

A 题:电采暖负荷参与电力系统功率调节的技术经济分析

建设以新能源为主体的新型电力系统是应对全球气候变化挑战的重要举措。高比例新能源接入导致电力系统调节能力稀缺，亟需开发新的调节资源，如火电深度调峰、建设抽水蓄能电站、配置储能和挖掘负荷中的调节能力等。现代电力负荷中含有较大比重的温控型负荷（如空调、电采暖），由于建筑热惯性的存在，可以在不影响住户舒适度体验的情况下，合理调控温控型负荷的用电方式，既可为电力系统提供调节能力，又可通过辅助服务收益降低温控型负荷的用电成本。

设某住宅小区有 600 个电采暖供热住户，为简便起见，将所有住户用典型住户表示，典型住户只有一个房间，建筑面积 80 m^2 ($8\text{m}\times 10\text{m}\times 2.9\text{m}$)，采用一个额定功率为 8 kW 的电加热器，温控区间为 18°C - 22°C 。小区电采暖设备总额定功率为 4800 kW。

建筑物房间的温度变化过程由电采暖设备制热功率、室外温度共同作用决定，通常用三维分布参数的偏微分方程来描述。为简化分析，将偏微分方程简化成集总参数的常微分方程，简化的室内温变过程模型及典型住户模型参数见附件 A。电采暖负荷用电的峰谷电价及其参与削峰填谷辅助服务补偿价格见附件 B。

若某聚合商组织该小区所有电采暖负荷参与电网功率调节，在日前向调度中心申报运行日各时段电采暖负荷计划功率和向上、向下可调节功率，在运行日按调度指令参与功率调节可从中获得经济补偿。

若你是该小区电采暖负荷的聚合商，请问如何刻画电采暖负荷参与电网调节的功率/电量特性，并进行经济收益评价。

1、典型住户电采暖负荷用电行为分析

(1) 在满足温控区间约束条件下，分析典型房间温变过程微分方程稳态解的性态，包括制热功率 $P_{\text{heat}}(t)$ 、室内温度 $\theta_{\text{in}}(t)$ 和墙体温度 $\theta_{\text{wall}}(t)$ 的变化特点，并分析模型参数对稳态解变化规律的影响。

(2) 室内初始温度为 20°C ，在表 1 给定的室外温度下，计算并绘制一日

24h的室内温度变化和相应的电采暖设备开关状态曲线，统计相关特征量填入表 1，并分析室外温度对电采暖设备运行特性及耗电量的影响。

表 1 典型住户电采暖负荷用电行为特征量统计结果（室内初始温度为 20℃）

室外温度	平均升温 时长/min	平均降温 时长/min	周期 /min	平均占空 比/%	日用电量 /kWh	日平均用电 功率/kW	日用电 成本/元
0℃							
-5℃							
-10℃							
-15℃							
-20℃							
-25℃							

（3）假设供暖期为 180 天，室外平均温度及持续天数如表 2 所示，试计算供暖期典型住户用电量和用电成本，并填入表 2。

表 2 供暖期典型住户用电量和用电成本统计结果

室外平均 温度	持续天数	用电量/kWh	供暖成本/元	供暖期总用 电量/kWh	供暖期总 成本/元
0℃	30				
-5℃	40				
-10℃	40				
-15℃	40				
-20℃	30				

2、典型住户电采暖负荷参与功率调节的能力分析

由于建筑物具有热惯性，通过关断处于加热状态的电采暖设备可以获得向下的功率调节能力，下调的持续时间受限于温控区间下限；通过开启处于关闭状态的电采暖设备可以获得向上的功率调节能力，上调的持续时间受限于温控区间上限。

（1）以单个住户电采暖负荷为对象，室外温度为-15℃，室内初始温度为 20℃，电采暖设备开关的初始状态为开启，计算典型住户电采暖负荷在日内 24h 各时点（间隔 1min）功率上调、下调的可持续时间，并绘制计算结果。

（2）对于表 1 给定的不同室外温度，计算电采暖负荷功率上调、下调的可持续时间，并分析不同室外温度对功率上调、下调特性的影响。

3、多个电采暖负荷的调节能力分析

以 6 个电采暖住户（序号分别为 1-6）为例，假设室外温度为-20℃，室内

初始温度在温控区间内均匀分布，自行选定一组电采暖设备开关的初始状态：

（1）计算 6 个住户正常用电时日内 24h 的室内温度变化及电采暖设备的开关状态，绘制 6 个住户的总用电功率曲线。

（2）以上述 6 个住户总用电功率曲线为基础，计算并绘制日内 24h 各时点（间隔 1min）可参与上调、下调的电采暖设备序号及各时点的总可上调、下调功率。

（3）在表 1 给定的各室外温度下，重新分析第（1）、（2）问，并分析不同室外温度对电采暖设备可调节能力的影响。

4、住宅区电采暖负荷参与电网调节的能力分析

以电采暖住宅区 600 个住户为分析对象，设各住户初始室内温度在温控区间内均匀分布，在表 1 所示的各室外平均温度下，自行选定一组电采暖设备开关的初始状态，计算日内 24h 各时点的室内温度及电采暖设备的开关状态，绘制住宅区电采暖设备的总用电功率曲线。以上述总用电功率曲线为基础，计算并绘制日内 24h 各时点住宅区电采暖负荷可参与上调、下调的总功率曲线。

5、住宅区电采暖负荷参与电网削峰填谷的收益分析

聚合商组织住宅区 600 户电采暖负荷参与电网削峰填谷（削峰时段、填谷时段及补偿价格见附件 B），需确定削峰或填谷时段内可持续提供的最大调节功率值。问题 4 所解出的各时点可上调、下调功率结果是基于单纯满足温控区间约束条件的电采暖设备开关状态决定的，电采暖负荷参与功率调节将改变其原有的开关状态，进而影响后续可调节功率的时变特性。

（1）请计算 600 户电采暖负荷在削峰时段可提供的持续最大向下调节功率值。

（2）请计算 600 户电采暖负荷在填谷时段可提供的持续最大向上调节功率值。

（3）假设上述计算所得持续最大向上、向下调节功率全部被调度中心调用，统计各时点由于参与电网调节导致开、关状态发生变化的电采暖设备数量，绘制所有住户的室内温度曲线，检验参与调节后温度变化是否满足温控区间约束。

（4）假设供暖期为 180 天，室外平均温度及持续天数如表 2 所示，试估算

各室外温度下该住宅区电采暖负荷参与削峰填谷的上调、下调功率，根据辅助服务补偿价格，计算全年该住宅区电采暖负荷参与削峰填谷的总收益、平均每户的收益及节省的供热成本百分比。

6、温控型负荷参与电网调节展望

（1）试根据上述计算结果，分析展望面积为 4000 万 m^2 的省级区域电采暖负荷参与电网调节的潜能和可能遇到的问题，并给出建议和解决方案。

（2）南方省份的温控型负荷主要是空调，分析展望空调负荷参与电网调节的特点、潜能和可能遇到的问题。