presents the symptom results for faults such as snow, shading, sensor defect, blackout, soiling and so on from three years or more monitored data. These results will indicate that it is useful to develop fault detection and diagnosis tool to enhance capacity factor and save operation and maintenance cost of grid-connected photovoltaic system in the field.

Keywords: 계통연계(Grid-connected), 고장(Fault), 손실(Loss), 등가 가동시간(Yield)

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.37, No.3, pp.23-32, June 2017
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.3.023>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 10 April 2017

Revised: 22 May 2017

Accepted: 21 June 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호설명

$G_{a,m e a s}$: 경사면 일조강도 [kW/m^2]

$G_{a,r e f}$: 1 [kW/m^2]

$P_{a,m e a s}$: PV어레이 출력전력 [kW]

$P_{f,m e a s}$: PV시스템 출력전력 [kW]

$P_{a s}$: PV어레이 공칭용량 [kW]

$T_{m,m e a s}$: PV모듈 표면온도 [$^{\circ}C$]

l_a : PV어레이 직류선로 손실 [kW]

a_m : PV어레이 최대성능계수

a_t, b_t : PV 어레이 출력계수
 α_t : PV어레이 출력온도계수
 a_p, b_p, c_p : PV인버터 출력계수

1. 서론

1995년 2016년까지 국내에 설치된 태양광발전(PV, Photovoltaic) 시스템의 총 누적용량은 약 4.34 GW로 사용목적 및 용도에 따라 수십 W에서 수백 MW까지의 다양한 PV시스템으로의 설계적용과 함께 설치보급이 크게 확대되면서 미래 전력산업시장에서 PV산업의 중요성이 증대되고 있다¹⁾.

PV시스템의 주요 구성기기인 PV모듈 및 PV인버터는 외부 환경의 영향에 민감한 부품들로 구성되어 있어 풍속, 온도 및 일조강도 등의 외부 환경이 급격하게 변화하거나 구성기기에 고장 혹은 결함이 발생하게 되면 PV시스템은 기대했던 발전성능이 나오지 않는 경우가 발생되고 내구수명이 단축될 수 있다^{2,3,4)}. PV시스템이 다른 재생에너지원과 비교해서 내구수명이 길어서 유지보수가 거의 필요 없다고 하지만 Fig. 1에서 보듯이 PV시스템은 PV모듈, PV스트링, PV어레이 및 PV인버터의 고장 혹은 출력 감소, 그늘, 오염, 열화, 접속함, 단선, 다이오드 및 퓨즈 소손, PV시스템 설계 및 시공 결함 등으로 인해서 에너지 손실이 증가하고 이에 따른 고장 혹은 결함을 진단하고 복구하는데 추가적인 비용이 발생된다^{5,6)}. 따라서 PV시스템의 장기간의 성능품질, 안정성 및 신뢰성에 미치는 파급효과를 최소화하기 위해서는 외부 환경의 변화 및 PV시스템에서 발생하는 고장원인과 위치를 파악할 수 있도록 고장유형에 따른 성능특성을 정량적인 값으로 산출하여 분석하는 것이 매우 중요하다.^{4,5)}

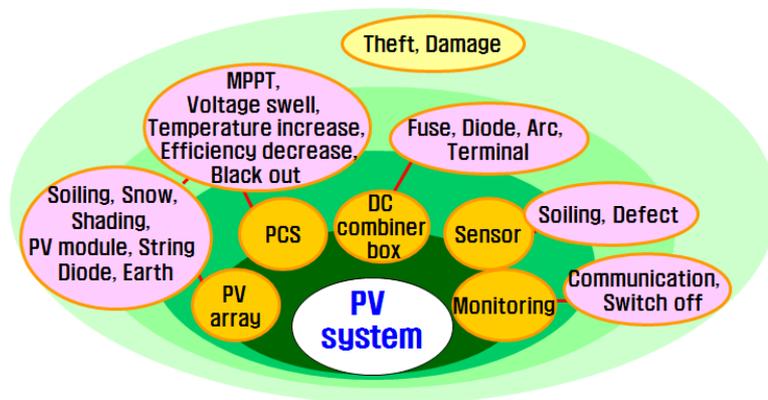


Fig. 1 Fault modes of PV system and balance of system

본 논문에서는 실제 운전되고 있는 2개소의 계통연계형 PV시스템에서 수집된 계측데이터로부터 일조강도에서 시스템 출력전력까지 5개의 손실 산출모델에 의한 추정값과 실측값을 산출하였고 외부환경의 변화 및

PV시스템에서 발생된 고장유형에 따른 성능과 손실과의 상관관계를 비교 분석하고 그 결과에 대해서 종합적으로 고찰하였다.

2. 고장유형별 손실 비교분석 방법

2.1 접근방법

외부 환경의 변화 및 PV시스템에서 발생하는 고장유형별 손실과의 상관관계를 정량적인 값으로 비교 분석하기 위해서 입사각 변동, 적설, 오염 및 노화 등에 의한 손실인 PV어레이의 기타 손실(Y_{lo}), PV어레이 직병렬 불균형 및 최대출력점 변동 등에 의한 손실인 PV어레이 부정합 손실(Y_{lm}), PV어레이 직류선로 저항에 의한 손실인 PV어레이 직류회로 손실(Y_{la}), PV모듈 표면온도상승에 의한 손실인 PV어레이 온도상승 손실(Y_{lt}) 및 PV인버터 변환효율 감소 및 대기상태 등에 의한 손실인 PV인버터 손실(Y_{lp})을 포함한 5개의 손실에 대해서 실측값과 추정값을 산출하여 비교 분석하였다.

수집된 계측데이터에서 태양 등가 가동시간(Y_r), 그늘, 적설, 오염 및 노화 등을 고려한 PV어레이 최대 등가 가동시간(Y_{am}), PV어레이 직류선로($l_{a,meas}$) 손실을 고려한 PV어레이 최적 등가 가동시간($Y_{ao,meas}$), PV모듈 표면온도 상승을 고려한 PV어레이 온도보정 후 등가 가동시간($Y_{at,meas}$), PV어레이 등가 가동시간($Y_{a,meas}$) 및 PV시스템 등가 가동시간($Y_{f,meas}$)의 실측 산출모델은 다음의 식으로 나타낸다^{7,8)}.

$$Y_r = G_{a,meas} / G_{a,ref} \quad (1)$$

$$Y_{am} = \alpha_m \cdot Y_r \quad (2)$$

$$Y_{ao,meas} = Y_{am} - l_{a,meas} / P_{as} \quad (3)$$

$$Y_{at,meas} = Y_a / (1 + \alpha_t \times (T_{m,meas} - 25)) \quad (4)$$

$$Y_{a,meas} = P_{a,meas} / P_{as} \quad (5)$$

$$Y_{f,meas} = P_{f,meas} / P_{as} \quad (6)$$

수집된 계측데이터에서 태양 등가 가동시간으로부터 PV어레이의 직류선로 손실($l_{a,esti}$)을 고려한 PV어레이 최적 등가 가동시간($Y_{ao,esti}$), PV어레이 표면온도 상승을 고려한 PV어레이 온도보정 후 등가 가동시간($Y_{at,esti}$),

PV어레이 등가 가동시간($Y_{a,esti}$) 및 PV시스템 등가 가동시간($Y_{f,esti}$)의 추정 산출모델은 다음의 식으로 나타낸다^{7,8)}.

$$Y_{ao,esti} = Y_{am} - l_{a,esti}/P_{as} \quad (7)$$

$$Y_{at,esti} = a_t \cdot Y_r + b_t \quad (8)$$

$$Y_{a,esti} = Y_{at,esti} \cdot (1 + \alpha_t \cdot (T_{m,meas} - 25)) \quad (9)$$

$$Y_{f,esti} = a_p \cdot Y_{a,esti}^2 + b_p \cdot Y_{a,esti} + c_p \quad (10)$$

식(1)~(6)과 식(7)~(10)을 사용하여 Y_{lo} , Y_{la} , Y_{lm} , Y_{lt} 및 Y_{lp} 의 산출모델은 다음의 식으로 나타낸다^{7,8)}.

$$Y_{ao} > Y_{at} \text{인 경우} : Y_{lo} = Y_r - Y_{am}, Y_{lm} = Y_{ao} - Y_{at} \quad (11)$$

$$Y_{ao} > Y_{at} \text{인 경우} : Y_{lo} = Y_r - Y_{am} + Y_{ao} - Y_{at}, Y_{lm} = 0 \quad (12)$$

$$Y_{la} = Y_{am} - Y_{ao} \quad (13)$$

$$Y_{lt} = Y_{at} - Y_a \quad (14)$$

$$Y_r > 0 \ \& \ Y_f > 0 \text{ 경우} : Y_{lp} = Y_a - Y_f \quad (15)$$

$$Y_r > 0 \ \& \ Y_f = 0 \text{ 경우} : Y_{lp} = Y_r \quad (16)$$

2.2 대상 PV시스템 개요

PV시스템에서 발생하는 고장유형별 손실과의 상관관계를 정량적인 값으로 비교 분석하기 위해서 실제 운전되고 있는 2개소의 계통연계형 PV시스템에서 수집된 계측데이터를 이용하였다. Fig. 2는 대상시스템인 2개소의 계통연계형 PV시스템을 보여준다. PV시스템은 위도 36.2°, 경도 127.22°에 설치되었고 PV어레이의 설치 방위각 -5°(남서)로 설계 구성되었다. PV시스템의 전기적 입출력 및 일조강도, 온도 및 풍속 등을 포함한

기상데이터는 2초 간격으로 계측하여 1분 간격의 평균값으로 수집 저장된다. 본 논문에서는 2008년 1월부터 2011년 03월까지의 수집된 계측데이터로부터 고장이 발생된 날의 15분 간격의 평균값을 사용하여 고장유형별 손실과의 상관관계를 정량적인 값으로 산출하여 비교 분석하였다.



Fig. 2 Grid-connected PV system

Table 1은 3 kW급과 2 kW급 계통연계형 PV시스템에 사용된 표준시험조건인 PV모듈과 PV어레이 그리고 정격조건에서의 PV인버터의 사양을 나타낸다. Table 2는 PV시스템에서 발생하는 손실의 실측값과 추정값을 산출하는데 사용된 모델계수를 보여준다.

Table 1 PV system and components specifications

Category	PV system	PV1	PV2
PV module	Cell type	Mono crystalline	Mono crystalline
	Nominal power	43 (W)	53 (W)
	Maximum power point voltage	8.9 (V)	17.4 (V)
	Maximum power point current	4.87 (A)	3.05 (A)
PV array	Total sheet	48	60
	Nominal power	2.08 (kW)	3.18 (kW)
	Arrangement	24*2	20*3
	Tilt angle	15 (degree)	30 (degree)
PCS	Rate power	3 (kW)	3 (kW)
	Input voltage	200 (V)	340 (V)
	Operating voltage range	160-250 (V)	150-340 (V)
	Efficiency	> 92 (%)	> 94 (%)

Table 2 Model parameter

Parameter	PV1	PV2
a_m	0.865	0.850
a_t	0.820	0.805
b_t	0.01	0.015
α_t	-0.0035	-0.004
a_p	-0.0465	0.0196
b_p	0.994	0.9366
c_p	-0.0273	-0.0097

3. 고장유형별 손실 비교분석 결과

수집된 계측데이터로부터 식(1)~(6)과 식(11)~(16)을 사용하여 PV시스템의 15분 간격의 실측값을 산출하고 수집된 계측데이터에서 일조강도 및 PV모듈 표면온도로부터 식(7)~(10)과 식(11)~(16)을 사용하여 PV시스템에 대한 15분 간격의 추정값을 산출한다. Fig. 3은 2008년 5월 19일로 PV시스템(PV2)이 고장 혹은 결함이 발생되지 않고 그늘 및 오염 등의 외부 환경변화에 따른 손실이 최소인 조건에서 정상 운전할 때 Y_f , Y_{lo} , Y_{lm} , Y_{lt} , Y_{la} 및 Y_{lp} 에 대한 15분 간격의 실측값과 추정값을 보여준다. 그림에서 보면 PV시스템이 정상 운전시 Y_r 은 0.3이상에서 손실의 실측값과 추정값과의 차이는 5%이하의 범위를 가진다. Y_r 이 0.3이상에서 실측값이 추정값과 비교해서 큰 차이가 없지만 Y_r 이 0.3이하에서는 PV어레이의 비선형성과 입사각에 따른 일조강도의 변동성으로 인해 Y_r 이 0.3이상에서 실측값과 비교하면 차이가 크다.

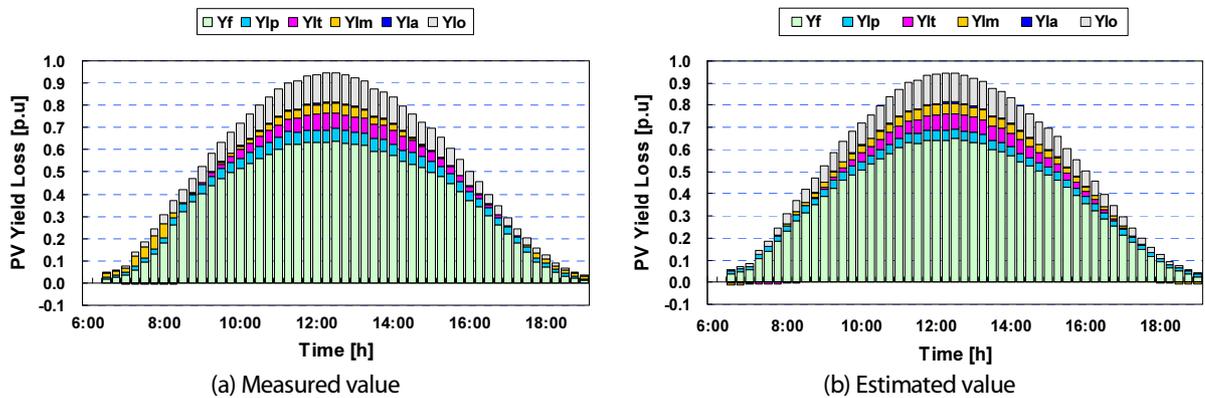


Fig. 3 PV system yield and losses at steady state

Fig. 4는 2008년 2월 26일로 PV시스템(PV2)의 PV어레이 표면에 눈이 쌓여 있을때 Y_f , Y_{lo} , Y_{lm} , Y_{lt} , Y_{la} 및 Y_{lp} 에 대한 15분 간격의 실측값과 추정값을 보여준다. 그림에서 보면 13:30분까지는 추정값과 비교해서 Y_{lp} 및 Y_{lm} 의 실측값이 변화가 큰 것은 실제 Y_r 은 0.3이상이지만 PV어레이에 쌓인 눈으로 인해서 PV시스템이

11:30분까지 운전이 정지되었다. 11:30분 이후부터 외기온도의 상승으로 PV어레이가 일부 눈이 녹이면서 운전을 시작하여 13:30분 이후부터 PV어레이에 쌓인 눈이 전부 녹으면서 PV시스템이 정상 운전되고 있는 것을 보여준다.

동절기에 Y_r 이 0.3이상에서 Y_{lp} , Y_{la} 및 Y_{lo} 은 실측값과 추정값의 오차가 $\pm 5\%$ 이하, Y_{lm} 은 오차가 30%이상이고 Y_{lt} 는 오차가 5%이상인 조건에서 연속적으로 10회 이하로 발생한 경우 PV어레이 표면에 쌓인 눈으로 인해 손실이 증가되면서 기대했던 발전성능보다 떨어진다.

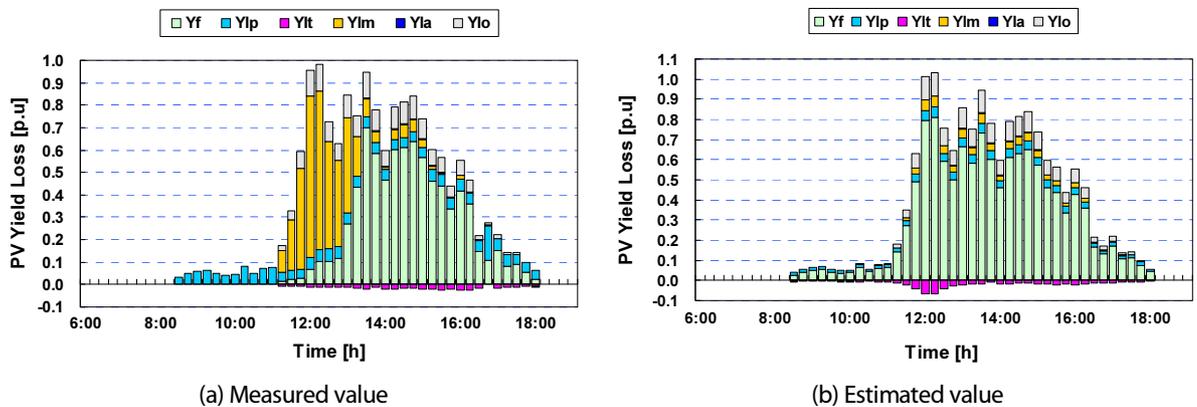


Fig. 4 PV system yield and losses in case of snow cover

Fig. 5는 2008년 3월 8일로 PV시스템(PV1)의 PV어레이 표면이 그늘과 황사로 오염이 발생하였을 때 Y_f , Y_{lo} , Y_{lm} , Y_{lt} , Y_{la} 및 Y_{lp} 에 대한 15분 간격의 실측값과 추정값을 보여준다. 그림에서 보면 추정값과 비교해서 Y_{lp} 및 Y_{lm} 의 실측값이 변화가 큰 것은 8:45분까지는 PV어레이 모두 그늘이 발생하여 PV시스템이 정지하고 있다가 8:45분 이후부터 PV어레이에서 발생한 그늘이 점차 사라지면서 정상 운전된다. 11:30분부터 고일조 강도 및 황사로 인해서 PV어레이의 표면이 오염에 따른 효율감소 및 직병렬 불균형에 의한 부정합 손실이 크다는 것을 보여준다.

그림에서 보면 Y_{lp} , Y_{la} , Y_{lt} 및 Y_{lo} 은 실측값과 추정값의 오차가 $\pm 5\%$ 이하, Y_{lm} 은 오차가 30%이상인 조건에서 연속적으로 6회 이하로 발생한 경우 PV어레이 표면에 그늘이 발생되고, Y_r 이 0.3이상에서 Y_{lp} , Y_{la} , Y_{lt} 및 Y_{lo} 은 실측값과 추정값의 오차가 $\pm 5\%$ 이하, Y_{lm} 은 오차가 6~11%인 조건에서 연속적으로 16회 이상 발생한 경우 먼지 혹은 황사 등으로 인해 PV어레이 표면이 오염이 되어 손실이 증가되면서 기대했던 발전성능보다 떨어진다.

Fig. 6은 2008년 10월 25일로 PV시스템(PV1)의 PV어레이에 그늘, 임시 장애물 그리고 정전이 발생하였을 때 Y_f , Y_{lo} , Y_{lm} , Y_{lt} , Y_{la} 및 Y_{lp} 에 대한 15분 간격의 실측값과 추정값을 보여준다. 그림에서 보면 Y_{lp} 및 Y_{lm} 의 실측값이 변화가 큰 것은 8:15분까지는 PV어레이의 전체 그늘로 인해서 PV시스템이 정지된다. 9:00분 이후

PV어레이에 발생한 그늘이 점차 줄어들면서 PV시스템은 정상 운전된다. 9:45분에는 임시 장애물에 의한 부정합 손실이 증가하고, 10:30분 이후에는 정전으로 PV시스템이 정지된 후 12:30에 전원복구와 함께 PV시스템의 정상 운전되는 것을 보여준다. 그림에서 보면 Y_{lp} , Y_{la} , Y_{lt} 및 Y_{lo} 은 실측값과 추정값의 오차가 $\pm 5\%$ 이하, Y_{lm} 은 오차가 30%이상인 조건에서 연속적으로 4회 이하로 발생한 경우 PV어레이 표면에 그늘이 발생되고, Y_{lp} , Y_{la} , Y_{lt} 및 Y_{lo} 은 실측값과 추정값의 오차가 $\pm 5\%$ 이하, Y_{lm} 은 오차가 50% 이상인 조건에서 연속적으로 4회 이하로 발생한 경우 임시 장애물에 의해서 PV어레이 표면에 그늘이 발생되고, Y_{la} , Y_{lt} 및 Y_{lm} 은 실측값과 추정값의 오차가 $\pm 6\%$ 이하이고, Y_{lp} 는 오차가 90%이상 조건에서 연속적으로 8회 이상 발생한 경우 정전으로 인해 PV시스템이 정지되면서 기대했던 발전성능 보다 떨어진다.

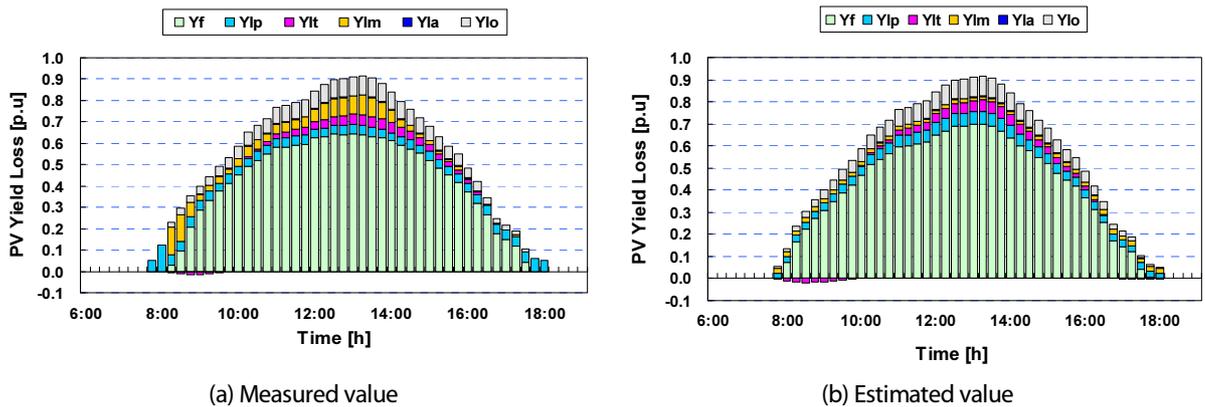


Fig. 5 PV system yield and losses in case of shade and dirt

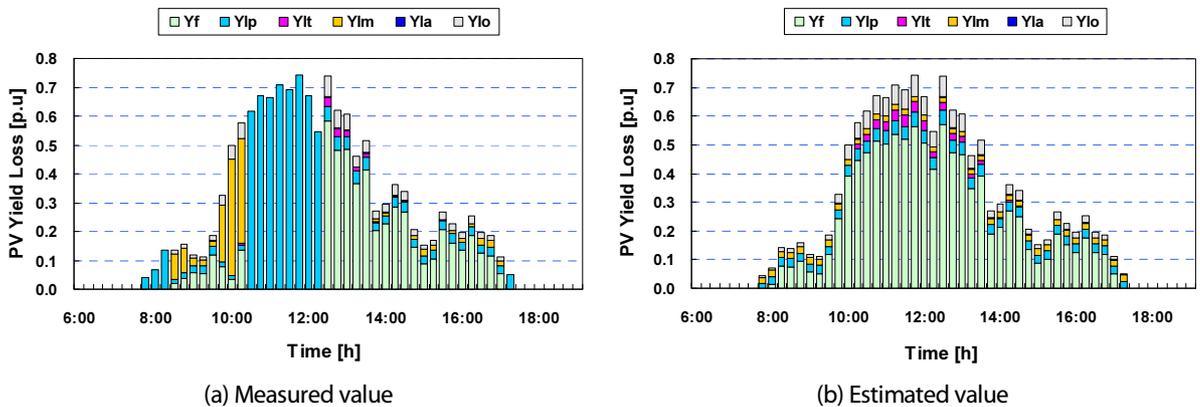


Fig. 6 PV system yield and losses in case of shade, obstacle and blackout

2008년 1월부터 2011년 3월까지 수집된 계측데이터로부터 Y_r 이 0.3이상에서 대상 PV시스템에서 발생한 7개의 고장에 대해서 고장유형별 손실의 실측값과 추정값에 대한 15분 간격의 평균값과 잔차를 정리하면 Table 3과 같다. 표에서 보듯이 실제 PV시스템의 운전시 발생된 고장들은 고장유형에 따라 Y_{lo} , Y_{lm} , Y_{lt} , 및

Y_{lp} 의 크기와 분포가 서로 다르고 고장 발생시 실측값과 추정값사이의 편차의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 PV시스템에 발생하는 고장유형별 손실과의 상관관계를 정량적인 값으로 산출하여 비교 분석하면 PV 시스템의 고장유무를 신속하게 파악하여 고장발생의 원인 및 위치, 중요성 등을 정확하게 진단할 수 있어 손실저감을 위한 대책 기술뿐만 아니라 비용 절감을 위한 최적의 운영 유지보수 기술의 개발에 중요한 자료로 활용할 수 있다.

Table 3 PV yield loss comparison results for fault modes

Category	Fault mode	Y_{lp}	Y_{lt}	Y_{lm}	Y_{la}	Y_{lo}
Steady state	Measuerd value	0.057	0.054	0.035	0.005	0.126
	Estimated value	0.044	0.053	0.044	0.004	0.126
	Residual	0.013	0.001	-0.009	0.001	0.000
PV array soiling	Measuerd value	0.048	0.072	0.066	0.004	0.089
	Estimated value	0.057	0.077	0.014	0.004	0.089
	Residual	-0.009	-0.005	0.052	0.000	0.000
PCS MPPT failure	Measuerd value	0.041	0.083	0.214	0.003	0.127
	Estimated value	0.051	0.107	0.038	0.004	0.130
	Residual	-0.010	-0.024	0.176	-0.001	-0.003
PV system stop	Measuerd value	0.545	0.000	0.000	0.000	0.000
	Estimated value	0.046	0.070	0.019	0.003	0.071
	Residual	0.499	-0.070	-0.019	-0.003	-0.071
PV array shading	Measuerd value	0.029	-0.011	0.089	0.001	0.036
	Estimated value	0.032	-0.014	0.020	0.001	0.038
	Residual	-0.003	0.003	0.069	0.000	-0.002
Irradiance sensor defect	Measuerd value	0.031	0.087	0.000	0.007	-0.031
	Estimated value	0.037	0.078	0.021	0.007	0.024
	Residual	-0.006	0.009	-0.021	0.000	-0.055
Surface temperature sensor defect	Measuerd value	0.053	0.189	-0.075	0.004	0.114
	Estimated value	-0.021	0.170	0.014	0.004	0.114
	Residual	0.074	0.019	-0.089	0.000	0.003
PV array defect	Measuerd value	0.019	-0.004	0.391	0.000	0.079
	Estimated value	0.037	-0.014	0.030	0.002	0.086
	Residual	-0.018	0.010	0.361	-0.002	-0.007

4. 결론

본 논문에서는 2개소의 계통연계형 PV시스템에서 수집된 계측데이터로부터 PV시스템에서 발생하는 고장 유형별 손실과의 상관관계를 비교 분석하였다. 본 논문에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2008년 1월부터 2011년 3월까지 수집된 2개소의 계통연계형 PV시스템의 계측데이터로부터 5개의 손

실 산출모델을 사용하여 손실의 실측값과 추정값을 정량적인 값으로 산출하여 실제 운전시 발생된 7개의 고장유형에 따른 손실과의 상관관계를 비교 분석하였다.

- (2) 고장유형별 손실에 대한 비교 분석 결과는 PV시스템의 고장유무를 보다 쉽고 신속하게 파악할 수 있어 손실 저감을 통한 시스템의 이용률을 향상시키고 운영 유지보수에 소요되는 비용을 절감할 수 있는 고장검출 진단도구로의 개발이 가능하다. 또한 PV시스템의 초기 설계부터 설치운전까지 발생하는 많은 문제점들을 사전에 파악할 수 있어 설치환경 및 사용목적에 부합된 PV시스템의 최적설계, 에너지 손실의 최소화 및 경제적 비용 개선을 포함한 장기간의 성능과 품질을 보증할 수 있다.
- (3) 향후에는 설치환경 및 설계구성에 따른 다양한 PV시스템의 계측데이터를 계속 수집하여 새로운 고장 유형에 대해서도 성능데이터베이스를 구축하여 정확도와 신뢰성을 가진 고장검출 진단기법을 개발하기 위한 연구를 계속 수행할 계획이다.

후기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생에너지연구개발 사업 연구비 지원으로 수행되었음(과제번호: 20153010011980).

REFERENCES

1. Korea Energy Management corporation, New & Renewable Energy Dissemination Statistics 2014, 2015.
2. Pearsall, N. M., Scholz, H., Zdanowicz, T., and Reise, C., PV System Assessment in Performance -Towards Maximum System Output, European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2574-2579, 2006.
3. Pearsall, N. M., Atanasium, B., and Zdanowicz, T., Progress on the Modernisation of the European PV System Monitoring Guidelines, European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 3208-3216, 2008.
4. Silvestre, S., Chouder, A., and Karatepe, E., Automatic Fault Detection in Grid Connected PV Systems. Solar Energy, Vol. 94, pp. 119-127, 2013.
5. Firth, S. K., Lomas, K. J., and Rees, S. J., A Simple Model of PV System Performance and its use in Fault Detection. Solar Energy, Vol. 84, pp. 624-635, 2010.
6. Colli Alessandra., Fault Mode and Effect analysis for Photovoltaic Systems. Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 50, pp. 804-809, 2015.
7. So, J. H., Lee, B. S., Yu, J. S., Hwang, H. M., and Yu, G. W., Performance Estimation Method of Grid-Connected Photovoltaic System, Journal of The Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No .6, pp. 95-101, 2010.
8. So, J. H., Lim, H. M., Hwang H. M., Jung Y. S., Ko S. W., Ju Y. C., Loss Calculation Method of Grid-Connected Photovoltaic System, Journal of The Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No .5, pp. 18-23, 2013.