

## 50kW급 PV시스템 시뮬레이터의 구현 및 경제성 분석에 관한 연구

\*\*이강연\*·김용구\*\*·신석두\*\*\*·김형곤\*\*\*·전형석\*\*\*·김병철\*\*\*·민완기\*\*\*·김남오\*\*\*  
 \*조선대학교 전기공학과, \*\*한국폴리텍5대학 전기계측제어과, \*\*\*조선이공대학 전기과,

### Implementation of the 50kW Utility Interconnected PV System Simulator and the Study of Financial Analysis

K. Y. Lee, Y. G. Kim, S. D. Shin, H. G. Kim, H. S. Chun, B. C. Kim, W. K. Min, N. O Kim

**Abstract** : This paper summarizes the results of these efforts by offering a photovoltaic system structure in 50kW. The combination of photovoltaic system components are interconnected and system monitoring system will be summarized for the purpose of the increasing safety in this article. This paper describes configuration of utility interactive photovoltaic system which generated electric power supplies to dormitory. In order to installing the middle or large scale photovoltaic system, It must investigated the optimal design of system, compute quantity of power generation, economic rate of return and so on. In this paper represent 50kW utility photovoltaic system examination, developed simulation results and financial analysis. The performance of photovoltaic system has been evaluated , analyzed with simulation and financial analysis results. The results obtained in this research will be much useful to prior investigation for installing utility interactive photovoltaic system.

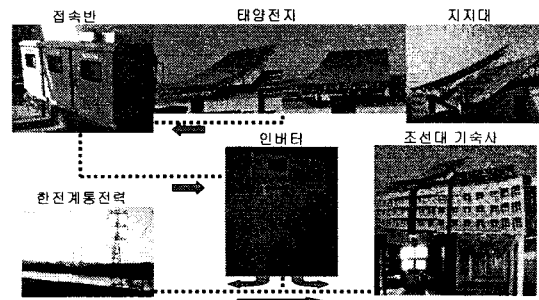
#### 1. 서 론

산업발전의 가속화와 국민생활 수준의 향상에 따라 에너지 소비량의 증가에 따른 에너지자원의 급속한 고갈과 환경문제가 대두되는 가운데 무한정·무공해의 신재생 에너지에 대한 연구기술 및 보급기술에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다.[1][2] 한국의 전력상황은 2004-2017년의 13여년의 기간동안 전력이 평균 2.5% 증가할 것으로 전망되며 최대전력은 평균 2.7% 증가할 것으로 예상된다.[3] 따라서 전력발전설비 확충에 있어 다양한 대체에너지 기술 중에서 태양광발전시스템은 발전소를 보완할 수 있는 중요한 에너지산업의 한 부분으로 분산전원의 역할을 분담해야만 한다.[4][5] 독립형과 계통연계형으로 분류되는 태양광 발전시스템 중에서 향후 보급의 잠재력이 큰 계통연계형 태양광발전시스템은 주택용 소규모 발전시스템부터 중·대규모 전력사업 용에 이르기까지 분산형 전원 혹은 전력사업용으로 전력부하의 피크전력을 감소시키기 위한 발전용으로 그 역할을 수행함으로써 그에 대한 연구의 필요성이 요구된다. 또한 세계적으로 기후협약에 따라 대체에너지의 적극적인 보급사업 계획을 국가적인 차원에서 수립, 추진하고 있는 실정이다.[6] 본 논문에서는 중·대규모의 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 일년 동안의 발전량과 이용에 따른 운전특성과 운용효율에 대해 분석, 검토하고 또한 계통연계형 태양광발전용 시뮬레이터를 구현하여 실증 데이터와 비교 분석함으로써 태양광 발전시스템의 효율성과 사업성을 시뮬레이션을 통해 검토할 수 있도록 하였다. 제안된 시뮬레이터는 동작과 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 일상량을 비롯한 시스템 파라미터등의 다양한 변수를 이용하는 방식으로 구현되었고 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해서 실제시스템의 출력 데이터와 시뮬레이션의 결과를 비교 검토함으로써 최적의 설계 조건을 제시한다. 또한 분석된 결과를 이용하여 RETScreen® Energy Model 소프트웨어를 이용하여 경제성분석을 수행함으로써 향후 중·대규모의 태양광발전시스템의 설치에 적극적으로 기여하고자 한다.

#### 2. 50kW급 태양광발전시스템

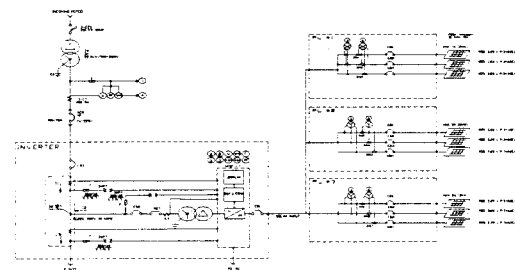
태양광발전시스템의 구성은 그림 1에서 보는 바와 같이 50kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 구성도와 같다. 25kW 2기를 설치하여 최대전력 50kW를 공급할 수 있는 시스템으로 계통연

계형 인버터를 통해 전력계통으로부터의 전원공급과 부하전력을 공급하고 있다. 또한 실시간 데이터의 저장과 인버터 운전감시 시스템, 부하에 따른 운전상태의 분석, 실시간 모니터링을 통한 전력의 안정적인 공급 등이 가능하도록 RS485 통신방식이 적용되어 시스템의 감시 및 동작에 따른 파라미터를 모니터링 하도록 구성되어 있고 FA Manager 50이 설치되어 획득된 데이터를 데이터베이스화하여 저장하도록 설계되었다.



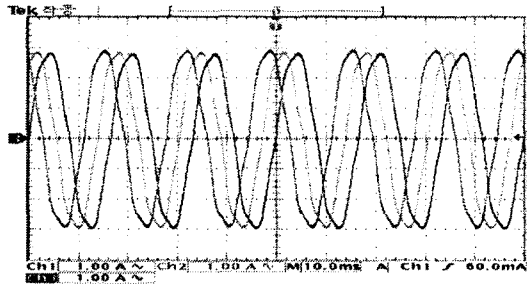
<Fig. 1> Overall System Configuration of the 50kW Grid Interconnected PV System

실증실험 대상인 태양광시스템에 설치된 태양전지로는 각동에 20직렬×8병렬 형태의 2개군과 20직렬×9병렬 형태의 1개군으로 모듈 500개로 구성되어 2개동에 총 1000개의 모듈로 구성되어 최대 50kW를 출력할 수 있는 직병렬형태로 구성되어 있다. 태양전지 어레이의 설치 위치는 위도 35.10°, 경도 126.55이며, 경사각 30방위각은 정남향 0°, 고도는 해발 69,1896m이다. 시스템의 형태는 계통연계형 태양광발전시스템으로 구성되어 있으며 그림 2에서 보는바와 같이 태양전지 어레이로부터 DC입력을 받아, 인버터에서 부하전력을 제어하는 계통도를 보여주고 있다. 또한 태양전지 발전량, 부하량, 일사량 및 외기온도 등의 검출 데이터를 모니터링용 컴퓨터로 전송하여 실시간 시스템의 동작상태 및 고장내용을 점검 및 데이터 저장할 수 있도록 구성되어 있다.



<Fig. 2> System Distribution Diagram

일일 발전전력 특성은 모니터링 시스템은 RTU와 양방향 디지털 전력계를 이용한 계측과정에서 운전, 정지, 경보 등을 디스플레이 및 일정 Format으로 DATA를 보관 할 수 있는 감시제어 시스템으로 설비되어 있다. 그림 3은 무부하시의 인버터 출력력의 선간전류파형을 보여주고 있다.



<Fig. 3> Inverter Current Waveforms with No Load

### 3. 계통연계형 PV 시스템의 시뮬레이터 구현

50kW급 계통연계형 모니터링시스템에서는 외기환경과 시스템 파라미터가 데이터베이스화되어 저장되고, 이 중 시뮬레이터의 구현을 위해 적용된 파라미터들 중 외기환경은 일사량, 온도, 풍속, 경도, 위도, 경사각, 방위각등이고 시스템 파라미터는 단락전류, 개방전압, 선로손실, 태양전지 어레이 손실 등이 이용되었다. 표 2에서는 미국 NASA의 ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER에서 제공하는 PV 시스템 설치장소의 10년간의 평균온도와 일사량을 보여주고 있으며 이는 경제성분석에 이용된다. PR은 성능계수를 의미하고 표준상태(STC)에서 손실요인을 고려하지 않은 PV 시스템의 이상적인 발전성과 실제 발전성에 대한 정의이다. PR이 80%이상인 경우 시스템은 양호한 발전 성능을 가지고 있는 경우이며, PR이 70%이하인 경우는 시스템 고장 혹은 결함 등의 여러 문제에 기인하여 성능은 저하된다. 시뮬레이션 툴의 개발을 위해 많은 배열로 된 데이터처리에 탁월한 성능을 지닌 마이크로소프트의 엑셀을 이용하였고, 편리한 데이터의 입출력을 위해 인터페이스 부분은 비주얼베이직 스크립트를 통해 구현하였다.

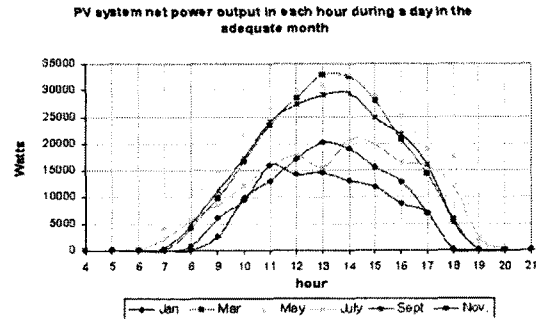
경제성분석은 기술적 타당성을 지닌 방안에 대해 그 투자비와 예상효과를 비교, 검토하여 해당 방안이 경제적 타당성을 가지고 있는가의 여부를 평가하는 것이다. 일반적으로 경제성분석은 연간수익대비를 중심으로 비교평가하게 되며, 경제적 타당성을 가 지려면 수익이 비용을 초과해야 한다. 여러 가지의 분석방법 중 순현재가치(NPV)를 이용하여 투자안의 수행으로 예상되는 미래 현금 유입을 적절한 할인율로 할인하여 산출한 현재가치에서 투자소요액을 차감한 값으로 이 때 순현재가

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{G_t}{(1+k)^t} - C_0$$
 식이 이용된다.  $NPV \geq 0$ 일 때 투자유인이 발생한다. 경제성분석 툴인 RETScreen ver. 3.2를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 근거로 타당성을 분석하였다. 분석을 위해 판매단가는 716.4원/kWh, 수선유지비 고정식 1%, 할인율을 연 2.5%로 설정했고, 모듈비용 4,500\$/kWp, 인버터 550\$/kW, 그리고 기타비용 등이 적용되었다.

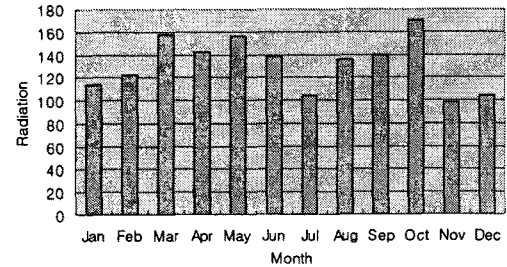
### 4. 실험 및 시뮬레이션

그림 4에서는 분석기간 동안의 시뮬레이션을 통한 월별 발전 특성을 보여주고 있다. 월별 시간에 따른 발전량은 시뮬레이션의 결과에서 보듯이 5월과 9월에서 가장 크게 나타났고, 12월에서 가장 적은 양이 발전되었다. 이는 일사량에 대한 실제 데이터와 비교했을 때 거의 유사한 형태로 출력됨을 확인할 수 있다. 일사량에 따른 태양전지 어레이 출력특성은 일사량이 좋은 봄, 가을에 출력이 많고 여름에는 장마에 의한 일사량 저하 및 외기온도 상승에 의해 출력이 저하되고 겨울철에는 적설과 온도변화와 같은 외기환경 등에 의해 일사량이 낮아져 태양광시스템의 출력이 저하됨을 확인할 수 있다. 그림 5에서는 월별 일사량의 합을 보여준다. 특히, 7월의 경우 태양광발전시스템은 강우 및 온도변화와 같은 발전성능을 결정하는 전일사량이 감소됨을 관찰할 수 있다. 그림 6에서는 PCS의 DC입력과 AC 출력을 월별로 보여준다. PCS의 입력과 출력의 차이는 PCS의 손실분이다. 본 시스템에서 적용된 PCS의 효율은 평균 90%이상의 효율을 가짐을 알 수 있다. 그림 7은 분석 및 시뮬레이션 기간인 2004년 한 해 동안의 월별 발전효율을 측정되어진 값과 시뮬레이션 값을 비교하여 보여준다. 측정값과 시뮬레이션값의 차이는 태양광시스템의 구조상 오목한 구조의 모듈설치로 인해 효율의 저하와 분단위의 일사량의 변동에 의해 발생된 오차로 분석되어진다. 이러한 오차의 요인은 발전효율 뿐만 아니라 어레이 변환효율과 PCS의 효율에도 영향을 미치게 된다. 그림 8에서는 월별 어레이의 변환효율을 보여준다. 시뮬레이션은 시간당 일사량의 변동을 획득하여

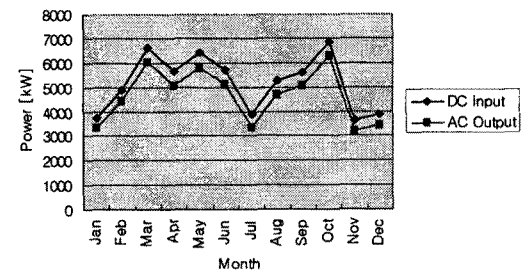
이를 데이터 처리함으로써 분당 일사량의 변동에 대해서는 대처 능력이 부족하여 계통오차가 발생함을 확인할 수 있다. 그림 9는 월별 PCS 효율을 비교하여 보여준다. 시뮬레이션의 결과가 실제 측정 결과보다 변동폭이 적은 것은 외기 환경의 변화에 능동적이지 못하다는 단점이 있음을 보여준다. 그림 10에서는 식(1)에서 정의된 바와 같이 실제 시스템의 월별 성능비를 보여준다. 기속사 전원용으로 사용하는 태양광발전시스템은 전체부하 중 약 10%에 해당되는 부하사용량을 담당하였고, 획득된 데이터를 검토해본 결과, 일사량이 저하되면 태양전지 어레이의 변환효율도 저하되고 정격출력의 30%이하로 감소하게 되면 인버터효율 또한 현저히 저하되므로 시스템의 각종 효율이 모두 저하됨을 확인하였다. 그림 11과 그림 12는 RETScreen의 Energy Model 화면과 경제성분석화면을 보여준다.



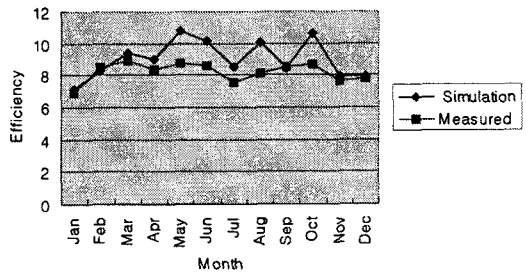
<Fig. 4> Generation Characteristic with monthly time variation



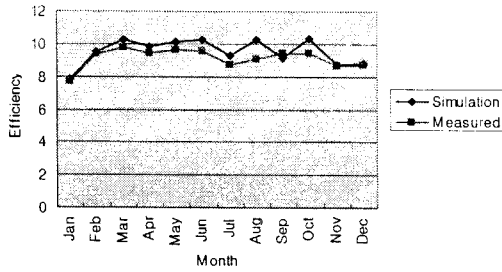
<Fig. 5> Monthly Sum of Irradiation



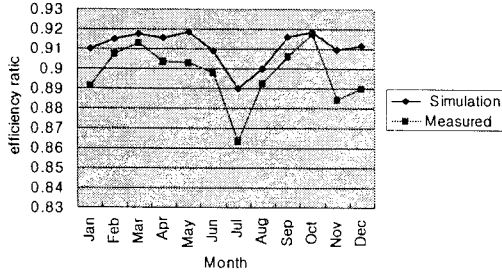
<Fig. 6> Monthly DC Input and AC Output of PCS



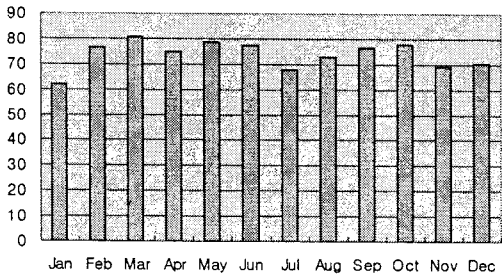
<Fig. 7> Monthly Generation Efficiency



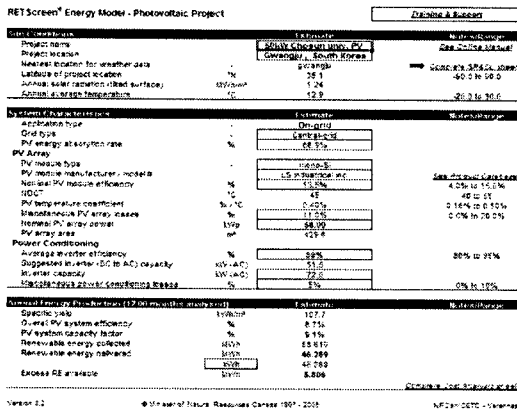
<Fig. 8> Monthly Array Conversion Efficiency



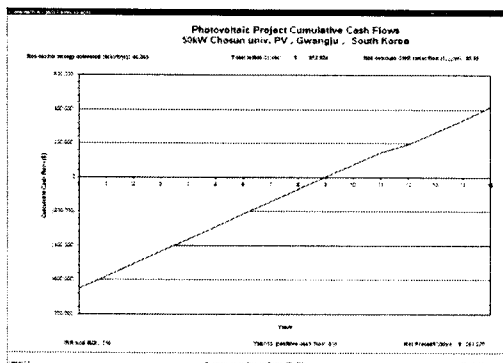
<Fig. 9> Monthly PCS Efficiency



<Fig. 10> Monthly Performance Ratio



<Fig. 11> Energy Model of 50kW PV System



<Fig. 12> Cumulative Cash Flow Chart for 50kW PV System

시뮬레이션의 결과와 측정된 데이터를 비교 분석한 결과 전반적으로 시뮬레이션의 결과에서 더욱 우수한 특성이 보였는데, 이는 시뮬레이션 상에서 고려되지 않은 외기환경과 시스템의 손실이 결과에 영향을 주었음을 확인하였고, 외기환경의 급격한 변동에 의해 측정데이터와의 차이가 발생했음이 검토되었다. 또한 오목한 형태의 상단 및 하단 모듈의 구조상의 설치면에 대한 효율의 감소가 시뮬레이션에서는 고려되지 않아 실증데이터값과 시뮬레이션의 결과가 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 경제성분석의 시뮬레이션 결과 8.95년이 소요되었고, 투자의 적합성의 기준이 되는 IRR은 8.5%이고 NPV>0으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 50kW급 태양광발전시스템을 계통과 연계하여 1년 동안을 분석기간으로 설정하여 PV시스템의 발전특성 및 성능의 평가에 대해 기술하였고 또한 계통연계형 PV시스템에 적용될 시뮬레이터를 개발하여 수치적 분석을 수행하였고 그 결과를 비교 검토하였다. 또한 이와 더불어 RETScreen ver. 3. 2 시뮬레이터를 이용하여 경제성분석을 수행하였다.

본 연구를 통해 태양광발전시스템의 모니터링을 통한 통계해석을 통해서 향후 중·대용량의 태양광발전설비의 설치시의 전력발생량의 계산을 위한 사전 조사과정의 중대한 기초 자료로 사용될 수 있다. 분석결과 중·대용량의 태양광발전시스템이 기후변화에 매우 민감한 특성을 출력력을 통해서 확인할 수 있었는데, 중·대용량은 그 비용과 효과에 대해서 기초 자료가 충분히 공급되어 사업의 타당성 입증에 요구되는 측면이 강해 이를 위한 중요한 학술 데이터이고 또한 시뮬레이션을 통해 이러한 문제를 해결할 수 있을 거라 생각한다.

향후 외기환경의 변동(그림자 손실, 고도의 영향, 등)이나 시스템 환경의 변동에 대한 적극적인 반응을 통해 좀 더 정밀한 시뮬레이터를 구현시켜 이를 활용함으로써 중·대용량 태양광 발전 시스템의 사전 설치 조사에 중요한 데이터를 제공하기 위한 연구를 수행할 계획이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Dong, H. Sugimoto, "A New Utility Interactive Photovoltaic Power Conditioning System And Its Maximum Power Tracking Control", IPPEC97, PP238-243, 1997
- [2] Takashi Oozeki and Toshiyasu Izawa "The Evaluation Method of PV System" Technical Digest of the International PVSEC-12, pp. 741-742, 2001
- [3] Werner Knaupp, "Evaluation of PV Module Design at Irregular Operation Conditions" 26th PVSEC, pp. 1213-1216, 1997
- [4] C. Hua, C. Shen, J. Lin, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking", Proceeding of the 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation Vol 2, 1997
- [5] S. Nonaka, K. Kesamaru, K. Yamasaki, et. al., "Interconnection System with Sinusoidal Output PWM Current Source Inverter between Photovoltaic Arrays and the Utility Line", IPEC-Tokyo, pp. 144-151, 1990
- [6] 소정훈, 유권중, 최주엽 "시뮬레이션에 의한 PV시스템 설치 방식의 최적설계에 관한 연구", 태양에너지학회 논문집 Vol. 23, No. 3, 2003
- [7] 산업자원위원회 "2004년 산업자원부 기금운용 계획 보고서", 산업자원부, 2004
- [8] 연구용역 보고서, 조선대학교, "대구 및 신안지역 태양광발전 사업 타당성 조사용역", 한국지역난방공사, 2005