

面向新能源消纳的热水器集群精细化均衡控制

刘向军¹,周行洁¹,刘迪¹,孙毅¹,谢祥颖²,卢毓东³

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206;2. 国网电子商务有限公司,北京 100053;
3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

摘要:针对新能源发电并网对电网可能造成的冲击,提出面向新能源消纳的热水器集群精细化均衡控制策略。相比于现有普遍研究的、对单台热水器只能实现开和关2种控制状态的控制方法,所提控制策略通过温度设置值和多级功率联合优化,并利用遗传算法,不仅考虑了单台热水器的开、关状态,更精确至单台热水器运行功率级的选择。所提方法在保障电网侧消纳任务完成情况的同时,综合考虑用户侧热水器的温度,实现了两者的双赢。仿真实验结果证明了所提控制策略可实现精准负荷调控,同时使热水器响应更加均衡。

关键词:新能源消纳;热水器集群;精细化控制;遗传算法;均衡响应

中图分类号:TM 761;TM 925.32

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202001003

0 引言

在全球新能源低碳发展的趋势下,积极开发利用清洁能源、以清洁能源替代化石能源、走低碳绿色发展道路成为能源变革的重要方向^[1]。与以火电为代表的常规电源相比,风能、太阳能等新能源发电的不同之处在于其有功出力具有随机性、间歇性、波动性^[2-3]。这些特点造成了新能源大规模并网后会对电网造成一定的冲击。为了实现电网的功率平衡和电压稳定,通常对新能源并网进行了诸多限制,甚至有些地方出现了大量弃风、弃光等能源严重浪费的情况^[4-5]。从能源利用率方面而言,新能源按最大容量发电最为经济,但完全依靠电池等储能设备进行电能调节在经济上成本较高^[6-7]。此时亟需负荷端能够对应消纳新能源,从而提高新能源的利用率。

2019年浙江省在迎峰度夏期间,全省安排削峰需求响应总负荷3000 MW,形成年度最大用电负荷3.8%的需求侧机动调峰能力。同时,探索开展了节假日填谷需求响应试点。在工业企业单一主体的基础上,将参与主体扩展至智能控制系统的智能家居用户,显著拓展了响应资源。在削峰需求响应的基础上,同时将应用场景拓展至节假日填谷需求响应,助力新能源消纳。为了鼓励用户积极参与,补贴力度也大幅提高,参与需求响应的用户可获得相应补贴:削峰实时需求响应补贴单价为4.0元/(kW·h),填谷需求响应补贴单价为1.2元/(kW·h)。

近年来,智能家居在居民用户家中不断普及,同时智能家居在电网调度中的潜力被逐渐开发,成为优质的调度资源^[8]。在将智能家居参与电网调度的

研究中,常选取温控负荷作为主要的研究对象,一方面是因为其可变的参与程度和储能特性;另一方面,以热水器、空调为代表的温控负荷构成了家庭的主要电力负荷,便于实际应用。相比于空调,居民电热水器的电力消耗约占居民负荷的20%,其水箱可以被视为是热能的储存设备。除此之外,居民电热水器可以作为可中断负荷参与电网的互动,通过改变特定热水器的运行状态,可以减少或增加其总体负荷。同时,主流品牌的新一代热水器可通过wifi和手机APP进行控制,例如海尔的新一代热水器可以智能感应当前时刻的电价,用户可设置热水器在电价低谷时段开启加热以节约费用。故热水器成为智能家居参与分布式新能源消纳的最佳选择。

在当前对热水器集群的控制策略研究中,文献[9]建立了热水器集群的优先队列,按照优先级顺序对热水器进行控制,直到满足要求为止。文献[10]通过对控制系统进行预约,综合考虑用水时间和温度的差值,对符合条件的热水器进行控制。在当前对单台热水器的控制方法研究中,文献[11-12]采用电压控制方法,文献[13]采用开关控制方法,文献[14-15]采用温度设置值方法。总结上述文献,主要存在以下不足:热水器在实际运行中存在多级功率,以上控制方法只考虑热水器存在单一功率级,未考虑到热水器多级功率的情况,对于单台热水器的调控过于粗糙,低估了单台热水器参与调控的潜力,影响了控制方法的应用范围。且现阶段热水器大多存在多级功率,如海尔EC6002-MC5型、海尔LEC5002-20Y2型等,只考虑单功率级热水器与实际情况存在较大的误差。

为了弥补当前研究的不足,本文提出针对多功率级热水器的精细化均衡调控策略,具体包含:根据热水器当前的温度情况和需要完成的消纳量,将调控精确至单台热水器功率级的选择,通过响应热水

收稿日期:2019-08-13;修回日期:2019-11-05

基金项目:国家电网公司科技项目(52110418001C)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(52110418001C)

器功率级的灵活组合,延长热水器温度到达温度上限的时间,从而增加调控可响应时间,使得调控更加均衡。

1 热水器数学模型

温度模型为^[15]:

$$\begin{cases} T(i+1) = \frac{T(i)(V_{\text{tank}} - f_r(i)\Delta t)}{V_{\text{tank}}} + \frac{T_{\text{inlet}}f_r(i)\Delta t}{V_{\text{tank}}} + \\ \left[845P_{\text{EWH}}(i)\eta_{\text{EWH}}S_{\text{EWH}}(i) - \frac{A_{\text{tank}}(T(i) - T_a(i))}{R_{\text{tank}}} \right] \frac{\Delta t}{60} \frac{1}{V_{\text{tank}}} \frac{1}{1.01} \\ T(i) \leq T_{\text{set}}(i) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $T(i+1)$ 、 $T(i)$ 分别为热水器在 $i+1$ 时刻、 i 时刻(当前时刻)水箱内热水的温度; T_{inlet} 为流入水箱的冷水温度; $T_a(i)$ 为 i 时刻的外界环境温度; $T_{\text{set}}(i)$ 为 i 时刻热水器的设置温度,在实际运行中,热水器当前时刻水箱内热水的温度不能超过当前热水器的设置温度; $f_r(i)$ 为 i 时刻热水流出水箱的速率; Δt 为控制的时间间隔,本文取 1 min; $P_{\text{EWH}}(i)$ 为单台热水器在 i 时刻的运行功率; η_{EWH} 为热水器的运行效率; $S_{\text{EWH}}(i)$ 为热水器在 i 时刻的开关状态,关闭时取值为 0,打开时取值为 1; A_{tank} 为热水器水箱表面积; R_{tank} 为热水器的热阻; V_{tank} 为热水器水箱体积。

用户在实际用水过程中消耗的热速率是指消耗混合热水(由水箱内的热水和流入水箱内的冷水混合)的速率。而式(1)中的 $f_r(i)$ 为水箱内热水流出的速率,故进行如下转换:

$$f_r(i) = v_{\text{usage}} \frac{T_{\text{mixed}} - T_{\text{inlet}}}{T(i) - T_{\text{inlet}}} \quad (2)$$

其中, v_{usage} 为水箱内热水流出的速率; T_{mixed} 为混合热水的温度。

热水器在 i 时刻的开关状态可表示为:

$$S_{\text{EWH}}(i) = \begin{cases} 0 & T(i) > T_{\text{set}}(i) \\ 1 & T(i) < T_{\text{set}}(i) - \delta \\ S_{\text{EWH}}(i-1) & T_{\text{set}}(i) - \delta \leq T(i) \leq T_{\text{set}}(i) \end{cases} \quad (3)$$

其中, δ 为热水器的保温区间; $S_{\text{EWH}}(i-1)$ 为 $i-1$ 时刻热水器的开关状态。

温度设置值控制模型为:

$$T_{\text{set}}(i) = \begin{cases} \lceil T(i) \rceil + \delta & S_{\text{EWH}}(i-1) = 0, S_{\text{EWH}}(i) = 1 \\ \lfloor T(i) \rfloor & S_{\text{EWH}}(i-1) = 1, S_{\text{EWH}}(i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)表示:若当前要将热水器从关闭状态变为打开状态,则需要提升当前热水器的温度设置值,新的温度值最低为 $\lceil T(i) \rceil + \delta$ (表示向上取整);若当前要将热水器从打开状态变为关闭状态,则需要降

低当前热水器的温度设置值,最高为 $\lfloor T(i) \rfloor$ (表示向下取整)。

2 精细化均衡控制的实施

2.1 多级热水器控制概述

对于单台多级功率热水器而言,可以从改变开关状态和改变运行功率级两方面来改变其运行功率。由改变温度设置值引起的热水器开关变化已在文献[15]中有具体的论述,本文不再赘述。对于多级功率热水器的运行特性,增加或减少功率时可以通过提高或降低运行功率级实现。相比于单功率热水器只有开和关 2 种状态,基于多级功率热水器的控制特性,可以通过将总体调控目标拆解为响应热水器功率级的组合方式,使调控精确至单台热水器功率级,同时通过功率级的优化组合,增加调控的均衡性。

例如,若当前有 3 台处于关闭保温状态的多功率级热水器,其中 P_1 — P_3 档的功率分别为 1、2、3 kW。有 2 台初始温度为 72.5 °C 的热水器(EWH_1 , EWH_2), 1 台初始温度为 70 °C 的热水器(EWH_3), 当前收到提高总功率 4 kW、持续时间为 5 min 的消纳任务。若只考虑单功率情况^[15], 初始选择单功率 EWH_1 、 EWH_3 (3 kW) 打开加热。在 2 min 时, EWH_1 会因到达温度上限(75 °C)而关闭,需要打开热水器 EWH_2 (3 kW) 进行加热,在第 4 min 后由于 EWH_2 、 EWH_3 均达到温度上限而关闭,从而不能完成消纳目标。引入多功率级调节,使 EWH_1 、 EWH_2 处于 P_1 档(1 kW)加热,而 EWH_3 处于 P_2 档(2 kW)加热,这样可以完成既定的消纳任务,同时中途不需要进行其他操作。

图 1 为 EWH_1 在 2 种加热档位下进行 5 min 消纳任务时的温度变化情况,图 2 为参与调控的热水器在 2 种控制方法下的响应情况。

从图中可以看出,引入热水器多功率级调节,可以灵活选择响应热水器的不同功率级参与消纳任务,延长可响应时长。且该算例在调控初始时就将所有热水器投入调控,增加了调控的均衡性,中途无需其他操作。

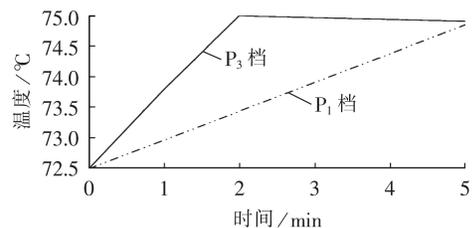
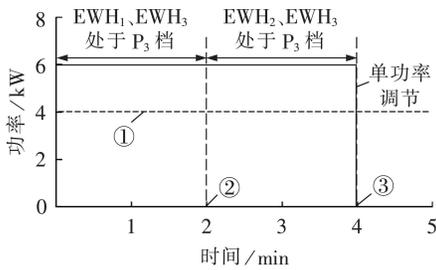


图 1 EWH_1 在 2 种档位下的运行温度曲线

Fig.1 Operation temperature curves of EWH_1 under two gears



- ① 多功率调节(EWH₁、EWH₂处于P₁档,EWH₃处于P₂档)
 ② EWH₁到达温度上限关闭,EWH₂打开
 ③ EWH₂、EWH₃均到达温度上限而关闭

图2 2种控制方法的响应结果

Fig.2 Response results of two control methods

2.2 热水器集群分组

基于变功率级热水器集群,综合当前热水器的开关状态、温度和用水情况,可将集群内热水器 k 分为用水群 A 、开启加热群 B 、保温关闭群 C 、不可控群 U 这4类,如式(5)所示。

$$k \in \begin{cases} A & S_{\text{EWH},k}(i)=1, H_{\text{hot_rate},k}(i) \neq 0 \\ B & S_{\text{EWH},k}(i)=1, H_{\text{hot_rate},k}(i)=0, T_{\text{EWH},k}(i)+\delta \leq T_{\text{max}} \\ C & S_{\text{EWH},k}(i)=0, H_{\text{hot_rate},k}(i)=0, T_{\text{EWH},k}(i) \geq T_{\text{min}} \\ U & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $H_{\text{hot_rate},k}(i)$ 为热水器 k 的用水情况, $H_{\text{hot_rate},k}(i)=0$ 表示热水器在当前 i 时刻不用水, $H_{\text{hot_rate},k}(i) \neq 0$ 表示热水器当前 i 时刻用水; $S_{\text{EWH},k}(i)$ 为当前热水器 k 的开关状态; $T_{\text{EWH},k}(i)$ 为当前热水器 k 水箱内热水的温度; T_{max} 、 T_{min} 分别为热水器厂商设置的温度上、下限。

2.3 控制目标量的确定

消纳任务中规定的目标调控量是以聚合负荷的基线负荷为基准制定的^[15]。故在本文所提控制方案下,当前时刻热水器集群的目标总功率为:

$$P_{\text{total}}(i) = P_{\text{baseline}}(i) + P_{\text{target}}(i) \quad (6)$$

其中, $P_{\text{total}}(i)$ 为当前 i 时刻热水器集群的目标总功率; $P_{\text{baseline}}(i)$ 为当前 i 时刻热水器集群的基线功率; $P_{\text{target}}(i)$ 为当前 i 时刻的目标消纳量。

为了保障用水舒适度,本文所提策略优先将用水群 A 内的热水器调至 P_3 档运行,可得到此时剩余需要变化的功率为:

$$\Delta P(i) = P_{\text{total}}(i) - P_{\text{real}}(i) - P_{\text{water_increase}}(i) \quad (7)$$

其中, $P_{\text{real}}(i)$ 为当前 i 时刻的实际功率(即上一时刻调控后的功率); $P_{\text{water_increase}}(i)$ 为将用水群 A 内处于 P_1 、 P_2 档运行的热水器调至 P_3 档运行所增加的功率。

2.3.1 提升集群热水器功率

若 $\Delta P(i) > 0$,则说明此时还需要提升集群热水器功率以达到目标。由于开启加热群 B 内处于 P_3 档运行的热水器不能通过改变功率级来增加功率,此时由开启加热群 B 内处于 P_1 、 P_2 档运行的热水器组

成的集群 B_{12} 和保温关闭群 C 内处于关闭状态的热水器参与调控。

参与调控的热水器集群总功率目标为:

$$P_{\text{increase_target}}(i) = P_{\text{total}}(i) - P_3(i) \quad (8)$$

其中, $P_3(i)$ 为所有处于 P_3 档运行的热水器总功率(包括当前用水热水器)。

$$\Delta P_1 = P_{\text{increase_target}}(i) - b_{12}(i)P_3 \quad (9)$$

其中, $b_{12}(i)$ 为开启加热群 B 内处于 P_1 、 P_2 档运行的热水器的数量; P_3 为 P_3 档的加热功率。

(1)若 $\Delta P_1 < 0$,说明通过变功率调控可以完成目标消纳量,则对开启加热群 B 内处于 P_1 档和 P_2 档运行的热水器组进行变功率操作,功率级的确认方法见下一节。此时调控组热水器的目标总功率为 $P_{\text{increase_target}}(i)$ 。

(2)若 $\Delta P_1 > 0$,说明只通过变功率调控不能完成目标消纳量,此时将集群 B_{12} 内的热水器全部调节至 P_3 档运行,然后利用文献[15]中改变温度设置值的方法打开关闭组的热水器,运行功率级的确认方法见2.4节。此时调控组热水器的目标总功率为 $P_{\text{increase_target}}(i)$ 。

2.3.2 降低集群热水器功率

若 $\Delta P(i) < 0$,则说明此时需要降低集群热水器功率以达到目标。调控后热水器集群的总功率目标为:

$$P_{\text{decrease_target}}(i) = P_{\text{total}}(i) - P_A(i) \quad (10)$$

其中, $P_A(i)$ 为用水群 A 内热水器(均处于 P_3 档运行)的总功率。

$$\Delta P_2 = P_{\text{decrease_target}}(i) - b(i)P_1 \quad (11)$$

其中, $b(i)$ 为开启加热群 B 内热水器的数量; P_1 为 P_1 档的加热功率。

(1)若 $\Delta P_2 > 0$,说明通过降低开启热水器的功率可以完成调控目标。此时处于 P_1 档运行的热水器不能通过降低功率级来减少功率,由开启加热群 B 内处于 P_2 、 P_3 档运行的热水器组成的集群 B_{23} 通过降低功率级的方式参与调控,功率级的确认方式见下一节。则调控组的目标总功率为:

$$P_{\text{action_target}}(i) = P_{\text{decrease_target}}(i) - b_1(i)P_1 \quad (12)$$

其中, $b_1(i)$ 为开启加热群 B 内处于 P_1 档运行的热水器的数量。

(2)若 $\Delta P_2 < 0$,说明只通过降低集群热水器的功率级不能完成调控目标。此时先将开启加热群 B 内的热水器均降至 P_1 档运行,然后通过改变温度设置值的方法选择热水器关闭。此时调控组的目标总功率为 $P_{\text{decrease_target}}(i)$ 。

2.4 控制流程

控制策略需要考虑热水器群的温度应满足用户对热水器温度的期望以及热水器集群的总功率能最

大限度地完成消纳任务。定义策略评估指标为^[16]:

$$\lambda_m = \varpi_1 \sum \left\| T_{\text{EWH}}(t) - T_{\text{EWH_set}}(t) \right\|^2 + \varpi_2 \sum \left\| P_{\text{real}}(i) - P_{\text{action_target}}(i) \right\|^2 \quad (13)$$

其中, $T_{\text{EWH}}(t)$ 为当前参与调控的热水器温度矩阵; $T_{\text{EWH_set}}(t)$ 为当前参与热水器温度设置值矩阵; ϖ_1 、 ϖ_2 为权重, 且满足 $\varpi_1 + \varpi_2 = 1$ 。定义目标函数为:

$$\min \lambda_m \quad (14)$$

利用遗传算法, 调用 Sheffield 工具箱, 求得满足条件的最优解, 以计算得到的最优解确定当前热水器响应新能源消纳的最佳运行档位。本文中可选参数遗传代沟 (GGAP) 取 1, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.01, 最大迭代次数为 50。

故精细化均衡控制策略的整体控制流程如下。

将热水器分组为用水群、保温关闭群、开启加热群。为了保障用户的用水满意度, 将用水群中的热水器均提升至 P_3 档加热。

(1) 根据新能源出力情况判断当前需要增加的功率或需要削减的功率。

(2) 根据 2.3 节所述内容判断当前的消纳任务是否可通过只改变功率级完成。

(3) 若通过改变功率级即可完成消纳任务, 则执行变功率级操作, 根据遗传算法计算各台热水器的最佳响应功率级, 并将各热水器调至相应的功率档位运行。若只通过改变功率级不可完成消纳任务, 则改变功率级后, 再根据新能源出力情况对当前热水器进行打开或关闭操作, 打开的热水器台数及功率级的确定方法仍按照遗传算法求得, 关闭的热水器台数的确定方法按照文献[15]中的方法, 选择关闭此时越靠近目标温度的热水器。

(4) 判断当前时刻的调控是否结束。若达到调控时间, 则结束调控; 若还未结束, 则返回继续控制流程。

精细化均衡控制策略的流程见图附录中图 A1。

电网运营商根据采集的新能源发电及传统发电等数据, 预测某时段需要消纳的新能源发电量, 并提前与负荷聚合商确定负荷消纳合同。当负荷聚合商平台收到电网运营商的消纳信号后, 感知各热水器的实时状态, 向部分热水器发送控制指令。在该架构下, 用户通过 APP 提前与平台签订参与并委托控制协议, 同时也可以通过 APP 设置热水器的温度设置值, 观察热水器设备的实时状态。热水器集群参与调控的系统信息架构见图附录中图 A2。

3 仿真场景及参数设置

场景 1: NTEM 策略场景, 该场景模拟了在文献[14]仿真场景下控制 1 h 热水器集群的运行情况。

场景 2: 协同交互策略场景, 该场景模拟了在文献[15]的仿真场景下控制 1 h 热水器集群的运行

情况。

场景 3: 精细化均衡策略场景, 该场景模拟了在本文仿真场景下控制 1 h 热水器集群的运行情况。

本文仿真场景下的热水器仿真参数见附录中表 A1 和表 A2。

热水器的温度越低, 则其消纳潜力就越大, 23:00—24:00 时段, 由于洗澡等用水行为, 多数热水器处于温度较低的区间, 故热水器集群的整体消纳能力较大。且此时的新能源出力丰富, 而其他居民负荷功率较小, 故本文选择这一时段进行仿真。同时, 参与到该时段消纳新能源的热水器的整体温度提高, 可以视为对早上小规模的水用行为如刷牙洗脸等进行预加热, 减少热水器早间的耗电。

4 仿真结果分析

图 3 为聚合热水器台数为 700 台时 3 种策略的响应结果对比。其中精细化均衡策略中的热水器均为多功率级热水器。

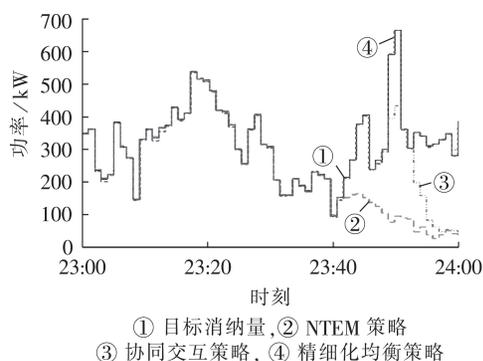


图 3 不同控制策略下的负荷消纳曲线与目标消纳曲线对比

Fig.3 Comparison between load consumption curves and target consumption curve under different control strategies

在消纳资源相对充足的情况下, 精细化均衡策略调控方案对目标曲线的匹配程度较好, 而 NTEM 策略在 40 min 后出现了不能完全匹配的情况, 协同交互策略在 50 min 后出现了不能完全匹配的情况。

出现这一现象的原因为: 由于热水器用水, 大量热水器已经处于打开状态, NTEM 策略和协同交互策略只考虑热水器单功率级情况, 即对于响应热水器只存在开、关 2 种状态, 对于打开组的热水器无法提升功率, 只能将处于关闭组的热水器打开。随着控制的进行, 越来越多的热水器到达温度上限, 造成不可控的情况, 使得处于可控范围内的热水器的数量较少, 不足以支撑完成消纳任务。NTEM 策略单纯考虑与目标温度的温度差作为调控的优先级, 没有优先调控消纳潜力大的热水器, 故相比于协同交互策略, 其会提前出现调控资源不足的现象。而精细化均衡策略考虑多级功率情况, 优先改变热水器

的运行功率,将控制精确至单台热水器的功率级。提升功率级调控不能完成目标后,才打开关闭的热水器,而且热水器开启后也多以 P_1 、 P_2 档运行,相比于NTEM策略和协同交互策略,精细化均衡策略延长了到达温度上限的时间,增加了调控的均衡性。故随着控制的进行,精细化均衡策略下处于可控范围外的热水器数量较NTEM策略和协同交互策略多。

图4为因温度到达上限而不可控的热水器数量随时间变化情况,图中所示结果可以进一步说明图3的现象。

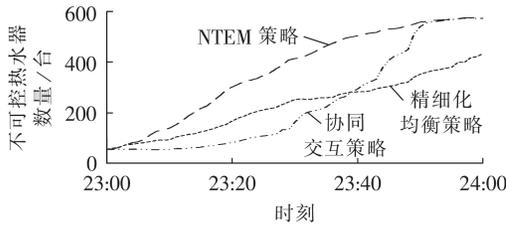


图4 不同控制策略下不可控热水器数量随时间的变化情况

Fig.4 Change of number of uncontrollable water heaters with time under different control strategies

从图4中可以看出,调控开始后,NTEM策略下的不可控热水器的数量快速均匀增加,说明没有优先控制当前温度较低的热水器,而是对各温度段的可控热水器进行平均控制。在30 min之后,协同交互策略中不可控热水器的数量快速增加,而一开始不可控热水器数量处于较低的水平,这是因为该策略优先调控温度较低的热水器,故调控的前30 min不可控热水器的数量没有快速增加,随着调控的进行,温度较低的热水器数量逐渐变少,只能控制温度较高的热水器,故会导致不可控热水器数量快速增加。精细化均衡策略因温度达到上限而不可控的热水器始终处于均匀增加的状态,这是因为通过功率级的灵活组合,使得调控较为均衡,延长了热水器到达温度上限的时间,增加了可响应时长。在控制过程的后半段,精细化均衡策略可调热水器的数量相较于NTEM策略和协同交互策略有明显的优势。

图5和图6分别为 EW_{H1} 和 EW_{H2} 这两台典型热水器在3种调控策略下的温度变化。

由图5可知, EW_{H1} 在调控初始时处于刚用完水

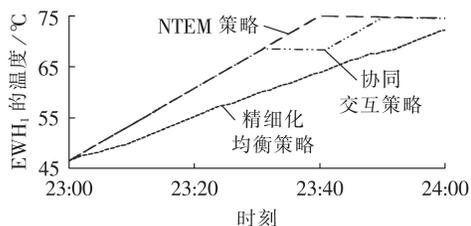


图5 EW_{H1} 在不同控制策略下温度随时间的变化曲线

Fig.5 Change curve of EW_{H1} 's temperature with time under different control strategies

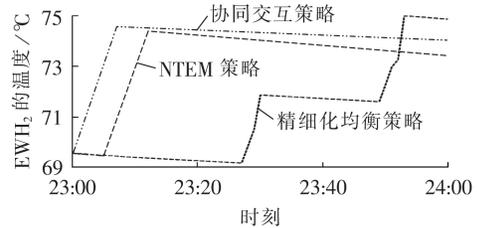


图6 EW_{H2} 在不同控制策略下温度随时间的变化曲线

Fig.6 Change curve of EW_{H2} 's temperature with time under different control strategies

温度较低的状态,在NTEM策略和协同交互策略下,其分别在37 min和48 min温度到达上限,从而在整个调控过程中 EW_{H1} 不能再参加调控,成为不可控的热水器;而在精细化均衡策略下,通过多级功率灵活组合的方式,在调控过程的每一时刻精确到响应的功率级,延长了热水器 EW_{H1} 的响应时间,直到调控结束,仍没有达到温度上限($75\text{ }^{\circ}\text{C}$),还具有可控性。

由图6可知, EW_{H2} 在调控初始时处于保温温度较高的状态,在NTEM策略和协同交互策略下,其分别在6 min和10 min温度到达上限而不可控;在精细化均衡策略下,因优先使得开启的热水器提升功率,故一开始并未选中热水器 EW_{H2} 参与调控, EW_{H2} 一直处于关闭保温状态,直到第27 min被选中参与调控,在达到新设置的目标温度后,于32 min关闭,在第50 min消纳任务出现阶段性最大值时又被选中参与调控。

图7对比了3种策略下热水器的平均温度。从图7中可以看出,随着调控的进行,NTEM策略和协同交互策略分别在第40 min和50 min之后,因可调热水器数量不足,温度上升较慢;精细化均衡策略在控制过程的后半段,因可调热水器数量较多,可以更好地挖掘出热水器的响应潜力,使得热水器集群较前2种方案可以达到更高的温度。

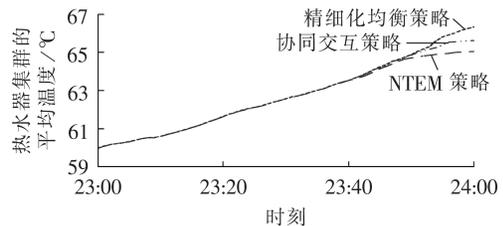


图7 不同控制策略下热水器集群的平均温度对比

Fig.7 Comparison of average temperature of cluster water heaters under different control strategies

综合以上分析可以得出结论:与文献[14]和文献[15]中的调控策略相比,本文所提调控策略与目标消纳量的匹配度更高,消纳效果更好,可以使集群热水器的响应潜力最大化,同时对热水器的调控更加均衡。

5 结论

本文基于多级功率热水器集群,提出了精细化均衡控制方案,综合考虑电网侧消纳情况和用户用水舒适度,实现了两者的双赢。通过仿真验证了本文所提控制方案的有效性和优势。本文为了仿真的简单化,只假设了热水器存在3个功率级,实际上可以将其推广至热水器有更多功率级的情况。未来将引入激励机制,考虑如何在变激励机制下制定政策,更好地鼓励用户参与到分布式新能源的消纳中。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘小聪,单葆国,王成洁,等. 高比例清洁能源替代潜力评估模型及关键影响因素分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2755-2761.
LIU Xiaocong, SHAN Baoguo, WANG Chengjie, et al. Substitution potential model of high proportion of clean energy and analysis of key affecting factors[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2755-2761.
- [2] 王守相,张齐,王瀚,等. 高可再生能源渗透率下的区域多微网系统优化规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 33-38, 52.
WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 33-38, 52.
- [3] 刘其辉,毛未,高峰. 提升无功调节能力的双馈式风力发电机转速变模式控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 85-92.
LIU Qihui, MAO Wei, GAO Yu. Variant mode control strategy of rotor speed for DFIG in promoting reactive power adjustment ability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 85-92.
- [4] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [5] 黎静华,左俊军,汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3503-3510.
LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503-3510.
- [6] 王魁,张步涵,闫大威,等. 含大规模风电的电力系统多时间尺度滚动协调调度方法研究[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2434-2440.
WANG Kui, ZHANG Buhan, YAN Dawei, et al. A multi-time scale rolling coordination scheduling method for power grid integrated with large scale wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2434-2440.
- [7] 杨茂,杨琼琼. 风电机组风速-功率特性曲线建模研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 34-43.
YANG Mao, YANG Qiongqiong. Review of modeling of wind speed-power characteristic curve for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 34-43.
- [8] IKAHEIMO J, EVENS C, KARKKAINEN S. DER aggregator business: the finish case[R]. Helsinki, Finland: VTT Technical

Research Centre of Finland, 2010.

- [9] 王成山,刘梦璇,陆宁. 采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 36-43.
WANG Chengshan, LIU Mengxuan, LU Ning. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 36-43.
- [10] 王境彪,彭坚,段娟凤,等. 基于需求侧预约响应的平滑微网等效负荷功率波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 69-77.
WANG Jingbiao, PENG Jian, DUAN Juanfeng, et al. Control strategy for suppressing power fluctuation of equivalent load in microgrids based on demand-side reservation and response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 69-77.
- [11] 董丹丹. 基于电热水器类温控负荷的电力系统频率稳定与控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
DONG Dandan. Research on the stabilization and control power system frequency based on EWH: a type of TCL[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [12] 孙建伟,唐升卫,刘菲,等. 面向需求响应控制的家用电热水器建模和控制策略评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 51-55.
SUN Jianwei, TANG Shengwei, LIU Fei, et al. Modeling method and control strategy evaluation of electric water heater for demand response program[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2016, 28(4): 51-55.
- [13] LU N, ZHANG Y. Design considerations of a centralized load controller using thermostatically controlled appliances for continuous regulation reserves[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 914-921.
- [14] 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.
- [15] ZENG L K, SUN Y, YE Q Z, et al. A centralized demand response control strategy for domestic electric water heater group based on appliance cloud platform[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017, 12: S16-S22.
- [16] 孙毅,石墨,许鹏,等. 基于混合逻辑动态模型的水热器群态势感知及调控策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5043-5051, 5301.
SUN Yi, SHI Mo, XU Peng, et al. Situation awareness and control strategy of water heater group based on mixed logical dynamic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5043-5051, 5301.

作者简介:



刘向军

刘向军(1970—),女,河北唐山人,副教授,博士,研究方向为电子技术应用、电力系统自动化以及信息化技术(**E-mail**: lxjun@ncepu.edu.cn);

周行浩(1994—),女,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为需求侧管理、智能用电技术等(**E-mail**: 1458197578@qq.com);

刘迪(1990—),男,河南开封人,博士研究生,研究方向为能源互联网、需求响

应(E-mail:kfliudi@163.com);

孙毅(1972—),男,辽宁朝阳人,教授,博士,主要研究方向为智能用电技术、“互联网+”下的电能替代技术(E-mail:sy@ncepu.edu.cn);

谢祥颖(1979—),男,北京人,高级工程师,博士,研究方

向为能源互联网、大数据;

卢毓东(1977—),男,浙江杭州人,高级工程师,硕士,研究方向为分布式电源、大数据、机器学习(E-mail:hbyudo@126.com)。

(编辑 陆丹)

Refined equilibrium control of electric water heater clusters for accommodation of renewable energy sources

LIU Xiangjun¹, ZHOU Xingjie¹, LIU Di¹, SUN Yi¹, XIE Xiangying², LU Yudong³

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

2. State Grid Electronic Commerce Co., Ltd., Beijing 100053, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the possible impact of grid-integrated renewable energy power generation on the power grid, a refined equilibrium control strategy of EWH (Electric Water Heater) clusters for renewable energy source consumption is proposed. Compared with the currently widely studied control method, which can only realize two control states of open and close for a single EWH, the proposed control strategy is optimized by temperature setting values and multi-stage power joint optimization and is solved by genetic algorithm, which not only considers the open and close state of a single EWH, but also is more accurate to the power level selection of a single EWH. The proposed method not only ensures the completion of the power grid side consumption task, but also comprehensively considers the temperature of the user side EWHs to realize a win-win situation. Simulative results show that the proposed control strategy can achieve accurate load control and make the EWHs' response more balanced.

Key words: accommodation of renewable energy sources; electric water heater clusters; refined control; genetic algorithms; balanced response

(上接第51页 continued from page 51)

Effect of wind and wave on vibration characteristics of offshore wind turbines and control strategy

LIU Haoming, ZHAO Min, TIAN Wei, YANG Suxiang, XU Bofeng, YUAN Xiaoling

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: A wave model is established, and the causes of the fluctuation components related to the hydrodynamic frequency in the aerodynamic loads and torque of offshore wind turbines are analyzed. The existence of the fluctuation is verified by simulation on GH Bladed platform. In order to reduce the fluctuation, wind shear and tower shadow effect on wind turbine, the integrated vibration acceleration signal of the top tower is superimposed with the reference signal of uniform variable pitch control, and converted into the variable pitch control signal of each blade combined with the 3P fluctuation components of output power and its azimuth. The simulative results show that the proposed variable pitch control strategy can not only effectively smooth the fluctuation of blade root flap-wise load caused by wind and wave, but also significantly reduce the fluctuation of aerodynamic torque and output power, which improves the output power quality of offshore wind turbines while reducing the fatigue loads.

Key words: wind force; wave force; aerodynamic load; aerodynamic torque; variable pitch control; vibration reduction

附录

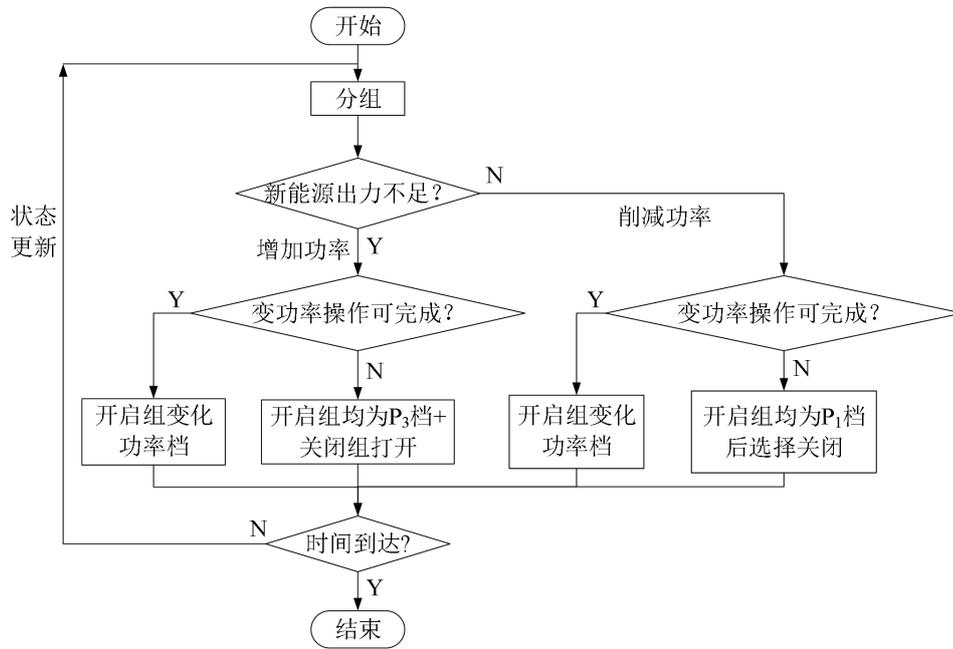


图 A1 控制实现流程图

Fig.A1 Flowchart of control implementation

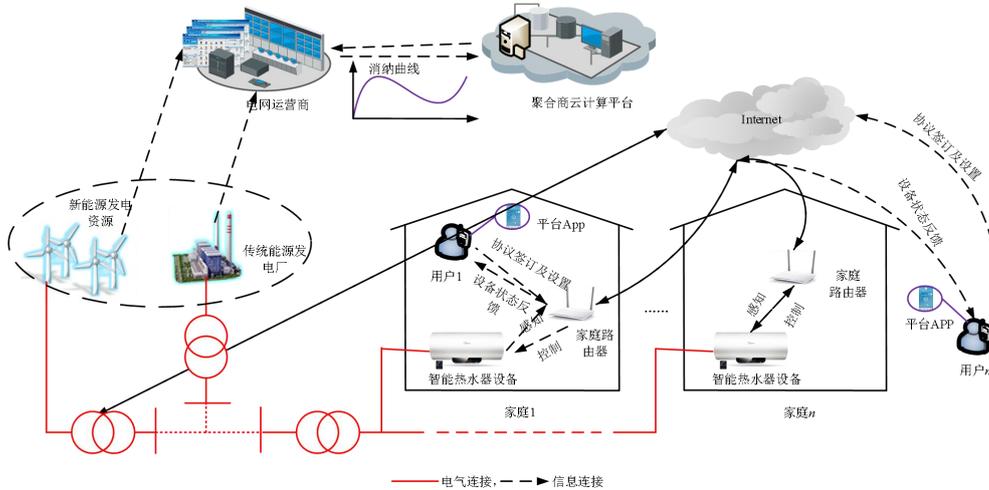


图 A2 聚合热水器消纳新能源的系统信息架构

Fig.A2 Information system architecture for balancing renewable generation through aggregated electric water heaters

表 A1 热水器参数设置

Table A1 Parameter setting of water heater

参数	取值
功率级设置	P ₁ 档 1 kW, P ₂ 档 2 kW, P ₃ 档 3 kW
水箱热阻	12~25 °C·ft ² ·h/Btu
保温范围	2 °C
水箱的半径与长度之比	1:5
厂家设置的最高允许温度	75 °C
厂家设置的最低允许温度	30 °C
流入水箱冷水温度	20 °C
流出水箱混合热水温度	40 °C

表 A2 其他参数设置

Table A2 Setting of other parameters

参数	取值
用水时间	服从 (1290,75) 的正态分布
用水时长	10~20 min 范围内的随机分布
消纳时段	23:00—24:00
数据采集周期	1 min

注：本文的时间间隔为 1 min，将 00:00 定义为 0 时刻，故 1290 时刻为 21:30，即 21:30 左右为用水高峰时期。