

축열식 전기보일러의 심야전력 공급시간 자동제어장치

한승호 권성철 고기중 정우용 김준호
한전 전력연구원

Power-Supply Time Control Device in Off-Peak Period for Thermal Storage Boiler

Han Seung-Ho, Kwon Seong-Chul, Ko Ki-Jung, Jeong Woo-Yong, Kim Jun-Ho
KEPRI (Korea Electric Power Research Institute)

Abstract - 전기히터를 사용하는 축열기기의 보급이 급속히 확산되고 모든 축열기기들이 심야전력 공급이 시작되는 22:00시에 동시에 가동이 시작되므로 심야전력 공급시작시간대에 전력수요피크가 발생하였다. 본 연구는 이러한 심야전력 공급시작시간을 상대적 저부하 시간대로 이동하기 위하여 대표적인 축열기기인 축열식 전기보일러의 적용할 심야전력 공급시간 자동제어장치 개발에 관한 것이다. 본 논문의 내용은 축열식 전기보일러의 축열조 잔열량에 따라 축열시작시간을 결정하는 자동제어장치의 알고리즘과 H/W, 그리고 시험실에서의 테스트와 현장에서의 검증작업을 포함한다.

유무를 판단한다. 이러한 계산을 수행하기 위하여 제어장치는 CPU를 가지고 연산할 수 있는 기능을 갖추고 있어야 하며 계산값들을 기억할 수 있는 메모리, 시간신호발생을 위한 부분, 온도센서로부터의 신호를 디지털 신호로 바꾸어 입력할 수 있는 A/D converter와 외부에 세어스위치 신호를 내는 릴레이를 비롯한 I/O 부분, 그리고 제어기 동작상태를 나타내어주는 표시부 등으로 나뉜다. 그 시작품의 구성은 그림1과 같다.

1. 서 론

전기에너지는 그 자체로 많은 양을 경제적으로 저장하기가 곤란하므로 통상 매 순간마다 부하에 상응하는 양만큼만 생산하여야 한다. 반면 부하는 수용가의 사정에 따라 매 순간 변동하게 되는데 주간, 야간, 심야 등으로 시간대별 부하차이가 크게 벌어지고, 근무일과 공휴일의 부하차이와 겨울과 여름 등의 시간대별 부하차이도 점점 커지고 있다. 따라서 최대부하가 증대됨에 따라 전력설비가 커져야 하므로 투자비가 증대되고, 부하율이 낮아지므로 설비이용률이 떨어져서 전력설비의 운용이 매우 비경제적으로 되고 있다.

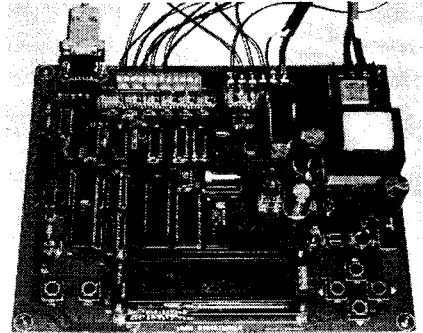
심야전력이란 경부하 시간대의 기저부하조성과 최대부하의 심야이전을 통한 주간 부하의 경감, 계통부하율 향상, 기저발전설비의 이용률 증대 등 전력부하의 평균화를 이룩하기 위한 목적으로 특별한 공급조건을 정해 값싼 요금으로 공급하는 전기요금제도이다. 심야전기는 아주 값싼 단가로 축열, 축냉 등 에너지 저장 기능을 가진 전기사용기기 즉 심야전력기기에 공급된다.

현재 보급되고 있는 심야전력기기는 공급개시시간인 22:00부터 축열잔량과 관계없이 축열을 위한 전력공급이 시작되며, 축열조의 온도가 설정치 이상이 되면 자동적으로 전력이 차단되도록 구성되어 있다. 이러한 심야전력기기의 전력공급시간을 조절하기 위해서는 전일에 사용하고 남은 축열잔량을 측정하고 전일의 난방부하패턴을 인식하여 익일의 축열을 위한 심야전력공급 시간대를 결정하는 별도의 제어장치를 부착하여야 한다.

2. 본 론

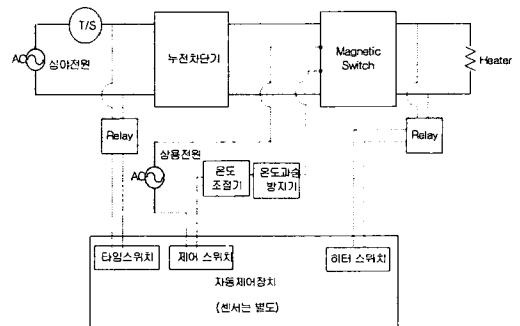
2.1 공급시간 자동제어장치

제어기의 구조는 입력으로는 심야전력기기의 평균 온도를 산출하기 위한 온도센서의 입력단과 히터의 on/off유무와 심야전력 timer 입력이 필요하고, 출력으로는 히터의 제어를 위한 1ch relay 출력이 필요하다. 자동제어기와 기존 제어기는 직렬로 연결되며, 히터양단의 전압으로 구동되는 히터 On/Off 여부를 알려주는 Relay와 심야전력 Timer에 연결되어 심야전력 시간 여부를 알려주는 Relay가 불으며, 자동제어기에서는 이 전압 입력신호를 통해 진행 시간을 계산하고 히터에 전력공급



[그림 1] 심야전력 공급시간 자동제어장치 시작품

자동제어장치의 제어기능은 결과적으로 심야전력의 공급을 차단할 수 있는 스위치의 역할과 같다. 제조업체에 따라 약간의 차이를 제외하면 축열식 전기보일러에서의 전기배선과 자동제어장치의 배선결선도는 [그림 2]와 같이 표현할 수 있다.



[그림 2] 축열식 전기보일러와 공급시간 자동제어장치와 결선도

[그림 2]의 좌측에서 심야전기의 전원이 타임스위치에 의해 차단되거나 공급되고 안전을 위한 누전차단기 거쳐 마그네틱스위치에 도달하게 된다. 이 마그네틱스위치

는 축열조에 부착된 온도조절센서나 온도과승방지센서의 접점 신호에 따라 상용전원으로부터 구동전력을 공급받아 히터에 전기공급 하게 된다. 히터는 통상 산화마그네슘 분말로 절연된 시즈형태로 축열조 내부에 삽입되어 있다. 이 회로에서 타임스위치와 히터스위치는 심야전기로부터 릴레이를 이용해 완전히 격리되어 있고 ON/OFF 접점만을 측정하는 구조이다. 제어스위치는 기존의 온도조절기 및 온도과승방지기와 직렬로 연결되어 있으므로 제어기스위치와 온도조절기, 온도과승방지, 심야전력을 공급하는 타임스위치가 동시에 ON 상태인 경우에만 심야전력이 히터에 전달된다.

2.2 자동제어 알고리즘

우선 축열조 내의 미소체적 dv 의 온도를 T_v , 밀도를 ρ 비열을 C 라고 하고 축열조 전체의 열량 Q 는 다음과 같이 주어진다.

$$Q = \int_v T_v \cdot \rho \cdot C \cdot dv$$

또한 이 축열조 전체의 온도가 일정한 어떤 평균온도 T_{ave} 로 되어 있고 축열조의 체적을 V , 같은 열량 Q 를 같다고 가정하면 Q 는

$$Q = T_{ave} \cdot V \cdot \rho \cdot C$$

가 되므로 약간의 오차를 감안하여 밀도와 비열을 50°C 를 기준, 상수로 두었을 때 평균온도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

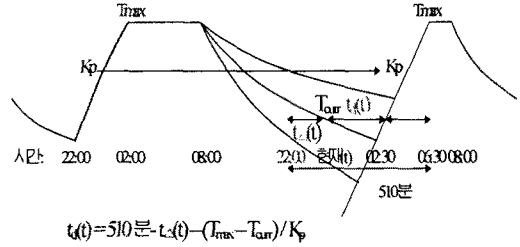
$$T_{ave} = \frac{1}{V} \int_v T_v \cdot dv$$

이렇게 평균온도를 정의하는 이유는 입출수 온수의 유량과 온도를 실시간으로 측정하여 단위시간 출입하는 열량으로 환산하고 이를 다시 시간에 대해 적분하는 통상의 방식을 제조현장의 경제적 사정으로 인하여 적용할 수 없기 때문이다. 축열식 전기보일러의 제조업체의 영세성으로 이 T_{ave} 를 정의하는 방법은 많다. 그 한 예를 들면, 우선 축열조를 상하 4 등분하여 각 등분의 중앙에 센서를 위치시키는 방법이다. 이는 산술평관을 택하는 방법인데 실제 제조현장에 센서의 위치를 손쉽게 정할 수 없다는 단점이 있다. 또 하나의 방법은 온도의 차이가 상하 1차원에서만 이루어지고 센서 4개에 의해 분할된 영역이 5개라고 할 때 진다면 평균온도를 다음과 같이 정의해볼 수도 있다.

$$T_{ave} = \frac{T1 + T2 + T3 + 2 \times T4}{5}$$

여기서 유독 T4에 weighting factor 2를 곱한 것은, 입수의 위치가 아래쪽이고 현장에서의 소비자는 축열조에 온수가 부족한 경우에 아주 민감하므로 찬물이 축열조에 유입되는 것을 강조하여 비중을 많이 두고자 하는 배려에서 이다. 센서의 개수가 더 많을 경우에도 같은 방식으로 처리가 가능하다.

제어 알고리즘의 취지는 평균온도가 현재의 온도에서 축열조의 기존온도조절기에 의해 목표치 온도까지 평균온도의 상승률과 목표치 온도 도달시간을 예측하여 심야전력시간대인 새벽 6:30분에 목표치 온도에 도달하도록 보일러의 히터의 동작을 제어하는 것이다. 자동제어장치의 계산 방식은 다음 다이어그램에서 보이는 바와 같다.



[그림 3] 공급시간 자동제어장치 계산구조

자동제어장치는 전일의 축열 시작시간과 온도를 기억하고 축열이 첫 번째 종료되는 시간과 온도를 측정하여 기억한다. 축열하는 동안에 온도가 최고치로 올라가 기존 온도조절장치에 의해서 전기히터에 전력공급이 첫 번째 차단되는 순간, 시각과 온도를 재어 이를 T_{max} 라고 하고 기억해둔다. 그리고 축열이 시작되는 시간과 온도를 t_{min} , T_{min} 이라고 하고 축열이 종료되는 시간과 온도를 t_{max} , T_{max} 라고 할 때, 축열조 온도상승을 위한 기율기 K_p 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$K_p = \frac{T_{max} - T_{min}}{t_{max} - t_{min}}$$

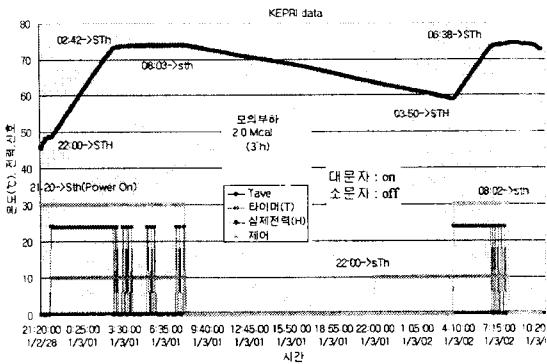
여기서 구한 K_p 와 T_{max} 는 다음날 축열시간 예측을 위하여 기억해둔다. 익일 심야전력이 투입된 순간부터 자동제어장치는 현재의 시간과 온도를 1분 단위로 측정하면서 동시에 익일의 축열을 위해서 축열을 시작하여야 하는지를 계산한다. 그 계산 방법은 다음과 같다. 익일을 위한 축열종료 시간이 06:30이라면 이때의 축열조의 온도는 전일의 최고치인 T_{max} 가 된다. 그리고 여기까지 도달할 기율기 K_p 를 가지는 직선을 결정할 수가 있고 현재의 시각 t 와 온도 T_{curr} 가 이 직선위에 있는지 조사한다. 실제로 CPU에서 계산하는 값은 조금 다른 방식인데, 심야전력이 투입된 시간부터 현재시점까지의 시간을 $t_d(t)$, 현재시각으로부터 익일 축열예상 직선 중 같은 온도(T_{curr})인 점까지의 시간을 $t_d(t)$ 라고 하였을 때 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$t_d(t) = 510 \text{ 분} - t_d(t) - \left(\frac{T_{max} - T_{curr}}{K_p} \right)$$

이렇게 되는 이유는 $t_d(t)$, $t_d(t)$, 그러므로 $[(T_{max} - T_{curr}) / K_p]$ 를 모두 더하면 현재의 시점에 관계없이 심야시작시각으로부터 익일의 축열종료시각까지의 경과시간 51분이 되기 때문이다. 이렇게 하여 익일의 축열시작을 위하여 제어스위치를 ON 시키고 나서 자동제어장치는 심야전력공급을 위한 타임스위치가 들어오던 시각으로부터 경과시간을 재어서 현재 시각을 다시 보정한다. 그 이유는 자동제어장치의 내부 시간신호발생기와 심야전력을 타임스위치와 시각을 동조시키기 위함이다. 이 전체 프로세스를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 전일의 축열곡선 측정(매 1분 간격)
- 2) 기율기 및 최고온도를 이동
- 3) 익일의 축열예정직선 확정
- 4) 현재의 온도와 시간으로 $t_d(t)$ 를 반복 계산
- 5) $t_d(t)$ 가 0이 되는 순간 심야전력공급

2.3 자동제어 실험결과

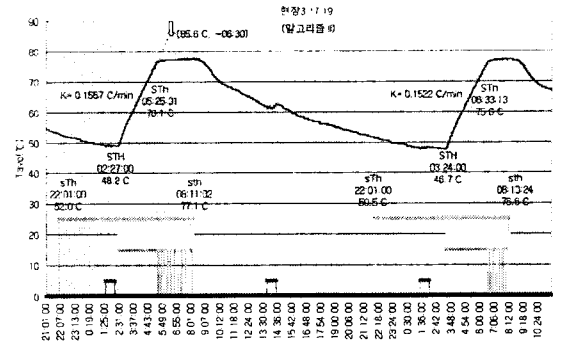


[그림 4] 모의부하 상태 하의 자동제어장치 실험결과

[그림 4]는 2.0Mcal/hour의 균일부하를 모의부하로 주었을 경우, 시간의 경과에 따른 축열식 보일러의 평균 온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 아래의 직선데이터에는 각종 0과 1로 표시되는 디지털 신호에 시각적 편의를 위하여 상수를 곱하여 표시하였다. 심야전력이 들어왔는지 유무를 나타내는 타이머는 ON 신호를 나타내는 1에 10를 곱하여 표시하고, 제어스위치는 30을 곱하여 ON을 표시하였다. 그리고 심야전력의 사용전력량을 나타내는 '실제전력'은 전기히터에 공급되는 전력을 kW 단위로 나타낸 것이다. 이 그래프의 좌측부터 시간의 순서대로 설명하면 다음과 같다.

1. 공급시간 자동제어장치를 21:20에 ON 하였다. 이때에는 심야전력이 아직 투입되지 않은 상태이고 첫날이므로 기존제어기로 동작시키기 위하여 제어스위치만 ON 되어 있다.
2. 22:00에 타이머 스위치가 ON되어 심야전력이 투입되고 히터에 전력투입으로 축열이 시작된다.
3. 기존의 온도조절기가 동작하여 첫 번째로 히터에 전력을 차단하는 시간 02:42까지 축열을 진행하였다.
4. 이후 온도조절기는 계속 히터에 전력을 공급하는 과정인 ON/OFF를 반복하다가 08:03에 심야전력이 마감하는 신호를 타이머의 OFF으로 받고 동시에 자동제어장치는 다음날 준비를 위하여 OFF 상태로 된다.
5. 자동제어장치는 계속 온도와 시간을 모니터링하고 다음날 제어스위치를 ON시킬 순간을 계산한다. 다음날 저녁 22:00에 타이머가 ON되더라도 제어스위치가 OFF이기 때문에 심야전력이 투입되지 않는다. 이 시점의 온도가 약 65°C로서 아직 잔열량이 충분히 있으므로 심야전력의 투입이 필요치 않다는 것을 알 수 있다.
6. 온도가 계속 내려가고 시간이 흘러 03:50에 제어스위치가 ON되고 이로 인하여 전기히터에 전력이 공급되어 다시 축열을 시작한다.
7. 축열이 계속되어 축열조가 최고온도로 올라가서 기존온도조절기가 히터로 가는 전력을 첫 번째로 차단하는 시간이 06:38이다. 참고로 공급시간 자동제어장치의 목표는 06:30에 평균온도를 최고치로 도달시키는 것이 목적이고 실제로 이때 전력차단을 하는 것은 자동제어장치와 전혀 관계가 없다. 이는 약 8분의 오차로 축열조에서 열량을 정확히 제어를 하여 기존 온도조절기가 전력을 차단한 결과이다.
8. 자동제어장치는 08:02에 제어스위치를 OFF시킴으로서 다음날의 제어를 위한 준비를 하고 있음을 알 수 있다.

다음은 균일 부하가 아니고 변동부하일 경우를 현장 측정의 예로 살펴보았다. 본 제어장치의 현장실험은 2700 liter의 축열식 전기보일러를 사용하고 있는 가정집에서 이루어졌다.



[그림 5] 기존온도조절기의 세팅치를 수정하였을 경우

[그림 5]는 난방용 변동부하가 임의로 주어졌을 때, 시간의 경과에 따른 축열조의 평균온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 전일의 제어모드에서 계속적인 자동모드의 운전이 진행되고 있다. 이 그래프의 아래쪽에 축열식 전기보일러의 온수순환 펌프가 임의의 시간에 난방을 위해서 가동되는 것을 볼 수 있다. 우선 기온기는 0.15대의 값을 보이고 전력투입은 02:27에 48.2°C에서 시작하였으나 기존 온도조절기의 세팅치를 낮추었기 때문에 축열종료시간은 05:25에 온도 76.1°C에서 끝났다. 이는 원래 기존의 온도조절기의 설정치가 변경되지 않았으면 온도 85.6°C, 06:30에 끝나야 하는 것이다. 실제로 85.6에서 76.1°C를 뺀 값 9.5°C를 기온기 0.157로 나누면 60.5분이 되므로 이를 05:25에 더해보면 06:25분이 된다. 그러므로 실제 자동제어장치는 약 5분의 오차로 예측해내었다는 것을 의미한다. 이 5분의 오차는 전일의 기온기와 약 0.005정도의 차이 때문일 가능성이 많다. 만약 그렇다면 이 오차는 기온기가 작아지는 경우 시간이 뒤로 이동하며 비슷한 경향을 보여야 할 것이다. 이는 다음날 데이터에서 바로 확인할 수 있다. 그림2.5.7의 우측의 데이터를 보면 03:24, 46.7°C에서 축열을 시작하여 최고치에 도달하는 것은 75.6°C, 06:33이다. 시간은 06:30에서 3분 뒤쪽으로 밀려난 경우가 되는데 이는 기온기가 0.152로 전날 0.157보다 0.005 작아졌고 최고치 온도도 76.1에서 75.6°C로 변화했기 때문일 것을 알 수 있다. 상기 경우에서도 살펴본 바와 같이 불균일 난방부하조건, 소비자의 임의조작 등 현장의 다양한 조건을 만족하는 제어장치 개발이 실제 상품화를 목적으로 할 경우에는 고려가 되어야 할 것이다.

3. 결 론

본 논문은 축열기기의 급속한 보급으로 인하여 야기된 동계 심야전력 피크를 기술적으로 저감하기 위하여 시장점유율이 높은 축열식 전기보일러에 심야전력 공급시간 자동제어장치를 부착하여 그 성능시험을 한 결과에 대한 것이다. 축열식 전기보일러는 한국의 특수한 온돌문화와 함께 보급되는 기기로 자동제어장치를 개발하는 과정에서 선진국에서조차 연구유래가 없어 거의 모든 것을 독창적으로 일구어야 하였고 실제 팔릴 수 있는 제품을 목표로 제어장치의 제작단가를 낮추는 데 주력하였다. 그럼에도 불구하고 제어장치의 동작오차는 그래프에서 본 바와 같이 전체 심야시간에 비해 상대적으로 상당히 작은 값을 보여주었다. 본 연구에서 나온 결과물은 제조업체로 이미 기술이전이 끝나고 이미 시장에 보급되기 시작하여 약 9개월 만에 피크전력 감소치 1,173 MW를 달성하였다. 향후, 타 축열기기에도 이러한 자동제어장치가 적용되어 피크전력 감소에 더욱 박차를 가할 수 있을 것으로 본다.