

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.03.015

计及用户舒适度的电热水器多目标优化控制策略

武媚, 包宇庆, 张金龙, 吉同舟

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210042)

摘要:需求响应通过电价或激励信号引导电力用户改变用电行为,提高电力系统的经济性和可靠性,用户的舒适度是需求响应项目在实行过程中需要考虑的重要内容。电热水器用量大、储热性较好,是重要的需求响应资源。文中以自动混水恒温型电热水器为研究对象,提出一种兼顾经济需求和舒适度的灵活调控方案,建立水箱热力学模型与自动混水阀控制系统,引入用电舒适度指标,建立了兼顾电费和舒适度指标的多目标优化模型;通过遗传算法优化求解,得到电热水器(EWH)最佳功率分布时段,并与传统控制策略和以最小化用电费用为目的的单目标优化策略进行对比,最后算例验证了该方法的有效性。

关键词:需求响应;多目标优化;电热水器;遗传算法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)03-0100-08

0 引言

需求响应是减小电力负荷峰谷差、增大电力资产利用率、提高电力系统稳定性的有效手段^[1]。需求响应通过电价信号引导用户将用电需求转移至电价谷时,减少电价峰时用电,达到削峰填谷的效果。快速发展的智能用电技术为电力用户参与电力系统调度、控制家庭用电设备工作状态提供了条件和手段^[2-3],但是需求响应会改变用户的用电行为,可能对用户用电舒适度产生影响。

温控负荷具有良好的热储能特性,在居民用电负荷中所占比例高达40%~50%,逐渐成为需求响应的重点研究对象^[4-6]。电热水器(electric water heater, EWH)、空调等家庭温控负荷能够以较少的热损失率将电能转化成“热能”的形式存储一段时间,因此只要精准控制用电设备工作状态就可以在保证舒适度的同时减少用电费用,实现需求响应^[7-8]。但是要求普通用户合理控制用电设备、充分响应电价或激励信号是耗费时间且极其不现实的,因此研究温控负荷运行的优化控制策略具有重要意义。

文献[4]采用一种基于改进Coloredpower算法的加权系数排队算法对家庭空调等温控负荷的微网运行进行控制;文献[9]提出一种智能电网环境下基于改进粒子群算法的空调系统多目标优化模型;文献[10]考虑可再生能源发电和能源存储利用遗传算法对空调系统进行优化控制;文献[11-13]

在考虑最大功率限制、最大舒适度约束的前提下,对智能电采暖网络寻求用电费用最小的运行策略;文献[14]在实时电价机制下,根据不同经济性和舒适性需求,创建EWH最佳运行方案;文献[15]建立EWH聚合模型并评估多种控制策略,结果表明相关控制策略能改进电力系统经济性。目前有关温控负荷的研究偏向于空调系统控制策略^[4,9,12],仅有一小部分关于EWH控制^[14-15]。EWH的2次混水过程决定了EWH模型的特殊性,因此在建模时不仅要考虑水箱中冷水混入,还要考虑混合阀混水情况。大部分EWH优化控制策略在建模时未考虑出水口的冷热水混合过程,即忽略恒温混水系统^[14-16]。在这种建模方式下,只能表示水箱的水温变化,无法准确反映用户所接触的出水口水温。

通过智能用电技术,综合考虑电价高低、外界温度、用水习惯等多种因素,提出一种平衡用电成本和舒适度的EWH优化控制策略。首先对比考虑和不考虑自动混水系统2种情况下的用水情况;其次对提出的多目标优化控制策略进行仿真实验,并与多种控制策略进行对比;最后分析了EWH聚合模型的需求响应效果。

1 电热水器热力学特性分析

1.1 EWH水箱水温

常用的家庭EWH由水箱和混合阀系统组成,如图1所示, E_{in} 为水箱存储总能量, E_{input} 为水箱加热能量, E_{loss} 为常规热损失, E_{usage} 为用水事件所消耗的热量, E_{inlet} 为流入水箱中的冷水能量, E_{tap} 和 E_{cw} 分别为出水口总能量和冷水进水口能量。首先对单台EWH水箱的热力学模型建模,为了研究方便,假

收稿日期:2019-01-17;修回日期:2019-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707099);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX19_0200)

设:(1) EWH 水箱中的水被视为温度均匀的单体,当用水事件发生时,假定流出的热水温度为水箱内水的平均温度;(2) 假设进水口进入的冷水瞬间与水箱内热水均匀混合,形成新的水箱水温;(3) 设流入水箱中的冷水能量为零基准,即 $E_{inlet} = 0$ ^[17]。

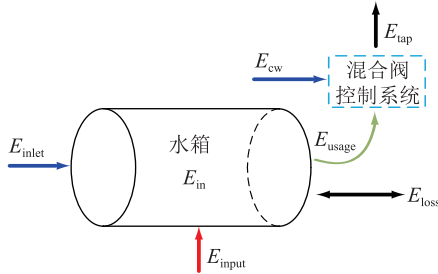


图1 EWH 能量流

Fig.1 Energy flow of the EWH

由上述假设可知,单位采样时间间隔(从 t 时刻到 $t+1$ 时刻)内 EWH 水箱内部能量可用下式表示:

$$\Delta E_{in} = \Delta E_{input} - \Delta E_{loss} - \Delta E_{usage} \quad (1)$$

式中: ΔE_{in} 为水箱里总能量的变化; ΔE_{input} 为水箱加热能量变化; ΔE_{loss} 为常规热损失变化; ΔE_{usage} 为用水事件所消耗的热量。假定输入的能量被均匀且瞬间分配到 EWH 水箱中,根据能量流动,可得水箱中的水温变化 ΔT_{in} 。

根据能量守恒可得下式^[18]:

$$E_{in}(t+1) = \frac{V_{tank} - V_{usage}(t+1)}{V_{tank}} E_{in}(t) \quad (2)$$

式中: $E_{in}(t+1)$ 为 EWH 在 t 时刻用水事件发生后,水箱内 $t+1$ 时刻剩余的热能; V_{tank} 为 EWH 水箱里的总体积; $V_{usage}(t+1)$ 为从 t 时刻到 $t+1$ 时刻所用水体积,也等于需要被加热水的体积。由比热容公式将式(2)转化为温度关系,可得下式:

$$T_{in}(t+1) = \frac{V_{tank} - V_{usage}(t+1)}{V_{tank}} \times [T_{in}(t+1) - T_{inlet}] + T_{inlet} \quad (3)$$

式中: $T_{in}(t+1)$ 为 EWH 在 t 时刻用水事件发生后,水箱内 $t+1$ 时刻平均水温; T_{inlet} 为注入水箱的冷水温度(室外水温),由于水的比热容较大,当吸收或者放出相同热量时水温变化较小,设为定值 T_{inlet} 。

利用式(3),用水事件期间损失的能量可由下式得到:

$$\Delta E_{usage} = c\rho V_{usage}(t+1) [T_{in}(t) - T_{inlet}] \quad (4)$$

式中: c 为水的比热容; ρ 为水的密度。

除用水事件所造成的能量损失外,下式表示从 t 时刻到 $t+1$ 时刻产生的常规热损失:

$$\Delta E_{loss} = \frac{[T_{in}(t) - T_{amb}(t)]}{R} \Delta t \quad (5)$$

式中: $T_{amb}(t)$ 为 t 时刻的 EWH 水箱外部温度; R 为水箱等效热阻; Δt 为采样时间间隔。

将式(1)、式(4)和式(5)代入 $\Delta E = cm\Delta T$,可得采样时间间隔内水箱水温微分方程,采用指数模型,则 EWH 水箱水温变化公式可表示如下:

$$T_{in}(t+1) = T_{in}(t) e^{-\frac{\Delta t}{\rho V_{tank} R'}} + [\eta P_0 u(t) R' + \frac{T_{amb}(t)}{R} R' + c\rho B(t) R' T_{inlet}] (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\rho V_{tank} R'}}) \quad (6)$$

$$B(t) = \frac{V_{usage}(t+1)}{\Delta t} \quad (7)$$

其中:

$$R' = \frac{R}{c\rho B(t) R + 1} \quad (8)$$

式中: $B(t)$ 为用水事件发生时热水流速; η 为加热效率; P_0 为加热额定功率; $u(t)$ 为 EWH 在 t 时刻启停状态; $P(t)$ 为 t 时刻 EWH 功率消耗, $P(t) = P_0 u(t)$ 。由公式(6)可知,决定水箱水温的主要变量有前一时刻的水温、环境温度、热力学参数、用水需求等因素。

1.2 EWH 自动混水系统

图2为 EWH 混合阀控制系统,通过混合阀将水箱中流出的热水混入一定比例冷水,为用户提供合适的出水口温度 $T_{tap}(t)$,故 EWH 水箱水温 $T_{in}(t)$ 变化情况直接决定用户用水温度,对用户舒适度产生极大影响。文中采用热不适标准 D 来衡量用户舒适度。

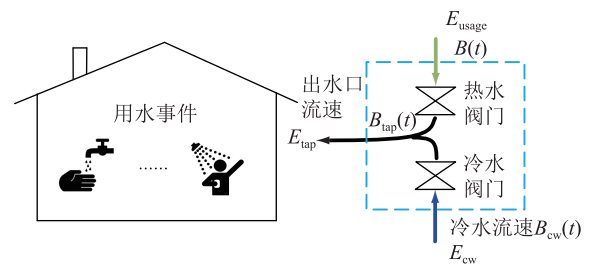


图2 EWH 混合阀控制系统

Fig.2 EWH mixing valve control system

1.2.1 混水阀工作过程

用水事件发生时,根据混合阀混水情况对热不适标准 D 分以下2种情况讨论。

(1) 刚开始时,假设最佳用水温度为定值 T_{exp} ,水箱水温 $T_{in}(t)$ 随着热水的流出和冷水的流入温度逐渐下降,起初 $T_{in}(t) \geq T_{exp}$,利用混合阀将出水口温度维持在 T_{exp} ,此时不存在用水不舒适情况。

由图2可知,出水口的能量以及冷热水流速关系如下式:

$$\begin{cases} \Delta E_{\text{tap}} = \Delta E_{\text{cw}} + \Delta E_{\text{usage}} \\ B_{\text{tap}}(t) = B_{\text{cw}}(t) + B(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: ΔE_{tap} 为采样时间间隔内出水口变化的总能量; ΔE_{cw} 为采样时间间隔内冷水进水口提供的热量; ΔE_{usage} 为采样时间间隔内热水进水口提供的热量; $B_{\text{cw}}(t)$ 为单位时间冷水流量; $B_{\text{tap}}(t)$ 为出水口水流速度, 假定在用水事件发生过程中出水口水流速度恒定。

由能量和温度关系公式 $\Delta E = cm\Delta T$, 将式(9)代入, 可得冷热水流速关系, 冷热水混合比例 K 可以表示为:

$$K = \frac{B(t)}{B_{\text{cw}}(t)} = \frac{T_{\text{tap}}(t) - T_{\text{cw}}}{T_{\text{in}}(t) - T_{\text{tap}}(t)} \quad (10)$$

式中: $T_{\text{tap}}(t)$ 为出水口水温; T_{cw} 为混入冷水水温, 假定一天之内冷水水温 T_{cw} 为定值; $T_{\text{in}}(t)$ 为 t 时刻水箱内水的温度。

由式(10)可知 K 取决于水箱内每个时刻水温以及注入冷水温度, 混合阀控制冷热水流量控制保证用水温度。

图3为某次仿真结果, 描述了混水阀控制系统下水温和水流速度曲线, 用水事件发生在晚上6点, t_{ch} 时刻之前, 水箱温度较高, 出水口水温恒为 T_{exp} 。用水期间由于水箱热水温度 $T_{\text{in}}(t)$ 快速下降, 为了维持出水口最适温度, 单位时间热水流量增加, 冷水流量减小。

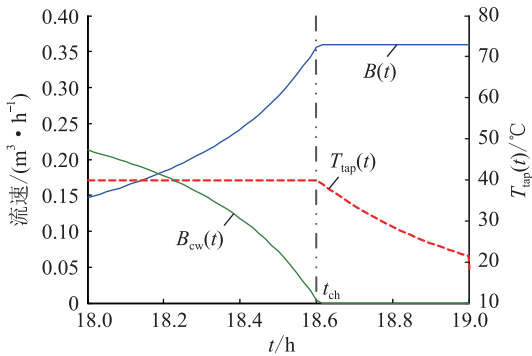


图3 流速及出水口温度变化曲线

Fig.3 Flow rate curve and tap water temperature curve

(2) 随着水箱内热水的流出, 冷水的注入, 箱内水温 $T_{\text{in}}(t)$ 逐渐降低, 直至 $T_{\text{in}}(t) \leq T_{\text{exp}}$, 此时混合阀控制冷水阀门关闭, 水箱流出热水不再混合冷水, 出水口的水流全部由水箱的热水提供, 即 $B_{\text{tap}}(t) = B(t)$, 此时需要考虑热不适。

图3中, t_{ch} 时刻后水箱温度 $T_{\text{in}}(t)$ 小于 T_{exp} , 为了减小对用水舒适度的影响, 令 $B_{\text{cw}}(t) = 0$, 出水口水温 $T_{\text{tap}}(t)$ 等于水箱水温 $T_{\text{in}}(t)$ 。

1.2.2 用户热不适

用水期间出水口水温 $T_{\text{tap}}(t)$ 与用户设置的最适温度 $T_{\text{exp}}(t)$ 偏差决定了热不适 D 大小, 偏差值越大则表示热不适值越大, 即用户舒适度越差, 热不适标准 D 函数如下:

$$D = \begin{cases} 0 & T_{\text{in}}(t) \geq T_{\text{exp}}(t) \\ \sum_{t=t_1}^{t_n} |T_{\text{in}}(t) - T_{\text{exp}}(t)| & T_{\text{in}}(t) < T_{\text{exp}}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: D 为所有用水时刻的出水口温度与最适温度温差之和; t_1, t_2, \dots, t_n 为用水时段; $T_{\text{exp}}(t)$ 为用户对于 t 时刻用水事件的最适温度期望。

由于用户个体生理条件以及用水事件类型的差异, 影响了用水用户对最舒适水温 $T_{\text{exp}}(t)$ 选择。由经验可知, 用水用户在洗手时期望温度与人体体温相近, 可承受水温波动; 而在洗澡时, 用户期望水温在 40°C 左右, 高于日常用水温度, 并且希望出水口水温恒定在期望值。

2 电热水器运行多目标优化模型

2.1 多目标优化模型

单台 EWH 每日消耗电费为:

$$M = \sum_{t=1}^N p(t)P(t) \quad (12)$$

式中: N 为 1 d (24 h) 内优化控制总时隙数; $p(t)$ 为 t 时刻的电价; $P(t)$ 为 t 时刻 EWH 功率消耗, $P(t) = P_0 u(t)$, $u(t)$ 其中为 EWH 启停状态; M 为 1 d (24 h) 内 EWH 消耗的电费。

考虑自动混水恒温控制 EWH 多目标优化模型及其约束条件如式(13)一式(16)所示。

$$\min D = \begin{cases} 0 & T_{\text{in}}(t) \geq T_{\text{exp}}(t) \\ \sum_{t=t_1}^{t_n} |T_{\text{in}}(t) - T_{\text{exp}}(t)| & T_{\text{in}}(t) < T_{\text{exp}}(t) \end{cases} \quad (13)$$

$$\min M = \sum_{t=1}^N p(t)P(t) \quad (14)$$

$$T_{\text{max}} \geq T_{\text{in}}(t) \geq T_{\text{inlet}} \quad (15)$$

$$P_{\text{max}} \geq P(t) \geq 0 \quad (16)$$

式中: $T_{\text{max}}, P_{\text{max}}$ 分别为 EWH 水箱可承受最高温度和 EWH 最大加热功率。在该模型中, 式(13)和式(14)是目标函数, 式(15)和式(16)分别表示用水事件发生过程中水箱水温上下限约束和优化过程中对 EWH 加热功率施加的约束条件。

2.2 模型变换

利用用户偏好因子, 采用加权方法将上述提出的多目标优化模型转化为下式进行优化求解:

$$f = \min[\alpha\mu M + (1 - \alpha)D] \quad (17)$$

式中: α 为用户偏好因子, $0 \leq \alpha \leq 1$, α 取值越小表示用户对舒适度要求越高, α 取值越大表示用户越重视电费节省, α 的值由用户设定,若用户对给定 α 下的控制结果不满意,可以重新设置; μ 为比例因子, $\mu > 0$ 。

虽然单台 EWH 功率曲线的改变对提高电网的稳定性的影响微乎其微,但是当大量 EWH 都对电力公司发出的电价或激励信号进行响应,调整工作状态改进 EWH 负荷群的聚合功率,有利于削峰填谷提高电力系统稳定性。负荷的聚合对于研究 EWH 参与需求响应十分重要,文中基于自动混水恒温型 EWH 热力学特性,将基本热力学参数 c, R 和主要影响因素(外界温度,用水需求等)进行正态分布,采用蒙特卡洛模拟方法直接对 EWH 负荷进行累加。

2.3 遗传算法

由式(6)可知,EWH 水箱温度公式为非线性方程,变量较多,难以线性化,故该优化为非线性优化问题。人工智能方法,如粒子群算法和遗传算法等可以有效解决非线性优化问题。其中遗传算法具有使用范围广,寻优能力强,程序实现简单等优点,适合于求解复杂非线性优化问题^[12,19]。遗传算法(genetic algorithms, GA)是一种根据自然界中生物遗传和进化规律所提出来的随机全局搜索优化技术^[20-21],流程如图4所示。

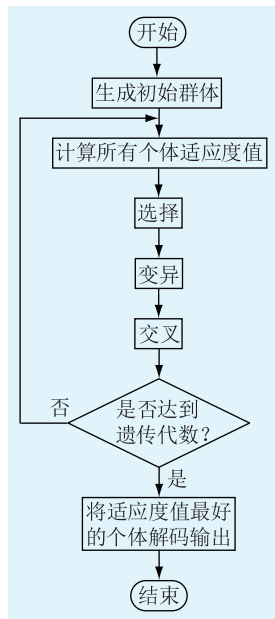


图4 遗传算法流程

Fig.4 Genetic algorithm flow chart

许多文章将1 d(24 h)内每个时刻点的工作状态,或者温控设备各时刻点的温度设为决策变

量^[9,13],但为了优化准确性通常取较小时间间隔 Δt ,因此可能导致决策变量过多,影响优化效率,准确度较低。文中以电费-热不适多目标函数作为适应度函数,将热水器开关时刻点作为决策变量,采用二进制编码方式对开启时刻点进行编码,假设1 d(24 h)内电热水器最多开启 j 次,再将开停时刻点转换成 EWH 启停状态 $u(t)$,如式(18)所示。由于 EWH 开停次数较小,精简了决策量个数,提高了优化效率,避免陷入早熟收敛。

$$u(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_{on1} \\ 1 & t_{on1} \leq t \leq t_{off1} \\ 0 & t_{off1} \leq t \leq t_{on2} \\ 1 & t_{on2} \leq t \leq t_{off2} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & t_{offj} \leq t \leq 24 \end{cases} \quad (18)$$

s.t. $t_{on1} \leq t_{off1} \leq \dots \leq t_{offj}$

式中: t_{onj} 表示第 j 次开启时刻; t_{offj} 表示第 j 次关闭时刻。

3 算例分析

为验证文中方法的有效性,对未来1 d内 EWH 的运行状态进行优化。将1 d 24 h分为1 440个时隙,即最小采样时间间隔 Δt 为1 min。电热水器参数 R 取值同文献[17],其他参数见表1。

表1 EWH 相关参数

Table 1 EWH related parameters

参数	典型值	参数	典型值
V_{tank}/L	150	$R/[\text{K} \cdot \text{d}(\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	17.922
P_0/kW	3.5	$T_{\text{inlet}}/\text{°C}$	10
$c/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{°C})^{-1}]$	4 200	$\eta/\%$	100

仿真中使用的电价信号采用江苏省实行的居民峰谷分时电价。假定在冬天对 EWH 工作状态进行优化,水箱外部温度 $T_{\text{amb}}(t)$ 可通过采集12月份某工作日5个时刻点的水箱外部温度进行插值拟合,以下图为例,当室外水温 T_{inlet} 为10 °C时,水箱外部温度变化曲线如图5所示。

假设用水事件 WA1(water activity)发生在中午12:00~12:30期间,用于厨房用水;WA2发生在晚上18:00~19:00期间,两人淋浴用水;用水 WA1 中用水最适温度 T_{exp1} 取37 °C,用水 WA2 中用水最适温度 T_{exp2} 取42 °C。

3.1 不用混水方式对比

本小节与文献[10]中未考虑混水系统的 EWH 控制策略进行对比,验证文中自动混水恒温控制策

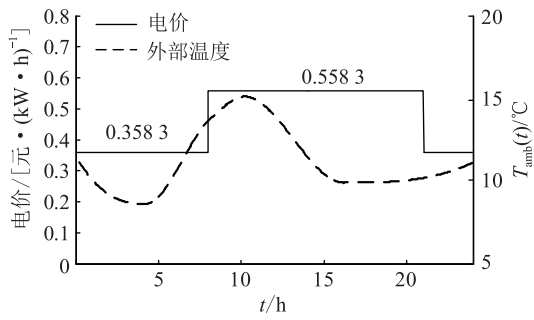


图5 电价与外部温度曲线

Fig.5 Price and external temperature curves

略的有效性,用水事件选取 WA1。2种混水方式下的 EWH 功率消耗和 EWH 水箱水温曲线如图 6(a)、(b)中左图,出水口水温变化情况和冷热水流速曲线如图 6(a)、(b)中右图。

由图 6(a)中右图可知,不考虑自动混水系统时,假设出水口水流由冷、热水等量混合,出水口水温快速下降,温度由 45 °C 下降到 30 °C。虽然此时 EWH 采用的控制策略是将水箱水温维持在 70~75 °C,但出水口只有一半时间保持水温在 T_{exp1} 以上,且较高的出水温度可能造成用户烫伤。由图 6(b)中右图可知,通过混合阀对冷热水流速的自动调节,此时出水口水温能够保持较长时间的最适温度 T_{exp1} ,最大化利用 EWH 水箱热水,保证用户舒适度要求。

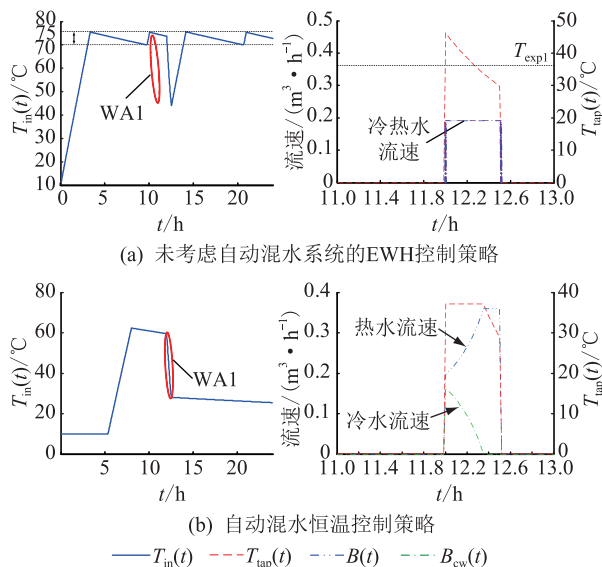


图6 不同混水方式下 EWH 水箱水温、出水口水温曲线以及流速曲线

Fig.6 EWH tank temperature curve, tap water temperature curve and flow rate curve of different water mixing modes

3.2 不同控制策略对比

为了比较文中提出的多目标优化控制策略有

效性,在相同用水情景下(考虑用水事件 WA1、WA2)将 EWH 运行在传统用水方式实时加热、简单预加热控制和最小化用电费用的单目标优化控制方式下,分别进行仿真比较,结果见表 2 和表 3。

表2 不同控制策略下的仿真结果

Table 2 Simulation results of different control strategies

控制策略	电费/元	$D/^\circ\text{C}$
实时加热	7.816 2	31 638
简单预加热	5.016 2	43 113
单目标优化	4.474 8	44 286

表3 多目标优化控制策略的仿真结果

Table 3 Simulation results of multi-objective optimization control strategy

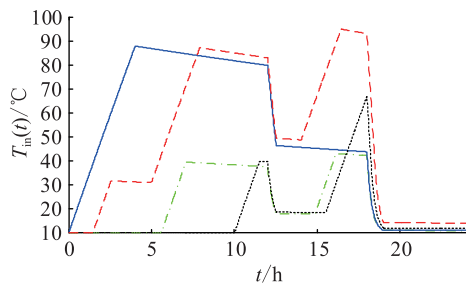
α	电费/元	$D/^\circ\text{C}$
11/12	4.63	43 961
7/8	4.640 8	43 961
5/6	5.580 5	38 141
3/4	9.75	18 947
1/2	9.772 5	19 084
3/10	10.14	18 744
1/10	10.787 1	18 114

考虑到遗传算法的不一致收敛特性,表 3 所列出的多目标优化遗传算法的结果是每种程序独立运行 10 次的最优结果。

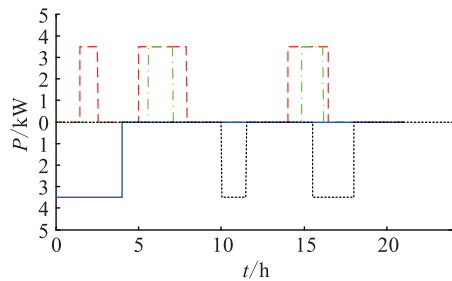
由表 2 可以看出,实时加热控制下热不适值最小,但它的用电成本也是最高;如果采用 α 取 5/6 的多目标优化控制策略,相比于实时加热控制,电费可节省 30%,对用户舒适度影响相近。与实时加热方式相比,其他 2 种控制策略较好的利用 EWH 储热特性。但是简单预加热方式仅在电价低谷时段预先加热,方式单一,考虑不够周全。由表 2 和表 3 可以看出,当 α 取 11/12 时,相比于简单预加热控制方式电费减少 6%,而热不适仅提高了 2%左右。

表 3 说明 α 越大,电费越少,对用户舒适度影响越大。因此,舒适度的提高是以用电成本增加为代价的,一旦用户根据自己需求偏好设置 α ,多目标优化控制策略可以提供最佳 EWH 工作曲线,较好的参与需求响应。

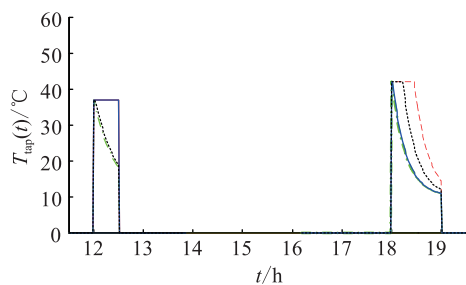
图 7 是一次仿真所得结果,分别表示 4 种不同控制策略下的水箱水温曲线、加热功率情况以及出水口水温变化,其中多目标优化控制策略用户偏好因子 α 取 1/10。由图 7 可知,采用实时加热控制方式,每次用水事件发生时出水口水温 $T_{tap}(t)$ 可维持较长时间的最适水温温度 T_{exp} ,但对应耗电量全部集中在高峰电价时段;简单预加热控制方式完全避



(a) 不同控制策略下水箱水温对比



(b) 不同控制策略下加热功率对比



(c) 不同控制策略下水口水温对比

— 多目标优化策略 — 单目标优化策略
— 简单预加热策略 — 实时加热策略

图7 不同控制策略下的用水情况对比

Fig.7 The contrast diagrams of water usage of different control strategies

开高峰电价时段,但对较晚用水事件的舒适度的影响很大;相比于单目标优化,多目标优化能够将所有用水事件出水口水温恒温保持较长时间。

根据以上分析,文中提出的电费-热不适多目标优化策略能够更好地兼顾用电用户的经济需求和舒适度需求,可以根据用户对电费和舒适度的不同偏好要求灵活调整优化控制策略。以上说明该多目标优化控制策略更加灵活,人性化,并且互动性更强。

3.3 EWH 负荷群的聚合功率

以由 300 台 EWH 组成的负荷群为例,表 4 为负荷群相关参数数据, α 取 1/10,为了提高运行效率,最小采样时间间隔 Δt 取 4 min。下面分析某小区日负荷曲线,图 8 为该小区某日日负荷曲线,研究 EWH 负荷群对电价信号进行响应后的小区日负荷曲线变化情况,为了验证提出优化策略的有效性,在 3 种情况下对比分析小区日负荷曲线。

情况 I:不考虑文中提出的优化策略;

情况 II:考虑文中提出的优化策略,采用峰谷分时电价;

情况 III:考虑文中提出的优化策略,采用峰谷分时电价和尖峰电价(critical peak pricing, CPP)。

表 4 EWH 负荷群参数

Table 4 Parameters of 300 EWHs in the load group

参数	数值分布
水箱体积 V_{tank}/L	50~120
加热额定功率 P_0/kW	1.5~3
水箱外部温度 $T_{\text{amb}}/^\circ\text{C}$	10~11
冷水温度 $T_{\text{inlet}}/^\circ\text{C}$	8~11
最适温度 $T_{\text{exp}}/^\circ\text{C}$	35~43
用水时间 t_{use}/h	18~22
$c/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$	4 100~4 300
$R/[\text{K}\cdot\text{d}(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	17.45~18

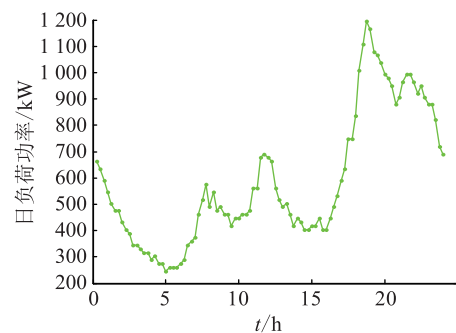


图8 日负荷曲线

Fig.8 Daily load curve

针对上述 3 种情况分别对负荷群中每台 EWH 进行多目标优化控制,其聚合策略如图 9 所示。

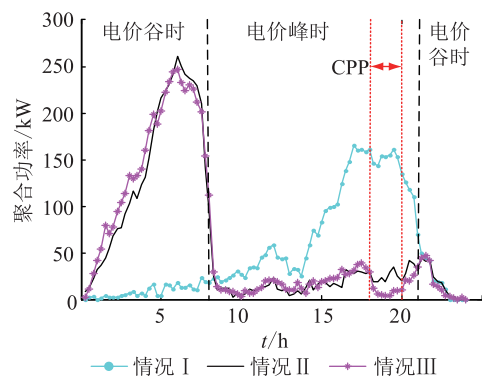


图9 不同情况下负荷群的聚合功率

Fig.9 The aggregate power of the load group under different conditions

当为情况 I 时假设电价在不同时段统一定价,由图 9 可以看出此时功率消耗集中在晚上 17 点以后,这是因为大量用水事件一般发生在晚上,用户在使用前提前加热 EWH 或用水过程中实时加热,增加了系统晚高峰用电负担。当情况 II 时,保证用户舒适度的前提下,根据峰谷分时电价进行电价响

应,利用 EWH 的储热能力,负荷群的聚合功率从晚上转移到早晨。由图 9 可知早晨为用电低谷,因此能够实现削峰填谷。图 8 中日负荷曲线中小区居民用电晚高峰明显,在 18:00~19:00 出现尖峰负荷,而 CPP 在尖峰时期提高电价,以达到削减尖峰负荷的目的。因此情况 III 在情况 II 的基础上加入 18:00~20:00 的 CPP,由图 9 可以看出 CPP 能够有效的减少此时段的用电量。

图 10 为 EWH 进行电价响应后修正的小区日负荷曲线。采用文中提出的优化控制策略,当 300 台 EWH 对峰谷分时电价进行响应,负荷群能够减少小区日负荷中的尖峰负荷,约 10%,并将需用的聚合功率转移到用电低谷时段,削峰填谷效果明显。

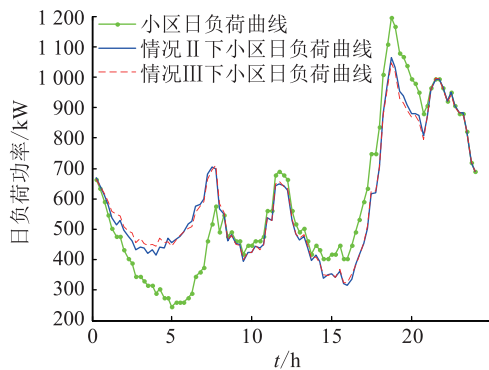


图 10 不同情况下日负荷曲线

Fig.10 Daily load curves under different conditions

4 结论

根据混合阀的热交换过程引入“热不适”概念建立自动混水恒温型 EWH 热力学模型,提出一种用户可参与自主决策的 EWH 多目标优化控制策略。通过研究,取得了以下结论:

(1) 采用遗传算法,将 EWH 开关时刻点作为决策变量,既有利于提高优化效率,又便于采用较小时间间隔增加优化准确性;

(2) 采用 EWH 多目标优化模型,保证用户舒适度要求和经济性需求。在此基础上,EWH 负荷群的聚合功率曲线可以有效降低居民日用电负荷曲线的尖峰负荷,实现削峰填谷,需求响应效果显著。

但是,文中提出的多目标优化模型主要针对电价信号进行响应,没有考虑激励信号和可再生能源出力状况。此外,EWH 的负荷群的协同优化也将是今后工作重点。

参考文献:

[1] 吴桥,卢树峰,杨世海,等.需求侧响应条件下的家庭用电管理研究[J].电力工程技术,2016,35(5):28-31.
WU Qiao,LU Shufeng,YANG Shihai, et al. Research on home

energy management under the condition of demand-side response[J].Jiangsu Electrical Engineering,2016,35(5):28-31.

- [2] 林启开,王珂,余昆,等.峰谷电价下居民用电聚合响应特性分析[J].电力工程技术,2017,36(3):88-93.
LIN Qikai,WANG Ke,YU Kun,WANG Jian, et al. Analysis on the polymeric response characteristics of residents under the peak and valley electricity price[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2017,36(3):88-93.
- [3] ZHAO Z,LEE W C,SHIN Y, et al. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(3):1391-1400.
- [4] 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.
- [5] 彭政,崔雪,王恒,等.考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(22):63-69.
PENG Zheng,CUI Xue,WANG Heng, et al. Study on the photovoltaic absorptive capacity of microgrid considering energy storage and demand side response [J]. Power System Protection and Control,2017,45(22):63-69.
- [6] 唐学军,韩信,苗世洪,等.基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型[J].电力系统保护与控制,2017,45(16):116-123.
TANG Xuejun,HAN You,MIAO Shihong, et al. Multi-type load coordination control model based on demand side response [J]. Power System Protection and Control,2017,45(16):116-123.
- [7] 王丹,范孟华,贾宏杰.考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2071-2077.
WANG Dan,FAN Menghua,JIA Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically-controlled loads and efficient power plant[J].Proceedings of the CSEE,2014,34(13):2071-2077.
- [8] LU N,KATIPAMULA S. Control strategies of thermostatically controlled appliances in a competitive electricity market[C]// Power Engineering Society General Meeting. IEEE,2005:202-207 Vol. 1.
- [9] 张延宇,曾鹏,李忠文,等.智能电网环境下空调系统多目标优化控制算法[J].电网技术,2014,38(7):1819-1826.
ZHANG Yanyu,ZENG Peng,LI Zhongwen, et al. A multi-objective optimal control algorithm for air conditioning system in smart grid [J]. Power System Technology,2014,38(7):1819-1826.
- [10] 刘洪鑫,夏通,徐非非,等.针对“峰谷倒置”负荷特性的电价策略研究[J].浙江电力,2017,36(12):6-10.
LIU Hongxin,XIA Tong,XU Feifei, et al. Study on the price strategy based on "peak-valley inversion" [J]. Zhejiang

- Electric Power, 2017, 36(12):6-10.
- [11] 王庆泽,陈星莺,颜庆国,等. 分时电价环境下的办公建筑空调负荷双层柔性优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21):43-50.
WANG Qingze, CHEN Xingying, YAN Qingguo, et al. Dual-layer flexible optimal control strategy for air-conditioning load of office buildings under time-shared electricity price [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21):43-50.
- [12] ARABALI A, GHOFRANI M, ETEZADI-AMOLI M, et al. Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):162-170.
- [13] 范帅, 郑琨琪, 郭炳庆, 等. 分散式电采暖负荷协同优化运行策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19):20-29.
FAN Shuai, JIA Kunqi, GUO Bingqing, et al. Collaborative optimal operation strategy for decentralized electric heating loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19):20-29.
- [14] DU P, LU N. Appliance commitment for household load scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2):411-419.
- [15] 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-EPSA, 2016, 28(4):51-55.
- [16] 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.
- [17] NEL P J C, BOOYSEN M J, MERWE B V D. A computationally inexpensive energy model for horizontal electric water heaters with scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(1):48-56.
- [18] BOOYSEN M J, JAA E, MOLINARO A. Proof of concept: large-scale monitor and control of household water heating in near real-time[J]. 2013.
- [19] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6):5-8.
ZHANG Lizi, SHU Jun, LIN Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6):5-8.
- [20] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4):1201-1206.
MA Yongjie, YUN Wenxia. Research progress of genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(4):1201-1206.
- [21] 陈碧云, 韦杏秋, 陈绍南, 等. 基于多种群遗传算法的电力系统多目标优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7):24-29.
CHEN Biyun, WEI Xingqiu, CHEN Shaonan, et al. Power system multi-objective optimization based on multi-population genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(7):24-29.

作者简介:



武媚

武媚(1994),女,硕士在读,研究方向为电力系统调度(E-mail:1695488730@qq.com);

包宇庆(1987),男,博士,讲师,研究方向为电力需求响应、电力系统调度等(E-mail:baoyuqing@njnu.edu.cn);

张金龙(1965),男,博士,教授,研究方向为自动化检测与智能控制。

Optimized control strategy of the electric water heater considering user comfort

WU Mei, BAO Yuqing, ZHANG Jinlong, JI Tongzhou

(School of NARI Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Demand response guides users to change power consumption behavior through electricity price or incentive signals, and improves efficiency and reliability of the power system. User comfort is of great significance that needs to be considered during the implementation of demand response programs. Due to the large electricity consumption and good heat storage capability, electric water heaters (EWH) are the important demand response resources. This paper proposes a flexible control scheme for the automatic water-mixed thermostat EWH aiming at balancing economical demand and demand on user comfort. The thermodynamic model of water tanks and automatic water mixing valve control system are established, an index reflecting the comfort degree of users is introduced. Based on which a multi-objective optimization is established, coping with both electricity consumption and user comfort index simultaneously. The optimal power distribution period of EWH is obtained through genetic algorithm. Results of the proposed method are compared with those by both traditional control strategy and single-objective optimization strategy aiming at minimizing electricity consumption. The effectiveness of the method is verified.

Keywords: demand response; multi-objective optimization; electric water heater; genetic algorithm

(编辑 钱悦)