

计及用户舒适性与公平性的热泵负荷集群控制策略

孙毅¹, 陈一童¹, 李彬¹, 石坤², 薛溟枫³

(1. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214031)

摘要:温控负荷作为一种需求侧典型柔性负荷,具有应用规模大、可调节性强等特点,可通过集中控制辅助实现新能源消纳。以典型温控负荷电热水器作为调控对象,提出了一种计及用户舒适性与公平性的负荷调控策略。该策略考虑温控负荷温度变化对用户舒适度的影响,以平均舒适度与最佳舒适度偏差量最小为目标,建立数学模型并利用自适应粒子群优化算法求取最佳任务分配量;同时计及热泵参与响应的公平性,在负荷集群控制环节引入控制频次约束对调控策略进行修正,以解决单个热泵控制频率过高的问题。通过仿真验证所提调控策略可减少负荷平均舒适度与最佳舒适度偏差量,并有效避免了负荷调控频次过多的现象,提升了温控负荷参与调控过程中的用户体验。

关键词:温控负荷;新能源消纳;舒适性;公平性;集群控制策略

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.018

0 引言

能源是现代发展的基础,是人类社会发展的重要保障。随着能源安全、生态环境、气候变化等问题日益突出,加快发展新能源已成为国际社会推动能源转型发展、应对全球气候变化的普遍共识和一致行动^[1-2]。在大力推广风电等新能源发电的同时,其出力的不确定性和随机性也给电网运行带来了挑战^[3],因此研究面向新能源大规模消纳的负荷调控策略对提高电网可靠性具有重要意义^[4]。

目前,解决新能源发电随机性问题的方法主要是建设大规模的储能设备和利用负荷直接控制手段进行需求响应^[5]。但是建设大规模储能设备系统成本高,同时储能设备普及率比较低,缺乏大规模使用的基础^[6]。温控负荷作为典型的需求响应资源,在需求侧具有柔性化的特点,以空调、商用电热水器、电采暖负荷为代表的温控负荷在居民用电负荷中占比越来越高^[7]。同时,在售电侧改革的背景下,以具备售电能力的负荷聚合商作为枢纽,通过负荷集群的控制方式可对新能源电厂发电曲线进行逆向匹配,也为温控负荷实现新能源消纳提供了实现的基础^[8]。

对于温控负荷的直接控制策略,目前已有许多文献进行了深入的讨论。文献[9]选用电热水器作为需求响应控制对象,利用具有二阶微分方程形式的等值热力学参数ETP(Equivalent Thermal Parameter)模型对电热水器进行热电耦合建模,适用于电热水器负荷建模。文献[10]研究了目前常见的温控负

荷,如空调、冰箱、热水器等,通过居民温控负荷的聚合功率计算公式,讨论了不同负荷性质情况下的聚合负荷的响应潜力。文献[11]针对常见可控负荷,提出了一种启动延迟的调控策略从而避免负荷曲线的峰值过高。文献[12]构建了一种由电热水器负荷组成的集群温控负荷模型,通过对电热水器设定温度设定点控制热水器的开闭状态,为电力系统的频率恢复提供服务。上述文献主要考虑了负荷模型及用户舒适度需求,但对于因任务量分配不同而引起的用户舒适体验存在差异以及频繁控制会给设备带来损害的问题则研究较少。

本文针对电热水器温度变化与调控频次会给用户正常使用带来诸多的影响,提出了一种计及用户舒适性与公平性的负荷调控策略。以电热水器作为负荷调控对象,以人体舒适度指数作为衡量用户舒适体验标准,利用自适应粒子群优化算法计算最佳任务量分配以提高用户的舒适感;增加设备调控频次限制环节,防止设备调控频次过高给用户使用带来的不良影响,最后通过仿真验证了所提策略的有效性。

1 电热水器热力学模型

电热水器作为一种典型的温控负荷具有良好的储热功能,是国内逐渐推广的一种重要的取暖负荷。目前已有许多文献研究了电热水器的建模和控制方法,常用的方法是利用二阶微分方程进行ETP建模。文献[13]已经证实ETP模型可以表述电热水器的运行状态。

电热水器设备的热力学等值示意图如图1所示。在电热水器设备的热力学模型中,根据电热水器的设备温度与其消耗的电功率之间的对应关系,可以得到电热水器的热电耦合模型 $Q = S^k Q_{op}$,其中 Q_{op} 为电热水器的额定热比率, S^k 为设备的开关状态。

收稿日期:2018-06-05;修回日期:2019-03-14

基金项目:国家电网公司科技项目(YDB11201702612)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(YDB11201702612)

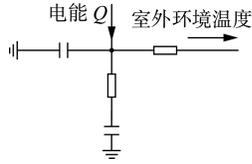


图 1 热力学等值示意图

Fig.1 Thermodynamic equivalent schematic diagram

设备开关状态变化如式(1)所示。

$$S^k = \begin{cases} 1 & T_{\text{room}}^{k-1} < T_{\text{set}}^k - \delta/2 \\ 0 & T_{\text{room}}^{k-1} > T_{\text{set}}^k + \delta/2 \\ S^{k-1} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k=2,3,\dots$; T_{set} 为电热泵的温度设定值; δ 为温度死区的宽度; T_{room} 为室温。

由于电热泵设备型号参数具有多样性,其热力学参数具有随性分布特点^[14],本文选取热力学参数为正态随机函数分布。通过信息采集系统采集用户家中电热泵负荷的运行数据并将数据上传给负荷聚合商,以参与新能源消纳过程。在上述模型的基础上通过数学推导^[15]可以得到描述电热泵运行状态的指数模型,如式(2)所示。

$$T_{\text{room}}^{k+1} = \begin{cases} T_{\text{out}}^k + QR - (T_{\text{out}}^k + QR - T_{\text{room}}^{k-1}) e^{-\frac{1}{RC}} & S^k = 1 \\ T_{\text{out}}^k - (T_{\text{out}}^k - T_{\text{room}}^{k-1}) e^{-\frac{1}{RC}} & S^k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, R, C, Q 分别为室内空气热阻、室内空气热容、电热泵的热比率; T_{out} 为室外空气温度。

电热泵负荷单体运行状态如图 2 所示,仿真时间间隔为 1 min。

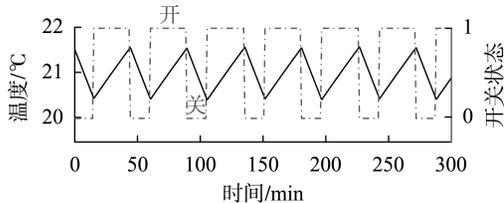


图 2 电热泵负荷单体运行状态示意图

Fig.2 Schematic diagram of electric heat pump load single operating state

为了保证调控过程中室内温度处于人体可接受温度范围内,在此设定温度上下限为 $[T_l, T_h]$,当室内温度低于下限 T_l 时,将热泵开关状态设为开启使室温升高;当室内温度高于上限 T_h 时,将热泵开关状态设为关闭使室温下降。

2 面向新能源消纳的热泵集群控制架构

负荷聚合商可以管控大量的分散负荷,一般通过负荷群体温度设定值对负荷进行集群控制。当对大规模负荷进行控制时,采用分区控制不仅可以减少大规模负荷集中控制带来的通信压力,还可以根据大规模负荷的分散特性进行区域的划分,使负荷

调控具有更好的针对性^[16]。

考虑到负荷调控的便捷性和物理分布特性,本文根据用户所在智能小区地理差异划分区域,将区域内接受调控的用户进行集群,通过负荷聚合商实现点对多点的协调控制。图 3 为包含负荷聚合商的风电消纳架构图。各负荷聚合商收到新能源电厂的消纳任务信息后,首先进行任务分配处理,将任务分配信息发送给控制站点,位于各智能小区的控制站点收到消息后,制定负荷控制策略并将控制信息传输给位于小区的各温控负荷,温控负荷收到控制信息后调整各自运行状态,从而完成新能源消纳任务。

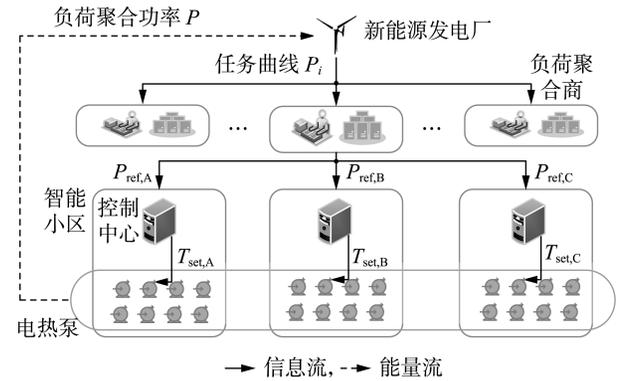


图 3 电热泵参与风电消纳架构图

Fig.3 Architecture diagram of electric heat pump participating in wind power consumption

3 计及用户舒适性与公平性的负荷控制策略

电热泵在参与新能源消纳过程中,负荷群平均温度与舒适温度的偏差值会影响用户的舒适情况。针对此问题,本文以减少负荷群平均舒适度与最佳舒适度的偏差量为目标,建立数学模型并利用自适应粒子群优化算法求取最佳任务分配量;计及电热泵参与响应的公平性,在负荷集群控制环节引入控制频次约束对调控策略进行修正,以解决热泵控制频率过高的问题,进一步提高用户的使用体验。负荷控制策略流程图如图 4 所示。

3.1 计及用户舒适性的任务量分配

热泵温度变化会对用户使用热泵的舒适程度造成影响,而用户的舒适与否是评价温控负荷需求响应是否合理的重要依据。本文采用标准人体舒适度指数来衡量用户的舒适情况^[17]。人体舒适度指数计算公式如式(3)所示。

$$I_{Cl} = 1.8T_{\text{room}} - 0.55(1.8T_{\text{room}} - T_{\text{com}})(1 - R_H/100) + 32 \quad (3)$$

其中, T_{com} 为舒适温度; R_H 为相对湿度。室内相对湿度受多种因素影响,在本文讨论电热泵工作过程中,相对湿度为定值,当室内温度为舒适温度时取得最佳舒适度 $I_{Cl,com}$ 。为了直观表达单个用户与群体用户体验,定义用户平均舒适差 f_{AUC} ,如式(4)所示。

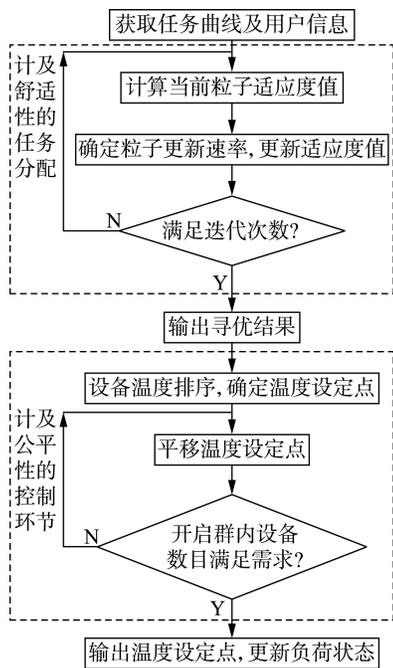


图4 负荷控制策略流程图

Fig.4 Flowchart of load control strategy

$$f_{AUC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{Cl,i} - I_{Cl,com}| \quad (4)$$

其中, $I_{Cl,i}$ 为用户 i 当前舒适度指数; N 为设备数。平均舒适差越小,说明该负荷群在进行需求响应时越接近舒适温度,用户的体验越好。

取室内相对湿度为 65, 舒适温度为 20 °C, 用户平均舒适差与平均温度对比如图 5 所示。可以看出, 当温度靠近舒适温度时, 平均舒适差降低, 用户体验增强; 当温度远离舒适温度时, 平均舒适差升高, 用户体验变差。

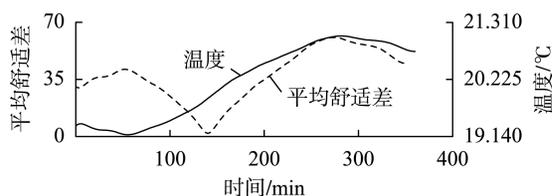


图5 平均舒适差与舒适温度对比

Fig.5 Comparison between average comfort difference and comfort temperature

由于热泵的初始温度、热力学参数存在差异, 在多个负荷群同时进行需求响应时, 负荷群响应任务量的大小会影响该负荷群的平均温度变化。不同的任务分配会使负荷群有不同的调控动作, 负荷群之间的温度变化也不同, 从而造成用户舒适度与最佳舒适度之间的偏差不同。当环境湿度保持不变时, 舒适度指数与温度呈一次函数关系, 是随温度变化的单目标函数。平均舒适差是当前舒适度与最佳舒适度的差值, 若当前舒适度远离最佳舒适度, 平均舒适差升高; 若当前舒适度靠近最佳舒适度, 平均舒适差降低; 当当前舒适度为最佳舒适度时, 平

均舒适差为 0, 故在平均舒适差曲线中会出现尖峰的情况。

本文旨在制定合理的任务分配方法, 以减少平均舒适度与最佳舒适度的偏差量。粒子群优化算法作为一种全局搜索的智能优化算法, 可以用来制定合理的任务分配策略。

本文中, 粒子群优化算法的粒子结构为:

$$P_j = \{P_{ref,1}, P_{ref,2}, \dots, P_{ref,M}\} \quad (5)$$

其中, $P_{ref,M}$ 为第 M 个小区的任务功率。粒子群优化算法中目标函数为负荷群的平均舒适差, 平均舒适差越小, 说明负荷群整体越靠近舒适温度。

在粒子群优化算法中, 速度权重值 ω 有平衡全局寻优能力的作用。当 ω 值较大时, 全局寻优能力强, 局部寻优能力弱, 不易得到精确的全局最优解; 当 ω 值较小时, 收敛能力弱, 可以得到精确的最优解。为此本文对粒子群优化算法中选择速度权重值的方法做出了改进, 采用一种自适应的调整策略。

标准粒子群优化算法的速度更新公式为:

$$V = \omega v + c_1 R_{rand}(p_{best} - x) + c_2 R_{rand}(g_{best} - x) \quad (6)$$

其中, R_{rand} 、 p_{best} 、 g_{best} 分别为 0~1 范围内的随机数、个体极值和全局极值。此时速度权重值 ω 为定值, 在迭代过程中保持不变。而自适应粒子群优化算法的速度权重值计算公式为:

$$\omega = \left| P_{ref} - \sum_{i=1}^N P_i \right| F_{fun} \varphi \quad (7)$$

其中, P_{ref} 为当前时刻任务量; P_i 为热泵功率; F_{fun} 为当前时刻适应度值; c_1 、 c_2 、 φ 为粒子群优化算法的参数值, 该参数值与负荷控制的数目以及功率有关。式(7)表明, 当任务功率与聚合功率接近时, 任务分配得当, 粒子更新速度降低, 便于寻得最佳粒子。

任务分配环节示意图如图 6 所示。

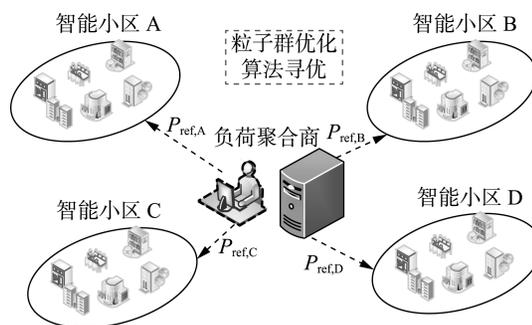


图6 任务分配示意图

Fig.6 Schematic diagram of task assignment

由图 6 可知, 任务分配环节是负荷聚合商向各智能小区进行新能源消纳任务量的分配。本文利用粒子群优化算法, 以平均舒适差最小为目标进行迭代寻优, 制定合理的任务分配量以提高用户群的舒适度。

3.2 计及负荷响应公平性的控制策略

本文所提策略以温度队列控制策略为基础,在已有策略基础上,为防止单一负荷响应次数过多影响用户体验,提出计及负荷响应公平性的控制策略,其步骤如下。

a. 负荷分群与状态排序。对于一个智能小区而言,开启的负荷数目为 N_{on} ,关闭的负荷数为 N_{off} ,初始温度设定值根据采集到的当前时刻室内温度对所有电热泵负荷进行从低到高的排序。开启负荷数 N_{on} 与初始温度设定值 T_{set} 的计算公式分别为:

$$N_{on} = P_{ref} / P_E \quad (8)$$

$$T_{set} = \text{Que}[N_{on}] \quad (9)$$

其中, P_E 为热泵的额定功率; P_{ref} 为小区的任务功率; $\text{Que}[x]$ 为温度队列中位置 x 对应的温度值。

b. 计及负荷响应公平性的控制策略。当需求功率大于当前聚合功率时,需增加开启群内热泵数目,反之需增加关闭群内热泵数目。室温低于设定值的热泵开启,高于设定值的热泵关闭。定义频次阈值,当热泵在一段时间内的控制频次超过频次阈值时,认为该台设备的响应次数过多,跳过当前调控指令,当满足调控条件时再进行调控。频次阈值的选取会影响功率匹配效果,频次阈值越小,负荷控制频次限制越严格,处于过调控状态的负荷数目越多。“过调控”负荷数目越多,说明调控的公平性越差。

当某一负荷的响应频次超过频次阈值时,认为该负荷处于“过调控”状态,保持该设备开关状态不变。将温度设定值按照温度队列方向进行平移,直到可以更改状态的热泵数目满足要求为止。在 K 时刻,电热泵的温度排序和电热泵的开关状态见图7。

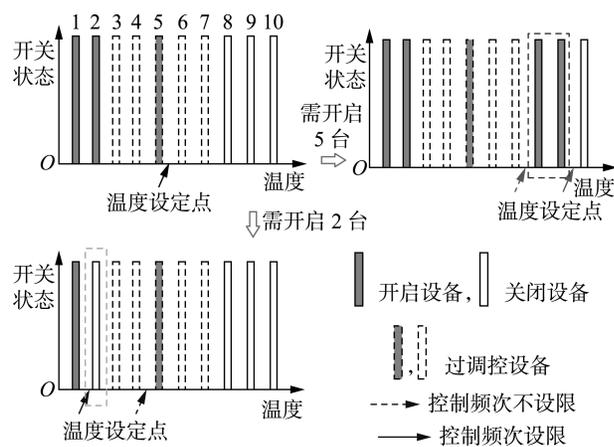


图7 电热泵状态改变示意图

Fig.7 Schematic diagram of changing electric heat pump state

由图7可知,开启的热泵功率之和为总体热泵聚合功率。设上一时刻开启群热泵数为 n_1 ,上一时刻温度设定点的位置为温度轴上第 x_1 个设备之后、第 x_1+1 个设备之前,即 $T_{set} \in (T_{x_1}, T_{x_1+1})$ 。

取 $N=10, N_{on}=3, N_{off}=7, x_1=5, n_1=3$ 。在当前

时刻,根据任务量计算该时刻开启热泵数为 n_2 。根据电热泵的开启数 n_1 和 n_2 可分为如下2种情况进行讨论。

a. 若 $n_2 > n_1$, 则:

$$n_2 - n_1 = x_2 - x_1 - \text{seb}(x_2, x_1) \quad (10)$$

b. 若 $n_2 < n_1$, 则:

$$n_1 - n_2 = x_1 - x_2 - \text{seb}(x_2, x_1) \quad (11)$$

其中, x_1 和 x_2 分别为平移前、后 T_{set} 在温度队列中的位置; $\text{seb}(x_2, x_1)$ 为 x_2 与 x_1 之间状态改变受限的设备个数。当 n_2 分别取5和2时,这2种情况下的设定点如图7所示。 $n_2=5$ 时,开启编号为8、9的热泵; $n_2=2$ 时,关闭编号为2的热泵。

4 算例仿真

选择A、B、C、D这4个小区,每个小区内参与负荷控制的热泵数均为200。采用文献[18]的任务曲线作为本文的任务曲线。文献[19]研究了电热泵参与新能源消纳,其热力学参数的选取符合热泵实际运行状态。本文将文献[19]的热力学参数作为仿真实验的具体参数,详见附录中表A1。由于本文研究重点是提出了一种计及舒适性与公平性的负荷控制策略,同时本文采用的ETP模型和粒子群优化算法并不依赖于数据自身的特性,因此即使参数变化,所提方法依然适用。

选择北京市1月份某天的室外温度作为仿真数据。室外温度曲线如图8所示。

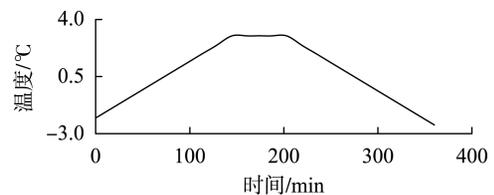


图8 室外温度曲线

Fig.8 Curve of outdoor temperature

在任务量分配环节,本文将常用的负荷数目比例分配算法作为对比算法。该算法依照区域热泵数的比值进行任务分配,符合消纳过程的要求^[20],具体如式(12)所示。

$$P_{ref,j}^k = N_{Re,j} P^k / N_{sum} \quad j=1,2,3,4 \quad (12)$$

其中, $P_{ref,j}^k$ 为 k 时刻区域 j 的任务分配值; $N_{Re,j}$ 为第 j 个区域的设备数; N_{sum} 为参与调控的热泵总数; P^k 为任务总量。在比例分配算法中,分配的原则是按热泵数进行任务分配,主要考虑的是负荷群消纳能力的差异性,对用户的舒适性考虑较少,而粒子群优化算法的目标即为使用户的平均舒适度更靠近最佳舒适度,以提高用户的舒适性。

采用负荷数比例分配算法与本文提出的自适应粒子群优化算法的仿真结果对比如图9所示。由图

9 可以看出,在新能源消纳过程中,聚合功率曲线与任务功率曲线基本吻合,说明新能源消纳任务完成较好;任务量按热泵数目比例分配与自适应粒子群优化算法分配在完成总体消纳任务的效果上基本相同,都可以完成负荷聚合商的消纳任务。

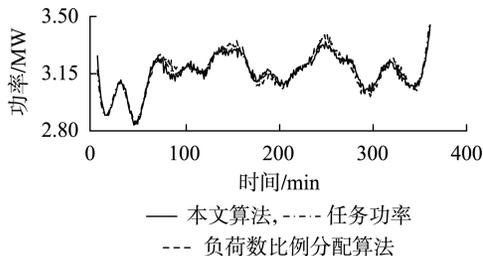


图 9 仿真结果对比

Fig.9 Comparison of simulative results

图 10、11 分别为采用热泵数目比例分配与自适应粒子群优化算法分配在完成负荷聚合商的消纳任务时,热泵群的平均温度变化与平均舒适差变化。

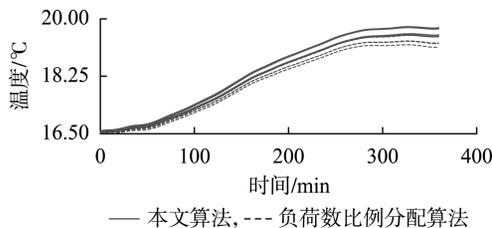


图 10 平均温度变化曲线

Fig.10 Curve of average temperature

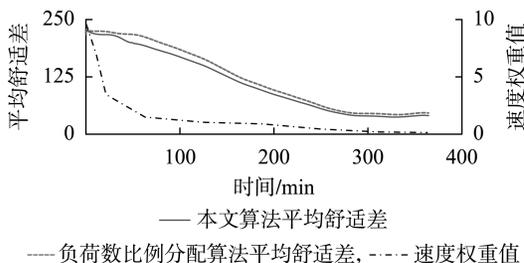


图 11 平均舒适差与速度权重值曲线

Fig.11 Curves of average comfort difference and speed weight

由图 10 可知,新能源消纳开始之后,热泵温度处于较低温度状态。从图 9 可以看出,任务功率曲线介于 $[2.9, 3.5]$ MW 之间,因此在控制过程中有大多数负荷处于开启状态,所调室温整体升高,热泵温度呈现上升趋势。当平均温度向舒适温度靠近时,平均舒适度与最佳舒适度偏差量减小,用户体验感增强。本文实验环节选择的舒适温度为 20°C ,负荷的初始温度较低,负荷温度向舒适温度靠拢呈现上升趋势。粒子群优化算法以负荷平均舒适度与最佳舒适度偏差最小为目标,采用比例分配算法的负荷群平均温度低于采用粒子群优化算法的负荷群平均温度。由图 11 可知,在相同时刻,采用本文所提策略的热泵群平均温度能够以更快速率向舒适温度靠拢。原因在于粒子群优化算法可以确定更智能化的

功率分配策略,使负荷群的平均温度变化曲线可以更快地靠近舒适温度值,提升用户整体的舒适体验。与比例数分配算法相比,在相同时刻采用本文所提策略的热泵群平均舒适度与最佳舒适度的差值也较小,说明采用智能算法可以提高需求响应的用户体验。同时根据式(7)可知,速度权重值 ω 随着目标函数值逐渐减小。在控制初始阶段, ω 较大,此时全局寻优能力较强,而随着控制的进行, ω 不断变小,此时局部寻优能力较强,最终得到精准的最优解。

图 12 为不同频次阈值下负荷群聚合功率与任务功率曲线的匹配效果。

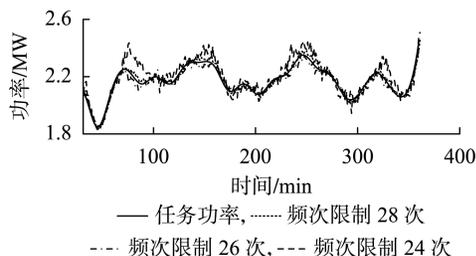
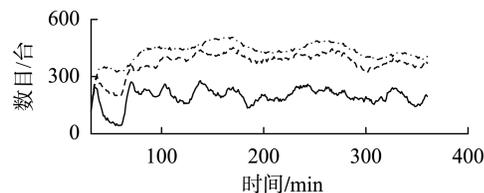


图 12 不同频次阈值下功率匹配效果

Fig.12 Power matching effect under different frequency thresholds

由图 12 可知,频次阈值取不同值时,负荷群聚合功率的匹配效果有一定的差异。频次阈值是预先确定的可以接受的在 30 min 内设备开关状态变化次数。频次阈值越高,说明设备的控制频次限制越小,聚合功率曲线匹配任务曲线的难度越小;反之控制频次限制越大,匹配任务曲线难度越大。若设备在 30 min 内的控制频次已经高于频次阈值,则保持设备的开关状态不变。可以看出,当频次阈值为 28 次时,匹配效果最优;当频次阈值为 26 次时,匹配效果有一定程度的下降,但与 28 次时相差不大;当频次阈值为 24 次时,匹配效果大幅下降。

图 13 为不同频次阈值情况下处于过调控状态的设备数目。其中“过调控”负荷是指在 30 min 内负荷开关状态变化次数大于 23 次的负荷。由图 13 可知,在 70 min 左右,过调控负荷数明显增多,原因是在 70 min 时,任务功率增多,开启群内负荷数增多,导致过调控负荷数增多;而在 200 min 左右,过调控负荷数减少,原因是在 200 min 时,任务功率较为平缓,开启群与关闭群内负荷数较为稳定,没有较



--- 频次限制 28 次, --- 频次限制 26 次, — 频次限制 24 次

图 13 处于过调控状态的设备数目

Fig.13 Number of over-regulated devices

大的数目浮动,因此过调控负荷数目减少。同时由于本文所采用的控制策略为温度设定值控制,温度设定值控制对温度有聚集作用,所控温度基本上集中于温度设定值附近。因此只要设定值不超过上下限,由室温超过上下限引起的热泵状态变化就可以忽略不计,热泵状态变化只与设定值变化有关。

综上所述,频次阈值越高,说明负荷调控的次数限制越小。负荷调控次数限制越小,处于过调节状态的负荷数越多,用户体验感越差。当频次阈值为24次时,处于过调节状态的负荷数最少同时功率匹配效果最差;当频次阈值为26次时,处于过调节状态负荷数与匹配效果适中;当频次阈值为28次时,匹配效果最好,同时处于过调节状态负荷数也最多。换言之,降低负荷的平均调控次数是以“牺牲”负荷群的功率匹配效果为代价的。对比图12以及图13可以看出,当频次阈值刚开始降低时,功率匹配效果并没有明显的变差,但“过调控”负荷数已经有了明显的减少。这说明只要设定的频次阈值不过小,采用计及用户舒适性与公平性的负荷调控策略是在完成任务曲线匹配的基础上,有效地降低单一负荷控制频次,减少处于过调控状态的负荷数目,提高负荷控制的公平性。

5 结论

本文针对电热泵负荷在进行需求响应中室温变化会影响用户舒适感的同时频繁的负荷调控会影响用户公平性的现象,提出了一种计及用户舒适性与公平性的负荷控制策略。该策略利用粒子群优化算法计算最优任务分配以减少负荷平均舒适度与最佳舒适度的偏差值,通过限制设备的调控频次防止设备调控频次过高。仿真结果显示,该策略能够有效地减少负荷平均舒适度与最佳舒适度的偏差值并减少单一负荷的调控频次,提高负荷参与新能源消纳过程中用户的舒适性与公平性。

在本文所提新能源消纳中,为体现任务分配方法的有效性,简化了负荷聚合商向风电场购电的环节。在现行模式下,购电行为还是比较直接的签约关系,而随着市场机制的完善和发展,多个负荷聚合商与新能源电厂之间呈现博弈关系,因而采用更有效的购电方式也是新能源消纳需要考虑的问题。同时由于控制过程中包含信息的传输,其实时性受到误码率以及通信带宽等影响,但控制策略本身对控制过程的实时性影响不大。针对控制策略实时性的研究,可以作为下一步需开展的工作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张志刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):1-8.
- [2] 舒印彪,张文亮,周孝信,等. 特高压同步电网安全性评估[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):1-6.
- SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(34):1-6.
- [3] 宋福龙,吴洲洋,张艳,等. 大规模风电下基于模糊场景聚类的网-储协调规划方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):74-80.
- SONG Fulong, WU Zhouyang, ZHANG Yan, et al. Fuzzy scene clustering based grid-energy storage coordinated planning method with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):74-80.
- [4] 崔雪,邹晨露,王恒,等. 考虑风电消纳的电热联合系统源荷协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):75-81.
- CUI Xue, ZOU Chenlu, WANG Heng, et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):75-81.
- [5] 李明,胡殿刚,周有学,等. 基于“两个替代”战略的甘肃新能源就地消纳模式研究与实践[J]. 电网技术,2016,40(10):2991-2997.
- LI Ming, HU Diangang, ZHOU Youxue, et al. Research and practice of renewable energy local consumption mode in Gansu province based on “double alternative” strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2991-2997.
- [6] 高赐威,吴天婴,何叶,等. 考虑风电接入的电源电网协调规划[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):30-35.
- GAO Ciwei, WU Tianying, HE Ye, et al. Consideration of wind power access to the power grid coordination planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22):30-35.
- [7] 廖正海,李利娟,刘红良,等. 电网友好型多用电设备协调控制模型与策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):207-213.
- LIAO Zhenghai, LI Lijuan, LIU Hongliang, et al. Coordinated control model and strategy for grid friendly multi-household applications[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):207-213.
- [8] 孙毅,许鹏,单葆国,等. 售电侧改革背景下“互联网+”电能替代发展路线[J]. 电网技术,2016,40(12):3648-3654.
- SUN Yi, XU Peng, SHAN Baoguo, et al. Road map for “internet plus” energy substitution in electricity retail market reform in China[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3648-3654.
- [9] 范孟华,王丹,张家安,等. 电热泵负荷等值热力学建模及控制策略评估[J]. 电力系统自动化学报,2016,28(4):31-37.
- FAN Menghua, WANG Dan, ZHANG Jiaan, et al. Equivalent thermodynamic modeling and control strategy evaluation of electric heat pump load[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(4):31-37.
- [10] 李亚平,姚建国,雍太有,等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(19):5519-5530.
- LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19):5519-5530.
- [11] 孙毅,周晋宇,李彬,等. 基于启动时间延迟的家庭负荷管理优化策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):83-89.
- SUN Yi, ZHOU Jinyu, LI Bin, et al. Optimization strategy based on start-time delay for domestic load management[J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2017, 37(2): 83-89.
- [12] 戚野白, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于需求响应的集群温控负荷建模及参与低频减载策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 751-759.
QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on under frequency load shedding strategy using aggregated thermostatically controlled loads based on demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 751-759.
- [13] 戚野白, 王丹, 贾宏杰. 基于归一化温度延伸裕度控制策略的温控设备需求响应方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5455-5464.
QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on demand response for thermostatically controlled appliances based on normalized temperature extension margin control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5455-5464.
- [14] 施金晓, 邵能灵, 李珂, 等. 计及需求侧管理的热泵-储能型微电网能量优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 146-151.
SHI Jinxiao, TAI Nengling, LI Ke, et al. Energy optimization strategy considering demand-side management for microgrid with heat pump and hybrid energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 146-151.
- [15] ASHRAF R, UMESH V, VENKATARAMANA A. Sequential set-point control for heterogeneous thermostatically controlled loads through an extended Markov chain abstraction[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 116-127.
- [16] HU Jianqiang, CAO Jinde, MICHAL Z Q C. Load following of multiple heterogeneous TCL aggregators by centralized control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3157-3167.
- [17] 张伟. 基于人体舒适度指数的配电网短期负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 74-79.
ZHANG Wei. A distribution short-term load forecasting based on human comfort index[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 74-79.
- [18] HU Jianqiang, CAO Jinde, YONG Taiyou. Demand respond load following of source and load systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(5): 1586-1598.
- [19] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [20] AMINIFAR F, ROTUHI-FIRUZABAD M, SHAHIDEHPUR M, et al. Impact of WAMS malfunction on power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 3(7): 891-898.

作者简介:



孙毅

孙毅(1972—),男,北京人,教授,博士,主要研究方向为电力系统通信与信息处理、智能用电与需求响应等;

陈一童(1995—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统信息通信技术等(E-mail: 18811315822@163.com);

李彬(1983—),男,北京人,副教授,博士,主要研究方向为电气信息技术以及自动需求响应相关技术;

石坤(1984—),男,北京人,工程师,硕士,主要研究方向为能效与智能用电技术;

薛溟枫(1976—),男,江苏南京人,工程师,硕士,主要研究方向为电力需求侧管理、有序用电管理、负荷预测等。

Heat pump load aggregated control strategy considering comfort and fairness of customers

SUN Yi¹, CHEN Yitong¹, LI Bin¹, SHI Kun², XUE Mingfeng³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Wuxi Electric Power Supply Company, Wuxi 214031, China)

Abstract: As a typical type of flexible load on the demand side, the thermostatically controlled load has the characteristics of large-scale application and strong adjustability, which can contribute to the accommodation of renewable energy sources through centralized control. Taking the typical thermostatically controlled load, electric heat pump, as the control object, and a load regulation strategy that takes account of customers' comfort and fairness is proposed. The strategy considers the impacts of temperature changing about thermostatically controlled load on customers' comfort, while minimizing the deviation between average comfort and optimal comfort. The mathematical model is established and adaptive particle swarm optimization algorithm is employed to obtain an optimal task allocation. The strategy also considers the fairness of the heat pump's participation in the response, and introduces the control frequency constraint in the load cluster control link to modify the control strategy, so as to solve the problem of high control frequency of single heat pump. Simulative results verify that the proposed control strategy can effectively reduce the deviation between the optimal comfort degree and the average comfort degree. At the same time, the issue of excessive load regulation frequency is avoided, which improves the customers' experience of the temperature control load participating in the regulation process.

Key words: thermostatically controlled load; accommodation of renewable energy sources; comfort; fairness; aggregated control strategy

附 录

表 A1 仿真参数

Table A1 Simulation parameters

对象		参数
物理参数	R 均值	1.2808 °C/W
	C 均值	3599.3 J / °C
	Q 均值	400 W
设备数目		200/200/200/200
初始温度		16.5 °C
舒适温度		20 °C
温度范围		[15,23] °C
相对湿度		65%RH
仿真步长		1min
仿真时间		6h
热泵额定功率		6kw
控制频次测量时间		30min
过调控标准		23 次