

TRNSYS를 이용한 대규모 태양열발전시스템 성능 연구

김 종규¹⁾, 강 용혁²⁾, 김 진수³⁾, 이 상남⁴⁾, 유 창균⁵⁾, 윤 환기⁶⁾

Study on the Large Scale Solar Thermal Power Plant System by Using the TRNSYS Program

Jongkyu Kim, Yongheack Kang, Jinsu Kim, Sangnam Lee, Changkyun Yu, Hwanki Yun

Key words : Solar Thermal Power Plant System(태양열발전시스템), Direct Normal Irradiation (직달 일사량), Receiver(흡수기), Storage(저장기)

Abstract : This paper describes the procedure of the basic design and transient variation of performance for a 1 MWe large scale solar thermal power plant system (STPPS) by using the commercial software tool of TRNSYS. In order to simulate the transient variation of STPPS's performance, the basic design of STPPS are preceded by using the THERMOFLEX. Three different days of DNI weather data of Daejeon in 2005 are used to calculate the performance. For a high DNI data values, the generating power of 1.1 MWe and flow rate of 1.4 kg/s at 804 W/m² are good agreement with the basic design value of 1.0 MWe, 1.36 kg/s at 800 W/m². Using the other weather data of low and sudden decreasing DNI values, the results show that the output power and flow rate follow well the DNI variation. Based on the results, it is allowed to use the program to estimate the performance of STPPS for variety of DNI data.

Nomenclature

MWt : thermal power
MWe : electric power output
DNI : Direct Normal Irradiation [W/m²]

이를 위하여 본 연구에서는 TRNSYS(Transient System Simulation) Ver. 15를 사용하였다. TRNSYS는 건물부하계산용으로 널리 사용되어 왔으며 특

1. 서론

기존의 화력발전에서는 일정한 양의 화석연료의 연소를 통해 열원을 공급 받는다. 따라서 화력발전소의 경우 기동, 정지 및 부하변동 시에 공급 열원의 변동을 제외하곤 거의 일정한 열량을 공급받게 된다. 한편 태양열발전시스템은 태양의 복사에너지가 열원이 된다. 이러한 태양복사에너지는 시간 및 지역에 따라 그 값이 변하게 되는데, 정상운전 상태라 하더라도 일사량 변화에 따라 발전시스템의 열·물질 균형이 변하게 되며 이로 인하여 증기 발생량, 발전량 등의 변화가 동반된다. 따라서 태양열발전시스템에서는 시간에 따른 태양복사에너지의 변화로 인한 발전시스템의 운전성능 변화를 예측하는 것이 필요하다.

-
- 1) 한국에너지기술연구원
E-mail : rnokim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3744 Fax : (042)860-3739
 - 2) 한국에너지기술연구원
E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3518 Fax : (042) 860-3739
 - 3) 한국에너지기술연구원
E-mail : jnskim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3549 Fax : (042) 860-3739
 - 4) 한국에너지기술연구원
E-mail : snlee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3223 Fax : (042) 860-3739
 - 5) 한국에너지기술연구원
E-mail : ckyu@kier.re.kr
Tel : (042)860-3515 Fax : (042) 860-3739
 - 6) 한국에너지기술연구원
E-mail : hkyoon@kier.re.kr
Tel : (042)860-3513 Fax : (042) 860-3739

히 태양열 분야에서는 일사량 변화에 따른 태양열 시스템의 동적성능 예측 및 설계를 위하여 사용된다. 특히 대규모 태양열발전시스템의 성능을 예측하기 위해서는 기존의 TRNSYS 모듈로는 부족한 부분이 많다. 따라서 독일에서 개발한 STEC(Solar Thermal Electric Components) Library를 사용하였다.

Schwarzarzbözl et al.⁽¹⁾은 TRNSYS를 이용하여 태양열-가스터빈 혼합발전시스템의 여러 발전용량에 대한 성능계산을 실시하였다. 따라서 본 논문에서도 기존의 THERMOFLEX를 이용한 기본설계안을 바탕으로 구성된 타워형(Tower) 대규모 태양열발전시스템에 대하여 TRNSYS를 이용하여 발전시스템의 성능 연구를 실시하였다.

2. 태양열발전시스템

본 연구에서는 대규모 태양열발전으로서 타워형 태양열발전시스템을 고려하고 있다. 타워형 발전시스템은 태양열을 반사하는 반사기(Heliostat), 반사된 태양에너지를 흡수하여 작동유체에 전달하는 흡수기(receiver), 태양에너지를 열의 형태로 비축해 두는 저장기(storage) 그리고 발전을 담당하는 증기터빈(steam turbine)으로 크게 나눌 수 있다. 또한 증기터빈에서 저압의 출구증기를 흡수기로 다시 공급하기 위해서 복수기(condenser), 냉각탑(Cooling Tower), 탈기기(deaerator), 공급수 펌프(feedwater pump) 등의 설비가 추가로 필요하다.

흡수기 작동매체와 저장기 매체의 종류에 따라 여러 가지 형태를 가질 수 있지만 본 연구에서는 흡수기 작동유체로서 물을 사용하고 있고 저장기 작동유체로는 용융염 등의 다른 작동매체를 고려하고 있다. 그림 1은 본 연구에서 대상으로 하고 있는 타워형 태양열발전시스템이다. 작동유체가 물인 발전시스템은 저장기를 제외하곤 기존의 화력발전 방식인 랭킨 사이클(Rankine Cycle)과 동일하다고 할 수 있다.

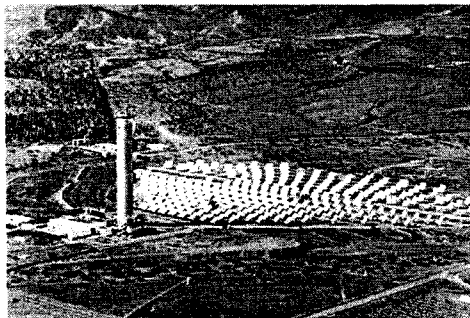


Fig. 1 Solar Thermal Power Plant (CESA-1, Spain)

3. 기본설계

현재 타워형 태양열발전시스템의 목표성능은 발전용량으로 1 MWe이다. 이를 위하여 흡수기 출구의 증기조건은 40 bar, 350 °C의 과열증기를 이용하고자 한다. 이때 TRNSYS를 이용하여 시간별 직달 일사량(DNI)에 따른 발전시스템의 성능변화를 계산하기 위해서는 기본설계를 통한 발전시스템의 구성이 완료되어 있어야 한다. 이는 기본설계를 통한 발전시스템이 정상운전이라는 조건하에 터빈 발전출력이 1 MWe를 만족시켜야 하며 이러한 발전시스템에서 일사량의 변화가 발전시스템의 작동유체, 발전량에 미치는 영향을 검토해 보아야 한다.

태양열발전시스템의 기본설계를 위해서 미국의 Thermoflow Inc.에서 개발한 THERMOFLEX Ver. 16.0 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 기존 발전시스템을 대상으로 하고 있기 때문에 태양열발전시스템에 적용하기 위해 태양복사에너지를 일반 보일러의 연소용 연료의 열량으로 환산하여 나타내었다.

3.1 열량계산

태양열발전을 위한 기본설계시 필요열량을 계산하기 위해서는 축열시간, 저장기 운전시간 등에 대한 고려가 필요하고 이를 통하여 축열기 저장열량, 반사판 면적 등의 계산을 수행하여야 한다.⁽²⁾ 본 연구에서 고려하고 있는 태양열발전시스템은 정상운전시 1 MWe의 터빈 출력이 발생하고 이때 일정량의 증기를 사용하여 3시간 동안 저장기에 열을 저장함으로써 저장기를 통해 0.7 MWe의 전기를 추가로 1시간 발전할 수 있는 시스템으로 설정하였다. 이를 만족시키기 위하여 필요한 열량, 반사판 면적 등에 대하여 계산을 수행하였다. 이때 직달일사량은 800 W/m², 반사판의 반사효율 78%, 터빈에서 전기변환 효율을 23.6%, 흡수기 효율을 90% 그리고 저장기의 경우 모든 열손실을 고려하여 84%의 효율을 나타낸다고 가정하였다.^(3,4)

흡수기에서 필요한 태양복사에너지를 구하면 아래와 같다.

$$1 \text{ MWe 발전열량} : 1 \text{ MWe} / 0.236 = 4.24 \text{ MWt} \quad (1)$$

$$0.7 \text{ MWe 발전열량} : 0.6 \text{ MWe} / 0.236 = 2.54 \text{ MWt} \quad (2)$$

여기에서 저장기 필요열량은 3시간 저장, 1시간 운전이므로 식 (2)에서 1시간동안 운전을 위한 총 열량은 2.54 MWt이 되고 이를 3시간 동안 나누어 저장하므로 시간당 저장 열량은 식 (3)과 같고 저장효율 84%를 고려하면 1.2 MWt의 열량이 필요하다..

$$2.54 \text{ MWth} / 3\text{hr} / 0.84 = 1.0 \text{ MWt} \quad (3)$$

따라서 반사효율 78 %를 고려한 총 필요열량은 식(4)와 같다.

$$(4.24 \text{ MWt} + 1.0 \text{ MWt}) / 0.9 / 0.78 = 7.46 \text{ MWt} \quad (4)$$

이때 직달일사량을 800 W/m^2 으로 가정하면 총 필요열량 7.46 MWt를 위한 반사판의 면적은 $9,325 \text{ m}^2$ 이다.

3.2 기본설계 결과

태양열발전시스템의 기본설계 결과를 그림 2에 나타내었다. 이는 앞서 언급 한 것과 같이 일정한 태양에너지가 유입되는 정상운전 상태만을 고려한 결과이다.

THERMOFLEX 프로그램에서는 반사판 효율을 고려하지 않고 터빈 출구압력이 0.1 bar로서 높은 엔탈피 차를 보이기 때문에 터빈 효율이 높아진다. 따라서 THERMOFLEX를 이용하여 계산한 총 소모열량 4.9 MWt로 나타났다. 이는 위 식(4)에서 반사율 0.78을 고려하지 않고 구한 총 소모열량 5.8 MWt 보다 적음을 알 수 있다. 그러나 이는 THERMOFLEX 프로그램에서 터빈 효율을 약 30 %로 높게 예측한데 따른 결과로 판단된다. 터빈 출구 복수기 압력에 따라 출력량의 변화가 크기 때문에 복수기 압력을 0.1 bar에서 1 bar로 높게 되면 터빈효율은 20.5 %로 떨어지며 동일 출력을 유지하는 조건에서 6.8 MWt의 열량이 요구된다. 이와 같이 터빈 성능에 따라 흡수열량은 차이를 보이고 있으며 THERMOFLEX를 이용한 결과는 이러한 조건변화를 주종하여 결과를 나타내고 있다. 여기에서 결정된 발전시스템 구성과 운전조건을 바탕으로 TRNSYS를 이용한 시간별 태양열발전시스템의 성능을 검토해 보았다.

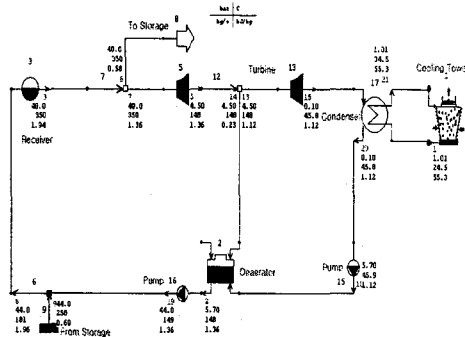


Fig. 2 Basic design of solar thermal power plant (THERMOFLEX program)

4. TRNSYS 해석결과

STEC 라이브러리를 설치한 TRNSYS 프로그램은 랭킨, 브레이튼 사이클 모듈과 함께 CRS(Central Receiver System), Parabolic Trough 형식을 포함한 태양열발전관련 모듈을 사용할 수 있다. 따라서 태양열발전이 필요한 증기터빈, 증기발생기, 복수기 등을 사용할 수 있으며 타워형식의 태양열발전시스템에 해당하는 반사판(Heliostat Field), 흡수기(Receiver)를 CRS모듈에서 선택할 수 있다. 그림 3은 TRNSYS 프로그램에서 타워형 태양열발전시스템의 성능을 계산하기 위해 구성한 단위기기 아이콘들의 연결 상태를 나타내고 있다.

계산 순서 및 주요 입력항목을 살펴보면 시간에 따른 직달일사량을 읽어 들인 후 반사판의 면적, 반사효율 등을 고려하여 흡수기로 열량을 보내게 된다. 이때 흡수기에서는 유입되는 공급수 온도 및 출구 증기조건(압력, 온도) 등의 설정 값을 통하여 필요 유량을 계산하게 된다. 이후 과열증기의 유동경로를 따라 터빈에서는 출구증기압 및 탈기기로의 공급 증기량, 복수기에서는 냉각용수 온도, 탈기기에서는 포화온도 이하로 공급수를 만들어 공급수 펌프로 전달해 주는 역할을 하며 해당 계산을 수행한다.

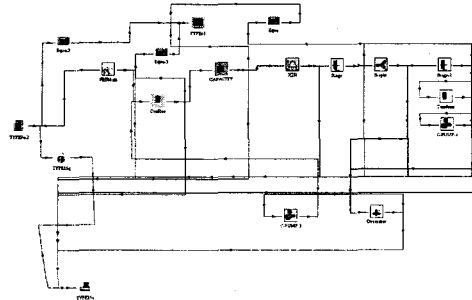


Fig. 3 Performance calculation of Solar Thermal Power System (TRNSYS Program)

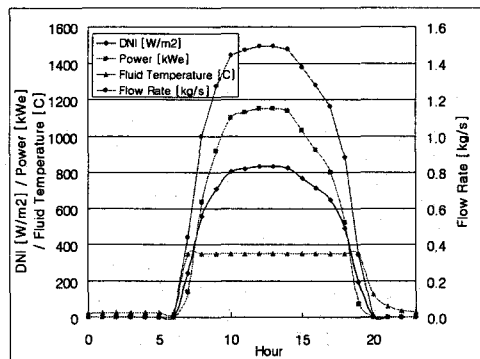


Fig. 4 Performance variation of Solar Thermal Power Plant (3 May)

그림 4는 2005년 5월 3일 대전지역의 직달일사량이 최대 831 W/m²일 경우의 TRNSYS 해석결과이다. 오전 10시에 직달일사량이 804 W/m²에 도달하게 되는데 이때 유량 1.44 kg/s, 터빈출력 1.1 MWe를 나타내고 있다. 이는 THERMOFLEX에서 수행한 기본설계 결과인 1.35 kg/s, 1.0 MWe의 결과와 유사함을 알 수 있다.

직달일사량이 800 W/m² 보다 낮은 경우(2005년 4월 8일), 그림 5와 같은 운전성능을 보이고 있다. 직달일사량이 가장 높은 14시에 (684 W/m²) 가장 높은 터빈 출력을 (869 kW)을 나타내고 있으나 이는 높은 직달일사량 결과인 그림 4와 비교하면 낮은 직달일사량으로 인해 유량의 흐름이 줄어들어 발전용량이 줄어들게 됨을 나타내고 있다. 이러한 경우 정상운전에서 출력인 1 MWe의 발전이 불가능해 지고 저부하 운전시 출력조건을 설정하여 운전해야 할 것이다. 그림 6의 경우 갑작스런 직달일사량의 감소로 발전 출력이 500 kW 정도로 감소함을 알 수 있다.

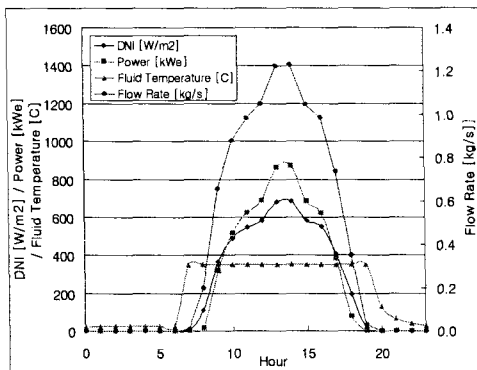


Fig. 5 Performance variation of Solar Thermal Power Plant (8 April)

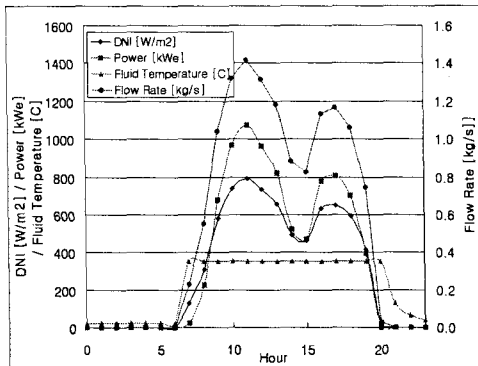


Fig. 6 Performance variation of Solar Thermal Power Plant (23 May)

이와 같이 TRNSYS를 이용한 대규모 태양열발전 시스템의 동적부하 변화에 따른 성능해석은 기본설계값과 비교하여 타당한 결과를 보이고 있다고 판단되며 이를 이용하면 지역별, 시간별 직달일사량의 변화 즉, 부하변화에 따른 태양열발전시스템의 성능변화를 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

태양열발전시스템의 기본설계 및 TRNSYS를 이용한 동특성 해석과정을 살펴보았다.

태양열발전의 경우 일사량의 변화는 열량의 변화와 같으므로 발전성능에 직접적인 영향을 준다. 따라서 시간에 따른 발전성능을 예측하기 위해서는 기본설계를 통해 발전시스템을 구성하고 이를 바탕으로 TRNSYS 프로그램을 사용하였다. 그 결과 발전 시스템의 성능변화 및 운전조건의 변화를 예측할 수 있었으며 이를 기본설계 결과와 비교하였다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 실증연구사업 연구 지원(2005-N-S017-P-01-0-000)을 통해 수행되고 있습니다.

References

- [1] Schwarzbozl, P., et al. 2005, "Solar gas turbine systems: design, cost and perspectives", Solar Energy, Article in Press
- [2] Kim, J. K. et al., "Study on the Basic Design of Large Scale Solar Power Plant System", Proceedings of the KSNER 2006 Spring Annual Conference, pp. 576-579.
- [3] Castro, M. et al., 1987, "Five-year CESA-I simulation program review", Solar Energy, Vol. 38, No. 6, pp. 415-424.
- [4] Castro, M. et al., 1991, "C.R.S. receiver and storage systems evaluation", Solar Energy, Vol. 47, No. 3, pp. 197-207.