

偏差电量考核机制下聚合温控负荷群控制策略

李滨,于广文,白晓清

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室,广西 南宁 530004)

摘要:为降低售电公司在电力交易中的偏差考核电量和惩罚成本,以在用户负荷中占比较高的温控负荷为控制对象,建立配电网监测控制系统,收集电力市场和居民负荷数据,再根据这些数据设计基于聚合温控负荷群双层优化调度模型的直接负荷控制策略。仿真结果表明,该策略能降低配电网功率不平衡性,有效增加温控负荷的可调度容量,减少温控负荷的调度次数,降低售电公司的偏差考核电量,提高售电公司利润。

关键词:偏差电量考核;温控负荷;售电公司;直接负荷控制;变分模态分解

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202401007

0 引言

近年来,随着售电业务逐渐向社会资本放开^[1],全国开始大量建立售电公司。为了进一步完善售电公司参与电力市场的交易规则,国家发展改革委、国家能源局于2020年发布了《电力中长期交易基本规则》^[2],其中“偏差电量考核”的概念意味着售电公司在参与电力市场交易时会面临购、售电不符带来的偏差电量考核风险。我国售电公司主要分为3类^[3],即电网企业的售电公司、社会资本投资增量配电网并拥有配电网运营权的售电公司以及不拥有配电网运营权的独立售电公司。本文以前2类拥有配电网运营权的售电公司为研究主体。在售电市场竞争愈发激烈的情况下,如何降低偏差电量考核带来的成本成为售电公司运营的关键。

售电公司降低偏差电量的方法主要有以下2类:①售电公司通过提高短期负荷预测的精度得到精确的日前购电曲线^[4],从而降低偏差电量,但短期负荷预测难度较大,难以满足偏差电量考核要求;②售电公司通过需求响应降低偏差考核电量,如控制在负荷侧占比较高的空调、热水器、冰箱、电采暖等温控负荷^[5-7]。据统计,2019年夏季安徽省以空调为代表的温控负荷占有所有负荷的50%以上,而冬季以电采暖负荷为代表的温控负荷占有所有负荷的比例也超过了45%,若去除工业负荷,则居民区温控负荷的占比将会更高。大量的温控负荷会直接影响配电网馈线负荷波动,售电公司若能控制这些负荷,使馈线负荷按所需要的趋势改变,则可以降低偏差电量。

目前,已有很多学者对需求响应进行了相关研究,需求响应可分为直接负荷控制(direct load control, DLC)与间接影响用户负荷的方式。在DLC方面:文献[8]通过改变空调负荷集群的启停状态实时平抑风电引起的功率波动,提升电网运行频率的稳定性;文献[9-10]建立定频空调双层调度模型,通过控制空调启停响应条件信号,降低馈线负荷偏差;文献[11]通过控制楼宇温控负荷降低楼宇的用电成本,保证楼宇的经济运行;文献[12]通过将定频空调运行周期分为多段并制定轮控策略满足电力公司的调度计划要求。在间接影响用户负荷方面:文献[13-14]从博弈论的角度分析如何设定动态电价来增强需求响应;文献[15]介绍分时电价、实时电价等促进用户参与需求响应的原理;文献[16-17]建立一种通过给用户发放奖励券促进需求响应的机制。上述方式均能直接或间接地完成电网辅助服务,但仍有点缺陷需要优化:对负荷的随机波动进行全补偿导致备用需求量大;控制步长和预测步长较短,导致对控制目标下令次数过多,损害用户利益;控制策略简单,导致未充分发掘控制目标潜力,难以应付误差较大的情况;忽略对控制结果的完整评估,导致策略控制结果展现得不够全面和直观。

针对上述问题,本文提出一种基于聚合温控负荷群双层优化调度模型的DLC策略,主要创新工作如下:建立配电网监测控制系统,使得售电公司能够得到电力市场信息和用户单体负荷信息,为所提策略提供数据支持;利用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)进行数据处理、自回归滑动平均模型(auto-regressive moving average model, ARMA)进行超前预测的联合方法选择性补偿负荷波动的低频部分,有效减少控制目标调度次数;以负荷侧占比较高的温控负荷为控制对象,建立聚合温控负荷群双层优化调度模型,充分挖掘控制目标调度潜力,提高负荷可调度容量,有效应对误差较大的情形;建立温控负荷按优先级排列的调度模型,有效

收稿日期:2023-02-14;修回日期:2023-09-04

在线出版日期:2024-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51967001);广西创新驱动发展专项(桂科AA19254034)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51967001) and Guangxi Special Fund for Innovation-driven Development(AA19254034)

平衡每台温控负荷调度次数。仿真结果验证了所提策略的有效性。

1 偏差电量考核与配电网负荷

1.1 偏差电量考核机制

偏差电量考核机制指当售电公司日前购电计划与用户实际用电量有差别时,售电公司需付出相应的考核成本。广东电力市场的偏差电量考核机制设计最早且已实施多年,具有一定的代表性,因此,本文参考2018年广东电力市场发布的《广东现货电能市场交易实施细则(征求意见稿)》^[18]中的现货交易规则,针对售电公司日前购电计划曲线与用户实际用电曲线,以15 min为一个偏差考核周期进行考核,允许的售电公司偏差电量范围为购电计划的±2%以内,对超过部分的电量进行偏差电量考核,这将给售电公司带来相应的考核成本。

1.2 用户单体负荷监测

本文的控制对象为所有的用户温控负荷,因此需要获得所有用户温控负荷的实时状态。在智能电网背景下,高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)^[19]给负荷监测提供了支持,AMI中有一套完整的硬件系统,可以利用智能电表和双向通信网络定时或实时获取终端电力用户多种带时标的分时段或实时计量值并将其传输至量测数据管理系统,但AMI只能得到用户整体负荷数据,而无法得到用户每个负荷的精确状态,若通过给每个负荷均安装传感器解决该问题,则在现实中因高成本而难以实现。为此,非侵入式负荷监测(non-intrusive load monitoring, NILM)技术被提出,NILM通过对AMI得到的用户总负荷数据进行分解得到用户各负荷的实时状态(功率大小、开关状态)。随着智能化量测技术的发展,NILM的分解精度不断提高,目前已可达到98%以上^[20],本文所考虑的负荷需达到该精度,才能被签约并被调度控制。

1.3 配电网总负荷

将配电网总负荷分为2个部分,一部分为温控负荷,另一部分为除温控负荷外的固定负荷,如式(1)所示。

$$P_{f,t} = P_{a,t} + P_{d,t} \quad (1)$$

式中: $P_{f,t}$ 为 t 时刻的馈线总负荷; $P_{a,t}$ 为 t 时刻的总温控负荷; $P_{d,t}$ 为除温控负荷外的固定负荷。

典型的10 kV电压等级居民区馈线负荷曲线图如附录A图A1所示。图中: $P_{f,t}$ 和 $P_{a,t}$ 的实时数据通过测量装置测量得到, $P_{d,t}$ 通过式(1)计算得到; $P_{p,t}$ 为售电公司日前购电值,需在日前进行预测。按照上述偏差电量考核机制,图A1中全天的偏差考核电量如附录A图A2所示,总考核电量达到4.1148 MW·h。若不采取措施,则不仅会加重配电网的不平衡度,而

且会使售电公司因偏差电量而承担不小的经济损失。

1.4 配电网监测控制系统

以温控负荷为售电公司的控制主体,构建配电网监测控制系统,如图1所示。

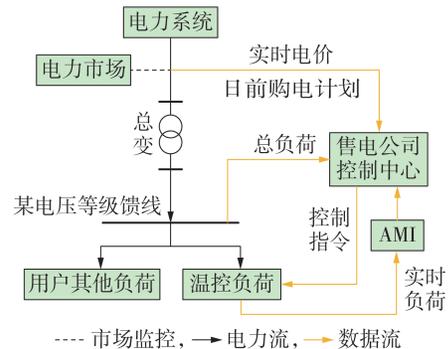


图1 配电网监测控制系统

Fig.1 Monitoring and control system of distribution network

该系统主要包括基础电力部分、电力市场信息部分、负荷监测部分和售电公司控制中心部分。其中售电公司控制中心是售电公司为控制温控负荷而建立的,主要完成数据收集分析和指令下达任务,收集的数据包括日前电价、实时电价、馈线总负荷和合同用户负荷,通过收集这些数据最终完成下列操作:售电公司通过负荷预测得到日前购电计划,并按照该计划向电力市场购电,这给电力市场带来收益,但给售电公司带来购电成本;售电公司在与使用温控负荷的用户签订合同后,收集用户温控负荷状态并对其进行控制,根据调度量用户能得到相应补偿,这给用户带来收益,但给售电公司带来控制成本;售电公司在收集负荷数据后生成控制策略,并向用户温控负荷下达指令,从而降低偏差电量,这给售电公司带来收益。

2 温控负荷

居民用户常见的温控负荷包括空调、冰箱、热水器和供暖负荷。

2.1 单台温控负荷模型

以在居民用户中占比较高的制冷模式下的变频空调为例,变频空调通过改变变频器的频率控制室温,变频器的输入为设定的空调温度 T_{set} 与室内温度 T_{in} 。当 T_{set} 低于 T_{in} 时,压缩机处于高频工作状态;当 T_{set} 接近 T_{in} 时,压缩机处于低频工作状态;而在 T_{set} 高于 T_{in} 一定程度时,压缩机将会停止工作。为便于分析,将室内变频空调模型简化为一阶等效热参数(equivalent thermal parameter, ETP)模型,变频空调工作模型如附录A图A3所示。变频空调的闭环控制过程如附录B式(B1)~(B4)所示。式(B1)呈现

了变频空调制冷量与室内外温度的关系,式(B2)则呈现了变频空调实时功率与实时制冷量的关系。为完成变频空调的闭环控制,还需要分析室内温度对空调实时功率的影响。结合文献[21]对变频空调进行分析:当室内温度高于设定的空调温度时,空调处于制冷状态,当室内温度与设定的空调温度差值大于死区温度 T_0 时,空调以额定功率制冷,而当温度差值在 $[0, T_0]$ 内时,空调功率随着温度差值线性降低,保证最终室内温度维持在设定的空调温度;而当室内温度低于设定的空调温度时,空调功率为0,空调变为停机状态。为防止空调频繁启停,设置小死区温度差值 T_s ,室内温度与空调实时功率的关系如式(B3)所示。根据式(B1)~(B4),更改设定的空调温度值能有效改变空调功率。

温控负荷中的冰箱模型与制冷模式下的变频空调模型一致,运行过程满足式(B1)~(B4),通过改变设定温度值同样可改变冰箱功率,具体为通过升高(降低)设定温度值减少(增加)功率;而以空气源热泵为核心的具备制热模式的空调、热水器、热泵供暖负荷等热泵负荷以及蓄热型电采暖负荷也可被等效为一阶ETP模型^[22-23],也可通过改变设定温度值改变负荷功率,具体为通过升高(降低)设定温度值增加(减少)功率。

2.2 聚合温控负荷双层模型

单台温控负荷功率低,负荷分布较为分散,若直接进行控制,则会造成很大的通信压力,因此,本文对所有与供电公司签订合同的温控负荷建立聚合温控负荷双层模型^[24],如图2所示。图中: a 为温控负荷聚合总组数; b 为每组聚合温控负荷所包含的温控负荷数量,每组温控负荷数量保持一致。

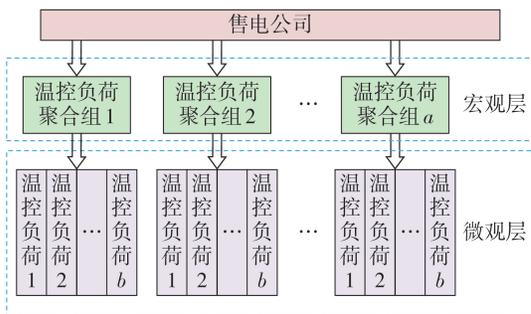


图2 聚合温控负荷双层模型

Fig.2 Bi-layer model of aggregated temperature-controlled load

温控负荷通过宏观层和微观层的双层结构聚合,这不仅给全天的分组调度带来便利,而且减小了售电公司对单台温控负荷的通信压力,使控制更容易实现。

3 数据处理与控制值生成

给温控负荷动作生成下令值主要分为数据采样

处理和数据预测2个部分。

温控负荷总功率 P_a 和馈线总功率 P_f 会随着对温控负荷的人为控制而变化,这些数据会出现耦合,不适合对其直接进行处理;而 P_f 与 P_a 的差值——固定负荷 P_d 不会随着策略的实施而发生变化,适合对其进行数据处理。 P_d 会因客观因素(天气、用户行为等)而出现幅值较小但频率较高的波动,不适合直接使用,需要对其进行预处理,预处理方法为VMD,过程如附录C所示。利用VMD方法将 P_d 信号分解为 k 个变分模态分量和1个残差分量,对各分量进行频谱分析:当分量的频谱集中在高频部分时,表明该分量周期短,不应该进行补偿;当分量的频谱集中在低频部分时,表明该分量为主周期项或趋势项,对该部分进行补偿不仅可以将误差限制在允许范围内,还可以最大化利用温控负荷资源。对主周期项和趋势项进行重构,得到用于预测的初始数据。

使用ARMA对初始数据进行预测,预测过程为:

1)对初始数据进行平稳性检测,若数据非平稳,则对数据进行差分,直到数据通过平稳性检测;

2)通过最小化信息量准则和贝叶斯信息准则对模型进行定阶,并采用最大似然估计方法求解每阶的系数;

3)在模型确定后,对其进行拟合优度检验,若通过检验,则为最终模型;

4)取当前 t 时刻后 T_p 时长为预测区间,得到预测序列 $\{P_{d,t+1}, P_{d,t+2}, \dots, P_{d,t+T_p}\}$ 。

为减少调度次数,降低平均误差,取预测序列的平均值 $\tilde{P}_{d,[t+1,t+T_p]}$ 为未来 T_p 时长的控制值,售电公司在 $[t+1, t+T_p]$ 时段的日前购电功率值为 P_p ,因此,温控负荷在该时段的功率理论需求值 P'_a 为:

$$P'_a = P_p - \tilde{P}_{d,[t+1,t+T_p]} \quad (2)$$

若不进行控制,则温控负荷总功率为 P_a ,这会导致最终的用电曲线与购电曲线间的误差较大,因此,本文策略的核心控制过程是控制温控负荷总功率由 P_a 变为 P'_a 。

4 聚合温控负荷控制策略

4.1 基于负荷超短期预测的温控负荷超前控制

本文提出一种基于负荷超短期预测的温控负荷超前控制策略,如图3所示。图中 P_f 、 P_a 和 P_d 的关系与式(1)相同。

控制策略流程为:对1d中的配电网馈线总功率 P_f 和温控负荷总功率 P_a 进行采样,以当前时刻为基准,将采样前 N_T 时长的负荷数据作为原始数据,采样间隔为 Δt ,得到数据 P_d ;通过VMD+ARMA的联合方法得到步长为 T_p 的 P_d 预测值;通过式(2)对温控负荷进行调度,在调度完成的 T_p 时间后重复使用该

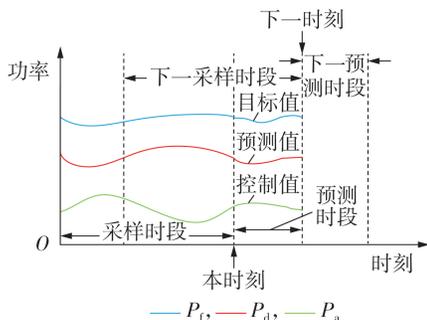


图3 基于负荷超短期预测的温控负荷超前控制

Fig.3 Advance control of temperature-controlled load based on ultra-short-term prediction of load

策略,直到1 d调度完成。

温控负荷的具体调度流程如下。

1) 温控负荷分组。

使用图2所示的温控负荷双层模型。在宏观层中,售电公司以用户为单位,将所有温控负荷平均分为12组,每组负责1 d中的2 h。在微观层中,每组都有一定数量的温控负荷被调度,将这些组进行如下分类:①核心组,若当前时段由某组温控负荷负责,则称该组为核心组,应优先调度核心组的温控负荷;②过渡组,在当前时段调度温控负荷后,为保证后面时段正常调度温控负荷,应维持后面时段的温控负荷为初始状态,根据温控负荷的特性,将核心组后3组组成过渡组,当前时段不对其进行调度;③备用组,已经结束调度的温控负荷进入恢复期,直到满足调度要求,这些温控负荷构成备用组。为降低温控负荷恢复引起的功率突变的影响,恢复期过程如下:在某组(包括备用组)温控负荷结束调度后,温控负荷的设定温度每15 min变化0.5℃,当设定温度回到初始温度时,将温控负荷加入备用组以供调度。

上述分组方法理论上能够有效增加可调度容量,解决误差较大时备用不足的问题。

2) 基于嵌套优先级排列的聚合温控负荷调度。

本文提出一种基于三重优先级排列的聚合温控负荷调度策略。设一组温控负荷中的每台温控负荷都拥有 S_1 — S_3 这3个调度状态值,3个调度状态值的意义和控制约束如下。

a) S_1 为温控负荷调度形态。由于温控负荷机械性能的限制,不能在短时间内多次调度温控负荷, S_1 初始值为1,在调度温控负荷后立即将其置为0。温控负荷调度形态的约束为:

$$\begin{cases} \{n_1\} = \{n, S_1(n, t) = 1\} \\ S_1(n, t) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=t-\Delta T_0}^{t-1} S_1(n, i) = 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中: n_1 为满足调度需求的温控负荷编号; n 为某组温控负荷编号; ΔT_0 为温控负荷调度的间歇时间。

由于温控负荷机械性能的限制, S_1 为温控负荷调度的最高优先级。

b) S_2 为温控负荷调度的累计值。 S_2 的初始值为0,反馈温控负荷累计调度次数,累计值约束为:

$$\begin{cases} \{n_2\} = \left\{ n_1, \min \left\{ \sum_{i=1}^{t-1} S_2(n_1, i) \right\} \right\} \\ S_2(n_1, i) = \{ S_2(n_1, i-1) + 1, s \} \end{cases} \quad (4)$$

式中: n_2 为满足调度需求的温控负荷编号; s 为 $t-1$ 时刻的温控负荷调度事件。可以看出, n_2 是在 n_1 取值中选取的,因此, S_2 的优先级低于 S_1 。

c) S_3 为温控负荷调度状态。 S_3 的初始值为0,反馈温控负荷设定值的变化,设温控负荷设定值为 T_{set} ,由于用户舒适度的要求,温控负荷设定值不能随意变化, S_3 状态值记录 T_{set} 的变化过程。温控负荷调度约束为:

$$\{n_3\} = \{n_2, \max | S_3(n_2, t) | \} \quad (5)$$

$$\begin{cases} S_3(n_2, t) = \{ S_3(n_2, t-1) + 1, u \} \\ S_3(n_2, t) = \{ S_3(n_2, t-1), v \} \end{cases} \quad (6)$$

式中: n_3 为满足调度需求的温控负荷编号; u 为 $t-1$ 时刻升高温控负荷设定温度值事件; v 为 $t-1$ 时刻降低温控负荷设定温度值事件。可以看出, S_3 的优先级低于 S_2 。

由式(3)—(6)得到基于优先级的聚合温控负荷嵌套调度流程, $\{n_3\}$ 为最终的温控负荷集合, $\{n_3\}$ 集合中空调的3个调度状态值完全一致,因此系统对集合中的空调随机调度,常规状态下只允许温控负荷升温或降温1℃,当完成 $\{n_3\}$ 中某一温控负荷的调度后,去掉其编号值,重复过程a)—c),直至调度完成。温控负荷调度流程图如附录A图A4所示。

3) 控制死区、动作区与紧急动作区。

只要馈线出现误差就调度温控负荷显然是不合理也是不可能实现的,因此,需通过设立相应的死区限制温控负荷动作。①小死区,将温控负荷的动作周期设定为1 min,温控负荷在动作后的1 min内不会继续动作;②大死区,当用户响应带来的成本超过偏差电量减少带来的收益时,不应调度温控负荷;③动态死区,由前文可知,当馈线误差超过馈线日前负荷的±2%时才进行偏差电量考核,考虑到温控负荷动作周期为1 min,设定在馈线实时采样值不超过日前负荷的±1.5%时不调度温控负荷;④动作区,当调度不符合上述死区时,开始调度温控负荷;⑤紧急动作区,若控制中心模拟完全调度核心组和备用组温控负荷时仍然不满足要求,则放开只允许温控负荷升温或降温1℃的限制,改为允许升温或降温2℃。

4) 温控负荷动作方案。

控制中心通过第3章原理计算得到控制所需数

据 P_a 和 P'_a , 温控负荷动作的目标是使 P_a 尽可能接近 P'_a 。通过死区判别, 温控负荷在不处于任何死区区间时动作。温控负荷的动作方案如下。

a) 若 $P'_a > P_a$, 则表示聚合温控负荷群需要增加功率。控制中心根据优先级排列的策略筛选出满足要求的温控负荷集合 $\{n_3\}$, 从 $\{n_3\}$ 中选择一台温控负荷, 通过式(B1)~(B4)计算温控负荷设定值 T_{set} 升高或降低 1°C 后的功率变化, 更新 P_a 。若结果满足 $|P'_a - P_a| < \gamma$ (γ 为死区限制的最小值), 则停止调度; 否则从 $\{n_3\}$ 中剔除该温控负荷编号后重复上述过程。当 $\{n_3\}$ 为空集时, 继续筛选除初始 $\{n_3\}$ 中所有已调度的温控负荷外的温控负荷, 形成新的 $\{n_3\}$ 。当筛选出空集而不能使调度满足要求时, 以同样的方式调度备用组, 并重复上述过程, 直到满足 $|P'_a - P_a| < \gamma$ 。若仍然不满足要求, 则进行紧急调节, 允许温控负荷降低 2°C , 并依次调度核心组和备用组负荷直到满足要求。

b) 若 $P'_a < P_a$, 则表示聚合温控负荷群需要降低功率。将温控负荷设定值 T_{set} 升高或降低 1°C , 重复过程 a)。

控制中心通过上述过程计算出温控负荷动作方案后, 对温控负荷下达相应命令, 在命令完成后的 T_p 时长内不调度温控负荷。

4.2 控制结果评价

为使控制结果更加全面和直观, 本文引入3种指标对策略结果进行评价, 分别为: ①全天均方根误差 $\beta_{\text{RMSE}}^{\text{DAY}}$, 反映全天馈线总误差情况; ②15 min均方根误差 $\beta_{\text{RMSE}, r}^{15\text{min}}$, 反映偏差考核效果; ③1 min平均误差 δ_i , 反映短时间控制效果。3种指标的计算公式分别为:

$$\beta_{\text{RMSE}}^{\text{DAY}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^{n_{\text{DAY}}} (P_{f,t} - P_{p,t})^2}}{C_s \sqrt{n_{\text{DAY}}}} \quad (7)$$

$$\beta_{\text{RMSE}, r}^{15\text{min}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=900(r-1)+1}^{900r} (P_{f,t} - P_{p,t})^2}}{\sqrt{900} C_s} \quad r=1, 2, \dots, 96 \quad (8)$$

$$\delta_i = \text{mean} \left(\sum_{t=60(i-1)+1}^{60i} \frac{|P_{f,t} - P_{p,t}|}{P_{f,t}} \right) \quad i=1, 2, \dots, 1440 \quad (9)$$

式中: n_{DAY} 为1 d时长, 单位为s; $P_{p,t}$ 为 t 时刻馈线功率日前预测值; C_s 为馈线输送容量; $\text{mean}(\cdot)$ 为求平均函数。为了直观进行比较, 设置考核点的 $\beta_{\text{RMSE}, r}^{15\text{min}}$ 与 δ_i 分别在5%和10%内的为合格点, 否则为不合格点。

4.3 利润计算

售电公司作为联系电网与用户的中间商, 是本文策略主体。在电力市场背景下建立售电公司利润模型^[25], 售电公司整体经历以下4个阶段。

1) 日前购电阶段。

售电公司在日前进行负荷预测, 得到日前负荷曲线, 在日前电力市场申报电量, 购电成本 E^{DA} 为:

$$E^{\text{DA}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{DA}} \lambda_t^{\text{DA}} \quad (10)$$

式中: T 为1 d的总时刻数; P_t^{DA} 为 t 时刻的预测负荷; λ_t^{DA} 为 t 时刻的日前市场电价。

2) 实时售电阶段。

售电公司通过在实时市场中售电获得利润, 交易所获得的收益 E^{NW} 为:

$$E^{\text{NW}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{NW}} \lambda_t^{\text{NW}} \quad (11)$$

式中: P_t^{NW} 为 t 时刻在实时市场中的售电电量; λ_t^{NW} 为实时市场电价。

3) 用户响应阶段。

售电公司在与用户签订合同后, 以一定成本控制用户温控负荷, 无论是使温控负荷增大还是减少功率, 均应按照一定价格补偿用户, 补偿成本 E_1^{CT} 为:

$$E_1^{\text{CT}} = \sum_{t=1}^T |\Delta P_t^{\text{CT}}| \lambda_t^{\text{CT}} \quad (12)$$

式中: ΔP_t^{CT} 为 t 时刻的温控负荷调度功率; λ_t^{CT} 为 t 时刻的温控负荷补偿价格, 本文取为定值。

此外, 增加调节用户温控负荷功率所带来的成本也应由售电公司承担, 额外成本 E_2^{CT} 为:

$$E_2^{\text{CT}} = \sum_{t=1}^T \Delta P_t^{\text{CT}} \lambda_t^{\text{NW}} \quad (13)$$

4) 偏差电量考核阶段。

在电力市场环境, 当馈线功率不平衡超过日前购电量的 $\pm 2\%$ 时, 售电公司需向电力市场支付偏差电量考核费用 E^{AS} , 即:

$$E^{\text{AS}} = \sum_{i=1}^{96} |\Delta P_i^{\text{AS}}| \lambda_i^{\text{AS}} \quad (14)$$

式中: ΔP_i^{AS} 、 λ_i^{AS} 分别为第 i 个考核时段 (本文设定每15 min考核1次, 因此全天共有96个考核时段) 的考核电量和考核电价, 本文设定为定值。

因此, 售电公司1 d中的利润 E 为:

$$E = E^{\text{NW}} - E^{\text{DA}} - E_1^{\text{CT}} - E_2^{\text{CT}} - E^{\text{AS}} \quad (15)$$

5 仿真分析

为验证本文策略的有效性, 以图1的10 kV居民区馈线负荷为例进行仿真, 馈线输送容量为12 MW, 售电公司与馈线内3600台制冷模式下的温控负荷用户签订合约, 将温控负荷分为12个聚合组, 每组包含300台温控负荷, 每组负责1 d中的2 h以供调度。采样周期 $N_s=900$ s, 采样间隔 $\Delta t=1$ s, 预测步长 T_p 和温控负荷动作间隔一致, 取为60 s。日前电价曲线与实时电价曲线参考文献[26], 假定能对较小误差的实时电价曲线进行短时预测, 如附录A图A5所示。补偿价格取为0.5元/kW。1 d中的户外温

度曲线如附录A图A6所示。

5.1 仿真结果

经过仿真,得到全天控制效果如图4所示。

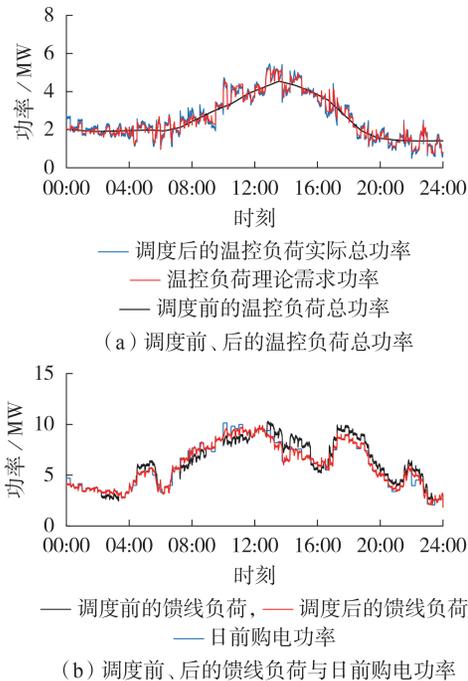


图4 全天控制效果

Fig.4 Control effect of whole day

相较于调度前,调度后的全天均方根误差由3.59%下降到1.59%。由图4(a)可知,在本文策略下,温控负荷能有效追踪目标负荷。 $\beta_{\text{RMSE},r}^{15\text{min}}$ 与 δ_i 指标的考核结果如表1所示。

表1 考核结果

Table 1 Assessment results

指标	条件	考核点	合格数	合格率/%	最差值/%
$\beta_{\text{RMSE},r}^{15\text{min}}$	调度前	96	59	61.46	17.23
	调度后		93	96.88	10.75
δ_i	调度前	1440	896	62.22	68.68
	调度后		1407	97.71	31.96

注:最差值指所有考核点中误差的最大值。

由表1可知,调度后的 $\beta_{\text{RMSE},r}^{15\text{min}}$ 与 δ_i 均接近100%,仍存在不合格点的主要原因是大死区与温控负荷容量的限制。全天考核电量由4.12 MW·h降低到0.6 MW·h,考核电量分布如附录A图A7所示。

温控负荷调度情况如图5所示。全天对温控负荷共下令219次,由图可知,各组温控负荷平均调度次数最大为30.4,平均温度变化最大为1.92℃,因此,本文策略能以较少的动作次数以及对用户较小的影响实现对目标负荷曲线的跟踪。根据4.3节计算公式,实施策略前,售电公司1d的利润为19256.704元,实施策略后,售电公司1d的利润为25501.841元,本文策略给售电公司带来6245.137元

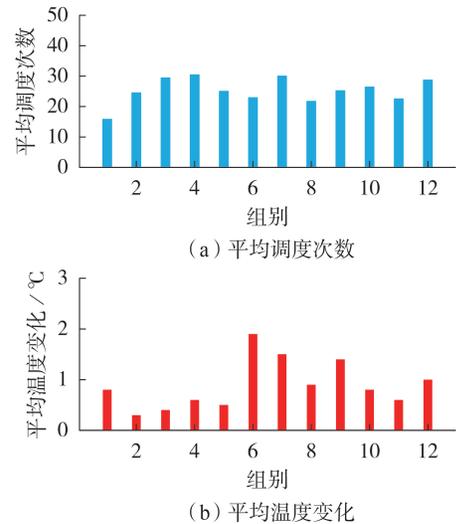


图5 温控负荷调度情况

Fig.5 Scheduling condition of temperature-controlled load

的利润。

5.2 不同策略的对比

为验证本文策略(记为策略1)的优越性,将其与另外2种策略进行对比:一种是文献[27]的比例积分控制策略,记为策略2;另一种是未采用VMD,直接使用ARMA方法进行预测的策略,记为策略3。为便于对比分析,仿真条件与数据与前文算例相同。各方法全天调度效果对比如附录A表A1与表A2所示。

由表A1可知:策略1与策略2的结果对比表明,比例积分控制作为单步长控制方法,其温控负荷调度次数最多,而本文所提多步长预测与控制的方法则能有效减少控制目标的调度次数以及对用户的影响;策略1与策略3的结果对比表明,使用VMD先去掉负荷波动中高频信号数据的处理方法能有效减少温控负荷调度次数。由表A2可知:策略1与策略3的结果对比表明,先用VMD去掉负荷波动中的高频信号数据、再用ARMA进行预测的方法比直接使用ARMA进行全补偿的方法的误差更小,这表明在相同备用的前提下前者补偿效果更好;在调度后,在考核标准合格率和给售电公司带来的利润方面,策略1最优,策略2次之,策略3最差。

综上所述,本文策略能以更小的误差和更少的动作次数达到降低馈线功率不平衡、提高售电公司利润的目的。

6 结论

在偏差电量考核背景下,本文以售电公司为主体,提出一种以用户温控负荷为控制对象的基于优先级调度的策略。通过仿真结果得出以下结论。

1)本文策略能有效降低日前与实时配电网馈线

负荷功率偏差。

2)温控负荷基础容量足够大,且滚动备用聚合温控负荷组设置能有效增加可调度容量。多种死区设置能有效减少温控负荷调度次数。基于优先级调度的策略能有效平衡每台温控负荷调度次数。

3)相比其他策略,本文策略具有控制对象动作次数更少、控制结果误差更小的优势,给售电公司带来了更多的利润。

本文策略仍然存在考虑不足的情况,比如未考虑配电网光伏、风电渗透的场景,以及未考虑用户差异化诉求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号文)[EB/OL]. (2015-03-15)[2023-01-17]. <https://smartgrids.ofweek.com/2015-03/ART-290010-8480-28942130.html>.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. 关于印发《电力中长期交易基本规则》的通知[EB/OL]. (2020-06-10)[2023-01-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202007/t20200701_1232843_ext.html.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局. 关于推进售电侧改革的实施意见[EB/OL]. (2015-11-26)[2023-01-17]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151130_760016.html.
- [4] 杨阳方,刘继春. 计及电量互保策略的售电公司两阶段日前决策方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):120-128.
YANG Yangfang, LIU Jichun. Two-stage decision-making method of retailers considering power transfer strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 120-128.
- [5] CHEN Y Y, LUO F J, DONG Z Y, et al. A day-ahead scheduling framework for thermostatically controlled loads with thermal inertia and thermal comfort model[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 568-578.
- [6] BIEEL B, ANDERSEN P, STOUSTRUP J, et al. Sustainable reserve power from demand response and fluctuating production—two Danish demonstrations[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(4): 780-788.
- [7] 余洋,权丽,贾雨龙,等. 平抑新能源功率波动的聚合温控负荷改进模型预测控制[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):92-99.
YU Yang, QUAN Li, JIA Yulong, et al. Improved model predictive control of aggregated thermostatically controlled load for power fluctuation suppression of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 92-99.
- [8] 刘志伟,苗世洪,杨炜晨,等. 计及电气特性的空调负荷建模及集群控制策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(1):178-184,192.
LIU Zhiwei, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Air conditioning load modeling and cluster control strategy considering electrical characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 178-184, 192.
- [9] VANOUNI M, LU N. Improving the centralized control of thermostatically controlled appliances by obtaining the right information[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 946-948.
- [10] HAO H, SANANDAJI B M, POOLLA K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 189-198.
- [11] 余苏敏,杜洋,史一炜,等. 考虑V2B智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):95-101.
YU Sumin, DU Yang, SHI Yiwei, et al. Optimal scheduling of low-carbon building considering V2B smart charging pile groups[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 95-101.
- [12] 高赐威,李倩玉,李扬. 基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1546-1555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [13] CHAI B, CHEN J M, YANG Z Y, et al. Demand response management with multiple utility companies: a two-level game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 722-731.
- [14] 王德志,张孝顺,余涛,等. 基于帕累托纳什均衡博弈的电网/多元家庭用户互动多目标优化算法[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):114-121,128.
WANG Dezhi, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Multi-objective optimization algorithm based on Pareto curve and Nash equilibrium game for interaction between grid and multi-home user[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 114-121, 128.
- [15] MOHAJERYAMI S, MOGHADDAM I N, DOOSTAN M, et al. A novel economic model for price-based demand response[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 135: 1-9.
- [16] ZHONG H W, XIE L, XIA Q. Coupon incentive-based demand response: theory and case study[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1266-1276.
- [17] ZHONG Haiwang, XIE Le, QING Xia, et al. Multi-stage coupon incentive-based demand response in two-settlement electricity markets[C]//2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington DC, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [18] 陈新和,裴玮,邓卫. 基于代理模型的分布式能源现货市场运营模式[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):107-116.
CHEN Xinhe, PEI Wei, DENG Wei. Surrogate model based operation mode of distributed energy spot market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 107-116.
- [19] 栾文鹏,余贻鑫,王兵. AMI数据分析方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(1):29-36.
LUAN Wenpeng, YU Yixin, WANG Bing. AMI data analytics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 29-36.
- [20] 冯人海,袁万琦,葛磊蛟. 基于图信号交替优化的居民用户非侵入式负荷监测方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1355-1365.
FENG Renhai, YUAN Wanqi, GE Leijiao. Non-intrusive load monitoring method for resident users based on alternating optimization in graph signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1355-1365.
- [21] 李天阳,赵兴旺,肖文举. 面向峰谷平衡的商业楼宇空调负荷调控技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):96-102.
LI Tianyang, ZHAO Xingwang, XIAO Wenju. Regulation technology of air-conditioning load in commercial buildings for balance of power grid peak and valley[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 96-102.
- [22] 栗子豪,吴文传,朱洁,等. 基于机会约束的主动配电网热泵日前调度模型及可解性转换[J]. 电力系统自动化,2018,42(11):24-31.
LI Zihao, WU Wenchuan, ZHU Jie, et al. Chance-constrained model for day-ahead heat pump scheduling in active distribution network and its tractability transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 24-31.
- [23] 崔屹峰,李珍国,杨金庆,等. 考虑需求差异的户用蓄热式电采暖优化运行策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(7):116-122.

- CUI Yifeng, LI Zhenguo, YANG Jinqing, et al. Optimal operation strategy for household electric thermal storage heating considering demand difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 116-122.
- [24] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.
ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [25] 郭昆健, 高赐威, 林国营, 等. 现货市场环境下售电商激励型需求响应优化策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 28-35.
GUO Kunjian, GAO Ciwei, LIN Guoying, et al. Optimization strategy of incentive based demand response for electricity retailer in spot market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 28-35.
- [26] 李滨, 黎智能, 陈碧云. 电力市场中配电网的空调群调控策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 124-131.
LI Bin, LI Zhineng, CHEN Biyun. Air conditioning group dispatch control strategy of distribution network in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 124-131.
- [27] 何玉灵, 孙凯, 王涛, 等. 基于变分模态分解与精细复合多尺度散布熵的发电机匝间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 164-172.
HE Yuling, SUN Kai, WANG Tao, et al. Fault diagnosis of generator interturn short circuit fault based on variational mode decomposition and refined composite multiscale dispersion entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 164-172.

作者简介:

李滨(1975—),女,副教授,博士,主要研究方向为电力系统最优化(**E-mail**:lizhen@gxu.edu.cn);

于广文(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统最优化(**E-mail**:1312807735@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

Control strategy of aggregated temperature-controlled load group under deviation electricity assessment mechanism

LI Bin, YU Guangwen, BAI Xiaoqing

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to reduce the deviation assessment electricity and penalty cost of the electricity sales company in the power trading, the temperature-controlled load with a high proportion in the user load is taken as the control object, a monitoring and control system of distribution network is established to collect the data of power market and residential loads, and then a direct load control strategy based on the bi-layer optimal dispatching model of the aggregated temperature-controlled load group is designed according to the data. The simulative results show that the strategy can reduce the power imbalance of distribution network, effectively increase the dispatchable capacity of the temperature-controlled load, reduce the dispatch number of the temperature-controlled load and the deviation assessment electricity of the electricity sales company, and increase the profit of the electricity sales company.

Key words: deviation electricity assessment; temperature-controlled load; electricity sales company; direct load control; variational mode decomposition

附录 A:

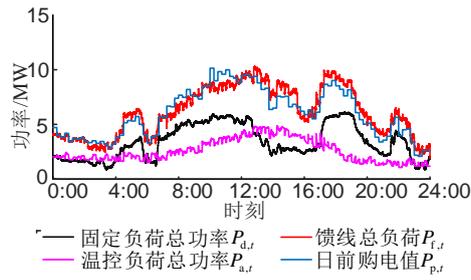


图 A1 典型馈线负荷曲线图
Fig.A1 Typical feeder load curve

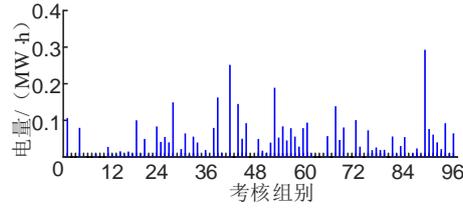
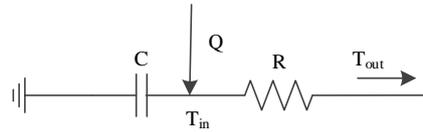


图 A2 全天考核电量
Fig.A2 All-day assessment electricity



注： T_{in} 为室内温度； T_{out} 为室外温度； R 为等效热阻； C 为等效比热容； Q 为空调制冷量。

图 A3 变频空调一阶等效热参数模型
Fig.A3 First-order equivalent thermal parameter model of inverter air conditioner

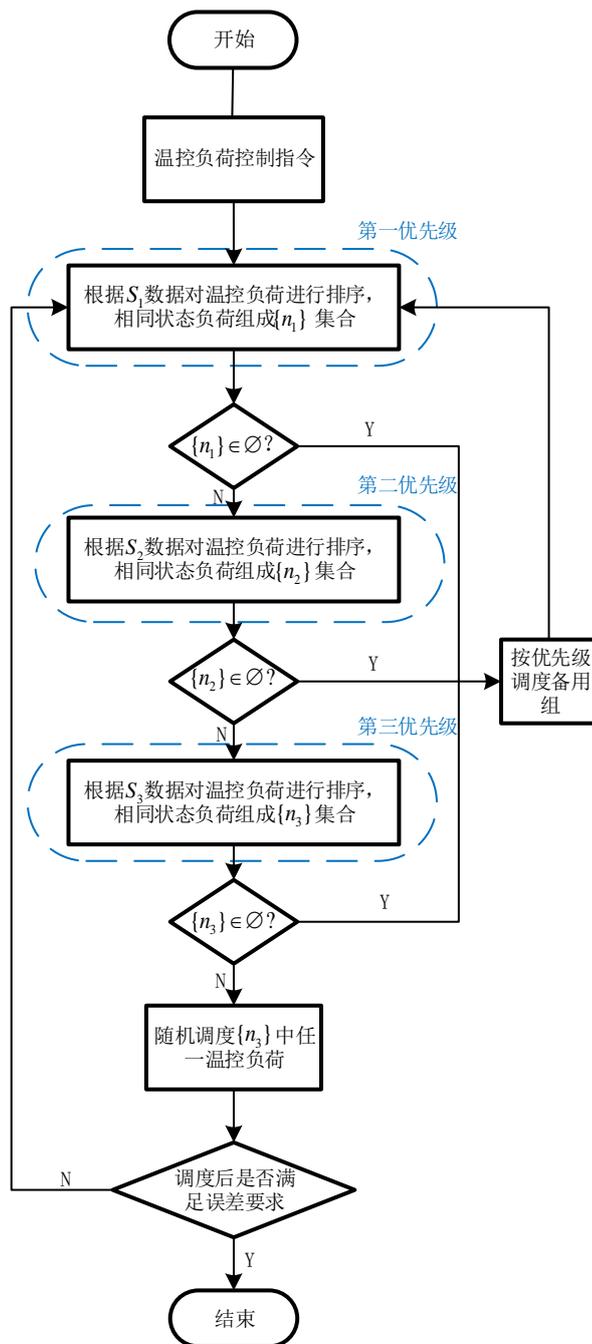


图 A4 基于优先级排列的温控负荷调度策略

Fig.A4 Temperature control load scheduling strategy based on priority ranking

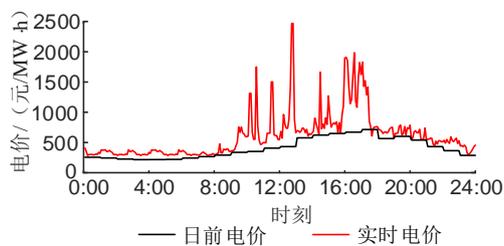


图 A5 某天实时电价与日前电价

Fig.A5 One-day real-time electricity price and day-ahead electricity price

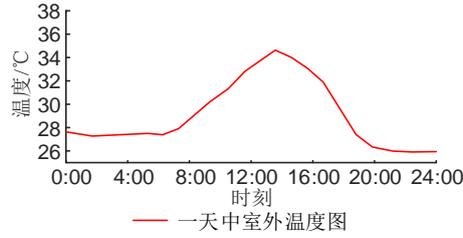


图 A6 一天室外温度曲线

Fig.A6 One-day outdoor temperature curve

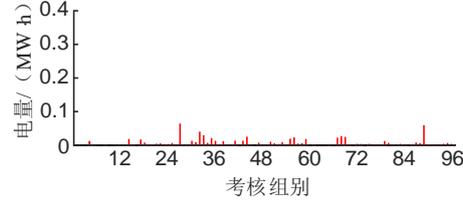


图 A7 调度后全天考核电量

Fig.A7 Whole day assessment electricity after scheduling

表 A1 温控负荷平均调度次数

Table A1 Average dispatch times of temperature-controlled load

控制策略	12 组聚合温控负荷总	
	调度次数	均调度次数
VMD+ARMA 方法	90756	25.21
PI 控制	124128	34.48
ARMA 方法	113580	31.55

表 A2 各方法调度结果对比

Table A2 Comparison of scheduling results of various methods

策略	考核标准	考核点	合格数	合格率/%	最差值/%	全天考核电量/MW	方法给售电公司带来的利润/元
未控制	$\beta_{RMSE,r}^{15\min}$	96	59	61.46	17.23	4.12	—
	δ_i	1440	896	62.22	69.68		
VMD+ARMA 控制	$\beta_{RMSE,r}^{15\min}$	96	93	96.88	8.75	0.6	6245.137
	δ_i	1440	1407	97.71	21.96		
PI 控制	$\beta_{RMSE,r}^{15\min}$	96	89	92.71	10.14	1.63	5461.27
	δ_i	1440	1284	89.17	47.35		
ARMA 控制	$\beta_{RMSE,r}^{15\min}$	96	88	91.67	11.21	1.75	4836.382
	δ_i	1440	1272	88.33	51.23		

附录 B:

室温 T_{in} 与制冷量 Q 的关系如下:

$$\begin{cases} T_{in}(t+1) = T_{out}(t+1) - Q(t)R - (T_{out}(t+1) - Q(t)R - T_{in}(t))\varepsilon \\ \varepsilon = e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \end{cases} \quad (B1)$$

式中: t 为任一时刻, ε 为散热系数, 其值越高表示房间内与外界的隔热效果越好, Δt 为时间分辨率, 取 1s。空调制冷量与空调实时功率的关系为:

$$Q(t) = \frac{k_Q}{k_p} P(t) S(t) \quad (B2)$$

式中: k_Q 和 k_p 均为常数, P 为空调实时功率, S 为变频空调开关状态, 空调开启时为 1, 关闭时为 0。

空调实时功率 P 和室温 T_{in} 如下式所示:

$$P = \begin{cases} k[T_{in} - T_{set} - T_D] + P_{rated} & T_{set} - T_d \leq T_{in} < T_{set} + T_D \\ P_{rated} & T_{in} \geq T_{set} + T_D \\ 0 & T_{in} < T_{set} - T_d \end{cases} \quad (B3)$$

$$k = \frac{P_{\text{rated}} - \frac{k_p}{k_Q} (T_{\text{out}} - T_{\text{set}}) A}{T_D} \quad (\text{B4})$$

式中： P_{rated} 为额定功率并且 $P \in [0, P_{\text{rated}}]$ ； T_D 为死区温差； T_d 为小死区温差； T_{set} 为空调温度设定值。

附录 C:

变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 是 2014 年由 Dragomiretskiy 所提出的一种适合非平稳信号的分解算法^[27], VMD 能将原始信号有效分解为多个中心频率明显的经验模态分量。

VMD 将信号 f 分解成 k 个变分模态分量 $\{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, 在以每个模态的带宽之和为最小的条件下, 信号分解过程变为求解如下变分问题的过程:

$$\begin{cases} \min_{\{u_i\}, \{\omega_i\}} \left\{ \sum_{i=1}^k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_i(t) \right] e^{-j\omega_i t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^k u_i = f \end{cases} \quad (\text{C1})$$

式中: $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 为各变分模态分量, $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$ 为各模态分量的中心频率, t 为任一时刻, $\delta(t)$ 为冲激函数, ∂_t 为对时间求偏导。

为求解该模型, 引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘法算子 λ , 将约束性变分问题转化为非约束性变分问题, 扩展的拉格朗日表达式为:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) := \alpha \sum_{i=1}^k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_i(t) \right] e^{j\omega_i t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{i=1}^k u_i(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{i=1}^k u_i(t) \right\rangle \quad (\text{C2})$$

通过交替方向乘子算法 (alternate direction method of multipliers, ADMM) 求取上述扩展拉格朗日函数的最优解。具体步骤为:

- 1) 初始化各个模态 $\{u_k\}^1$ 、拉格朗日算子 λ^1 和中心频率 $\{\omega_k\}^1$, $l=1$;
- 2) 更新模态分量 u_k :

$$\hat{u}_k^{l+1} = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i=1}^{k-1} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (\text{C3})$$

式中: \hat{u}_k^{l+1} 为更新 l 次后的模态分量, ω 为频率变量。

更新中心频率 ω_k :

$$\omega_k^{l+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (\text{C4})$$

式中: ω_k^{l+1} 为更新 l 次后的中心频率。

更新 λ :

$$\hat{\lambda}^{l+1} = \hat{\lambda}^l + \tau \left(\hat{f}(\omega) - \sum_{i=1}^k \hat{u}_i^{l+1}(\omega) \right) \quad (\text{C5})$$

式中: $\hat{\lambda}^{l+1}$ 为更新 l 次后的拉格朗日算子, τ 为噪声容限参数。

- 3) 判断是否满足约束条件 $\frac{\sum_{i=1}^k \left\| \hat{u}_i^{l+1} - \hat{u}_i^l \right\|_2^2}{\left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2} < h$, h 为给定精度, 若不满足, 则 $l=l+1$, 重复步骤 2, 若

满足, 则迭代终止, 得到 k 个变分模态分量。