

태양추적장치

■ 박영철 / 서울산업대학교 공과대학 제어계측공학과, ycpark@snut.ac.kr

머리말

지구온난화, 탄소배출규제강화 등과 같은 용어들이 최근 국제적으로 중요한 화두가 되면서, 신재생에너지에 대한 관심이 그 어느 때보다도 높아지고 있다. 우리나라에서도 저탄소 녹색성장이 신국가 건설을 위한 국가발전 패러다임으로 채택되고, 2020년까지 국가온실가스 감축비율을 2005년 대비 4%로 하는 것과 같은 정책이 만들어지면서 신재생에너지에 관한 관심이 집중되고 있다.

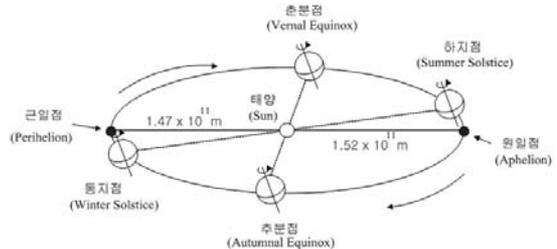
지구상의 신재생에너지 자원 중, 태양에너지는 가장 풍부하고 광범위한 분포를 가지고 있는 것으로, 이론상으로는 1시간 동안 지구에 도달하는 태양에너지의 양은, 1년 동안 지구상의 모든 국가가 사용하는 에너지의 양과 거의 동일한 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고, 태양에너지의 활용은, 비록 최근의 태양광 발전시스템의 보급이 확대되면서 일부 증가하고는 있으나, 지난 수십년 동안 온수공급시스템 그리고 극히 일부에서 활용되고 있는 태양열 이용 냉난방시스템과 같은 지극히 소극적인 수준을 벗어나지 못하고 있다. 태양에너지의 활용, 특히 태양열에너지의 활용이 이와 같이 소극적 수준에 머무르고 있는 것은, 태양에너지가 가지고 있는 문제점, 즉 에너지 밀도가 낮고, 낮과 밤의 변화와 같이 활용 가능시기가 간헐적이며, 아울러 일기 변화에 따른 일조량의 변화와 같이 활용 가능한 에너지 자원의 양과 질의 변화가 크기 때문이다.

태양추적장치는 태양열에너지가 가지고 있는 문제점인 저밀도 에너지원으로서의 태양열에너지를 고밀도화 하기 위한 자동제어시스템으로, 태양에너지 이용시스템이 태양의 위치 변화를 추종하면서 태양으로부터 입사되는 직달일사량 성분을 이용하기 위한 시스템이다. 물론 태양추적장치는 태

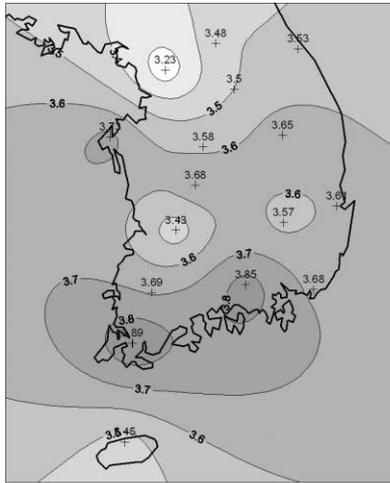
양광 발전시스템에서도 일부 사용된다. 그러나 대부분의 태양추적장치는 태양열에너지의 고밀도화를 위해 사용되며, 따라서 여기서는 태양열이용시스템의 태양추적장치를 근간으로, 태양추적장치의 종류 및 활용사례 등에 대하여 알아본다.

활용 가능한 태양에너지

지구에 도달되는 태양 에너지는 그림 1에서와 같이, 지구가 태양을 중심으로 타원형의 궤도를 따라서 회전함으로써 발생하는 지구와 태양의 거리 변화에 의해 변화하기는 하나, 일반적으로 지구 대기권에 도달되는 태양에너지의 양은 일정한 것으로서 간주되고 있다. 이는 지구로 도달되는 태양에너지의 양의 변화가, 근일점(aphelion)에서의 최대값 및 원일점(perihelion)에서의 최소값까지, 다만 연중 평균치의 이내에서 변화하는 값이기 때문이다^[1]. 그러나 지구 대기권 밖에서 일정한 양으로 간주할 수 있는 태양에너지는, 지구 대기권을 통과하는 동안, 오존, 공기 입자, 수증기, 먼지 등에 의하여, 흡수, 산란 또는 반사되면서, 지역에 따라 지표면에 도달하는 량이 달라지게 되는데, 일반적으로 지구로 복사되는 전체 태양에너지 중 83% ~ 33%^[1]만이 지구 표면까지 도달된다.

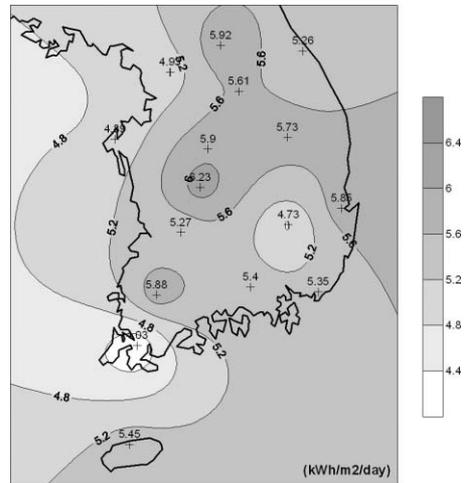


[그림 1] 년중 태양위치의 변화



Annual-average (1982-2005)

[그림 2] 전국 연평균 1일 수평면 전일사량(kWh/m²)



Annual-average (1990-2005)

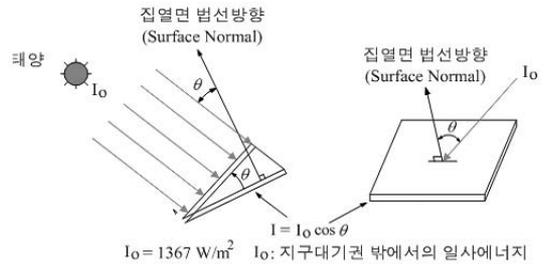
[그림 3] 전국 연평균 1일 법선면직달일사량(kWh/m²)

태양에너지는 수평면 전일사량과 법선면 직달일사량으로 구분되어 사용된다. 수평면 전일사량은, 지면과 수평한 평면에 도달되는 태양에너지의 량을 나타내는 것으로서 평관형 집열기, 온수기, 건조기, 증류기, 그린하우스 등과 같이 낮은 온도에서 동작하는 태양열시스템이나 축적장치를 갖지 않는 태양광발전시스템의 설계 및 성능 평가에서 사용된다. 이에 반하여, 법선면 직달일사량은 넓은 면적에 입사하는 태양에너지를 한곳으로 모아 고온의 에너지를 얻도록 하는 태양열집열시스템, 즉 태양열 발전시스템과 같은 태양열 이용시스템의 설계 및 평가에서 사용된다.

그림 2, 3은 1982년부터 2005년까지 한국에너지기술연구원이 측정한 실측자료를 바탕으로 분석된 우리나라에서 활용 가능한 태양에너지의 분포를 나타낸 것이다²⁾. 그림에서와 같이, 수평면 전일사량에서 우리나라는 년 평균으로 하루에 3.58 kWh/m²의 에너지를 받고 있으며, 청명(淸明)한 날 하루에 연평균 5.40 kWh/m²의 직달일사에너지를 받고 있다.

태양추적장치의 필요성

태양추적장치는 우선 그림 4에서와 같이, 태양



[그림 4] 코사인(cosine loss) 손실

열집열기의 코사인손실을 최소화하기 위한 장치이다. 즉 태양추적장치는 태양열 집열기의 집열면이 항상 태양을 향하도록 함으로서, 집열면이 입사되는 태양광선에 수직으로 놓여 있지 않음으로 인하여 발생하는 손실을 최소화시키고, 따라서 보다 많은 에너지를 집열시킬 수 있도록 하기 위한 자동제어시스템이다. 중·저온의 온도에서 동작되는 태양열 이용 난방 또는 급탕시스템에서는 일반적으로 설치 지역의 위도(또는 위도의 ±10° 이내)로 고정되어 있는 고정형 태양열 집열기가 사용된다. 이는 난방 또는 급탕시스템의 경우, 코사인손실에 의한 열손실을 제외한 나머지 태양에너지만을 사용하여서도, 시스템에서 요구되는 온도범위에 도달될 수 있기 때문에, 따라서 태양추적장치가 필요



하지 않기 때문이다.

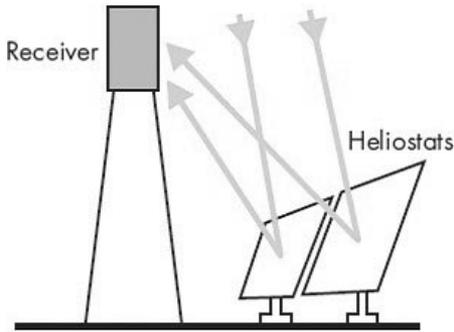
태양추적장치는 또한 그림 5에서와 같이, 입사되는 태양에너지를 일정한 방향으로 반사시키기 위하여 사용되는 장치이다. 그림 5는 탑형 태양열 발전시스템(tower type solar thermal power plant)의 헬리오스타트(heliostat)를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 태양추적장치는 변화하는 태양의 위치에 따른 반사거울의 방향을 조정함으로써, 반사거울로 입사되는 태양광이 항상 집열기에 도달되도록 하는 장치이다.

태양추적장치의 분류

태양추적장치는 구동축의 수에 따라 1축 또는 2축 구동형 태양추적장치로 구분되기도 하며, 추적 신호의 생성방식에 따라서 프로그램식, 센서식 그리고 프로그램/센서 복합식 태양추적장치로 분류되기도 한다.

1축 구동형 태양추적장치는 1개의 회전축을 중심으로 하여 태양열 집열기를 회전시킴으로서 태양열 집열기가 태양의 위치 변화에 따른 고도각 또는 시간각만을 추적할 수 있도록 하는 장치이다. 일반적으로 1축 구동형 태양추적장치의 회전축은 동서 또는 남북으로 고정되어 있다. 또한 일부 시스템의 경우, 태양열 집열기가 설치 지방의 위도(또는 위도 $\pm 10^\circ$ 이내)의 경사각으로 고정되어 있으며, 따라서 회전축은 지구의 자전축과 평행하도록 설치되어 태양의 시간축만을 추적하도록 하는 경우도 있다. 그림 6은 1축 구동형 태양추적장치에 의한 태양추적을 수행하는 태양열 집열기인 구유형 태양열 집열기(PTC, parabolic trough collector)이다.

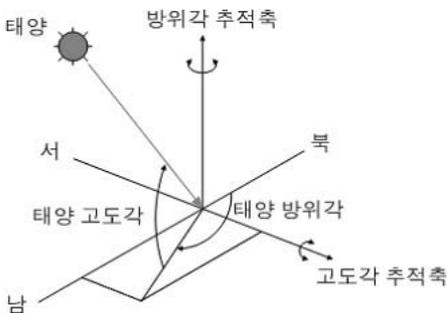
2축 구동형 태양추적장치는 태양의 고도각은 물론 방위각에 대하여서도 태양 추적을 수행함으로써 보다 정확한 태양 추적이 가능한 시스템이다. 2축 구동 태양추적장치는, 태양의 위치를 추적하기 위하여 사용되는 구동축의 배열방법에 따라서 극



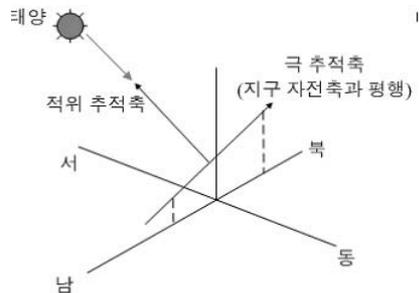
[그림 5] 탑형 태양열발전시스템의 헬리오스타트



[그림 6] 구유형 태양열 집열기 (한국에너지기술연구원)



[그림 7] 방위각/고도각 추적방식의 추적축 배열



[그림 8] 극-적위 추적방식의 추적축 배열

좌표 또는 방위각/고도각 추적방식으로 나누어진다. 그림 7은 방위각/고도각 태양추적장치의 추적축 배열 방식을 나타 낸 것이다. 그림 7에서와 같이 방위각/고도각 태양추적장치에서의 태양열 집열기는 지표면에 수직인 축(방위각 추적축)을 중심으로 회전하고, 동시에 이에 수직한 축(고도각 추적축)을 기준으로 하여 회전한다. 그림 8은 극좌표 추적방식의 추적축을 도식적으로 나타낸 것이다. 극좌표 추적방식의 태양추적장치에서의 집열기는 지구의 자전축과 평행한 축(극 추적축)에 대하여 시간당 15° 회전하고, 동시에 이와 수직한 축(적위 추적축)을 기준으로 하여 년 $\pm 23.5^\circ$ 이내에서 회전한다.

일반적으로 1축 구동형 시스템은 2축 구동형 시스템과 비교하여 태양 추적의 정확성은 떨어지고, 따라서 집열기의 집열 가능 에너지량이 작고, 이로 인한 효율도 떨어진다. 그러나 추적장치의 단순성 및 경제성 측면에서 비교하면, 1축 구동형 추적장치가 2축 구동형 장치보다 우위에 있으며, 따라서

고온, 고효율을 요구하지 않는 응용분야에서 많이 사용되고 있다. 반면 2축 구동형 태양 추적장치는 태양열발전 등을 위한 그림 9와 같은 접시형 태양열 집열시스템, 그림 10과 같은 타워형 태양열 집열시스템과 같이 고온, 고효율이 요구되는 곳 또는 자연채광장치등과 같은 곳에서 사용된다.

태양추적시스템은 추적신호의 생성 방식에 따라서 다시 크게 3가지 방식으로 나눌 수 있는데, 태양 위치를 계산하여 시스템을 구동시키는 프로그램 방식, 광센서를 이용하여 태양의 위치를 찾아 구동시키는 센서식 그리고 프로그램/센서 복합식으로 나눌 수 있다.

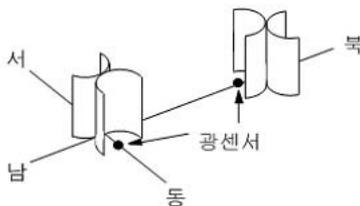
태양의 위치를 천문학에서 제공한 알고리즘에 의하여 계산하고, 이를 구동 모터의 제어 명령으로 사용함으로써 태양을 추적하는 프로그램식¹⁶⁾은, 비교적 높은 태양 추적 정확도를 가지고는 있으나, 구조가 복잡하고 값이 비싼 단점이 있다. 또한 시스템의 운전 도중, 현재의 태양 위치를 파악하는 센서가 없으므로 최초 정확한 설치가 이루어지도록 하여야



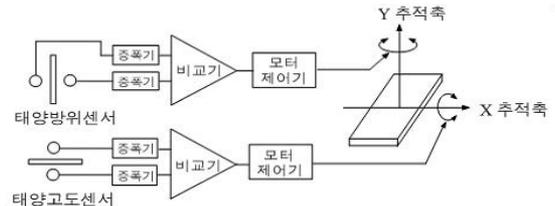
[그림 9] 접시형 태양열 집열시스템(한국에너지기술연구원)



[그림 10] 타워형 태양열 집열시스템(미국샌디아국립연구소)



[그림 11] 센서식 태양추적장치의 광센서 배치



[그림 12] 센서식 태양추적장치



한다. 태양의 위치의 계산은 태양열 집열기가 설치되어 있는 지역의 정확한 위도, 경도 및 시간을 요구하며, 일반적으로 대규모 시스템에 적합하고, 대부분 개루프시스템(open loop control system)이며, 추적 정밀도를 유지하기 위하여 주기적으로 태양 위치계산을 위한 데이터를 조정해 주고, 또한 설치된 집열기의 조정을 필요로 한다.

센서식 태양추적장치^{14, 51)}는 광센서를 이용하는 방식인데, 프로그램식에 비교하여 간단하고 값싼 방법이다. 센서식은 그림 11과 같이 태양 위치를 감지하기 위하여 두개 또는 여러개의 광센서사이를 그늘판으로 막은 1쌍의 센서를 직각으로 배치하고, 쌍으로 이루어진 센서의 출력을 서로 비교하여 추적을 위한 구동모터를 기동시키는 방법으로 폐루프시스템(closed loop system)이다. 센서식 태양추적장치의 장점으로는 구조가 비교적 간단하면서도 높은 정확도가 유지되며, 설치시 집열기를 대강의 방향만 맞추어도 되므로 편리하다. 단점으로는 태양이 잠시 구름에 가리워진 경우나, 태양이 광센서의 감지 범위밖에 위치해 있는 경우, 또는 지면 반사, 구름에 의한 산란 등으로 오동작이 일어날 수도 있다.

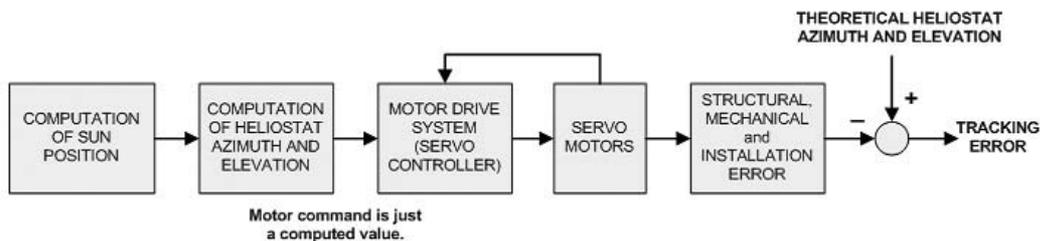
프로그램식과 센서식을 조합하여, 두방식의 장점만을 사용하고, 각각의 방식의 단점을 보완하는 프로그램/센서 복합식⁶⁾은, 보다 정확한 태양 추적을 필요로 하는데 사용된다. 이 방식에서는 주된 추적은 프로그램식으로 하고, 그 오차를 센서식으로 보정하는 방식과 센서식의 단점인 산란 등으로 인한 오동작을 방지하기 위하여 주된 추적은 센서식으로 하지만, 이상 동작의 경우에는 프로그램식을 사용하여 보완하는 방식 등이 사용되고 있다.

헬리오스타트 제어시스템

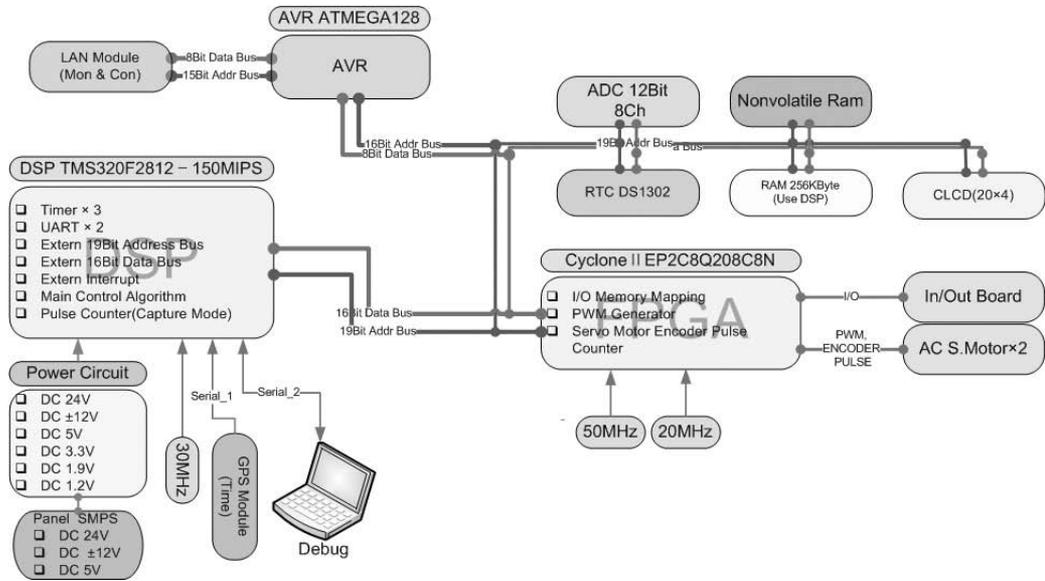
헬리오스타트는 그림 5 또는 그림 10에서와 같은 탑형 태양열발전시스템의 집광을 위한 반사거울로서 헬리오스타트 제어시스템은 헬리오스타트의 방위각과 고도각 제어를 통하여 헬리오스타트가 변화하는 태양을 추종하게 하는 태양추적장치이다. 현재 세계적으로 사용되고 있는 대부분의 헬리오스타트는 헬리오스타트 방위각과 고도각 제어에 의해 태양 추적을 수행하는 2축 방위각/고도각 태양추적장치를 사용하고 있다.

그림 13은 헬리오스타트 제어시스템의 태양추적 알고리즘을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 헬리오스타트 제어시스템의 태양추적제어는 개루프 제어시스템(open loop control system)으로서, 우선 현재 시간과 헬리오스타트가 설치된 지점의 위도와 경도를 사용하여 태양의 방위각과 고도각을 계산한다. 헬리오스타트 제어시스템은 이와 같이 계산된 태양위치를 근거로, 집열기가 위치하고 있는 태양탑의 목표지점으로 태양광을 반사시키기 위한 헬리오스타트의 방위각과 고도각을 계산하고, 태양추적을 위한 서보모터 제어기는 계산된 헬리오스타트의 방위각과 고도각으로 헬리오스타트를 구동시킴으로서 헬리오스타트가 태양추적을 수행하게 된다.

헬리오스타트 제어시스템은 헬리오스타트의 태양추적 기능의 수행과 더불어, 헬리오스타트가 통합된 태양열 발전시스템의 요소 시스템으로서의 역할을 수행하기 위한 동작 제어를 수행한다. 즉 개별 헬리오스타트 제어시스템은, 헬리오스타트 필드의 통합된 운전을 관리하는 헬리오스타트 필



[그림 13] 헬리오스타트 제어알고리즘



[그림 14] 헬리오스타트 제어시스템의 제어기 기본구조

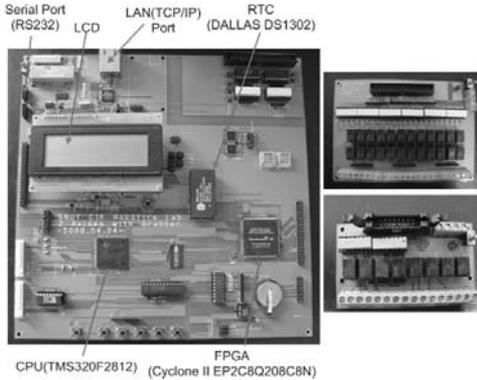
드 제어시스템으로부터 해당 헬리오스타트가 담당해야 하는 집열기의 반사 목표 지점과 운전 모드 지령을 넘겨받아, 해당 운전 모드에서 요구되는 동작 제어를 수행하며, 헬리오스타트 필드 제어기와 통신 두절과 같은 비상 상황에서의 독자적 운전, 헬리오스타트 구동장치의 야간 전원제어 (on/off control) 그리고 헬리오스타트 운전 정보의 보고 등과 같은 기능을 동시에 수행한다.

그림 14는 현재 국내에서 개발된 전용제어기 형태의 헬리오스타트 제어시스템의 제어기 기본구조를 나타낸 것이다⁷⁾.

제어기는 우선 제어기의 동작 모드를 결정하는 자동/수동 운전 선택 스위치를 포함하여, 헬리오스타트의 수동 운전에서 사용되는 14개의 각종 스위치 신호입력부, 헬리오스타트의 동작 상태를 표시하기 위한 LED 및 LCD 출력부, 헬리오스타트 방위각 및 고도각 구동축에 설치되어 있는 리미트 센서(limit sensor)와 근접 센서 신호 입력부, 주변 기기 구동 제어를 위한 릴레이(relay) 출력부, 그리고 태양추적장치의 구동 모터로 사용되는 AC 서보 모터의 속도 및 위치 제어를 위한 서보모터 제어부로 구성되어 있다. 또한 제어기는 태양위치계산 등

에서 요구되는 시간 제어를 위하여 실시간 발생기(RTC, real time clock)를 가지고 있으며, 헬리오스타트 필드 제어시스템과의 통신을 위한 TCP/IP 프로토콜 사용 LAN 통신포트를 가지고 있다. 아울러 제어기는 헬리오스타트가 설치되어 있는 지점의 위도 및 경도, 목표지점, 헬리오스타트 방위각 및 고도각의 현재 위치 등과 같은 헬리오스타트 운전의 중요 정보를 정전 등과 같은 비상 상황으로부터 보호하기 위한 NVRAM(nonvolatile RAM)을 가지고 있으며, 각각의 제어기에서 독립적으로 시간동기(real time synchronization)가 필요한 경우에 사용하기 위한 GPS 모듈 연결용 직렬통신 포트 그리고 확장성을 고려한 12 비트 8채널의 A/D 변환기를 가지고 있다.

헬리오스타트 제어시스템의 제어기는 태양위치 계산, 헬리오스타트 방위각 및 고도각 계산, 서보 모터 제어 등과 같은 많은 계산의 실시간 처리를 위하여 중앙처리장치로서 DSP(TMS320F 2812)를 사용하고 있으며, 아울러 회로의 간소화를 위하여 DSP 내부의 128 K × 16 플래시 롬(flash rom)을 사용하고, 데이터 메모리의 부족을 해결하고자 256 Kbyte의 SRAM을 사용하고 있다.



[그림 15] 헬리오스타트 제어시스템의 제어기

2개의 서보모터 위치 및 속도 제어를 위한 펄스 발생기와 서보모터 엔코더 펄스 카운터 그리고 32비트의 디지털 입·출력(24비트 입력, 8비트 출력)을 위한 로직은 FPGA를 사용하여 구현하였다. 헬리오스타트 방위각과 고도각 구동을 위한 서보모터의 엔코더는 단위 회전 당 2048 펄스를 생성하며, 구동축의 감속비가 최대 60,000 : 1 이하인 것을 고려하여 FPGA에 구현된 엔코더 펄스 카운터를 32비트로 설정하였다. 아울러 제어기는 서보모터 정·역 회전 제어신호와 같은 서보모터 제어신호의 생성을 위하여 MC3487을 사용하였으며, 엔코더 펄스 입력을 위하여 MC3486을 사용하였다. 그림 15는 GPS 모듈이 장착되어 있지 않은 헬리오스타트 제어시스템의 제어기이다.

맺음말

가장 적합한 태양추적장치는 적용되는 태양열이용시스템에 따라 선택되어야 하며, 이는 태양추적장치의 필요성에서부터 적절한 구조 선택에 이르기까지 충분한 사전 검토를 필요로 한다.

여기에서는 태양추적장치의 필요성, 분류 그리고 활용사례로서 탑형 태양열발전시스템의 헬리오스타트 제어시스템에 대하여 설명하였다. 비록 내용이 충분하지는 못하나, 설명된 내용들이 태양추적장치에 대한 이해를 높이고, 아울러 적용하고자 하는 태양열이용시스템의 적절한 태양추적장치를 선택하는데 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

1. W.B. Stine and R.W. Harrigan, Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications, John Wiley and Sons, 1985
2. D.K. Jo, Y.H. Kang, Y.C. Park, "Analysis of solar radiation climate in Korea", ISES 2007, Beijing China
3. B.P. Edwards, "Computer based sun following system", Solar Energy, Vol. 21, No. 6, 1978, pp. 491-496
4. L.L. Vant-Hull and A.F. Hildebrandt, "A central receiver solar system applicable to central power stations", Solar Energy, Vol. 18, 1976, pp. 31-39
5. Sode-Shinni and N. Rumart, "A shadow method for automatic tracking", Solar Energy, Vol. 37, No. 3, 1986, pp. 245-247
6. 윤환기, "적응제어 알고리즘을 이용한 태양 추적 장치의 설계", 한남대학교 대학원 석사학위 청구논문, 1994
7. 박영철, "Heliostat 제어시스템", 한국태양에너지학회논문집, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 50-57