

대규모 태양열 발전시스템 기본설계 특성 분석

김 종규¹⁾, 강 용혁²⁾, 김 진수³⁾, 이 상남, 유 창균, 윤 환기

Study on the Basic Design of Large Scale Solar Thermal Power Plant System

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

Key words : Basic design(기본설계), Solar Thermal Power Plant System(태양열 발전시스템), Receiver(흡수기), Storage(저장기), Rankine Cycle(랭킨사이클)

Abstract : This paper describes characteristics and procedure of the basic design of large scale solar thermal power plant system. The evaluation is based on the operating data of CESA-I, solar central receiver plant. In order to evaluate the solar irradiation on the receiver, it is necessary to calculate the amount of thermal energy consumption at steam turbine and storage system in the STPPS. Especially, it is need to take into account of the storage and operating time to design a plant efficiently. In addition, basic design is performed for the CESA-I using the software tool of THERMOFLEX program. Based on the results, it is allowed to use the program to investigate detail performance of each units of the STPPS by varying the operating conditions.

Nomenclature

STPP : solar thermal power plant
MWt : thermal power
MWe : electric power output

1. 서 론

태양열발전은 재생에너지의 한 분야로서 1970년대부터 유럽, 미국 등을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 고유가 및 에너지, 환경문제로 인하여 그 유용성이 커지고 있으며 시험용 플랜트의 규모를 넘어서 태양열발전의 효율을 높이고 발전단가를 낮추기 위한 노력의 일환으로 대규모 태양열발전 시스템을 구성하여 운전하려 하고 있다.

대규모 태양열 발전은 집광된 태양열을 받아들이는 흡수부, 태양에너지를 열의 형태로 비축해 두는 저장부 및 터빈을 구동하기 위한 각종 기기 등으로 구성된다. 여기서 터빈 구동부는 일반 발전시스템에서의 구성과 동일하다고 할 수 있다. 즉, 터빈에서 배출되는 증기를 흡수기로 다

시 공급하기 위해서는 복수기(condenser), 탈기기(deaerator), 공급수 히터(feedwater heater) 등의 설비가 필요하다. 따라서 이러한 설비의 배치 및 운전조건의 설정은 전체 태양열발전 시스템의 효율과도 밀접한 관련을 가지고 있다.

본 논문에서는 태양열발전 시스템에서 기본설계 방법을 살펴보고 기존 화력발전과 다른 특징에 대하여 논하고자 한다. 또한 기존 화력발전 설비를 대상으로 하는 기본설계 프로그램인 THERMOFLEX를 이용하여 태양열발전 시스템의 기본설계를 수행하였다. 이를 통해 태양열발전의 기본설계에 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

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

2. 태양열발전 시스템

태양열발전은 태양의 복사에너지를 열원으로 하여 터빈과 발전기를 구동시킴으로써 전기에너지를 만들어내는 발전방식이다. 따라서 날씨와 밤낮의 영향을 대비하여 열에너지를 저장하는 저장기가 설치되는 특징이 있다. 이와 더불어 태양열발전 시스템은 흡수기 순환 매체와 저장기 매체의 종류에 따라 여러 가지 형태를 가질 수 있다.⁽¹⁾ 예로서 그림 1은 흡수기 순환매체로 물을 이용하고 저장기 매체로서 용융염을 사용하는 스페인에 건설된 tower형 태양열발전 시스템인 CESA-I의 개략도이다. 흡수기에서 발생한 증기 중 일부는 직접 증기터빈을 구동시켜 전기를 발생시키고, 나머지 증기는 열교환기를 통하여 저장기에 열에너지의 형태로 저장된다. 그림 1에서 언급한 태양열발전 방식은 흡수부와 저장부를 구성하는 특징을 제외하곤 기력발전 방식인 랭킨 사이클(Rankine Cycle)과 동일하다고 할 수 있다.

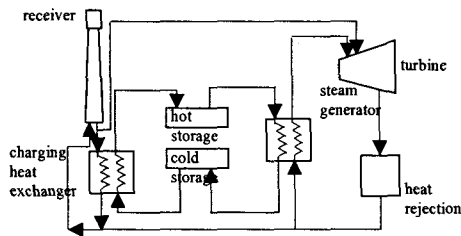


Fig. 1 Schematic drawing of Solar Thermal Power Plant

3. 기본설계

태양열발전 시스템의 설계 및 제작을 위하여 시스템에 대한 기본설계가 필수적이다. 태양열발전시스템의 발전용량, 저장용량을 설정하고 이를 만족시키기 위해 흡수기에서 생성되어야 할 증기량 및 온도, 압력조건을 계산한다. 이로부터 흡수기에서 필요로 하는 태양복사량을 계산할 수 있으며 반사기(heliostat)의 필요면적, 개수 등을 예측할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 전체 태양열발전 시스템 각기의 요구사항을 정리할 수 있다.

기본설계를 위하여 미국의 Thermoflow Inc.에서 개발한 THERMOFLEX 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 기존 발전시스템을 대상으로 하고 있기 때문에 태양열발전 시스템에 적용하기 위해 몇 가지 사항에 대하여 가정이 필요하다. 첫째, 태양복사에너지를 일반 보일러의 연소용 연료의 열량으로 환산하여 사용하여야 한다. 둘째, 열 저장 장치에 대한 모델이 없기 때문에 저장시스템으로 동일 열량의 증기가 흡수(heat sink)된다고 설정한다. 이 경우 저장기에서의 축열량이 필요

하다.

본 논문에서 기본설계 과정의 이해를 돕기 위하여 CESA-I tower형 태양열발전 시스템을 예로서 사용하였다. CESA-I 발전시스템의 터빈출력은 1.2 MWe이고 이때 흡수기 출구 증기조건은 520 °C, 110 kg/cm²의 과열증기이다.^(2,3,4)

3.1 소요열량 계산

태양열발전의 경우 정상운전시 터빈 구동을 위해 요구되는 열량이 있으며 저장기 단독으로 증기를 발생시켜 터빈을 구동하기 위한 열량 역시 필요하다. 따라서 기본설계시 이 두 가지 경우를 합산한 열량을 만족시키기 위한 발전시스템을 구성하여야 한다. 특히, 태양열발전의 열원이 반사기로부터 투사되는 태양 복사에너지이므로 반사기의 면적 즉, 반사기 개수를 결정하는데도 태양열발전 시스템에서의 소모열량 계산이 필요하다.

정상운전시 터빈 출력과 저장기로부터의 출력이 각각 1.2 MWe, 800 kW에 터빈의 발전효율을 약 20%라고 하면 식 (1)로부터 소모열량이 각각 6 MWt, 4 MWt로 구해진다. 따라서 약 10 MWt의 열량이 앞서 언급한 터빈 출력을 위해 필요하게 된다. 그러나 여기에서 흡수기의 효율 등을 고려하면 더 많은 열량이 흡수기로 공급되어야 할 것이다.

$$\text{소모열량(MWt)} = \frac{\text{터빈출력(MWe)}}{\text{터빈효율}} \quad (1)$$

3.2 저장기 축열량 계산

여기서 한 가지 고려해야 할 사항이 있다. 일반 화력발전이라면 위와 같이 결정된 소모열량을 위하여 연료를 계속적으로 공급해 주는 방식을 취하면 된다. 그러나 태양열 발전의 경우 매일 운전이 시작되고 시간에 따른 태양복사에너지의 변화가 발생한다. 그림 2에 하루 중 시간에 따른 태양열발전시스템의 총 전기출력, 저장열량, 그리고 태양복사에너지의 변화를 계략적으로 나타내었다. 이와 같이 태양열 발전이 정상운전에 도달한 뒤 저장기로 여분의 열량을 보내기 시작할 수 있다. 또한 정상운전과 저장기로 열량공급이 가능한 시간대가 태양복사에너지가 좋은 몇 시간 동안으로 국한된다. 따라서 이를 고려한 설계가 필요하다.

그럼 예를 들어 보겠다. 우선 정상운전 동안에 한하여 저장기에 열량을 보낼 수 있다고 가정하고 3시간 동안 1.2 MWe 출력의 정상운전이 지속된다고 하자. 이러한 경우 저장기에 약 3시간동안 4 MWt, 총 12 MWht의 열량이 저장된다. 이는 결국 저장기 단독운전인 경우 0.8 MWe의 터빈 출력이 약 3시간 동안 지속된다고 할 수 있다.

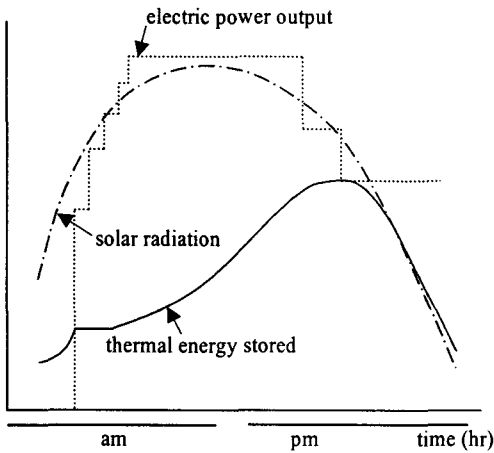


Fig. 2 Schematic drawing of gross electric output, thermal energy stored, and solar radiation.

만약 저장기 단독운전으로 6시간 동안 0.8 MWe 발전이 유지되어야 한다면 3시간 동안 8 MWt의 열량 즉, 24 MWht가 저장되어야 하고 이러한 경우 태양열발전의 정상운전시 소모열량 6 MWt와 저장열량 8 MWt, 총 14 MWt가 필요하게 되어 반사기의 추가설치가 요구된다.

반대로 저장기 단독운전으로 1시간 동안 0.8 MWe의 전기를 생산하는 경우 필요열량은 1시간 동안 4 MWt, 이다. 따라서 정상운전 3시간동안 약 1.3 MWt의 열량을 저장기로 보내면 된다. 이 경우 태양열 발전의 정상운전시 필요한 총 열량은 7.3 MWt로 반사기를 줄일 수 있다.

또한 그림 2와 같이 태양복사량의 감소에 따라 터빈출력을 줄이게 되면 이때 남은 열량을 저장기에 보낼 수 있다. 이러한 경우 저장기로의 축열시간이 늘어나게 됨으로써 흡수기의 부하가 줄어드는 효과를 가져오게 된다. 즉, 반사기 개수를 줄일 수 있어 투자비용을 저렴하게 가져갈 수 있다. 이와 같이 태양열 발전의 기본설계를 위해서는 출력에 따른 총 소모열량을 산출하는 것과 더불어 저장기 축열 시간과 단독운전 시간을 고려한 설계가 필요하다.

3.3 반사면적 계산

CESA-I 태양열 발전 시스템의 경우 흡수기는 흡수열량이 5 MWht 이상인 경우 90% 정도의 효율을 나타내며 저장기의 경우 모든 열손실을 고려하여 84%의 효율을 나타낸다.⁽⁴⁾ 그리고 터빈에서

의 전기 변환효율은 23.6% 라고 한다.⁽²⁾ 따라서 1.2 MWe의 발전용량을 위해서는 약 5.1 MWt의 열량이 필요하다. 그리고 저장기를 통한 발전용량은 0.8 MWe 이고 동일한 터빈 효율을 고려하면 3.4 MWt의 열량이 필요하다. 저장기의 경우 3시간 열 흡수, 3시간 발전을 생각한다면 기본설계시 태양열 발전 시스템에서 고려해야 할 총 소모열량은 8.5 MWt (5.1 + 3.4 MWt)이다. 이때 흡수기 효율 90%를 고려하면 흡수기에 도달하는 태양 복사에너지는 9.4 MWt가 되어야 한다. 태양복사에너지가 800 W/m^2 ⁽²⁾ 이므로 반사기의 총 면적은 11,750 m^2 이 된다. 실제로 CESA-I의 300개 반사기의 총 반사면적은 12,000 m^2 으로 위 계산결과와 거의 동일하다고 할 수 있다.

4. 기본설계 프로그램

THERMOFLEX 프로그램을 이용하여 실제로 기본설계를 그림 3과 같이 실시하였다. 이 경우 정상운전 상태만을 고려하였다. 앞서 말한 것과 같이 흡수기는 연료의 연소로부터 열원을 공급받는 보일러라고 생각하였고 저장기는 공정 중에 열흡수부라고 처리 하였다. 이때 열흡수량은 위 3.2장과 같이 저장기의 흡수열량을 계산하여 그 값을 사용하였다.

실제 CESA-I 태양열 발전 시스템의 흡수기는 증발기와 과열기로 구성되어 되어있으며 저장기 시스템은 두 대의 저장탱크와 연결된 열교환기들로 복잡하게 구성되어 있다. 그러나 본 연구에서는 프로그램의 검증 및 활용성을 검토하기 위하여 간단하게 그림 3과 같이 구성하였다. 흡수기에서 요구 되어지는 과열증기 조건(520°C , 110 kg/cm^2)을 설정하고 저장기로 흡수되는 열량(3.4 MWt) 만큼 열흡수가 되도록 하였다. 그 결과 보일러에서 필요한 열료량이 8.2 MWt(net fuel input)로 계산되었다. 그러나 터빈 출구 복수기 압력에 따라 터빈

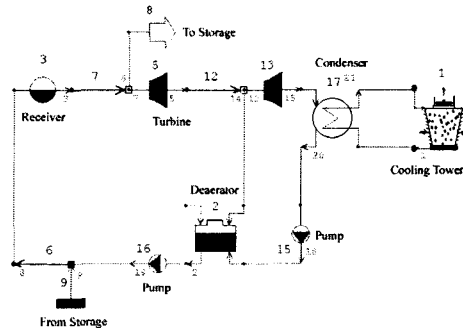


Fig. 3 Basic design of solar thermal power plant (THERMOFLEX program)

출력량의 변화가 크기 때문에 복수기 압력을 0.1 bar에서 1 bar로 높이면 동일 출력을 유지하는 조건에서 흡수기에서 9.1 MWt의 열량이 요구된다. 이렇게 태양열 발전 시스템 각 기기의 운전 조건 등을 변화시키는 과정을 통하여 전체 시스템 효율과 이에 따른 발전량, 필요열량 등을 예측할 수 있으며 최적의 태양열 발전 시스템을 구성할 수 있다.

이러한 기본설계 방법은 그림 2와 같은 태양복사에너지의 변화에 대한 발전용량의 변화 등을 반영하기 어렵다. 단지 기본설계가 완성된 후 부분 부하상태로 계산하는 것이 바람직하겠다. 그러나 TRNSYS 프로그램에서 STEC 라이브러리를 사용하면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있을 것이다.⁽⁵⁾

4. 결론

태양열 발전 시스템에 대한 기본설계 특성에 대하여 실제 공사실적을 적용하여 그 과정을 살펴보고자 한다.

태양열 발전의 경우 기존 화력발전과 달리 저장기로의 저장열량, 저장시간 등을 고려하여 소모열량을 계산하고 이를 기본설계에 반영하여야 한다. 또한 이러한 정보를 이용하여 반사기의 총면적 및 개수를 예측할 수 있다.

기존의 화력발전에 사용되는 프로그램을 이용하여 기본설계를 수행하였으며 이를 통하여 전체 발전 시스템의 효율 및 각 기기의 성능을 계산할 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지·자원기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, J. K. et al., 2006, "Study on the large scale solar power plant compared with thermal power plant", Proceedings of the KSES 2006 Spring Annual Conference, pp. 194-198.
- [2] Castro, M. et al., 1987, "Five-year CESA-I simulation program review", Solar Energy, Vol. 38, No. 6, pp. 415-424.
- [3] Andujar, J. M. et al., 1991, "CESA-1 thermal storage system evaluation", Solar Energy, Vol. 46, No. 5, pp. 305-312.
- [4] Castro, M. et al., 1991, "C.R.S. receiver and storage systems evaluation", Solar Energy, Vol. 47, No. 3, pp. 197-207.
- [5] Schwarzbozl, P., et al. 2005, "Solar gas turbine systems: design, cost and perspectives", Solar Energy, Article in Press.