

## 축열식 난방기기의 심야전력 공급시간 자동제어장치 개발

권성철, 한승호, 이학주, 박영근, 고기중  
한전 전력연구원

### Automatic Power Supply Time Controller for the Thermal Storage-type Heating Appliances

S.C Kwon, S.H. Han, H.J. Lee, Y.K. Park, and K.J. Ko  
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

#### ABSTRACT

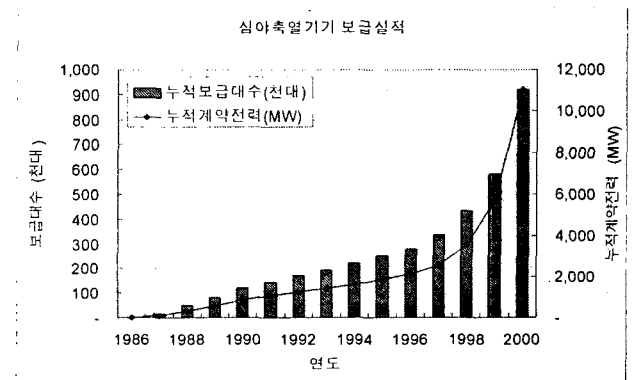
한전에서는 수요관리의 하나의 방법으로 심야전력요금제도를 운영하고, 심야축열기기를 보급하여 기저부하증대 및 부하율을 개선하기 위한 많은 노력을 기울이고 있다. 최근 유가상승 등의 원인으로 1999년과 2000년에 심야전력 난방기기의 급격한 보급증가로 인한 심야시간대 동계 최대 전력수요가 발생하여 22시 이후 단시간 부하급증으로 일부지역의 배전선로 회선용량부족 및 부하불평형으로 정전을 유발하게 되는 등 많은 어려움이 발생하였다. 본 논문은 심야수요급증으로 인한 대책의 일환으로 축열식 심야난방기기에 대하여 심야전력의 공급시간 자동제어장치를 개발하였다. 축열 잔열량을 측정하여 그 잉여량 만큼의 시간동안 심야전력의 공급을 지연하여 심야전력 공급초기에 집중되는 심야기기의 가동을 억제하여 심야부하를 분산하게 된다. 이로써 축열식 난방기기에 의한 동계 최대 전력수요 발생을 억제하여, 배전선로의 효율적인 운영에 기여할 것으로 기대된다

이용한 난방기기의 신청고객이 급증하여 2000년 한 해 동안 '86~'99년의 총보급량을 상회하는 실정에 이르렀다.

이의 여파로 인하여 심야시간대 동계 최대 전력수요가 발생하고, 일부지역 송전선로 및 변전소 주변압기의 용량 부족 및 배전선로 회선용량 부족 및 부하 불평형으로 정전을 유발하는 등 많은 문제점을 야기했다. 심야난방기기의 수요급증에 따른 조치사항으로 한전에서는 심야전력 공급시간대를 조정하고, 심야전력 설치보조금에 대한 지원을 중단하고, 10kW 초과분에 대한 고객부담 공사비를 부과하는 등 여러 가지 단기대책을 마련하였다. 그러나 장기적으로 최대전력수요에 영향을 주지 않도록 심야부하를 분산시켜 부하평준화 효과를 제고 할 수 있는 장기적인 대책마련이 시급하다. 이에 축열식 전기보일러, 온수기, 온풍기 및 온돌 등 4가지 심야전력기기에 대하여 잔여 축열량에 따른 심야전력의 공급 시간을 제어하는 제어장치를 개발하였다. 본 논문에서는 이러한 축열식 난방기기중에서 축열식 보일러 및 온풍기에 대한 심야전력 공급시간 자동제어장치의 개발에 대하여 기술하였다.

#### 1. 서 론

한전에서는 수요관리정책의 일환으로 1985년 심야전력 요금 제도를 신설한 이래 꾸준히 심야전력을 이용하는 축열 및 축냉기기를 보급하여 심야전력 수요를 개발함으로써 원자력 및 석탄 등 기저발전설비의 이용률을 제고하여 부하율을 향상시키고, 전원구성 최적화로 전력공급의 원가를 절감하여 왔다. 그러나 1999년 ~ 2000년에 들어서 국내외 유가상승으로 인한 심야축열기기의 경제성이 상대적으로 향상되었고, 심야기기 보급시장의 경쟁심화로 인한 기기가격의 하락으로 인하여 심야전력을



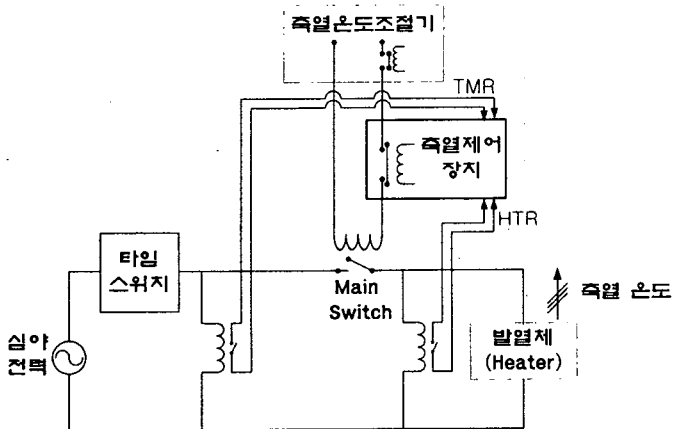
<그림 1> 축열기기 보급실적

## 2. 심야전력 공급시간 자동제어장치

### 2.1 심야전력 공급시간 자동제어장치 개요

심야전력요금제도는 22:00부터 공급이 시작되어 다음날 오전 08:00에 자동적으로 전력공급이 차단되어지도록 하는 타임 스위치를 부착하여 운영되어지고 있어서 심야전력이 공급되기 시작되는 22시에 23시 경에 일제히 전력이 투입됨으로 인하여 배전계통에 심야시간대에 최대부하 발생을 야기시킨다. 여기서 개발된 심야전력 공급시간 자동제어 장치는 심야전력이 공급되기 시작하는 22시에 심야전력기기로 바로 전력이 투입되지 않고, 축열기기의 축열잔량을 측정하여 이에 비례하여 심야전력이 공급되는 시간을 자동제어하는 장치이다.

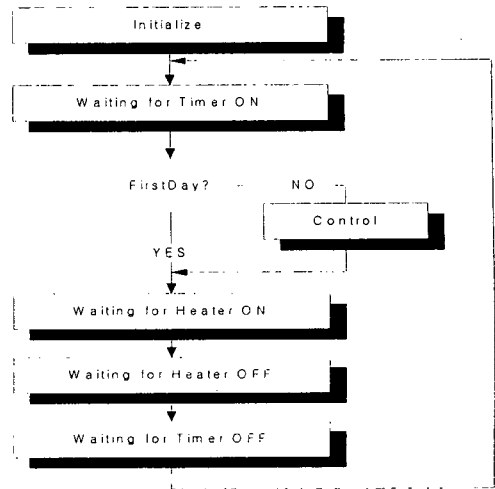
심야전력 공급시간 자동제어장치는 심야전력용 타임스위치와 축열기기의 축열량제어기와 직렬로 연결되어 심야전력의 공급시간을 제어한다. 제어장치는 타이머(TMR)와 온풍기 Heater(HTR)의 점접 신호, 발열체의 축열온도를 입력으로 하여 축열잔량에 비례하여 주 스위치의 개폐를 제어하여 심야전력 공급시간을 조절한다. <그림 2>는 심야전력 공급시간 자동제어장치의 개략적인 구성도이다.



<그림 2> 심야전력 공급시간 자동제어장치 구성도

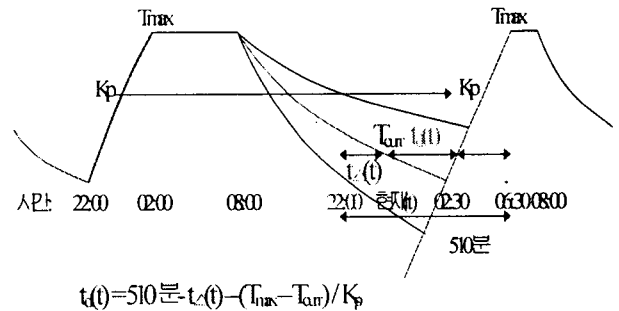
### 2.2 제어 알고리즘

제어장치는 <그림 3>과 같이 초기상태, 타이머 ON 대기상태, 히터 ON 대기상태, 히터 OFF 대기상태, 타이머 OFF 대기상태 및 제어상태 등 총 6개의 상태(state)로 이루어진다. 각각의 상태의 타이머와 히터의 점접 입력의 값에 따라 변환된다. 각종 변수의 초기화(1:Initialize) 후 타이머가 ON되기를 기다리고, 타이머가 ON후에는 첫째날이면 제어장치를 바이패스하여 히터 ON → 히터 OFF → 타이머 OFF → Waiting Timer ON으로 상태가 변화 된다. 둘째날부터는 타이머 ON이후 6:Control 상태로 넘어가서 심야전력 공급시간을 제어하게 된다.



<그림 3> 제어장치 State Diagram

심야전력 공급시간 자동제어장치의 기본 알고리즘은 축열식 보일러 및 온풍기의 축열량(축열평균온도)이 현재의 열량에서 심야전력기기의 기존온도조절기에 의해 조절되는 목표열량(온도)까지 평균열량(온도)의 상승률과 목표값 도달시간을 예측하여 심야전력 종료시간에 목표열량(온도)에 도달하도록 심야전력기기의 동작을 제어하는 것이다. 자동제어장치의 계산 알고리즘은 다음 다이어그램에서 보이는 바와 같다. 최종 축열 완료시간은 공급시간인 오전8시에서 여유율로 1시간30분을 두어서 오전 06시30분으로 설정하였다.



<그림 4> 공급시간 자동제어장치 계산알고리즘

자동제어장치는 전일의 축열 시작시간과 온도를 저장하고, 축열이 처음으로 종료되는 시간과 온도를 측정하여 저장한다. 축열하는 동안에 온도가 최고치로 올라가 기준에 부착되어있는 온도조절장치에 의해서 전기히터에 전력공급이 첫 번째 차단되는 순간, 시각과 온도를 측정하여 이를  $T_{max}$ 라고 하고 저장한다. 그리고 축열이 시작되는 시간과 온도를  $t_{min}$ ,  $T_{min}$ 이라 하고 축열이 종료되는 시간과 온도를  $t_{max}$ ,  $T_{max}$ 라고 할 때, 축열조 온도상승을 위한 기울기  $K_p$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

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

여기서 계산한  $K_p$ 와  $T_{max}$ 는 다음날 축열시간 예측을 위하여 다시 저장되어진다. 다음날 심야전력이 투입된 순간부터 자동장치는 현재의 시간과 온도를 1분 단위로 측정하면서 동시에 다음날의 축열을 위해서 언제 축열을 시작하여야 하는지를 계산한다. 그 계산 방법은 다음과 같다. 기존의 심야전력 공급 종료시간인 오전 8시에서 1시간 30분의 여유율을 고려한 다음날의 축열종료시간이 06:30이라고 설정하고, 이때의 축열조의 온도는 전일의 최고치인  $T_{max}$ 가 되도록 한다. 그리고 여기까지 도달할 기울기  $K_p$ 를 가지는 직선을 결정할 수가 있고 현재의 시각  $t$ 와 온도  $T_{curr}$ 가 이 직선위에 있는지 계산한다. 실제로 CPU에서 계산하는 값은 조금 다른 방식인데, 심야전력이 투입된 시간부터 현재시점까지의 시간을  $t_{\Delta}(t)$ , 현재시각으로부터 익일 축열예상 직선 중 같은 온도( $T_{curr}$ )인 점까지의 시간을  $t_d(t)$ 라고 하였을 때 다음 식을 이용하여 계산한다.

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

이렇게 되는 이유는  $t_{\Delta}(t)$ ,  $t_d(t)$ , 그리고  $[(T_{max} - T_{curr}) / K_p]$ 를 모두 더하면 현재의 시점에 관계없이 심야시작시각으로부터 익일의 축열종료시각까지의 경과시간 510분이되기 때문이다. 이렇게 하여 익일의 축열시작을 위하여 제어스위치를 ON 시키고 나서 자동제어장치는 심야전력공급을 위한 타임스위치가 들어오던 시각으로부터 경과시간을 측정하여 현재 시각을 다시 보정한다. 그 이유는 자동제어장치의 내부 시간신호발생기와 심야전력용 타임스위치와 시각을 동조시키기 위함이다. 이 전체 프로세스를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 매 1분 간격 전일의 축열곡선 측정
- 2) 기울기( $K_p$ ) 및 최고온도( $T_{max}$ ) 갱신
- 3) 다음날의 축열Process 확정
- 4) 현재의 온도( $T_{curr}$ )와 시간(t)으로  $t_d(t)$ 를 반복 계산
- 5)  $t_d(t)=0$ 이면 심야전력공급 시작

### 3. 실험결과

#### 3.1 축열식 보일러

<그림 5>는 2.0Mcal/hour의 균일부하를 모의부하로 주었을 경우, 시간의 경과에 따른 축열식 보일러의 평균 온도의 변화와 타임스위치, 히터 및 제어스위치의 점 ON/OFF를 나타내었다.

1. (첫째날) 심야전력 공급시간 자동제어장치는 동작하

지 않고, 제어스위치는 ON상태로 유지한다. 22:00세 타임스위치가 ON되어 심야전력 투입되어 히터에 전력투입되어 축열과정 시작된다.

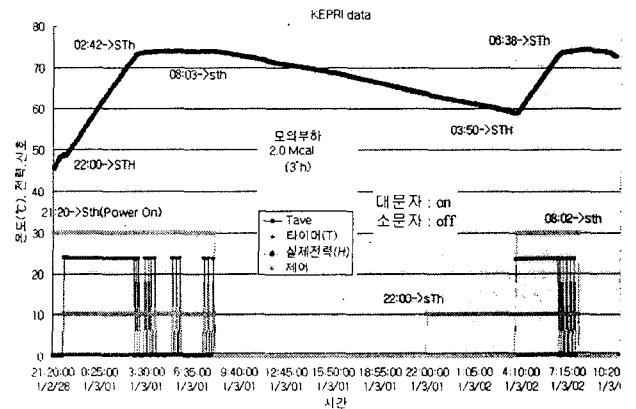
2. 기존 온도조절기 동작하여 02:42에 히터의 전력 차단하여 축열종료된다. 이후 온도조절기는 08:00 타임스위치가 OFF 될 때까지ON/OFF 반복한다.

3. 다음날 자동제어장치는 온도와 시간을 감시하여 제어스위치를 ON 시킬 순간을 계산한다. 타임스위치가 ON되어 심야전력 공급가능하더라도 제어스위치가 OFF되어 심야전력 투입되지 않는다.

4. 축열온도가 계속 내려가고 시간이 흘러 03:50에 제어스위치가 ON되고 이로 인하여 전기히터에 전력이 공급되어 다시 축열을 시작한다.

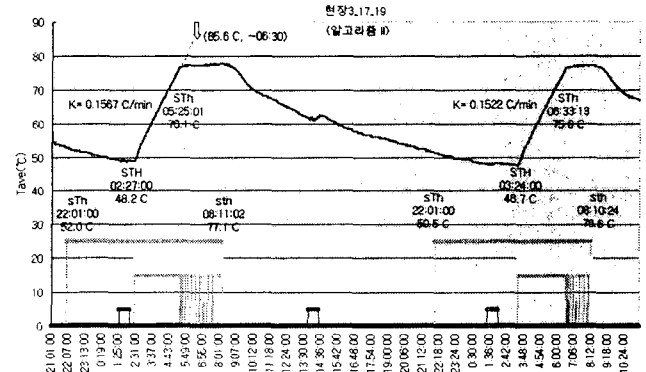
5. 축열이 계속되어 축열조가 최고온도로 올라가서 기존온도조절기가 히터로 가는 전력을 첫 번째로 차단하는 시간이 06:38이다. 약 8분의 오차가 발생하였다.

6. 자동제어장치는 08:02에 제어스위치를 OFF시킴으로서 다음날의 제어를 위한 준비를 하고 있음을 알 수 있다.



<그림 6> 모의부하 상태 하의 자동제어장치 실험결과

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



<그림 7> 기존온도조절기의 세팅치를 수정하였을 경우

<그림 7>는 난방용 방열부하가 임의로 주어졌을 때, 시간의 경과에 따른 축열조의 평균온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 전일의 제어모드에서 지속적인 자동모드의 운전이 진행되고 있다. 우선 기울기는 0.15대의 값을 보이고 전력투입은 02:27에 48.2℃에서 시작하였고, 온도설정값이 변경되지 않았으면 온도 85.6℃, 06:30에 끝나야 하지만, 온도조절기의 세팅치를 낮추었기 때문에 축열종료시간은 05:25에 온도 76.1℃에서 끝났다. 이는 실제로 85.6에서 76.1℃를 뺀 값 9.5℃를 기울기 0.157로 나누면 60.5분이 되므로 이를 05:25에 더해보면 06:25분이 된다. 그러므로 실제 자동제어장치는 약 5분의 오차로 예측해 내었다는 것을 의미한다. 이 5분의 오차는 전일의 기울기와 약 0.005정도의 차이 때문일 가능성이 많다. 만약 그렇다면 이 오차는 기울기가 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℃에서 축열을 시작하여 최고치에 도달하는 것은 75.6℃, 06:33이다. 시간은 06:30에서 3분 뒤쪽으로 밀려난 경우가 되는데 이는 기울기가 0.152로 전날 0.157보다 0.005 작아졌고 최고치 온도가 76.1에서 75.6℃로 변하였기 때문인 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.

### 3.2 축열식 온풍기

<표 2>에서는 4일 동안의 실험결과 값을 나타내었다. t\_HeaterON, t\_HeaterOFF, Q\_HeaterON, Q\_HeaterOFF, T\_HeaterON, T\_HeaterOFF은 각각 Heater가 켜지고 꺼질때의 시각, 열량, 및 온도를 나타낸다. 그리고, K by Q, K, K by FitQ, t\_delay, t\_delay by Q는 각각 열량에 의한 온도상승률, 축열량센서의 온도상승률, 피팅열량에 의한 온도상승률 및 축열지연시간 값이다.

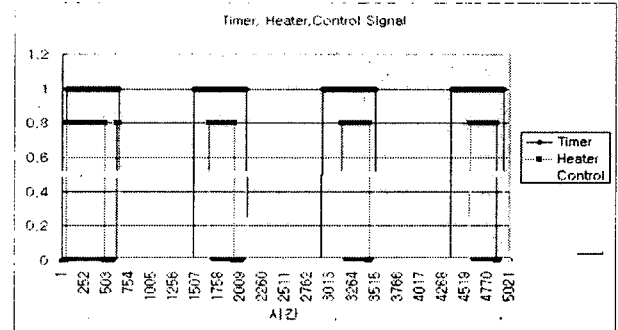
열량에 의한 제어와 센서온도에 의한 제어를 비교하면 t\_delay가 약 20여분(t\_delay by Q의 15%) 정도 더 늦어지는 걸 알 수 있다.

<표 2> 온풍기 실험결과 값

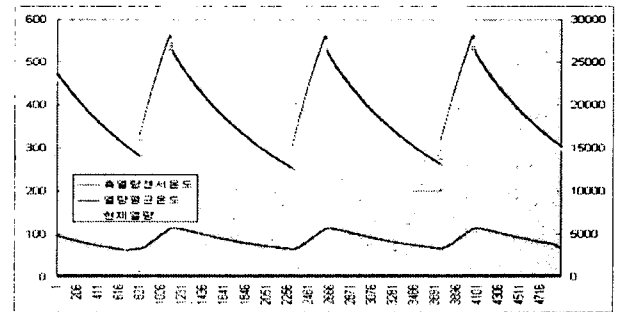
	첫째날	둘째날	셋째날	네째날
t_HeaterON	0	166	216	211
t_HeaterOFF	436	455	525	517
Q_HeaterON	10767	13728	12344	12813
Q_HeaterOFF	30478	27635	27492	27494
T_HeaterON	50.54	64.17	63.93	65.9
T_HeaterOFF	115.61	111.26	111.1	110.99
K by Q	-	48.12	49.02	47.98
K	-	0.16	0.15	0.15
K by FitQ	-	38.87	36.42	35.16
t_delay	0	165	216	210
t_delay by Q	0	139	192	210

<표 3> 실험 오차값 비교

	1st	2nd	3rd	4th
t_delay	0	165	216	210
t_delay by Q	0	139	192	210
오차	-	-26	-24	0
%	-	19%	13%	0%



<그림 8> 타이머, 히터 및 제어신호



<그림 9> 열량 및 축열량 센서온도 변화 추이

## 3. 결론

본 논문은 축열기기의 급속한 보급으로 인하여 야기된 동계 심야전력 피크의 기술적 저감을 위하여 축열식 전기보일러 및 온풍기에 대한 심야전력 공급시간 자동제어장치를 부착하여 그 성능시험 결과에 대한 것이다. 축열식 전기기기가 심야전력시간대가 시작하는 오후10시경 일제히 축열을 시작하여 심야전력으로 인한 동계 최대전력수요를 발생시키는 것을 축열잔량을 측정하여 이에 비례하여 심야전력 공급시간을 동적으로 제어하는 심야전력 공급시간 자동제어 장치를 개발하였다. 이로 인하여 동계 심야피크부하 발생을 억제할 수 있을 뿐만 아니라, 축열잔량에 따른 제어를 가능하게 하여 에너지 효율성을 높일 수 있을것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] National Instrument, LabVIEW User Manual.