

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.006

基于动态下垂控制的温控负荷一次调频控制策略

刘辉, 吴晓鸣, 苏懿

(广西大学电气工程学院, 广西南宁 530004)

摘要:利用温控负荷(thermostatically controlled load, TCL)作为调频资源参与电网调频是应对高比例可再生能源发电并网导致电力系统维持频率稳定能力下降的有效手段。文中提出一种基于动态下垂控制的 TCL 一次调频控制策略,考虑聚合商 TCL 平均温度状态(state of temperature, SOT)、调频容量和系统频率变化率,构建动态下垂控制模型,实时调整下垂控制系数,改变 TCL 聚合商调频参与度。当向上调频时,锁定关状态 TCL;当向下调频时,锁定开状态 TCL,确保频率快速恢复至额定值附近。同时,为确保用户的舒适度,利用 TCL 的 SOT 优先级排序列表派遣法,确定 TCL 参与调频顺序。在 Matlab/Simulink 平台上进行仿真分析,仿真结果验证了文中所提策略在确保用户舒适度、改善频率质量等方面的有效性。

关键词:需求响应;温控负荷(TCL);下垂控制;频率变化率;一次调频;温度状态

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)02-0048-10

0 引言

我国可再生能源到 2050 年预计将在能源消耗中超过 60%, 占总发电量 85% 以上^[1]。然而, 高比例可再生能源不能像传统机组一样提供转动惯量^[2], 导致系统维持频率稳定的能力下降^[3]。同时, 可再生能源的间歇性与波动性也对调频备用容量提出了更高要求^[4]。在这种情况下, 由传统发电机完成的频率调节^[5], 难以满足可再生能源发电增加对系统的调节需求^[6], 因而发电侧主导的调频模式正逐步转向需求侧和发电侧共同参与的调频模式^[7], 需求侧响应相应成为维持系统频率稳定的一种新途径。

同时, 双向通信技术和高级量测体系技术的迅猛发展^[8], 为实现直接控制用户端设备参与需求响应提供技术支撑^[9]。因而, 具有良好的热储能特性的空调、热水器、热泵等温控负荷(thermostatically controlled load, TCL)作为典型的需求响应资源, 在调频领域备受关注^[10-12]。例如, 负荷聚合商整合分散负荷资源, 依托智能电网设备, 集中控制 TCL 参与电网频率调节, 通过需求侧响应技术为市场提供辅助服务^[13]。

在 TCL 参与频率调节的控制策略方面, 目前国内已有较多文献进行了深入研究。文献[14]以电冰箱作为控制对象, 提出一种变参与度的需求侧分散调频策略。文献[15]通过调整集群负荷目标温度, 为系统提供调频备用, 同时降低对用户舒适

度的影响。文献[16]提出一种基于集体智慧的集成学习算法, 通过负荷聚合商聚合大规模家庭用户, 解决源-荷协同频率控制下的“维数灾难”问题。文献[17]提出空调双层控制的调频策略, 根据时间优先级列表, 控制空调在调频的同时保证用户舒适度。文献[14-17]均未涉及聚合商间协调问题。文献[18]提出通过虚拟自动发电控制机组对 TCL 聚合商进行分组轮流控制, 实现频率调节。文献[19]将暖通空调聚合商作为虚拟发电机, 通过温度优先级列表法, 触发频率控制空调, 实现调频, 同时确保舒适度, 但虚拟下垂系数仅考虑调频容量。文献[20]实现聚合商内部调频任务在暖通空调间的优化分配, 同时公平确保用户舒适度, 但聚合商间调频任务仅根据调频容量比例分配, 未考虑暖通空调的舒适度。文献[21]按调频容量比例分配, 协调控制多个 TCL 集群, 并通过温度动态调整 TCL 的触发频率, 实现自主响应调频。文献[18-21]主要考虑负荷模型与用户舒适度, 但较少从聚合商层面协调用户调频能力与舒适度。

针对目前 TCL 参与电网一次调频中较少同时考虑聚合商整体的温度、调频容量以及系统频率变化率, 文中提出一种基于动态下垂控制的 TCL 一次调频控制策略。以制热型 TCL 作为调控对象, 以聚合商 TCL 平均温度状态(state of temperature, SOT)作为衡量 TCL 聚合商整体舒适度的标准, 利用聚合商 TCL 平均 SOT、调频容量和系统频率变化率, 构建动态下垂系数, 并根据 TCL 的 SOT 优先级排序列表对 TCL 进行调控, 在实现 TCL 快速响应一次调频的同时, 确保 TCL 用户的舒适度。研究工作作为控制

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977041)

大规模 TCL 参与调频和减少发电机调频备用提供了新思路。

1 TCL 参与一次调频的模型及框架

1.1 TCL 数学模型

目前,常用等效热参数模型描述 TCL 热动力学原理,建立功率与室温的关系^[19,21]。

$$T(t+1) = T(t)e^{-\frac{\Delta t}{CR}} +$$

$$(1 - e^{-\frac{\Delta t}{CR}})(T_{out}(t) + m(t)R\eta P) \quad (1)$$

式中: t 为时间; Δt 为时间步长; T 为 TCL 的室内温度; T_{out} 为室外温度; C 为建筑等效热容; R 为建筑墙体等效热阻; m 为 TCL 的开关状态(取 1 代表开,取 0 代表关); η 为 TCL 的效率; P 为 TCL 的额定功率。

TCL 的开关状态与其设定温度和室内温度相关,以制热型 TCL 为例,其开关状态 m 的变化可用式(2)和式(3)描述。

$$m(t+1) = \begin{cases} 0 & T(t+1) > T_{max} \\ 1 & T(t+1) < T_{min} \\ m(t) & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{max} = T_{set} + \delta/2 \\ T_{min} = T_{set} - \delta/2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_{max} 、 T_{min} 分别为 TCL 允许温度的上限和下限; T_{set} 为 TCL 设定温度; δ 为允许的温度死区。

1.2 TCL 聚合商虚拟发电机下垂控制

传统的一次调频是发电机通过下垂控制实现,因而 TCL 聚合商也可虚拟发电机的一次调频,即将 TCL 聚合商作为虚拟发电机,通过模拟发电机下垂控制参与一次调频,如图 1 所示。具体而言,聚合商根据电网频率偏差与虚拟下垂系数得到需求响应需要调频的功率,然后将调频任务派发给 TCL,即当向上调频时,关停部分 TCL;当向下调频时,开启部分 TCL。 P_{DR} 为 TCL 聚合商需求响应调频任务; P'_{DR} 为限幅后的调频任务; K_{DR} 为虚拟下垂控制系数。

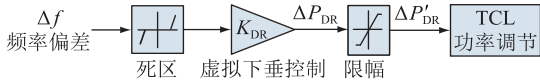


图 1 TCL 聚合商虚拟发电机下垂控制

Fig.1 Droop control of generator-based TCL aggregators

1.3 TCL 集中控制框架

通常需求响应主要有集中控制、分散控制、分层控制等 3 种控制方式^[22]。在此考虑 TCL 聚合商通过集中控制 TCL 参与一次调频,如图 2 所示。

由图 2 可知,首先在 TCL 聚合商层面,实时测量电网频率信息,包括系统频率 f 、频率偏差 Δf 和频率变化率 f' ;以及收集各集中器上传的 TCL 信息,

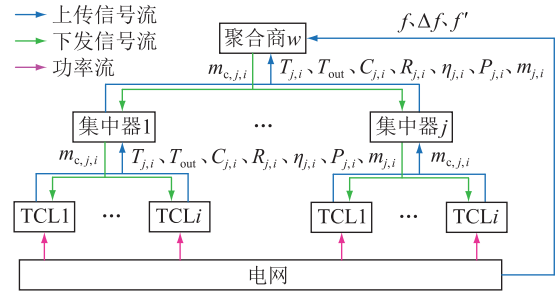


图 2 TCL 聚合商参与一次调频的集中控制框架

Fig.2 Centralized control of TCL aggregators for primary frequency regulation

包括室内温度 ($T_{j,i}$)、室外温度 (T_{out})、建筑等效热容 ($C_{j,i}$)、建筑墙体等效热阻 ($R_{j,i}$)、开关状态 ($m_{j,i}$)、TCL 的效率 ($\eta_{j,i}$)、额定功率 ($P_{j,i}$) 等,下标 j 为集中器编号, i 为 TCL 编号。同时 TCL 聚合商计算调频容量,并向集中器派发控制指令 ($m_{c,j,i}$);其次在集中器层面,收集并上传各 TCL 信息,同时将 TCL 聚合商的控制指令发布给 TCL;最后,对于 TCL 而言,将自身信息传递给集中器,同时按照集中器的控制指令进行启停控制,参与频率调节。

2 基于动态下垂的 TCL 一次调频控制

2.1 动态下垂控制模型

通常 TCL 聚合商根据其自身的调频容量确定下垂控制系数^[19,21],但对内部 TCL 整体温度趋势与频率恶化速度缺乏协调。因此,结合聚合商 TCL 的平均 SOT、调频容量及系统频率变化率,构建动态下垂控制模型,参与电网一次调频。

2.1.1 聚合商 TCL 平均 SOT

不同 TCL 的设定温度与温度死区存在一定差异,因而为便于后续工作开展,对 TCL 温度进行归一化处理,单台 TCL 的 SOT 可通过式(4)计算。

$$S_{j,i} = \frac{T_{j,i} - T_{set,j,i}}{T_{max,j,i} - T_{set,j,i}} \quad (4)$$

式中: $S_{j,i}$ 为第 j 个集中器中第 i 台 TCL 的 SOT; $T_{max,j,i}$ 、 $T_{set,j,i}$ 分别为第 j 个集中器中第 i 台 TCL 温度的上限和设定温度。

在式(4)中,SOT 越接近 1 和 -1 分别表示室内温度趋于允许温度上限和允许温度下限,此时对用户而言舒适度最差;其大小越接近 0 则表示室内温度趋于设定温度,此时对用户而言舒适度最佳。

为衡量用户总体的 SOT,引入聚合商 TCL 平均 SOT,如式(5)所示。

$$S_{agg,ave} = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N S_{j,i}}{MN} \quad (5)$$

式中: $S_{agg,ave}$ 为聚合商内部 TCL 的平均 SOT; M 为集中器的总数; N 为对应集中器所管辖 TCL 台数。

在式(5)中,如果聚合商内 TCL 温度大于设定温度的数量越多,则 $S_{agg,ave}$ 大于 0 且更趋向于 1,反之则小于 0 且更趋向于 -1。

2.1.2 TCL 锁定时间计算

为避免 TCL 在温度上下界处频繁启停影响设备使用寿命^[23],设定 TCL 启停后锁定时间,这段时间里,TCL 将不会参与调频。

TCL 由式(6)可推导主动关停时间 $t_{off,j,i}$ 。

$$t_{off,j,i} = R_{j,i} C_{j,i} \ln \left(\frac{T_{max,j,i} - T_{out}}{T_{min,j,i} - T_{out}} \right) \quad (6)$$

TCL 由式(7)可推导主动开启时间 $t_{on,j,i}$ 。

$$t_{on,j,i} = R_{j,i} C_{j,i} \ln \left(\frac{T_{min,j,i} - \eta P_{j,i} R_{j,i} - T_{out}}{T_{max,j,i} - \eta P_{j,i} R_{j,i} - T_{out}} \right) \quad (7)$$

结合式(6)和式(7),TCL 主动切换周期 $t_{c,j,i}$ 如式(8)所示。

$$t_{c,j,i} = t_{off,j,i} + t_{on,j,i} \quad (8)$$

同时,对每台 TCL 锁定时间按切换周期进行差异化,使每台 TCL 能有序恢复参与调频,如式(9)所示。

$$t_{delay,j,i} = \alpha t_{c,j,i} \quad (9)$$

式中: $t_{delay,j,i}$ 为第 j 个集中器中第 i 台 TCL 的锁定时间; α 为锁定时间系数。

2.1.3 TCL 聚合商调频容量

当 TCL 处于开启状态时,若 SOT 处于 $(-1, 1)$ 范围,且不在锁定时间,其向上调频容量如式(10)所示。

$$C_{up,j,i} = \begin{cases} -P_{j,i} & m_{j,i} = 1; -1 < S_{j,i} < 1; t_{q,j,i} \geq t_{delay,j,i} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $C_{up,j,i}$ 为第 j 个集中器中第 i 台 TCL 向上调频容量; $t_{q,j,i}$ 为 TCL 每次调节后计时时间。

当 TCL 处于关停状态时,若 SOT 处于 $(-1, 1)$ 范围,且不在锁定时间,其向下调频容量如式(11)所示。

$$C_{down,j,i} = \begin{cases} P_{j,i} & m_{j,i} = 0; -1 < S_{j,i} < 1; t_{q,j,i} \geq t_{delay,j,i} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $C_{down,j,i}$ 为第 j 个集中器中第 i 台 TCL 向下调频容量。

根据式(10)和式(11),TCL 聚合商的调频容量如式(12)所示。

$$\begin{cases} C_{agg,up} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N C_{up,j,i} \\ C_{agg,down} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N C_{down,j,i} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $C_{agg,up}$ 、 $C_{agg,down}$ 分别为 TCL 聚合商向上调频容量和向下调频容量。

2.1.4 动态下垂控制

结合聚合商 TCL 平均 SOT、调频容量及系统频率变化率构建动态下垂控制模型,在 TCL 参与一次调频时动态调整下垂控制系数。同时,为了确保快速恢复频率稳定,当向上调频时锁定关状态 TCL,当向下调频时锁定开状态 TCL,因此在频率恢复阶段设定下垂系数为 0。因此,向上调频时的动态下垂控制系数为:

$$\begin{cases} K_{up} = k_{up,1} k_{up,2} k_{up,3} & \Delta f < 0; f' < 0 \\ K_{up} = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

向下调频时的动态下垂控制系数为:

$$\begin{cases} K_{down} = k_{down,1} k_{down,2} k_{down,3} & \Delta f > 0; f' > 0 \\ K_{down} = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

在式(13)和式(14)中, $k_{up,1}$ 和 $k_{down,1}$ 的计算如式(15)所示。

$$\begin{cases} k_{up,1} = e^{-10f'} \\ k_{down,1} = e^{10f'} \end{cases} \quad (15)$$

在系统出现扰动时,频率偏移初始阶段的频率偏差较小但频率变化率较大,因而在频率偏差初始阶段考虑通过频率变化率调整动态下垂系数。因此,由图 3 可知,在下垂系数设定时,引入频率变化率,当 Δf 小于 0 且 f' 小于 0 时, $k_{up,1}$ 随着 f' 减小而增大,从而增加 TCL 聚合商内开状态 TCL 关停的参与度;当 Δf 大于 0 且 f' 大于 0 时, $k_{down,1}$ 随着 f' 增大而增大,从而增加 TCL 聚合商关状态 TCL 开启的参与度,及时减缓频率恶化程度。

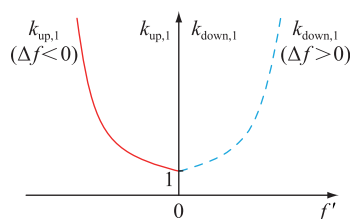


图 3 频率变化率 f' 与 $k_{up,1}$ 、 $k_{down,1}$ 的关系

Fig.3 The relation of frequency change rate f' to $k_{up,1}$ and $k_{down,1}$

$k_{up,2}$ 和 $k_{down,2}$ 的计算如式(16)所示。

$$\begin{cases} k_{up,2} = 1 + S_{agg,ave} \\ k_{down,2} = 1 - S_{agg,ave} \end{cases} \quad (16)$$

通常,聚合商集中控制大规模 TCL 参与电网一次调频时,其中下垂系数往往根据自身的调频容量设定^[19,21],忽视了聚合商内部 TCL 舒适度。例如,当聚合商内 TCL 温度聚集在大于设定温度范围,由于频率偏差在 0 附近周期波动,若下垂控制系数仅根据聚合商调频容量设定,可能会造成聚合商内 TCL 温度长期在大于设定温度范围波动。因此,下垂控制系数应根据聚合商内部 TCL 平均 SOT 的大小进行动态调整,确保整体舒适度。由图 4 可知,当 TCL 聚合商参与向上调频时, $k_{up,2}$ 随着 $S_{agg,ave}$ 增大而增大,从而增加 TCL 聚合商开状态 TCL 关停的参与度;当向下调频时, $k_{down,2}$ 随着 $S_{agg,ave}$ 减小而增大,从而增加 TCL 聚合商关状态 TCL 开启的参与度。

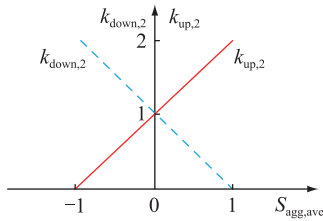


图 4 $S_{agg,ave}$ 与 $k_{up,2}$ 和 $k_{down,2}$ 的关系

Fig.4 The relation of $S_{agg,ave}$ to $k_{up,2}$ and $k_{down,2}$

$k_{up,3}$ 和 $k_{down,3}$ 的计算如式(17)所示。

$$\begin{cases} k_{up,3} = -C_{agg,up}/(\Delta f_{max} - \Delta f_{db}) \\ k_{down,3} = C_{agg,down}/(\Delta f_{max} - \Delta f_{db}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: Δf_{max} 为需求响应频率偏差最大值; Δf_{db} 为系统频率偏差死区。

根据调频容量大小,动态调整 TCL 聚合商调频参与度,即:调频容量大,则调频能力强,更多 TCL 可参与频率调节;反之,更少 TCL 参与。由图 5 可知,当 TCL 聚合商参与向上调频时, $k_{up,3}$ 随着 $-C_{agg,up}$ ($C_{agg,up} < 0$) 的增大而增大,从而增加 TCL 聚合商开状态 TCL 关停参与度;当向下调频时, $k_{down,3}$ 随着 $C_{agg,down}$ 的增大而增大,从而增加 TCL 聚合商关状态 TCL 开启参与度。

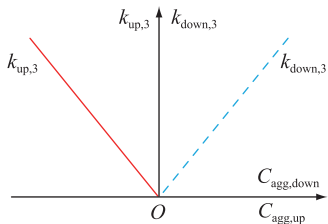


图 5 $C_{agg,up}$ 和 $C_{agg,down}$ 与 $k_{up,3}$ 和 $k_{down,3}$ 的关系

Fig.5 The relation of $C_{agg,up}$ and $C_{agg,down}$ to $k_{up,3}$ and $k_{down,3}$

TCL 聚合商可根据动态下垂控制系数与系统频率偏差,确定参与的调频任务,如式(18)所示。

$$\Delta P_{DR} = \begin{cases} C_{agg,up} & \Delta f \leq -\Delta f_{max} \\ K_{up}(\Delta f + \Delta f_{db}) & -\Delta f_{max} < \Delta f < -\Delta f_{db} \\ 0 & -\Delta f_{db} \leq \Delta f \leq \Delta f_{db} \\ K_{down}(\Delta f - \Delta f_{db}) & \Delta f_{db} < \Delta f < \Delta f_{max} \\ C_{agg,down} & \Delta f \geq \Delta f_{max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_{DR} 为 TCL 聚合商需求响应调频任务,其值大于 0,则开启 TCL,表示向下调频,其值小于 0,则关停 TCL,表示向上调频。

2.2 SOT 优先级排序列表派遣法

在聚合商 TCL 响应调频任务时,为合理控制 TCL,确保用户舒适度,文中提出 SOT 优先级排序列表派遣法。该方法的思路为:当向上调频时,TCL 聚合商按照 SOT 从大到小派遣调频任务;当向下调频时,按照 SOT 从小到大派遣调频任务。同时,考虑 TCL 开启和关闭 2 种状态,SOT 排序如式(19)所示。

$$\begin{cases} R_{on} = \{S_{on,1}, S_{on,2}, \dots, S_{on,x}, \dots, S_{on,n}\} \\ R_{off} = \{S_{off,1}, S_{off,2}, \dots, S_{off,y}, \dots, S_{off,z}\} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $S_{on,x}$ 为开状态列表 R_{on} 中第 x 个 TCL 的 SOT; $S_{off,y}$ 为关状态列表 R_{off} 中第 y 个 TCL 的 SOT; n 为开启状态下 TCL 可参与调频的台数; z 为关闭状态下 TCL 可参与调频的台数。

开关状态满足:

$$\begin{cases} S_{on,1} > S_{on,2} > \dots > S_{on,x} > \dots > S_{on,n} \\ S_{off,1} < S_{off,2} < \dots < S_{off,y} < \dots < S_{off,z} \end{cases} \quad (20)$$

聚合商根据排序结果,确定参与调频的 TCL,且满足式(21)。

$$\begin{cases} -\frac{P_{max}}{2} < \Delta P_{DR} - \sum_{x=1}^X (-P_x) < \frac{P_{max}}{2} & \Delta P_{DR} < 0 \\ -\frac{P_{max}}{2} < \Delta P_{DR} - \sum_{y=1}^Y P_y < \frac{P_{max}}{2} & \Delta P_{DR} > 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_{max} 为聚合商内单台 TCL 最大的功率; P_x 为聚合商分组排序后开状态的第 x 台 TCL 的功率; P_y 为聚合商分组排序后关状态的第 y 台 TCL 的功率; X 为一个向上调频周期中应关闭 TCL 的数量; Y 为一个向下调频周期中应开启 TCL 的数量。

通过 SOT 优先级排序列表派遣法,当向上调频时筛选出应关闭的 X 台 TCL,当向下调频时筛选出应开启的 Y 台 TCL,然后向筛选出来 TCL 对应的第 j 个集中器对应的第 i 台 TCL 发控制指令 $m_{c,j,i}$,指令为 1 是则开启 TCL,指令为 0 则关闭 TCL,进而实现频率调节。

3 仿真算例与分析

3.1 仿真系统设计

为验证文中所提控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 搭建如图 6 所示的两区域电力系统仿真模型^[24]。

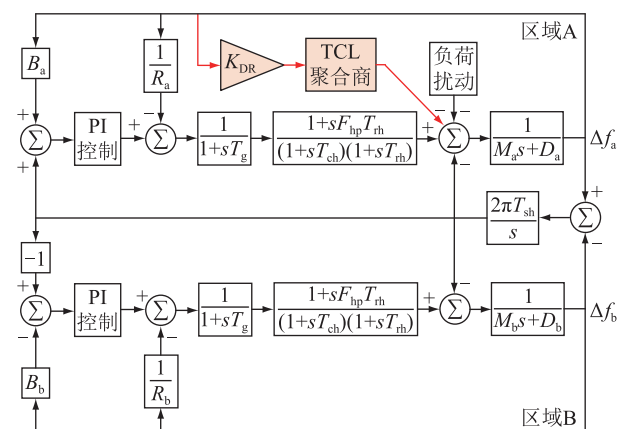


图 6 两区域电力系统模型

Fig.6 Two area power system model

该系统包含 1 000 个 TCL 聚合商和 250 000 台可控空调,且每个 TCL 聚合商管辖 250 台空调,相关参数分别见表 1 和表 2,其中 C 、 R 、 P 均服从正态分布。同时,考虑区域 A 的 TCL 聚合商,且仅区域 A 存在负荷扰动。

表 1 两区域系统模型仿真参数

Table 1 Simulation parameters of two-area power systems

仿真参数	区域 A	区域 B
最大负荷/MW	20 000	10 000
PI 控制器的比例增益	1	1
PI 控制器的积分增益	0.01	0.01
负荷频率控制时间周期/s	4	4
频率偏差系数 B/Hz^{-1}	0.150	0.075
机组惯性 M/s	0.32	0.16
负荷阻尼系数 D/Hz^{-1}	0.04	0.02
调速器的调差系数 R/Hz^{-1}	9.09	18.18
调速器的时间常数 T_g/s^{-1}	0.08	0.08
汽轮机时间常数 T_{ch}/s^{-1}	0.3	0.3
汽轮机再热器时间常数 T_{rh}/s^{-1}	10	10
汽轮机高压缸比例系数 F_{hp}	0.5	0.5
区域同步系数 T_{ab}/Hz^{-1}	0.04	0.04
一次调频死区/Hz	0.033	0.033
频率采样时间/s	0.1	0.1
通信延迟/s	1	1
区域控制误差死区/MW	20	20
爬坡速率/ $(\text{MW}\cdot\text{min}^{-1})$	400	200

为验证文中所提策略的有效性,考虑 3 种不同

表 2 需求响应仿真参数

Table 2 Simulation parameters of demand response

仿真参数	数值
建筑等效热容 $C/[(\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{°C}^{-1}]$	$N(2,0.2)$
建筑墙体等效热阻 $R/(\text{°C}\cdot\text{kW}^{-1})$	$N(2,0.2)$
室外温度 $T_{\text{out}}/\text{°C}$	5
设定温度 $T_{\text{set}}/\text{°C}$	19
允许的温度死区 $\delta_{\text{th}}/\text{°C}$	2
TCL 的额定功率 P/kW	$N(5.6,0.56)$
锁定时间系数 α	0.1
时间步长 $\Delta t/\text{s}$	1
频率偏差最大值 $\Delta f_{\text{max}}/\text{Hz}$	0.2
频率偏差死区 $\Delta f_{\text{db}}/\text{Hz}$	0.02

策略,如表 3 所示。

表 3 策略描述

Table 3 Strategy description

策略	策略描述
策略 1	仅考虑发电机参与一次调频
策略 2	TCL 参与频率调节,下垂控制系数由调频容量确定 ^[19]
策略 3	文中所提策略

3.2 仿真分析与对比

3.2.1 负荷阶跃扰动

在 $t = 60 \text{ s}$ 时,负荷(标么值)阶跃降低 0.025,如图 7 所示。

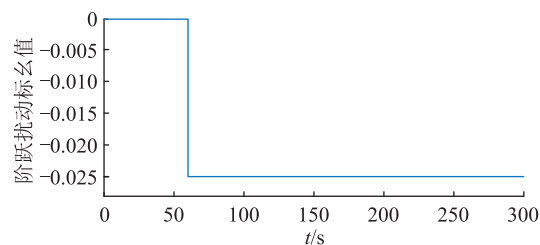


图 7 负荷阶跃扰动

Fig.7 Load step disturbance

引入频率偏差最大值、频率偏差稳态值、频率偏差峰值时刻等 3 个指标^[25],对比分析调频效果,如表 4 所示,与策略 1 和 2 相比,策略 3 有更好的调节性能。

表 4 负荷阶跃扰动下频率质量比较

Table 4 Comparisons on frequency quality under load step disturbance

参数	策略 1	策略 2	策略 3
频率偏差最大值/Hz	0.159 6	0.109 4	0.087 6
频率偏差稳态值/Hz	0.021 8	0.020 4	0.018 1
频率偏差峰值时刻/s	68.8	64.7	64.6

仿真后对应频率偏差如图 8 所示,与策略 1 和

策略 2 相比,在频率偏差初始阶段,策略 3 可更好地抑制频率偏移。因此,策略 3 可更有效地抑制负荷阶跃扰动导致的频率波动。

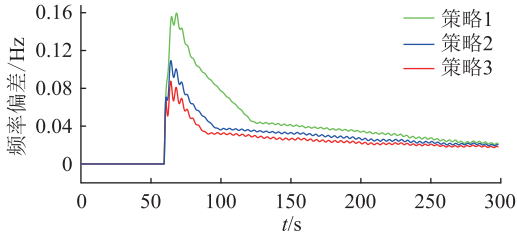


图 8 频率偏差

Fig.8 Frequency deviation

尽管多数研究都未考虑需求响应中时延造成的影响^[20,26],而实际上时延会导致温控负荷响应控制的不一致。文中参考文献[18]设计温控负荷自身定时器,聚合商内的 TCL 在预定延时后同时响应控制,确保响应控制协调一致。考虑聚合商内各温控负荷的时延分别在 0~0.1 s、0~0.3 s、0~0.5 s 范围随机取值,对应预定延时分别设为 0.1 s、0.3 s、0.5 s 等 3 种情况,频率质量如表 5 所示。由表 5 可知,随着时延范围增大,频率偏差稳态值和峰值时刻变化不大,频率偏差最大值变化较为明显。表明在负荷阶跃扰动下,时延对文中所提策略的调频效果有一定的不利影响。

表 5 负荷阶跃扰动下策略 3 不同延时频率质量比较

Table 5 Comparisons on frequency quality of different delay about strategy 3 under load step disturbance

参数	0 s	0~0.1 s	0~0.3 s	0~0.5 s
频率偏差最大值/Hz	0.087 6	0.089 7	0.093 2	0.096 4
频率偏差稳态值/Hz	0.018 1	0.017 9	0.017 7	0.017 6
频率偏差峰值时刻/s	64.6	64.7	64.7	64.7

3.2.2 负荷连续变化

利用快速小幅值、慢速大幅值白噪声序列^[27],模拟连续负荷扰动下的一次调频场景,正如图 9 和图 10 所示。

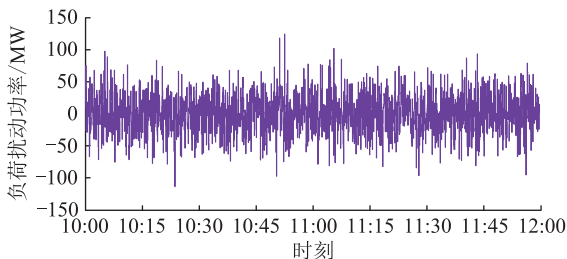


图 9 时间间隔为 4 s 的负荷波动

Fig.9 The load fluctuation at the time interval of 4 s

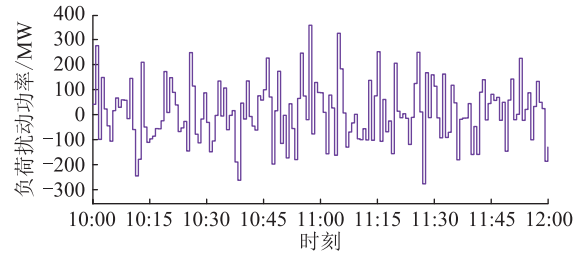


图 10 时间间隔为 45 s 的负荷波动

Fig.10 The load fluctuation at the time interval of 45 s

频率偏差如图 11 所示,由表 6 分析可知,与策略 1 和策略 2 相比,策略 3 的频率偏差均方差、频率偏差最大值和频率偏差最小值均最小,因此策略 3 具有更好的调节效果。

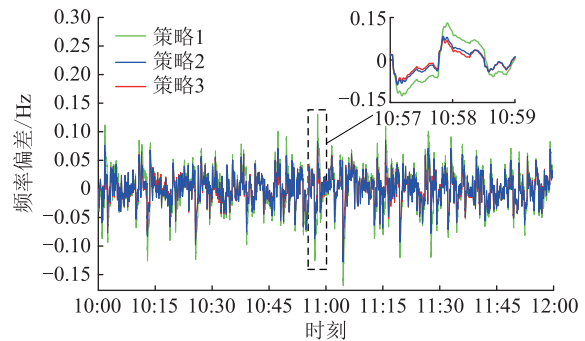


图 11 频率偏差

Fig.11 Frequency deviation

表 6 负荷连续扰动下频率质量对比

Table 6 Comparisons on frequency quality under continuous load disturbance Hz

参数	策略 1	策略 2	策略 3
频率偏差均方差	0.035 9	0.025 1	0.024 1
频率偏差最大值	0.131 3	0.086 3	0.077 4
频率偏差最小值	-0.170 5	-0.128 7	-0.116 5

此外,为了展示当存在时延时连续扰动下的调频效果,加入时延后进行仿真,频率质量如表 7 所示。

表 7 负荷连续扰动下策略 3 不同延时频率质量对比

Table 7 Comparisons on frequency quality of different delay about strategy 3 under continuous load disturbance Hz

参数	0 s	0~0.1 s	0~0.3 s	0~0.5 s
频率偏差均方差	0.024 1	0.024 2	0.024 3	0.024 4
频率偏差最大值	0.077 4	0.079 9	0.082 0	0.087 1
频率偏差最小值	-0.116 5	-0.119 0	-0.123 2	-0.127 5

由表 7 可知,随着时延范围的增大,频率偏差均方差变化不大,频率偏差最大值和最小值变化较为

明显。表明在连续负荷扰动下,时延对文中所提策略的调频效果有不利影响。

3.2.3 调频任务跟随

考虑负荷连续变化,任意选取 5 min 进行分析,如图 12 所示。

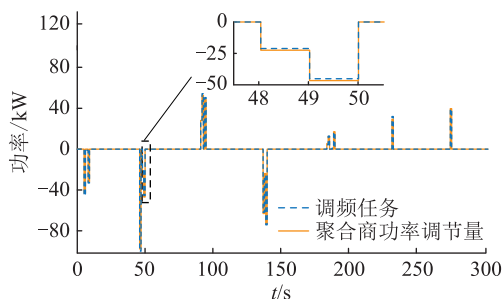


图 12 TCL 聚合商调频任务跟随

Fig.12 The aggregator frequency regulation task follows

由图 12 可知,TCL 聚合商能按照调频任务大小调整 TCL 功率,实现调频任务跟随。例如,在第 48 s 时,须减少 21.20 kW 功率,即须关停 21.20 kW 的 TCL,此时 TCL 开状态按照 SOT 从高到低排序,排序前 10 台 TCL 的切换情况如表 8 所示。

表 8 聚合商内 TCL 调控情况

Table 8 TCL regulation in an aggregator

TCL 标号	SOT	SOT 排序	动作情况	功率/kW
54	0.838	1	开→关	5.64
8	0.825	2	开→关	6.70
19	0.814	3	开→关	5.04
118	0.810	4	开→关	5.18
95	0.802	5	保持开状态	5.96
9	0.787	6	保持开状态	5.58
208	0.782	7	保持开状态	5.44
16	0.779	8	保持开状态	6.69
105	0.768	9	保持开状态	5.10
176	0.760	10	保持开状态	6.29

由表 8 可知,排序前 4 台 TCL(即 TCL54、8、19 和 118)完成了关停,功率分别为 5.64 kW、6.70 kW、5.04 kW 和 5.18 kW,共减少功率 22.56 kW,多减少了 1.36 kW 功率,且误差小于 1/2 倍 TCL 最大功率,满足要求;同时排序后 6 台 TCL(即 TCL95、9、208、16、105 和 176)继续保持原来开关状态。因此,TCL 按照计划完成了需求响应。

3.2.4 对用户舒适度的影响

简单起见,考虑 2 个 TCL 聚合商进行展示。由图 13 可见,与策略 1 和策略 2 相比,在策略 3 的作用下,聚合商 TCL 平均 SOT 波动更小,表明在策略 3 中用户整体舒适度趋势与最佳舒适度的偏差量更小,因而用户整体的舒适度更好。在策略 3 的作用

下,当聚合商 TCL 平均 SOT 较大时,向上调频会增加 TCL 聚合商的参与度,增加了 TCL 关停数量;同理,当聚合商 TCL 平均 SOT 较小时,向下调频会增加 TCL 开启数量,最终确保整体的舒适度趋向最佳。

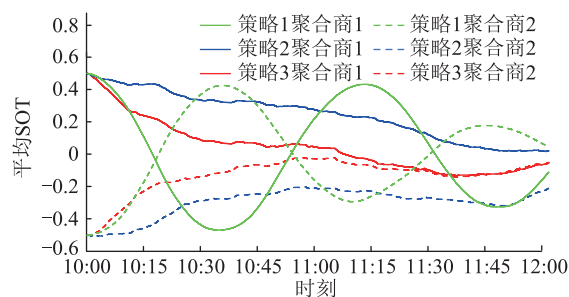


图 13 平均 SOT 变化

Fig.13 Average SOT change

以聚合商 1 和 2 为例,充分展示聚合商内每台 TCL 温度变化情况,如图 14、图 15 和图 16 所示,分别对应策略 1、策略 2 和策略 3。

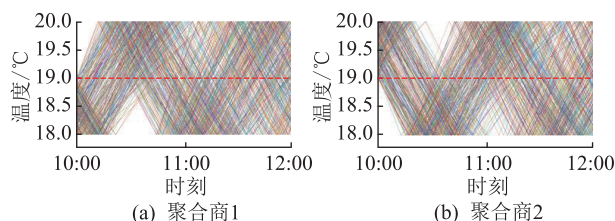


图 14 聚合商内 TCL 温度(策略 1)

Fig.14 TCL temperature in aggregators (strategy 1)

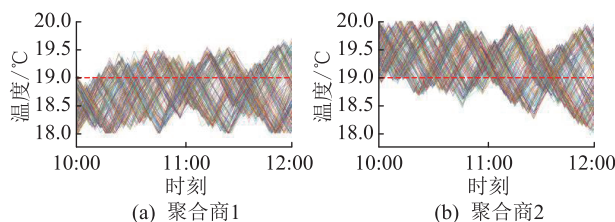


图 15 聚合商内 TCL 温度(策略 2)

Fig.15 TCL temperature in aggregators (strategy 2)

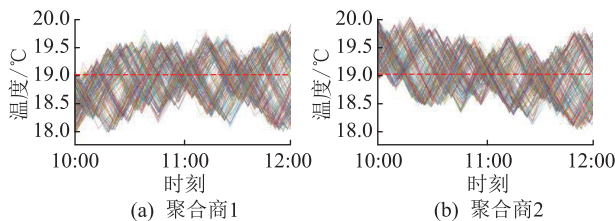


图 16 聚合商内 TCL 温度(策略 3)

Fig.16 TCL temperature in aggregators (strategy 3)

由图 14 和图 16 可知,与策略 1 相比,策略 3 能更好地维持 TCL 在设定温度 19 °C 附近;由图 15 和图 16 可知,与策略 2 相比,策略 3 能更快恢复到设定温度 19 °C 附近。为了展示策略 3 在确保聚合商内 TCL 舒适度的优越性,给出了聚合商 TCL 温度偏

差绝对值平均^[20],如表9所示。

表9 聚合商温度偏差对比

Table 9 Comparisons on temperature deviations of TCL aggregators °C

聚合商	温度偏差绝对值平均		
	策略1	策略2	策略3
聚合商1	0.497 6	0.370 6	0.303 3
聚合商2	0.497 0	0.368 4	0.306 0

由表9可知,与策略1和2相比,策略3具有最小的温度偏差绝对值平均值,因而更好地确保了用户的舒适度。

此外,为清晰展示聚合商内用户TCL的温度变化情况,任意选取一台TCL室内温度变化情况进行分析,如图17所示。

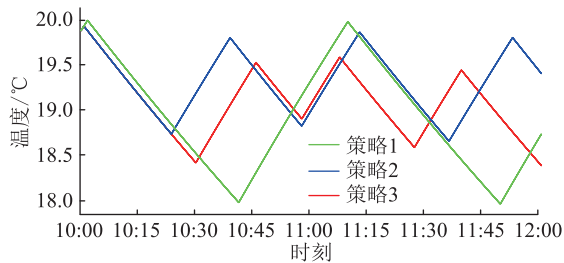


图17 单一TCL温度

Fig.17 Single TCL temperature

由图17可知,与策略1和2相比,策略3使TCL更接近设定温度19°C,这是因为策略3通过聚合商协调TCL整体温度,计算其参与频率调节功率,并根据温度排序选择TCL进行优化调度,可在TCL达到上、下限前,改变其开关状态,因而具有更好的舒适度。

4 结语

文中提出了一种基于动态下垂控制的TCL参与一次调频控制策略。该策略结合聚合商TCL平均SOT、调频容量及系统频率变化率,构建动态下垂控制模型,动态调整TCL下垂控制系数参与一次调频,同时兼顾TCL用户舒适度。仿真结果表明,该策略可通过TCL调控,快速抑制频率波动,同时能有效地使聚合商用户整体舒适度更佳,提高TCL参与一次调频过程中用户的舒适度。

由于通信时延、通道质量、设备同步一致性等因素对温控负荷参与电网频率调节有一定的负面作用,因而后续工作将进一步研究如何减小这些因素对调频的影响。

参考文献:

[1] 张鑫,李媛媛,吉平. 含高比例可再生能源的交直流混联电

网规划方法[J]. 全球能源互联网,2021,4(4):372-381.

ZHANG Xin, LI Yuanyuan, JI Ping. A planning approach for AC/DC hybrid power grid with high proportion of renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 372-381.

[2] DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 144-155.

[3] 胡泽春,罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(8):2-15. HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15.

[4] 杨金文,吴杰康,庄仲,等. 基于小区源-储-荷协同的微网多能协调控制策略[J]. 电力工程技术,2021,40(1):40-49. YANG Jinwen, WU Jiekang, ZHUANG Zhong, et al. Multi-energy coordinated control strategy based on source-storage-load micro network in community[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 40-49.

[5] REBOURS Y G, KIRSCHEN D S, TROTIGNON M, et al. A survey of frequency and voltage control ancillary services-part I: technical features[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 350-357.

[6] 姜婷玉,李亚平,鞠平,等. 柔性负荷控制及模型研究综述[J]. 智慧电力,2020,48(10):1-8.

JIANG Tingyu, LI Yaping, JU Ping, et al. Overview of modeling method for flexible load and its control[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 1-8.

[7] 李东东,刘洋,林顺富,等. 典型居民温控负荷建模及聚合特性研究[J]. 电测与仪表,2017,54(16):56-62.

LI Dongdong, LIU Yang, LIN Shunfu, et al. The study on the modeling and the aggregation characteristics of typical residential thermostatically-controlled load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 56-62.

[8] 李扬,王蓓蓓,李方兴. 灵活互动的智能用电展望与思考[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):2-9.

LI Yang, WANG Beibei, LI Fangxing. Outlook and thinking of flexible and interactive utilization of intelligent power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 2-9.

[9] 王东,曾沅,穆云飞,等. 基于温控负荷控制技术的新能源优化利用方法[J]. 电网技术,2015,39(12):3457-3462.

WANG Dong, ZENG Yuan, MU Yunfei, et al. An optimization method for new energy utilization using thermostatically controlled appliances[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3457-3462.

[10] 韩凝晖,周颖,石坤,等. 面向新型电力系统电量平衡的可调节负荷互动潜力分析[J]. 电力需求侧管理,2022,24(6):70-76.

HAN Ninghui, ZHOU Ying, SHI Kun, et al. Adjustable load interaction potential oriented to power balance of new power sys-

- tem[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 70-76.
- [11] 李华, 李献伟, 张鹏, 等. 考虑负荷频率特性的新能源场站一次调频控制方法[J]. 供用电, 2022, 39(1): 81-87.
LI Hua, LI Xianwei, ZHANG Peng, et al. Primary frequency modulation control regulation of new energy stations considering the load frequency characteristic[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 81-87.
- [12] 程松, 周鑫, 任景, 等. 面向多级市场出清的负荷聚合商联合交易策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 158-167.
CHENG Song, ZHOU Xin, REN Jing, et al. Bidding strategy for load aggregators in a multi-stage electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 158-167.
- [13] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [14] 贾宏杰, 戚艳, 穆云飞. 基于家居型温控负荷的孤立微电网频率控制方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(3): 247-256.
JIA Hongjie, QI Yan, MU Yunfei. Frequency control method of isolated microgrid based on household temperature control load[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2013, 43(3): 247-256.
- [15] 李娜, 王晓亮. 集群空调负荷提供微电网调频备用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 101-105.
LI Na, WANG Xiaoliang. Research of air conditioners providing frequency controlled reserve for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 101-105.
- [16] 王德志, 张孝顺, 刘前进, 等. 基于集成学习的孤岛微电网源-荷协同频率控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 46-52.
WANG Dezhi, ZHANG Xiaoshun, LIU Qianjin, et al. Ensemble learning for generation-consumption coordinated frequency control in an islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 46-52.
- [17] ZHOU L, LI Y, WANG B, et al. Provision of supplementary load frequency control via aggregation of air conditioning loads, Energies, 2015, 8(12), 14098-14117.
- [18] 姚垚, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
YAO Yao, ZHANG Peichao, WANG Yongquan. A two-layer control method for thermostatically controlled loads to provide fast frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
- [19] WU X Y, HE J H, XU Y, et al. Hierarchical control of residential HVAC units for primary frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3844-3856.
- [20] LIU H, XIE H M, LUO H, et al. Optimal strategy for participation of commercial HVAC systems in frequency regulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(23): 17100-17110.
- [21] ZHAO H R, WU Q W, HUANG S J, et al. Hierarchical control of thermostatically controlled loads for primary frequency support[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2986-2998.
- [22] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167.
- [23] 戚野白, 王丹, 贾宏杰, 等. 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.
- [24] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.
- [25] 王育飞, 杨铭诚, 薛花, 等. 计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 192-198, 219.
WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, et al. Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 192-198, 219.
- [26] 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.
- [27] LIU H, HU Z C, SONG Y H, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3480-3489.

作者简介:



刘辉

刘辉(1978),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定与控制,能源需求侧响应等(E-mail: hughlh@126.com);

吴晓鸣(1995),女,硕士在读,研究方向为电力需求侧响应;

苏懿(1994),女,博士在读,研究方向为电力系统稳定性分析与控制。

Thermostatically controlled loads control for primary frequency regulation based on dynamic droop control

LIU Hui, WU Xiaoming, SU Yi

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Using thermostatically controlled load (TCL) as a frequency regulation resource is an effective means of maintaining power grid frequency stability caused by the high proportion integration of renewable energy power generation into the power grid. A primary frequency control strategy is proposed for the participation of TCL in regulation based on dynamic droop control. The dynamic droop control model is constructed to control the participation of TCL aggregators in frequency regulation by adjusting the droop control coefficient in real time, while considering the average state of temperature of TCL, the capacity for frequency regulation and the rate of change of system frequency. In this condition, the off state of TCL is locked for regulation up, vice versa the on state is locked for regulation downward. Therefore, the frequency can quickly return near its rated value. At the same time, to ensure the user's comfort, the priority ranking list dispatch method on the state of temperature is used to determine the order of TCL for frequency regulation. Finally, simulations on the Matlab/Simulink platform show the effectiveness of the proposed strategy in improving frequency quality and the user's comfort.

Keywords: demand response; thermostatically controlled load (TCL); droop control; frequency change rate; primary frequency regulation; state of temperature

(编辑 李栋)

(上接第 47 页)

Optimal energy management of residential integrated energy system with consideration of integrated demand response

CHENG Shan^{1,2}, CHEN Nuo^{1,2}, XU Jianyu^{2,3}, WANG Can^{1,2}, ZHONG Shiling^{1,2}

(1. Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology

(China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. College of Electrical

Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. State Grid Zhumadian Power Supply Company of Henan Electric Power Co., Ltd., Zhumadian 463000, China)

Abstract: In response to the problem that the factors affecting room temperature and its influence on load modeling and the problems of user comfort and energy consumption expenditure when rigidly bundling residential integrated energy system (RIES) and users are not fully considered in the energy management of RIES, the RIES energy management optimization model and its solution method are proposed in the paper for the participation of cooling and heating loads in tiered subsidy and electric loads in the tariff-type integrated demand response. Firstly, the discrete building heat balance equation is obtained by comprehensively considering the factors affecting the room temperature, and the mathematical model of the flexible but not fixed cold, heat and electricity loads of the building is established. Secondly, a tiered subsidy for cold and heat load participation and a tariff-type integrated demand response mechanism for electric load participation should be established. Then, taking into account of RIES's cost of purchase energy from the outside, cost of affording integrated demand response (IDR), and profit of selling energy to the users, an optimization model for optimizing energy management is established that maximizes RIES's net profit with consideration a series of operation constraints of the components and the system. The Cplex is used to solve the linearized model. Finally, a simulation example shows that the residential integrated energy system optimization strategy that takes into account the comprehensive demand response can coordinate the resources on both sides of supply and demand, thus improving the economic benefits of the system and users.

Keywords: residential integrated energy system (RIES); user comfort; integrated demand response (IDR); flexible load; tiered subsidy; optimal energy management

(编辑 李栋)