

계통연계형 태양광발전시스템의 설계계수 산출분석

Design Factor Calculation and Analysis of Grid-Connected Photovoltaic System

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

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

(Submit date : 2013. 9. 7., Judgement date : 2013. 9. 13., Publication decide date : 2013. 10. 21.)

Abstract : This paper presents a simple but valid design factor calculation method of grid-connected photovoltaic system using normalized yield model. The proposed calculation method can be represented as a quantitative value about five design factors from irradiance to system output power. The validity of this method is identified by analyzing design factor with three years monitored data. These results will indicate that it is useful to determine the optimal design and selection of grid-connected photovoltaic system to meet different user purposes and enhance long-term reliability and stability of grid-connected photovoltaic system.

Key Words : 태양광발전(Photovoltaic), 계통연계(Grid-connected), 설계계수(Design factor), 손실(Loss), 등가 가동시간 (Yield)

기 호 설 명

$G_{a,meas}$: 경사면 일사강도 [kW/m^2]	$P_{f,meas}$: PCS 출력전력 [kW]
$G_{a,ref}$: 1 [kW/m^2]	P_{as} : PV어레이 설치용량 [kW]
$P_{a,meas}$: PV어레이 출력전력 [kW]	Y_r : 태양 등가 가동시간
	Y_a : PV어레이 등가 가동시간
	Y_p : PV시스템 등가 가동시간

*† 소정훈(교신저자) : 한국에너지기술연구원
E-mail : jhso@kier.re.kr, Tel : 041-860-3371
*황혜미 : 한국에너지기술연구원
*정영석 : 한국에너지기술연구원
*고석환 : 한국에너지기술연구원
*주영철 : 한국에너지기술연구원
*임현목 : (주)삼영

*† So Jung-Hun (corresponding author) : Korea Institute of Energy Reserach.
E-mail : jhso@kier.re.kr, Tel : 042-860-3371
*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..
**Lim Hyun-Mook : Samyoung Co., Ltd

Y_{am}	: PV어레이 최대 등가 가동시간
Y_{ao}	: PV어레이 최적 등가 가동시간
Y_{at}	: PV어레이 온도보정 후 등가 가동시간
I_a	: PV어레이 직류선로손실 [kW]
α_m	: PV어레이 최대성능계수
α_t	: PV어레이 온도보정계수
K_o	: PV어레이 기타손실을 고려한 설계계수
K_m	: PV어레이 부정합 손실을 고려한 설계계수
K_p	: PCS 손실을 고려한 설계계수
K_t	: PV어레이 온도상승 손실을 고려한 설계계수
K	: PV시스템 설계계수

1. 서론

태양광발전(PV, Photovoltaic)은 전 세계의 에너지수요를 모두 공급할 수 있을 만큼 무한한 잠재량을 가진 깨끗하고 소음이 적고 및 무공해의 지속가능한 친환경적인 재생에너지원으로 전 세계가 주목하고 있다.¹⁾ 전 세계에 설치된 PV시스템의 총 누적 설치용량은 2000년에는 678MW이지만 2011년에는 63.6GW로 급속하게 성장하였고 또한 미래 전력산업시장에서 PV산업의 중요성이 점점 확대되고 있다.²⁾

국내에서는 2011년까지 설치 보급된 PV시스템의 총 누적 설치용량은 812MW로 설치보급이 점점 확대되면서³⁾ 향후 PV시스템은 사용목적에 따라 다양화 및 복잡화가 예상됨에 따라 PV시스템의 성능, 품질보증과 함께 건물외관의 미적효과를 고려한 설계기술 개발이 중요하다. 따라서 PV시스템의 성능과 손실과의 상관관계를 분석하여 정량적인 값으로 설계계수가 산출된다면 설치환경에 따른 PV시스템 및 구성기기의 성능 평가분석에 있어 객

관적이고 신뢰성을 확립할 수 있으므로 향후 다양한 사용목적에 부합된 PV구성기기의 최적 선정 및 PV시스템의 최적설계가 가능하다.⁴⁾⁶⁾

본 논문에서는 2008년부터 2010년까지 3kW급 계통연계형 PV시스템에서 수집된 운전데이터로부터 주변 환경의 변화시 발생하는 손실을 고려한 정규화 설계계수를 정량적인 값으로 산출할 있는 방법을 제시하였고 그 산출 결과에 대해서 종합적으로 비교 분석하였다.

2. 설계계수 산출방법

PV시스템의 경사면 일사강도로부터 교류출력까지 등가 가동시간⁵⁾⁶⁾⁷⁾을 이용한 태양 등가 가동시간(Y_r), PV어레이 최대 등가 가동시간(Y_{am}), PV어레이 최적 등가 가동시간(Y_{ao}), PV어레이 온도보정 후 등가 가동시간(Y_{at}), PV어레이 등가 가동시간(Y_a) 및 PV시스템 등가 가동시간(Y_f)의 산출모델은 다음의 식으로 나타낸다.

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

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

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

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

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

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

식 (1)~식 (6)으로부터 등가 가동시간⁵⁾⁶⁾⁷⁾을 이용한 정규화 설계계수 산출방법은 다음과 같다. 입사각 변동, 적설, 오염 및 노화 등

을 포함한 PV어레이의 기타 손실(Y_{lo})을 고려한 설계계수(K_o), PV어레이의 직류선로 손실을 고려한 설계계수(K_a), PV어레이의 직병렬 불균형 및 최대출력점 변동 등을 포함한 PV어레이의 부정합 손실을 고려한 설계계수(K_m), PV어레이 온도상승 손실을 고려한 설계계수(K_t) 및 PCS(Power Conditioning System)의 변환효율 감소 및 대기상태 등을 포함한 PCS 손실을 고려한 설계계수(K_p) 그리고 PV시스템 설계계수(K)는 다음의 식으로 나타낸다.⁸⁾

$Y_{ao} > Y_{at}$ 경우 :

$$K_o = 1 - \frac{Y_r - Y_{am}}{Y_r} \quad (7)$$

$Y_{ao} < Y_{at}$ 경우 :

$$K_o = 1 - \frac{Y_r - Y_{am} + Y_{ao} - Y_{at}}{Y_r} \quad (8)$$

$$K_a = 1 - \frac{Y_{am} - Y_{ao}}{Y_r \times K_o} \quad (9)$$

$$K_m = 1 - \frac{Y_{ao} - Y_{at}}{Y_r \times K_o \times K_a} \quad (10)$$

$$K_t = 1 - \frac{Y_{at} - Y_a}{Y_r \times K_o \times K_a \times K_m} \quad (11)$$

$$K_p = 1 - \frac{Y_a - Y_p}{Y_r \times K_o \times K_a \times K_m \times K_t} \quad (12)$$

$$K = K_o \times K_a \times K_m \times K_t \times K_p = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (13)$$

Fig. 1은 수집된 분별 운전데이터로부터 식 (1)~식 (6)을 사용하여 산출한 PV시스템의 15분별 등가 가동시간을 보여준다. Fig. 2는 Fig. 1에서 산출된 등가 가동시간으로부터 식 (7)~식 (13)을 사용하여 산출한 PV시스템의 15분별 설계계수인 K_o , K_a , K_m , K_t , K_p 및 K 를 보여준다.

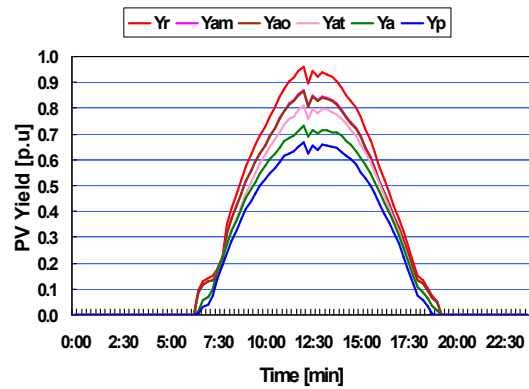


Fig. 1 15 minutely PV yield

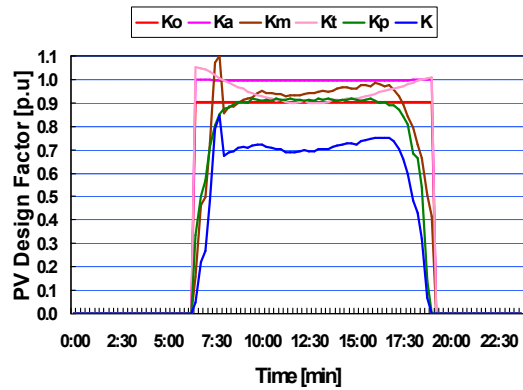


Fig. 2 15 minutely PV design factor

3. 설계계수 산출결과 비교분석

제시한 PV시스템의 정규화 설계계수 산출 방법의 유효성을 확인하기 위해서 3kW급 계통연계형 PV시스템에서 2008년부터 2010년까지 수집된 분별 운전데이터를 적용하였다.

Fig. 3은 3kW급 계통연계형 PV시스템을 보여준다. PV시스템은 대전지역(위도 36.2°, 경도 127.22°)에 설치되었고, PV어레이는 실리콘 단결정 태양전지를 사용한 53W급 PV모듈을 20직렬, 3병렬로 총 60개로 연결 구성되었고 설치 경사각은 30° 그리고 설치 방위각 0° (정남향)인 평지붕 구조로 설치되었다. 계통연계형 PCS는 정격출력이 3kW이고, 정격조건에서 92%이상의 변환효율을 가진다.



Fig. 3 3kW grid-connected PV system

Fig. 4는 2008년 5월1일부터 31일까지 수집된 분별 운전데이터로부터 식 (1)~식 (6)을 이용한 PV시스템의 일별 등가 가동시간과 설계계수의 산출결과를 보여준다. 그림에서 Y_r 는 1.61[h/d]~7.29[h/d], Y_{am} 은 1.42[h/d]~6.40[h/d], Y_{ao} 는 1.41[h/d]~6.36 [h/d], Y_{at} 는 1.74[h/d]~5.98[h/d], Y_a 는 1.75 [h/d]~5.75[h/d] 및 Y_p 는 1.05[h/d]~5.08 [h/d]의 분포를 가진다.

Fig. 5는 Fig. 4의 등가 가동시간으로부터 식(7)~식 (13)의 설계계수 산출모델에 의한 PV시스템의 일별 등가 가동시간과 설계계수의 산출결과를 보여준다. 그림에서 K_a 는 0.877~1.025, K_α 는 0.994~0.996, K_m 는 0.933~1.0, K_t 는 0.918~1.004, K_p 는 0.508~0.884 및 K 는 0.446~0.723의 분포를 가진다. 그림에서 보면 5월 15일, 5월 28일과 5월 30일에는 K 가 각각 0.587, 0.446 그리고 0.505로 다른 일의 K 와 비

교해서 차이가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 일사강도, 온도 및 오염 등의 주변 환경의 급격한 변화 혹은 PV구성기기의 이상 또는 결함 등으로 PV시스템에 성능장애가 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 PV시스템 설계계수의 산출결과를 주변 환경의 변화시 PV시스템의 성능을 미리 파악함으로써 PV시스템 및 구성기기에서 발생하는 성능저하 혹은 성능장애의 원인에 대해서 정량적인 분석이 가능하므로 향후 설치환경에 따른 PV구성기기의 최적선정과 함께 손실저감을 통한 성능향상, 사용목적에 부합되는 PV시스템의 맞춤형 최적설계에 있어 중요한 도구로의 응용이 가능하다.

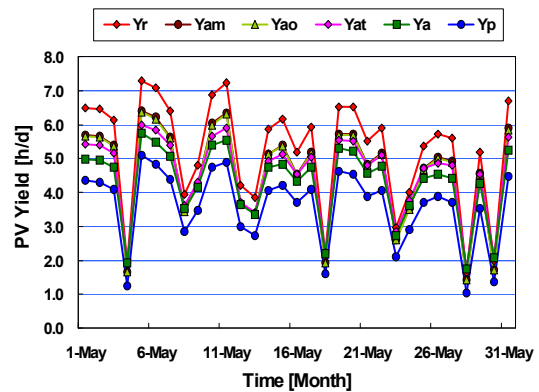


Fig. 4 Daily PV yield calculation results

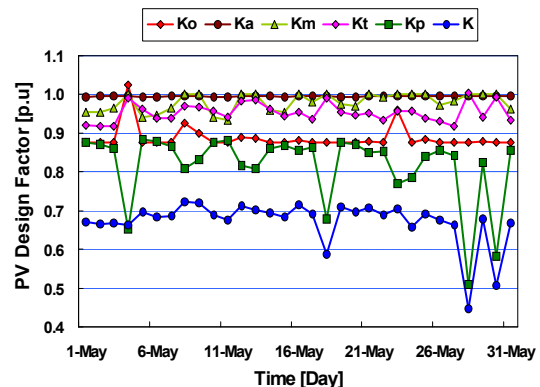


Fig. 5 Daily PV design factors calculation results

Fig. 6은 2008년부터 2010년까지 수집된 분별 운전데이터로부터 식 (1)~식 (6)을 이용한 PV시스템의 월별 일평균 등가 가동시간의 산출 결과를 보여준다. 그림에서 보면 Y_r 는 2.67[h/d]~5.21[h/d], Y_{am} 은 2.34[h/d]~4.57[h/d], Y_{ao} 는 2.33[h/d]~4.55[h/d], Y_{at} 는 2.26[h/d]~4.50[h/d], Y_a 는 2.27[h/d]~4.27[h/d] 및 Y_p 는 2.06[h/d]~3.70[h/d]의 분포를 가진다.

Fig. 7은 Fig. 6의 등가 가동시간으로부터 식 (7)~식 (13)의 설계계수 산출모델에 의한 PV시스템의 월별 일평균 등가 가동시간과 설계계수의 산출결과를 보여준다. 그림에서 보면 K_a 는 0.848~0.923, K_a 는 0.995~0.996, K_m 는 0.917~1.0, K_t 는 0.911~1.037, K_p 는 0.819~0.921 및 K 는 0.649~0.817의 분포를 가진다. 그림에서 보면 K_t 의 경우 동절기에는 1보다 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 외기온도에 의해서 PV모듈의 표면온도가 25°C이하로 낮아질 경우 온도이득에 따른 손실이 감소되었다는 것을 의미한다. 이와 같이 일사강도 및 온도 등의 주변 환경은 시간에 따라 동일하지 않고 항상 변화되기 때문에 PV구성기기 뿐만 아니라 PV시스템의 성능과 손실도 또한 변화한다. PV시스템의 성능과 손실과 상관관계부터 산출된 설계계수는 주변 환경의 급격한 변화뿐만 아니라 고장 혹은 이상이 발생할 경우 PV시스템의 성능을 정확히 파악함으로써 옥외에서의 PV시스템의 고장 혹은 이상 등으로 발생하는 문제점에 대한 원인들을 쉽게 파악하여 이에 대한 대책방안 제시와 함께 초기 설계부터 설치운전에서 발생할 수 있는 에너지 손실과 경제적 비용을 개선할 수 있다. 또한 PV시스템의 이용보급과 기술개발에 중요한 문제가 될 수 있는 PV모듈 및 PCS의 성능향상에서부터 최적선정, 설치환경 및 설계구성에 따른 다양한 PV시스템의 성능기준, 최적설

계 그리고 사후관리기술의 확립이 가능하다.

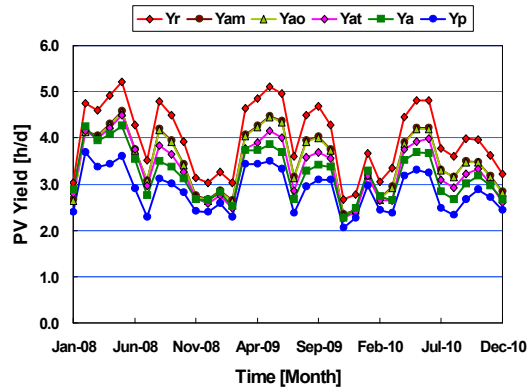


Fig. 6 Monthly PV Yield calculation results

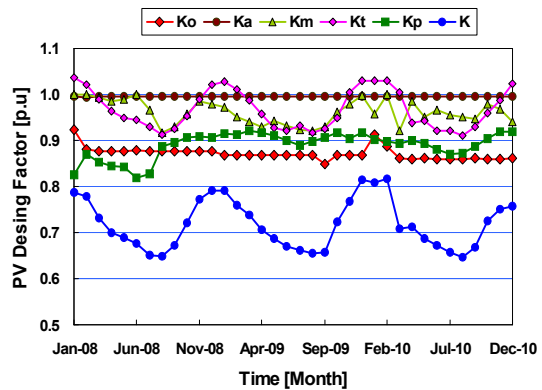


Fig. 7 Monthly PV design factors calculation results

4. 결 론

본 논문에서는 등가 가동시간을 이용한정규화 설계계수 산출방법을 제시하여 수집된 분별 운전데이터로부터 PV시스템의 설계계수를 정량적인 값으로 산출하였고 그 결과에 대해서 종합적으로 비교 분석하였다. 본 논문에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PV시스템의 성능과 손실과의 상관관계로부터 등가 가동시간을 이용한 정규화 설계계수 산출모델을 사용한 간단하지만 유

- 효성을 가진 설계계수 산출방법을 제시하였다.
- (2) 2008부터 2010년까지 3kW급 계통연계형 PV시스템에서 수집된 분별 운전데이터로부터 산출모델을 사용하여 설계계수를 정량적인 값으로 산출하였고 그 결과에 대해서 종합적으로 비교 분석하였다.
 - (3) 제시한 설계계수 산출방법은 초기 설계부터 설치운전에서 발생될 수 있는 PV시스템의 성능저하, 고장 혹은 이상 등으로 인한 문제점과 그 원인들을 정량화하여 파악할 수 있다. 그리고 산출결과를 데이터베이스화한다면 설치환경 및 설계구성에 따른 PV시스템의 성능기준을 결정할 수 있어 저가 및 고효율 PV시스템을 위한 최적 설계 도구로의 응용이 가능하다.

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. Moharil RM., Kulkarni PS., Reliability Analysis of Solar Photovoltaic System using Hourly Mean Solar Radiation Data, Solar Energy, Vol. 84 No.4, pp.691-702, 2010.
2. International Energy Agency, Survey Report of selected IEA countries between 1992 and 2011, Trends in Photovoltaic Applications, 2012.
3. Korea Energy Management corporation, New & Renewable Energy Dissemination Statistics 2011, 2012.
4. 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.
5. Pietruszko SM., Gradzki M., Performance of a Grid Connected Small PV system in Poland, Applied Energy, Vol. 74 No. 1-2, pp. 174-184, 2003.
6. 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.
7. So JH., Jung YS., Yu GJ., Choi JY, Choi JH., Performance Results and Analysis of 3kW Grid-Connected PV Systems, Renewable Energy, Vol. 32, No. 11, pp. 1858-1872, 2007.
8. 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.