

계통연계형 태양광발전시스템의 손실 산출방법

Loss Calculation Method of Grid-Connected Photovoltaic System

소정훈*† · 임현목** · 황혜미* · 정영석* · 고석환* · 주영철*

So Jung-Hun*† , Lim Hyun-Mook**, wang Hye-Mi*, Jung Young-Seok*,
Ko Suk-Whan*, Ju Young-Chul*

(Submit date : 2013. 7. 12., Judgement date : 2013. 7. 19., Publication decide date : 2013. 10. 21.)

Abstract : This paper presents a simple but valid loss calculation method of grid-connected photovoltaic system based on normalized yield model. The proposed method can be represented as a quantitative value for five losses and performance of grid-connected photovoltaic system with three years monitored data. These results will indicate that it is useful to investigate various loss factors causing the performance obstruction, enhance the lifetime yield for changing meteorological conditions, and determine the optimal design and performance improvement of grid-connected photovoltaic system.

Key Words : 태양광발전(Photovoltaic), 계통연계(Grid-connected), 손실산출(Loss calculation), 등가 가동시간(Yield), 성능계수(Performance ratio)

기 호 설 명

$G_{a,meas}$: 경사면 일사강도 [kW/m^2]
 $G_{a,ref}$: 1 [kW/m^2]
 $P_{a,meas}$: PV어레이 출력전력 [kW]
 $P_{p,meas}$: PCS 출력전력 [kW]
 P_{as} : PV어레이 설치용량 [kW]

Y_r : 태양 등가 가동시간
 Y_a : PV어레이 등가 가동시간
 Y_p : PV시스템 등가 가동시간
 Y_{am} : PV어레이 최대 등가 가동시간
 Y_{ao} : PV어레이 최적 등가 가동시간
 Y_{at} : PV어레이 온도보정 후 등가
가동시간

*† 소정훈(교신저자) : 한국에너지기술연구원
E-mail : jhso@kier.re.kr, Tel : 041-860-3371

**임현목 : (주)삼영

*황혜미 : 한국에너지기술연구원

*정영석 : 한국에너지기술연구원

*고석환 : 한국에너지기술연구원

*주영철 : 한국에너지기술연구원

*† So Jung-Hun (corresponding author) : Korea Institute of Energy Reserach.

E-mail : jhso@kier.re.kr, Tel : 042-860-3371

**Lim Hyun-Mook : Samyoung Co., Ltd..

*Hwang Hye-Mi : Korea Institute of Energy Reserach..

*Jung Young-Seok : Korea Institute of Energy Reserach.

*Ko Suk-Whan : Korea Institute of Energy Reserach.

Ju Young-Chul : Korea Institute of Energy Reserach.

- I_a : PV어레이 직류선로손실 [kW]
- α_m : PV어레이 최대성능계수
- α_t : PV어레이 온도보정계수
- T_m : PV어레이 표면온도[°C]
- Y_{lo} : PV어레이 기타 손실
- Y_{la} : PV어레이 직류회로 손실
- Y_{lm} : PV어레이 부정합 손실
- Y_{lt} : PV어레이 온도상승 손실
- Y_{lp} : PCS 손실

1. 서 론

2011년까지 국내에 설치 보급된 태양발전(PV, Photovoltaic) 시스템의 누적설치용량은 812MW이다.¹⁾ PV시스템은 사용목적에 따라 수십W에서 수십MW의 설치용량을 가진 다양한 시스템으로 설치적용이 가능하다.²⁾³⁾⁴⁾

PV시스템은 다른 재생에너지원과 비교해서 내구수명이 길어서 유지점검이 거의 필요없다고 하지만, 실제 PV어레이에 발생하는 그늘, 오염·열화, PCS의 고장, 성능저하 및 설계시공 등의 고장 혹은 이상으로 실제 옥외에서의 PV시스템은 초기 설계시 기대했던 발전 성능이 나오지 않는 경우가 발생한다.⁴⁾⁵⁾ 따라서 실제 옥외에서의 PV시스템에서 발생하는 주요 손실들을 정량적인 값으로 산출하여 제시된다면 운전시에 발생하는 다양한 문제점들을 사전에 파악할 수 있어 PV구성기기의 및 PV시스템의 성능향상 뿐만 아니라 체계적이고 효율적인 유지관리기술이 확립할 수 있어 장기간 성능과 품질 보증과 함께 수명이 다할 때 까지 항상 최대성능을 유지할 수 있다.²⁾³⁾⁴⁾

본 논문에서는 2008년부터 2010년까지 2kW급 계통연계형 PV시스템에서 수집된 분별 운전 데이터로부터 등가 가동시간을 이용하여 주변 환경 변화에 따른 성능 및 손실을 정량적인 값으로 산출할 수 있는 방법을 제시하였고 그 산출결과에 대해서 종합적으로 고찰하였다.

2. 손실 개요 및 산출방법

Fig. 1는 입력에너지인 일사강도로부터 교류전력으로 변환하는 과정에서 PV시스템의 성능과 손실과의 상관관계를 보여준다. PV시스템에서 발생하는 손실에는 PV어레이의 그늘, 오염, 먼지, 입사각 변동, 적설, 온도상승 효율감소, 직류회로, 부정합 및 PCS(Power conditioning system) 등의 손실이 포함된다.⁴⁾⁵⁾

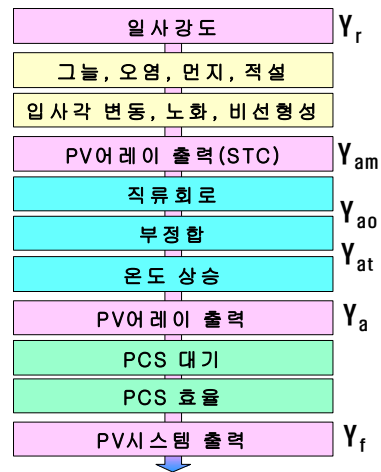


Fig. 1 Relationship between performance and losses

입력에너지인 경사면 일사강도에서 PV시스템의 출력전력과 관계로부터 등가 가동시간을⁴⁾ 이용한 정규화 손실 산출방법은 다음과 같다. 경사면 일사강도로부터 PV시스템의 출력전력까지 등가 가동시간을 이용한 태양 등가 가동시간(Y_r), 그늘, 적설, 오염 및 노화 등을 고려한 PV어레이 최대 등가 가동시간(Y_{am}), PV어레이 직류선로 저항을 고려한 PV어레이 최적 등가 가동시간(Y_{ao}), PV어레이 표면온도 상승을 고려한 PV어레이 온도보정 후 등가 가동시간(Y_{at}), PV어레이 등가 가동시간(Y_a) 및 PV시스템 등가 가동시간(Y_f)의 산출모델

은 다음의 식으로 나타낸다.

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

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

$$Y_{ao} = Y_{am} - l_a / P_{as} \quad (3)$$

$$Y_{at} = Y_{ao} / (1 + \alpha_t \times (T_m - 25)) \quad (4)$$

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

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

$$Y_{lm} = 0 \quad (10)$$

$$Y_{la} = Y_{am} - Y_{ao} \quad (11)$$

$$Y_{lt} = Y_{at} - Y_a \quad (12)$$

$Y_r > 0$ & $Y_f > 0$ 경우:

$$Y_{lp} = Y_a - Y_f \quad (13)$$

$Y_r > 0$ & $Y_f = 0$ 경우:

$$Y_{lp} = Y_r \quad (14)$$

식 (1)~식 (6)을 사용하여 산출된 PV시스템의 등가 가동시간으로부터 입사각 변동, 적설, 오염 및 노화 등에 의한 손실인 PV어레이 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}), PV어레이 표면온도상승에 의한 손실인 PV어레이 온도상승 손실(Y_{lt}) 및 PCS 변환효율 감소 및 대기상태 등에 의한 손실인 PCS 손실(Y_{lp})의 산출모델은 다음의 식으로 나타낸다.

$Y_{ao} > Y_{at}$ 경우 :

$$Y_{lo} = Y_r - Y_{am} \quad (7)$$

$$Y_{lm} = Y_{ao} - Y_{at} \quad (8)$$

$Y_{ao} < Y_{at}$ 경우 :

$$Y_{lo} = Y_r - Y_{am} + Y_{ao} - Y_{at} \quad (9)$$

3. PV시스템 개요

제시한 PV시스템의 손실 산출방법의 유효성을 확인하기 위해서 설치 운전중인 2kW급 계통연계형 PV시스템에서 수집된 운전데이터를 적용하였다. Fig. 2는 2kW급 계통연계형 PV시스템을 보여준다. PV시스템은 대전지역(위도 36.2°, 경도 127.22°)에 설치되었고 PV어레이의 설치 경사각은 15°, 설치 방위각 0°(정남향)인 지붕일체형 구조로 설계 구성되었다. 실리콘 단결정 태양전지를 사용한 PV모듈의 정격출력은 43.294W이고 24직렬, 2병렬로 연결되었다. 계통연계형 PCS의 정격출력은 3kW, 정격조건에서 92%이상의 변환효율을 가진다. PV시스템에 발생하는 손실을 산출하기 위해서 감시계측시스템을 구축 운영하여 PV시스템의 전기적 입출력 및 일사강도, 온도 및 풍속 등을 포함한 기상정보를 2초 간격으로 측정하여 1분 간격의 운전데이터를 수집 저장한다.⁴⁾ 2008년부터 2010년까지 수집된 운전데이터로부터 손실 산출모델을 사용하여 성

능 및 손실을 정량적인 값으로 산출하였다. PV시스템의 손실 산출모델의 모델계수는 Table 1과 같다.



Fig. 2 2kW grid-connected PV system

Table 1. Model parameter

항목	모델계수
P_{as}	2.078
a_m	0.9027
a_t	-0.0035

4. 손실 산출결과 및 고찰

2kW급 계통연계형 PV시스템에서 2008년부터 2010년까지 수집된 운전데이터를 사용하여 PV시스템의 손실 산출방법의 유효성을 확인하였다.

Fig. 3와 Fig. 4은 수집된 분별 운전데이터로부터 식 (1)~식 (6) 및 식 (7)~식 (14)에 의해 산출된 15분 간격의 PV시스템의 등가 가동시간인 Y_r , Y_{am} , Y_{ao} , Y_{at} , Y_a 및 Y_f 와 발생된 손실인 Y_{lp} , Y_{lm} , Y_{lt} , Y_{la} 및 Y_{lo} 의 산출결과를 보여준다.

Fig. 5는 2008년부터 2010년까지 수집된 운전데이터로부터 식 (1)~식 (6)을 이용한 PV시스템 월별 평균 등가 가동시간의 산출결과를 보여준다. Fig. 5에서 보면 Y_r 는 2.31[h/

d]~5.43[h/d], Y_{am} 은 2.08 [h/d]~4.90[h/d], Y_{ao} 는 2.07[h/d]~4.88[h/d], Y_{at} 는 1.78[h/d]~4.65[h/d], Y_a 는 1.83[h/d]~4.37 [h/d] 및 Y_f 는 1.62[h/d]~3.80[h/d]의 분포를 가진다.

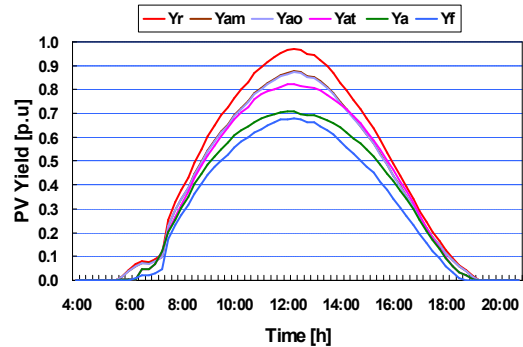


Fig. 3 PV yield curve at 15 minute intervals

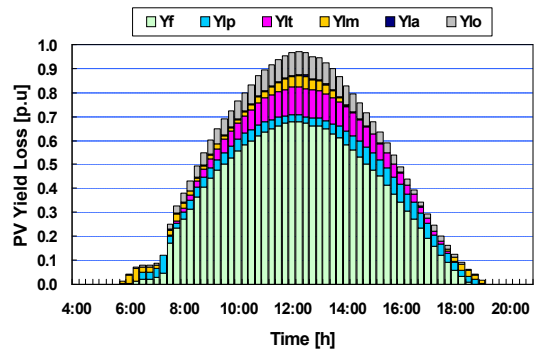


Fig. 4 PV yield losses at 15 minute intervals

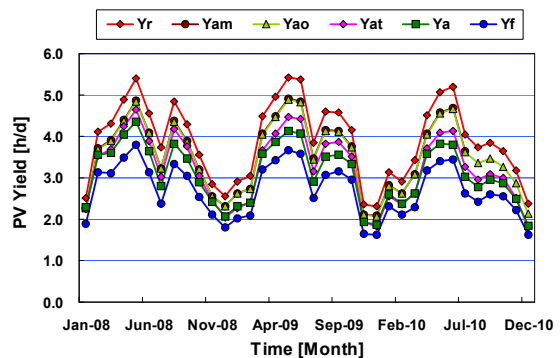


Fig. 5 Monthly PV yield calculation results

Fig. 6은 Fig. 5의 등가 가동시간으로부터 식 (7)~식 (14)의 손실 산출모델에 의한 월별 평균 PV시스템 등가 가동시간과 손실의 산출결과를 보여준다. 그림에서 보면 Y_f 는 1.622[h/d]~3.803[h/d], Y_{lp} 는 0.212 [h/d]~0.563[h/d], Y_{lt} 는 -0.048[h/d]~0.371 [h/d], Y_{lm} 은 0.033[h/d]~0.422[h/d], Y_{la} 는 0.008 [h/d]~0.021 [h/d] 및 Y_{lo} 는 0.245 [h/d]~0.632[h/d]의 분포를 가진다.

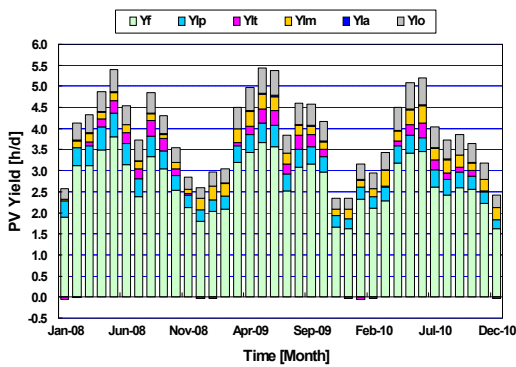


Fig. 6 Monthly PV yield losses calculation results

Fig. 6의 PV시스템의 월별 평균 손실에 대해서 정규화한 PV시스템 등가 가동시간과 손실 산출결과를 정리하면 Table 2와 같다. Table 2에서 보면 Y_f 는 0.637~0.760, Y_{lp} 는 0.065~0.153, Y_{lt} 는 -0.019~0.077, Y_{lm} 은 0.013~0.119, Y_{la} 는 0.003~0.004 및 Y_{lo} 는 0.097~0.133의 분포를 가진다. 하절기에는 온도상승에 따른 효율감소로 Y_{lt} 가 기타 계절과 비교해서 크기 때문에 PV시스템의 성능계수(PR, Performance ratio)⁴⁾⁵⁾가 떨어진다. 동절기에는 낮은 외기온도로 STC에서의 PV모듈 표면 온도 25°C보다 작은 경우가 발생하여 Y_{lt} 및 Y_{lm} 는 부의 특성을 가지기 때문에 이에 따른 온도이득으로 PR은 다른 계절과 비교해서 크다. 즉 PV시스템은 입력에너지인 일사강도가 동일하다면 춘·추절기와 하절기보다 온도상

승에 따른 손실 감소로 동절기에 PV시스템에서 발생하는 손실이 상대적으로 적기 때문에 시스템의 출력전력이 크다는 것을 의미한다. 그리고 일사강도 및 온도 등의 주변 환경은 시간에 따라 항상 변화하므로 PV구성기기 뿐만 아니라 PV시스템에 발생하는 손실도 또한 항상 변화한다.

Table. 2 Monthly normalized PV yield losses calculation result

시간	Y_f	Y_{lp}	Y_{lt}	Y_{lm}	Y_{la}	Y_{lo}
2008년 01월	0.752	0.153	-0.019	0.013	0.003	0.097
2008년 02월	0.760	0.105	-0.004	0.038	0.004	0.097
2008년 03월	0.722	0.110	0.020	0.048	0.004	0.097
2008년 04월	0.717	0.110	0.041	0.031	0.004	0.097
2008년 05월	0.704	0.104	0.053	0.038	0.004	0.097
2008년 06월	0.689	0.112	0.056	0.042	0.003	0.098
2008년 07월	0.637	0.117	0.060	0.050	0.003	0.133
2008년 08월	0.689	0.098	0.077	0.035	0.004	0.097
2008년 09월	0.708	0.098	0.068	0.025	0.004	0.097
2008년 10월	0.713	0.098	0.043	0.044	0.004	0.097
2008년 11월	0.747	0.104	0.013	0.035	0.004	0.097
2008년 12월	0.703	0.103	-0.010	0.103	0.003	0.097
2009년 01월	0.695	0.096	-0.014	0.112	0.003	0.109
2009년 02월	0.689	0.099	0.000	0.100	0.003	0.109
2009년 03월	0.712	0.084	0.019	0.072	0.004	0.110
2009년 04월	0.690	0.087	0.042	0.068	0.004	0.110
2009년 05월	0.673	0.088	0.060	0.066	0.004	0.110
2009년 06월	0.666	0.091	0.066	0.064	0.004	0.110
2009년 07월	0.656	0.104	0.060	0.065	0.004	0.111
2009년 08월	0.670	0.093	0.072	0.052	0.004	0.110
2009년 09월	0.689	0.089	0.065	0.043	0.004	0.110
2009년 10월	0.713	0.087	0.044	0.042	0.004	0.110
2009년 11월	0.706	0.115	0.002	0.064	0.003	0.110
2009년 12월	0.703	0.104	-0.015	0.095	0.003	0.109
2010년 01월	0.741	0.093	-0.014	0.054	0.003	0.122
2010년 02월	0.728	0.093	-0.011	0.064	0.003	0.122
2010년 03월	0.668	0.094	0.005	0.109	0.003	0.121
2010년 04월	0.705	0.088	0.029	0.051	0.004	0.123
2010년 05월	0.670	0.085	0.051	0.068	0.004	0.122
2010년 06월	0.664	0.065	0.065	0.081	0.004	0.122
2010년 07월	0.648	0.100	0.059	0.067	0.004	0.122
2010년 08월	0.648	0.100	0.044	0.083	0.004	0.122
2010년 09월	0.675	0.094	0.032	0.073	0.004	0.122
2010년 10월	0.700	0.090	0.033	0.051	0.004	0.123
2010년 11월	0.697	0.086	0.010	0.082	0.003	0.122
2010년 12월	0.682	0.089	-0.015	0.119	0.004	0.121
평균	0.695	0.098	0.030	0.062	0.004	0.111

이와 같이 주변 환경의 변화에 대해서 PV 시스템에서 발생하는 손실을 정량적인 값으로 산출할 수 있는 방법이 제시된다면 PV시스템의 고장 혹은 이상 등에 의해 발생하는 성능 저하의 원인을 신속하게 판단하여 이에 따른 에너지손실 개선할 수 있다. 또한 PV시스템이 수명이 다할 때 까지 항상 최대성능을 유지할 수 있는 장기간의 성능과 품질보증 체계를 확립할 수 있고 PV시스템의 이용보급과 기술개발에 중요한 문제가 될 수 있는 PV모듈 및 PCS의 성능향상에서부터 최적선정, 설치환경 및 설계구성에 따른 다양한 PV시스템의 성능 기준, 최적설계 그리고 유지관리기술을 확립할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 등가 가동시간을 이용한 손실 산출방법을 제시하여 수집된 분별 운전데이터로부터 PV시스템에서 발생하는 손실을 정량적인 값으로 산출하였고 그 결과에 대해서 종합적으로 고찰하였다. 본 논문에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PV시스템의 성능과 손실과의 상관관계로부터 등가 가동시간을 이용한 정규화 손실 산출모델을 사용하여 PV시스템에서 발생하는 손실을 산출할 수 있는 간단하지만 유효성을 가진 손실 산출방법을 제시하였다.
- (2) 2008부터 2010년까지 2kW급 계통연계형 PV시스템에서 수집된 분별 운전데이터로부터 산출모델을 사용하여 발생된 손실을 정량적인 값으로 산출하였고 그 결과에 대해서 종합적으로 비교 분석하였다.
- (3) 제시한 손실 산출방법은 정량적인 평가분석과 함께 PV시스템의 고장 혹은 이상에

따른 발생 원인을 파악할 수 있으므로 향후 PV시스템의 손실저감 및 최적화를 위한 설계 및 고장 검출 진단도구로의 응용이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20093020010010) 및 한국에너지기술연구원의 주요사업(B3-2452-02)으로 수행한 결과입니다.

참 고 문 헌

1. Korea Energy Management corporation, New & Renewable Energy Dissemination Statistics 2011, 2012.
2. Pearsall NM., Scholz H., Zdanowicz, Reise C., PV System Assessment in Performance -Towards Maximum System Output, European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2574-2579, 2006.
3. Pearsall NM., Atanasiu B., Zdanowicz T.. Progress on the Modernisation of the European PV System Monitoring Guidelines, European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 3208-3216, 2008.
4. So JH., Lee BS., Yu JS., Hwang HM., Yu GW., Performance Estimation Method of Grid-Connected Photovoltaic System, Journal of The Korean Solar Energy Society, Vol. 20, No .6, pp. 509-516, 2010.
5. Ueda Y., Kurokawa K., Kitamura K., Yokota M., Akanuma K., Sugihara H., Performance Analysis of Various System Configurations on Grid-Connected Residential PV Systems. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 93 No. 6-7, pp. 945-949, 2009.