

CPS 互动架构下的聚合电热水器消纳风能策略

刘向军¹, 叶秋子¹, 曾璐琨¹, 李彬¹, 孙毅¹, 杨斌², 马永红¹

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210000)

摘要:调控聚合温控负荷可高效地消纳可再生能源。针对聚合智能温控负荷群消纳可再生能源场景中的用户使用舒适度及能源消纳效率问题,在基于信息物理系统的可再生能源消纳互动架构下,提出典型温控负荷——电热水器的映射模型。在考虑用户行为信息感知的前提下,提出基于加热-剩余时间比(HRTR)的电热水器群分区方法,以及考虑分区差异性的可再生能源消纳控制策略。不同控制策略的仿真对比表明所提策略能更好地消纳可再生能源且能保证用户的高使用舒适度。

关键词:CPS; 可再生能源消纳; 温控负荷; 负荷控制

中图分类号:TM 73; TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.002

0 引言

能源互联网背景下,风电等绿色电力将大规模地接入电网,然而风电出力具有随机性和不可调特性,大规模风力发电接入电网需要发电侧的传统机组频繁地调整出力,以维持电网的供需平衡,这增加了电网运行调度的难度及成本^[1]。而需求侧家用电器负荷,尤其是温控负荷经过聚合后可成为高效的储能资源,在消纳风电方面有着很大的潜力^[2],可有效平抑可再生能源出力波动,提高能源利用率,提高电网运行的安全性、经济性^[3]。随着信息化与工业化的深度融合,信息物理系统 CPS (Cyber-Physical System) 应用于可再生能源消纳,可以通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术实现能源优化配置^[4]。用户可通过互联网技术及负荷控制平台进行设备的个性化使用设定,获取家电负荷状态等。目前国内已初步发展、投入运用的负荷聚合控制平台有海尔平台、京东平台等。此外,随着售电侧改革的推进和电力现货市场的逐渐开放,未来负荷聚合商的形成、负荷聚合商与可再生能源电厂的直接交易,以及用户负荷参与电力平衡调节也将得以实现^[5]。

近年来,在温控负荷参与可再生能源消纳方面的研究颇多^[6-8]。而在家电中,电热水器 EWH (Electric Water Heater) 的使用广泛,数量众多,在用电高

峰期功率可占家庭负荷的 30%^[9],相比于空调、冰箱等温控负荷,其能量损耗率更低,可调温度范围更广,在储能潜力方面更优。另外,考虑到风电并网需要进行无功补偿,电热水器为阻性负荷,不需要从电网中吸取无功,是优质的负荷资源,有着很大的消纳风能潜力^[10],因此本文以电热水器作为典型的温控负荷开展研究。

目前针对电热水器负荷模型,已经有学者提出 PDE (Partial Differential Equation) 物理模型^[9,11]、能耗模型等模型^[12-13],描述了电热水器的温度、功率等变化规律。在温控负荷控制策略方面,根据温度的周期性特性,对负荷进行状态队列 SQ (State Queueing) 划分、调控的策略较为常见^[14-17]。对于电热水器群的多样性状态,文献[18]提出保持负荷多样性的控制策略,文献[19]认为温控负荷的调整量应该采用变值而非定值,并且提出基于归一化温度延伸裕度 NTEM (Normalized Temperature Extension Margin) 的温度设定值调节策略。上述电热水器模型及控制策略均建立在无用户接入的场景下,且大多以温度参数作为指标。

在 CPS 互动架构下,聚合商可获得用户的使用时间、预设温度等更加多元的用户信息,需要制定更贴合用户使用舒适度的调控策略,以提高可再生能源的消纳效率。因此,本文提出电热水器运行状态综合性指标,即加热-剩余时间比 HRTR (Heat-Residual Time Ratio),根据 HRTR 对电热水器群进行分区,制定电热水器群差异化分区规则。最后,在消纳风电的场景下进行 CPS 互动架构下消纳可再生能源控制策略的仿真和对比分析,证明了 CPS 互动架构下的聚合温控负荷消纳风能策略有利于提高能源消纳效率,保证用户的使用舒适度。

1 基于 CPS 的可再生能源消纳互动架构

随着我国售电侧改革的不断推进,未来的电力市场体系和主体将不断地完善和丰富,为售电主体

收稿日期:2018-12-04;修回日期:2019-04-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901104);国家自然科学基金资助项目(51307051);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZP03,2015ZD01);国网公司科技项目

Project supported by the National Key Research & Development Project of China(2016YFB0901104), the National Natural Science Foundation of China(51307051), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014ZP03,2015ZD01) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China

提供良好的市场环境和多样化的运营模式,从而为电网提供综合能源服务,如可再生能源消纳等。另外,近年来以风力发电为代表的可再生能源电厂大力发展,其随机性、间歇性出力问题给电力系统的供需实时平衡带来了很大压力,给电网调度和通信带来了很大挑战。仅靠传统的电网供需互动模式难以解决大规模波动性可再生能源发电接入后的实时供需平衡问题,无法进行高效消纳可再生能源^[20]。CPS 是一套信息空间与物理空间之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能体系^[6]。为了实现用户与电网的高效双向互动、解决清洁能源消纳问题、提高资源配置效率、实现资源优化,本文提出基于 CPS 的可再生能源消纳架构。

在可再生能源消纳的交互过程中,参与的主要主体包括电网公司、交易中心、可再生能源电厂、负荷聚合商和用户,其互动架构如图 1 所示。电网公司主要负责对电网运行的安全校验和电力输送,负荷聚合商通过调控用户资源为电网提供可再生能源消纳服务,交易中心则为可再生能源电厂和负荷聚合商提供电力交易平台。此外,用电侧聚合商与用户的互动是实现可再生能源消纳的基础。智能家电作为单元级 CPS,将用户用电偏好、用电状态等隐性数据经过状态感知转化为可操作、可计算的显性数据,进而对数据进行集成并通过网关传输至聚合商提供的云平台,从而构成系统级 CPS。在信息空间中,负荷聚合商对集成的用户负荷信息进行计算分析,将显性数据转化为有价值的决策、预测、管理依据等信息,制定控制策略,再通过互联网传送调控指令,最后由具有嵌入式软件的智能家电设备进行精确的执行。

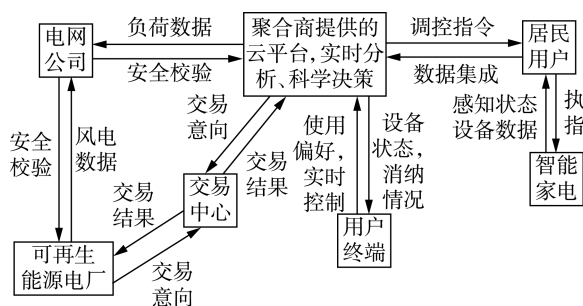


图 1 基于 CPS 的可再生能源消纳互动架构

Fig.1 CPS-based renewable energy consuming interaction frame

2 电热水器信息物理映射模型

本文在文献[13]的理论分析基础上建立电热水器负荷温度演变和加热时间模型,分析最终出水温度和水箱温度之间的关系。本文提出的 2 个模型分别反映热水器水温和加热时间随用户用水、时间的变化关系,为后续制定控制电热水器消纳风能的

控制策略和仿真实验提供有效的模型基础。

2.1 电热水器的温度演变模型

同文献[13]所述,本文模型建立的假设条件如下:热水器水箱内的水温均匀分布;进入热水器内的冷水温度始终一致。时间维度上将一天分解为 1 440 个时隙,每个时隙为 1 min。每隔时间 Δt 对热水器水箱内的能量进行采样,将进入热水器内的冷水热能作为基准值,记为零能量, t 时刻和 $t+1$ 时刻能量关系为:

$$E_{\text{inside}}(t+1) = E_{\text{inside}}(t) + E_{\text{input}}(t+1) - E_{\text{loss}}(t+1) - E_{\text{usage}}(t+1) \quad (1)$$

其中, $E_{\text{inside}}(t)$ 为 t 时刻采样电热水器内水的能量(J); $E_{\text{input}}(t+1)$ 为从 t 时刻到 $t+1$ 时刻期间电热水器加热元件的输入能量(J); $E_{\text{loss}}(t+1)$ 为从 t 时刻到 $t+1$ 时刻期间电热热水器的散热能量(J); $E_{\text{usage}}(t+1)$ 为从 t 时刻到 $t+1$ 时刻期间使用热水的能量(J)。

根据能量分析和公式 $\Delta Q = cm\Delta T$,上述能量可表示为水箱容积、水温、用水速率以及电热水器功率、开断状态的函数,如式(2)~(4)所示。

$$E_{\text{inside}}(t) - E_{\text{usage}}(t+1) = E_{\text{inside}}(t) \frac{V_{\text{tank}} - f_{\text{hot}} \Delta t}{V_{\text{tank}}} \quad (2)$$

$$E_{\text{inside}}(t) = c\rho V_{\text{tank}} [T_{\text{inside}}(t) - T_{\text{inlet}}] \quad (3)$$

$$E_{\text{input}}(t+1) = P(t) \eta \Delta t = P_0 s(t) \eta \Delta t \quad (4)$$

其中, V_{tank} 为热水器水箱容积(mL); f_{hot} 为水箱内热水流出速率(mL/s); c 为水的比热容(J/kg·°C); ρ 为水的密度(kg/m³); $T_{\text{inside}}(t)$ 为 t 时刻电热水器水箱内的水温(°C); T_{inlet} 为进入水箱的冷水温度(°C); $P(t)$ 为电热水器加热元件在 t 时刻的实时功率(W); η 为电热水器加热元件的能量转化效率; P_0 为加热器加热元件的额定功率; $s(t)$ 为加热元件在 t 时刻的开断状态,关闭时取值为 0,开启时取值为 1。

另外,同体积的电热水器在面积、半径、长度等物理参数上可能有所差异,根据文献[12], E_{loss} 可以表示为式(5)、(6),使得电热水器模型更为精确。

$$E_{\text{loss}}(t+1) = \frac{A_{\text{tank}} \Delta t}{R} [T_{\text{inside}}(t) - T_{\text{am}}] \quad (5)$$

$$T_{\text{inside}}(t+1) = \left(\frac{V_{\text{tank}} - f_{\text{hot}} \Delta t}{V_{\text{tank}}} - \frac{1\,000 A_{\text{tank}} \Delta t}{c\rho V_{\text{tank}}} \right) T_{\text{inside}}(t) + \frac{f_{\text{hot}} \Delta t}{V_{\text{tank}}} T_{\text{inlet}} + \frac{1\,000 \eta P(t) \Delta t}{c\rho V_{\text{tank}}} + \frac{1\,000 A_{\text{tank}} \Delta t}{c\rho V_{\text{tank}} R} T_{\text{am}} \quad (6)$$

其中, A_{tank} 为热水器的表面积(m²); R 为热水器的热阻(m²·°C/W); T_{am} 为室内环境温度(°C)。

将式(2)~(6)代入式(1),整理后得到:

$$T_{\text{inside}}(t+1) = \kappa T_{\text{inside}}(t) + \psi \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{V_{\text{tank}} - f_{\text{hot}} \Delta t}{V_{\text{tank}}} - \frac{A_{\text{tank}} \Delta t}{c \rho V_{\text{tank}}} \quad (8)$$

$$\psi = \frac{f_{\text{hot}} \Delta t}{V_{\text{tank}}} T_{\text{inlet}} + \frac{\eta P(t) \Delta t}{c \rho V_{\text{tank}}} + \frac{A_{\text{tank}} \Delta t}{c \rho V_{\text{tank}}} T_{\text{am}} \quad (9)$$

通过归纳推算可得,当电热水器在 t_0 起始时刻至 t 时刻之间处于开启状态,水箱水温的通项如式(10)、(11)所示。

$$T_{\text{inside}}(t) = \kappa^{\frac{t-t_0}{\Delta t}} T_{\text{inside}}(t_0) + \chi \quad (10)$$

$$\chi = \left(1 - \kappa^{\frac{t-t_0}{\Delta t}}\right) \frac{c \rho f_{\text{hot}} T_{\text{inlet}} + \frac{A_{\text{tank}}}{R} T_{\text{am}} + \eta P_0}{\frac{A_{\text{tank}}}{R} + c \rho f_{\text{hot}}} \quad (11)$$

2.2 电热水器的加热时间模型

用户的用水舒适主要包括温度舒适和时间舒适,即在用户预设用水时刻,水温应满足人体的舒适度。为此本节研究出水温度与水箱内水温的关系,推导出满足人体舒适度时对应水箱内的水温,并提出电热水器加热时间模型,为后文控制策略的制定提供重要依据。

电热水器的出水温度是指水箱中的热水与冷水混合后的温度,根据文献[21],出水温度与热水温度、热水速率、出水速率有关,具体关系为:

$$T_{\text{mix}} = T_{\text{inlet}} + (T_{\text{inside}} - T_{\text{inlet}}) \frac{f_{\text{hot}}}{f_{\text{mix}}} \quad (12)$$

其中, f_{mix} 为冷水和热水混合后的出水速率; T_{mix} 为冷水和热水混合后的温度。

由于用户对电热水器温度的设置习惯差异较大,存在用户将电热水器的温度设置高于其真实需要的温度的可能性。因此,出于公平起见,聚合商在对电热水器群进行控制时,以一般的人体用水舒适温度作为参考。关于用户的一般用水舒适温度及出水流量等参数设定参考文献[22],用户的用水流量 $f_{\text{mix}} = 10 \text{ L/min}$,舒适出水温度 $T_{\text{mix}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$,出水速率和热水速率的比值为 2:1,结合式(12)可得到满足用户舒适用水的热水温度 $T_{\text{com}} = 62 \text{ }^\circ\text{C}$ 。本文将舒适温度差额定义为水箱中热水温度与满足用户舒适用水的热水温度的差值,记作 ΔT ,如式(13)所示。

$$\Delta T = T_{\text{inside}} - T_{\text{com}} \quad (13)$$

另外,为了简化符号,后文电热水器的温度 T 均指代电热水器水箱内的水温。

除了用水的舒适温度,用户的用水时间需求同样是影响用户使用舒适度的重要因素。本文定义加热时间为电热水器水箱中的水从当前温度 $T(t_0)$ 加热到满足用户用水舒适度温度 T_{com} 所需要的时间,记为 t_{heat} ,单位为 min。当水箱中的热水温度高于 T_{com} 时, t_{heat} 值取 0。根据以上定义,可推导得到加热

时间为:

$$t_{\text{heat}} = \Delta t \frac{\ln \left[\frac{T_{\text{com}} - T_{\text{am}}}{T(t_0) - T_{\text{am}}} \right]}{\ln \left(1 - \frac{A_{\text{tank}} \Delta t}{c \rho V_{\text{tank}} R} \right)} = a - k \ln [T(t_0) - T_{\text{am}}] \quad (14)$$

$$k = \frac{\Delta t}{\ln \left(1 - \frac{A_{\text{tank}} \Delta t}{c \rho V_{\text{tank}} R} \right)} \quad (15)$$

$$a = k \ln (T_{\text{com}} - T_{\text{am}}) \quad (16)$$

3 基于 HRTR 的分区差异化控制策略

传统的控制策略以热水器水温与温度设置值的差值为选择指标,忽略了后续时间内的用户使用行为。在基于 CPS 的可再生能源消纳互动架构下,聚合商可对用户的使用时间、当前温度等使用数据进行感知。其中用户的使用时间可以由用户通过聚合商提供的 app 进行自主设定,也可基于马尔科夫等预测模型^[23]根据用户的历史使用数据进行预测。用户的使用信息将为聚合商制定负荷调控策略提供更全面的依据,保证用户获得更舒适的使用体验。另外,对于负荷群的状态排序除了温度方面的因素,还需要考虑用户的使用时间等。对此,本文提出新的电热水器群分区方法及分区差异化控制策略。

3.1 HRTR 的定义

为了更客观地分析各用户使用时间需求的缓急情况,需要对加热时间进行归一化。在此,本文将剩余时间定义为当前时刻 t_0 到开始用水时刻 t_s 之间的时间,记为 t_{residual} ,单位为 min。

$$t_{\text{residual}} = t_s - t_0 \quad (17)$$

HRTR 定义为加热时间与剩余时间的比值:

$$\sigma = \frac{t_{\text{heat}}}{t_{\text{residual}}} = \frac{a - k \ln [T(t_0) - T_{\text{am}}]}{t_s - t_0} \quad (18)$$

若 $\sigma > 1$,则说明当前时刻至用户预约用水时刻之间的剩余时间不足以将水箱中的水加热到 T_{com} ,即用户在预约用水时刻的出水温度无法满足人体舒适度;若 $0 < \sigma < 1$,则说明剩余时间相对于加热时间较为充裕,即使延缓开启电热水器也能满足用户用水的舒适度;若 $\sigma = 0$,则说明水箱中的热水温度高于 T_{com} ,已满足用户用水的舒适度,处于饱和状态。

3.2 基于 HRTR 的电热水器群分区方法

本文将电热水器的使用过程在时间上分为预热和用水 2 个阶段,如图 2 所示。

预热阶段是指从上一用水事件结束时刻到下一用水事件开始时刻。用水阶段是指从用户开始用水时刻至用水结束时刻之间的时间段。为便于表征,下面用 2 个集合 H' 和 U' 分别表示 t 时刻处于预热阶

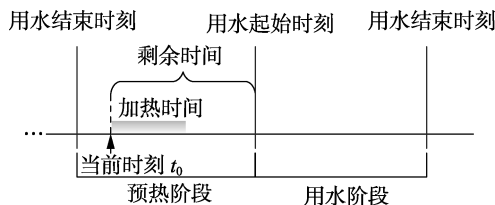


图 2 电热水器的运行阶段示意图

Fig.2 Schematic diagram of EWH operation stages

段和用水阶段的电热水器群:

$$H^t = \{H_1^t, H_2^t, \dots, H_{n_1}^t\} \quad (19)$$

$$U^t = \{U_1^t, U_2^t, \dots, U_{n_2}^t\} \quad (20)$$

其中, n_1 、 n_2 分别为 t 时刻处于预热阶段和用水阶段的电热水器数量, 并且 $n_1 + n_2 = n$ 为总电热水器数量。

H^t 中各个体的温度和使用状态各异, 需进一步对其中的电热水器进行分区。根据 HRTR 和 ΔT 对电热水器进行分区, 包括加热区、待热区和饱和区, 各分区 HRTR 及舒适温度差额的取值范围见表 1。

表 1 电热水器各状态分区对应的状态条件

Table 1 Corresponding status condition of each operation region for EWH

分区名称	HRTR 和舒适温度差额的取值
加热区	$\sigma > 1, \Delta T < 0$
待热区	$0 < \sigma < 1, \Delta T < 0$
饱和区	$\sigma = 0, \Delta T > 0$

以 ΔT 为纵坐标、 σ 为横坐标, 作出电热水器群的状态分布, 并将其划分为加热区、待热区和饱和区, 如图 3 所示。

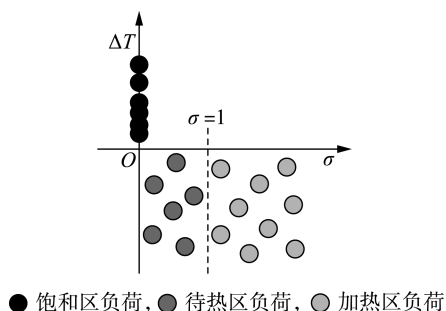


图 3 电热水器预热阶段的空间运行状态分区示意图

Fig.3 Schematic diagram of EWH spatial operation state division at pre-heat stage

分别以 A^t 、 B^t 、 C^t 这 3 个集合表示 t 时刻加热区、待热区、饱和区的电热水器:

$$A^t = \{A_1^t, A_2^t, \dots, A_{m_1}^t\} \quad (21)$$

$$B^t = \{B_1^t, B_2^t, \dots, B_{m_2}^t\} \quad (22)$$

$$C^t = \{C_1^t, C_2^t, \dots, C_{m_3}^t\} \quad (23)$$

其中, m_1 、 m_2 、 m_3 分别为 t 时刻处于加热区、待热区、饱和区的电热水器数量, 且满足 $m_1 + m_2 + m_3 = n_1$ 。

3.3 电热水器群的差异化排序规则

电热水器群响应顺序依次为加热区、待热区、饱

和区, 因各区电热水器群的状态存在差异, 各区内电热水器应结合本区特点进行排序, 具体规则如下。

加热区的电热水器温度低于舒适温度, 并且所需加热时间相比于剩余时间较长, 因此为了保证用户后续预约时刻的使用舒适度, 处于此区的电热水器群排序主要考虑用户使用时间, 排序按 HRTR 进行升序排序, 得到新序列 $A'^t = \{A_1^t, A_2^t, \dots, A_{m_1}^t\}$ 。

待热区相对于加热区的热水器在加热时间上具有更大的可调节范围, 但若仅考虑时间因素, 可能出现某些电热水器温度差额较大却延后开启的情况; 反之, 若仅考虑温度因素, 可能存在某些电热水器剩余时间较少却延后开启的情况。HRTR 是同时考虑温度及可调时间的综合指标, 但是由于实际运行过程中, 负荷温度的分布区间相对较小, 通常集中在 60°C 左右, 差异性较难体现。因此为提升温度因素的可辨识度, 在调控过程中引入温度加速因子, 此处采用舒适温度差额。以 HRTR 和舒适温度差额的乘积作为处于待热区电热水器的排序指标, 得到新序列 $B'^t = \{B_1^t, B_2^t, \dots, B_{m_2}^t\}$ 。

饱和区的电热水器温度均不低于舒适温度, 不存在加热时间不足的问题, 因此对该区电热水器按 ΔT 进行升序排序, 得到新序列 $C'^t = \{C_1^t, C_2^t, \dots, C_{m_3}^t\}$ 。

综上, 最终得到的电热水器群调控序列为:

$$H^t = \{A_1^t, A_2^t, \dots, A_{m_1}^t, B_1^t, B_2^t, \dots, B_{m_2}^t, C_1^t, C_2^t, \dots, C_{m_3}^t\} \quad (24)$$

3.4 电热水器群调控策略的实现流程

在基于 CPS 可再生能源消纳互动架构下, 本文提出的电热水器控制策略在用户侧的实现过程主要包括状态感知、实时分析、科学决策、精确执行 4 个环节, 其实现流程如图 4 所示。

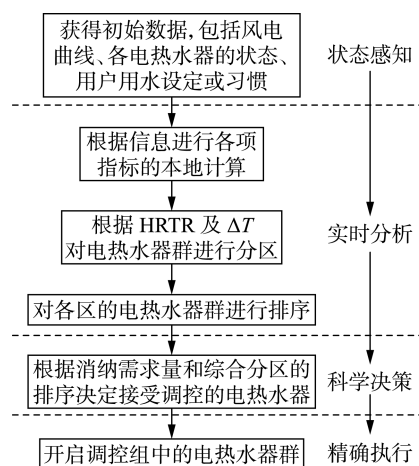


图 4 基于 CPS 可再生能源消纳互动架构的用户侧控制策略实现流程

Fig.4 Flowchart of control strategy at user side under renewable energy accommodation interaction framework based on CPS

a. 状态感知。状态感知是调控的基础, CPS 架构下各电力负荷和负荷聚合商可实现 (近) 实时的

数据交互。电热水器的当前温度可以通过热敏传感器和内嵌芯片处理获得;用水时间和预设温度等用户使用偏好可由用户自主设定或通过用户行为预测获得;风电的消纳需求则在可再生能源电厂与负荷聚合商达成交易后,由交易中心提供和发布。

b. 实时分析。实时分析将初始数据进一步转化为可操作的信息,主要包括设备状态数据的本地化处理和聚合商对电热水器群的排序。

目前的智能电热水器负荷基于其嵌入式可编程芯片拥有一定的数据处理能力,可对初始数据进行本地计算,如计算出热水器 HRTR 和温度差额的值,并通过互联网将计算结果传送至聚合商的云平台。

聚合商根据用户上传的负荷状态数据,基于 3.2 节的分区规则对电热水器群进行分区,并根据 3.3 节的排序规则对分区内电热水器对象进行排序,获得电热水器群的调控序列 H^t 。

c. 科学决策。聚合商从序列 H^t 中依次挑选 x 台电热水器,组成最终的调控组 $F^t = \{F_{H^t(1)}^t, F_{H^t(2)}^t, \dots, F_{H^t(x)}^t\}$,使得 F^t 内的电热水器功率在 t 时刻尽量贴近风电曲线,即电热水器群的总功率应满足式 (25)。

$$\left| \frac{\sum_{i \in U^t} P_i(t) + \sum_{i \in F^t} P_i - P_{\text{demand}}(t)}{P_{\text{demand}}(t)} \right| \leq \varepsilon \quad (25)$$

其中, P_i 为电热水器 i 的额定功率; P_{demand} 为风电的消纳需求量; ε 取 0.05。

d. 精确执行。确定最终需要调控的电热水器群后,聚合商通过互联网向所有电热水器发送控制指令,使得调控组 F^t 内的电热水器处于开启状态,其余电热水器保持其上一时刻的状态不变。综上, t 时刻的开关变量 $s_i(t)$ 如式 (26) 所示。

$$s_i(t) = \begin{cases} 0 & i \notin F^t, T_{\text{inside},i}(t) \geq T_{\text{set},i} \\ 1 & i \in F^t \\ s_i(t-1) & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

4 实验仿真及分析

4.1 实验场景设置

为了验证本文控制策略在提高用户舒适度和能源消纳效率上的有效性,本节对包括本文策略内的 3 种控制策略下的聚合热水器消纳风电控制进行仿真,各策略分别如下。

策略 1: 基于 HRTR 的分区差异化排序的控制策略,即本文提出的控制策略。

策略 2: 基于剩余时间的控制策略,下文简称剩余时间法。该策略以剩余时间为排序指标,优先开启临近使用的电热水器进行风电消纳。

策略 3: 文献 [16] 中基于 SQ 的控制策略,下文

简称 SQ 法。该策略优先开启“关闭群”中温度差额较小的负荷进行风电消纳。

热水器的总数设为 1 000 台,电热水器的物理参数设置及风电出力曲线分别如附录中表 A1 和图 A1 所示。用户用水次数、起始时间、持续时间均由随机函数 rand 生成。仿真时段为 12:00—24:00,仿真步长为 1 min。

4.2 评价指标定义

为了评价 3 种控制策略的效果,本文提出消纳匹配率及用户用水舒适度 2 个评价指标,定义如下。

a. 消纳匹配率。

本文将消纳匹配率定义为风电出力曲线与控制策略下消纳曲线间的拟合率,记作 k_{ac} ,用于评估控制策略的消纳效果,计算公式如式 (27)、(28) 所示。若 k_{ac} 越趋近 1 则表明控制策略的消纳曲线与风电出力曲线的拟合程度越高,消纳匹配率越高。

$$k_{ac} = \left\{ 1 - \frac{\sum_{t=0}^{T_a} [P_w(t) - P(t)]^2}{\sum_{t=0}^{T_a} [P_w(t) - \bar{P}(t)]^2} \right\} \times 100\% \quad (27)$$

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{T_a} \sum_{t=0}^{T_a} P(t) \quad (28)$$

其中, T_a 为电热水器进行消纳的总时间长度; $P_w(t)$ 为 t 时刻风电出力; $P(t)$ 为 t 时刻电热水器群总功率。

b. 用户群用水温度达标率。

本文将用水的舒适度分为客观舒适度和个体化舒适度,采集用水起始时刻的水温作为舒适度检验根据。客观舒适度指水温在使用时达到人体基本舒适需求,而个体化舒适度则指水温达到用户特定的舒适度需求。根据文献 [22],人体的客观舒适用水温度为 40℃,在用户用水起始时刻的水温应达到基本的人体舒适用水温度 T_{com} ,其次还要达到用户设定的用水温度 T_{set} 。针对以上 2 个需求,本文定义用户 i 的舒适温度达标率、预设温度达标率 2 个指标,并设置达标率上限为 1,分别如式 (29)、(30) 所示。

$$k_i^{com} = \max \left(\frac{\sum_{t \in I} \frac{T_i^t}{T_{com}} \times 100\%}{N_i}, 1 \right) \quad (29)$$

$$k_i^{set} = \max \left(\frac{\sum_{t \in I} \frac{T_i^t}{T_{set}} \times 100\%}{N_i}, 1 \right) \quad (30)$$

其中, N_i 为一天内用户 i 用水的总次数; I 为用户所有用水起始时刻的集合; T_i^t 为用户 i 用水起始时刻的电热水器温度; T_{set} 为用户 i 的预设温度。

c. 能量损耗率。

电热水器存在自然散热的现象,利用电热水器

群对风电进行消纳,将在一定程度增加电热水器的能量损耗。因此在评价控制策略时,还需要对电热水器群的能量损耗进行统计。本文定义电热水器群的能量损耗率为其总能量损耗与电热水器群的实际总功率之比,记作 k_{loss} ,如式(31)~(33)所示。

$$k_{\text{loss}} = \frac{E_{\text{loss}}}{\int_0^{T_a} P(t) dt} \times 100\% \quad (31)$$

$$E_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{n_1+n_2} E_{\text{loss},i} \quad (32)$$

$$E_{\text{loss},i} = \int_{t \in I} E_{\text{loss},i}(t) dt \quad (33)$$

其中, E_{loss} 为电热水器群的总能量损耗; $E_{\text{loss},i}$ 为单台电热水器 i 的能量损耗。

4.3 仿真结果及分析

4.3.1 单台电热水器的运行情况

在电热水器群中随机抽出一台电热水器,观察其在3种不同策略下一天内的温度及开关状态变化,运行情况分别如图5中(a)~(c)所示。

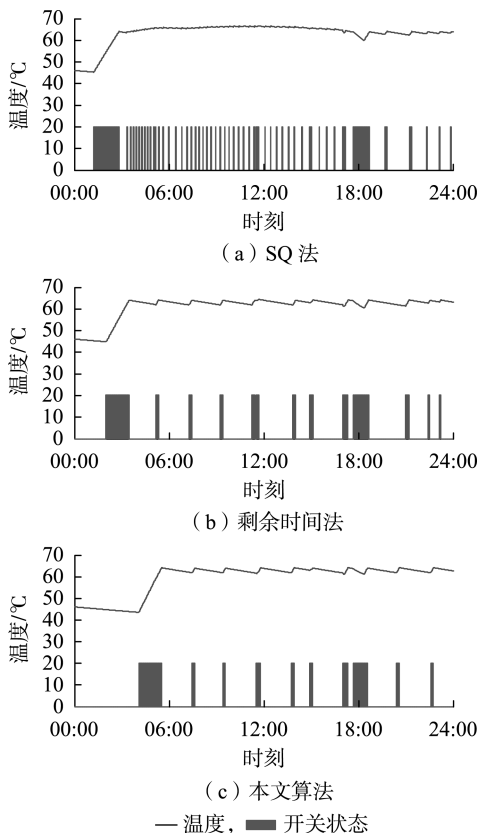


图5 不同控制策略下一台电热水器运行情况

Fig.5 Operation condition of an EWH under different control strategies

由图可见,SQ法下的电热水器开关状态改变频繁,而剩余时间法和综合分区法下的电热水器开停次数分别为13次与10次,均处于可接受范围内。SQ法在调控时忽略了用户的使用时间,只根据其温

度进行调控,导致电热水器频繁开停,对电热水器的使用寿命造成不良影响。同样在满足用户用水温度的前提下,剩余时间法和本文算法均考虑用户的使用时间,有效地降低了电热水器的开停次数。此外,本文算法通过对电热水器群进行详细分区和差异化排序,进一步降低了电热水器的开停频率。

4.3.2 电热水器群的整体运行情况

对3种控制策略下电热水器群的总功率进行统计,并与风电出力进行对比,结果如图6所示。由图可见,3种控制策略下的曲线变化趋势均与风电曲线相同,其中本文算法和剩余时间法的消纳曲线更接近风电曲线,而SQ法的消纳曲线明显较低。

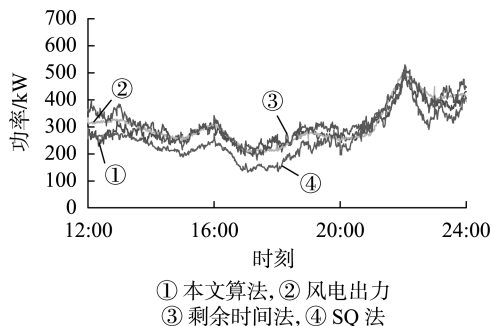


图6 3种控制策略下的消纳曲线及风电出力曲线

Fig.6 Consumption curves of three control strategies and wind power output curve

传统SQ法只考虑温度差额因素,易陷入局部最优的调控。尤其在经过一段时间的风电消纳后,大部分电热水器的水温接近预设值,电热水器群剩余的消纳裕度较低,导致后续消纳能力不足,电热水器群的总功率将无法达到风电消纳需求量。而本文算法与剩余时间法均考虑了用户的使用时间因素,使得电热水器群在时间上的消纳量分配更合理、持续。

为了进一步分析3种控制策略的消纳效果,对电热水器群的消纳匹配率和能量损耗率进行统计,得到如表2所示的结果。可以发现,本文算法在能源消纳匹配率和降低能量损耗率方面明显优于SQ法,且优于剩余时间法。这是由于本文算法和剩余时间法在制定电热水器控制策略时,均考虑用户的使用时间,使得接近使用时刻的电热水器优先开启,减短了电热水器的自然散热时间,有效地降低了电热水器群的能量损耗。

表2 3种控制策略下的消纳效率及整体用水舒适度

Table 2 Consumption efficiency and comprehensive water usage comfortableness of three control strategies

控制策略	消纳匹配率/%	能量损耗率/%
SQ法	46.84	23.97
剩余时间法	78.68	19.53
本文算法	79.77	18.48

另外,本文算法根据各分区的特点对电热水器群制定排序规则,同时考虑用户的使用时间和电

水器的温度差额,所以电热水器群舒适温度和预设温度达标率均明显高于另外2种控制方法,3种控制策略下的用户温度达标率的分布如图7所示,统计特征如表3所示。其中,由于多数用户设置的电热水温度略高于人体基本用水温度,SQ法的舒适温度达标率高于剩余时间法。

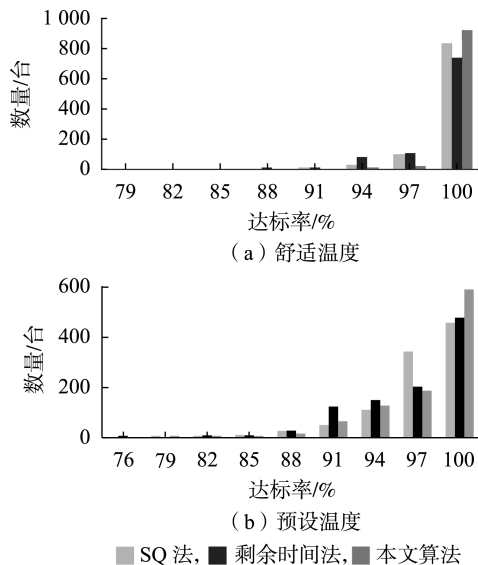


图7 不同控制策略下的舒适温度及预设温度达标率分布图

Fig.7 Standard reaching rate of comfortable temperature and presetting temperature for different control strategies

表3 不同控制策略下的舒适温度及预设温度达标率的统计特征

Table 3 Statistical characteristics of standard reaching rate of comfortable temperature and presetting temperature for different control strategies

控制策略	预设温度达标率		舒适温度达标率	
	期望/%	方差	期望/%	方差
SQ法	96.12	0.331 7	98.02	0.035 2
剩余时间法	95.70	0.041 4	98.62	0.022 7
本文算法	96.78	0.037 7	99.40	0.018 9

综上可得,在基于CPS的可再生能源消纳互动架构下,聚合商可获得多元化的信息,结合用户的使用时间和温控负荷状态进行差异化分区调控,在更高效利用能源的同时,可保证用户的使用舒适度,为电网-用户互动下的负荷调控策略制定提供参考依据。

5 结论

本文在CPS的可再生能源消纳互动架构下提出电热水器的温度演变和加热时间模型,并在该模型的基础上提出HRTR的概念。在风电消纳场景下,对基于HRTR的分区差异化消纳可再生能源策略进行仿真分析后可发现,基于HRTR对电热水器群进行分区和差异化排序,综合考虑用户使用时间和温控负荷状态对负荷群进行调控,可有效提高能源消纳效率及用户舒适度。为了优化能源消纳效率

和用户的使用舒适度,除了用户的使用信息感知以外,还需考虑多元化市场环境下的影响因素,如用户的动态补贴等,因此在后续研究中需在本文基础上综合考虑经济性等市场化问题,以进一步提升调控策略的合理性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱凌志,陈宁,韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):29-34.
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [2] 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.
- [3] 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):20-28.
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): 20-28.
- [4] 信息物理系统白皮书[R]. 北京:工业和信息化部,2017.
- [5] 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.
- [6] 王东,曾沅,穆云飞,等. 采用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.
- [7] 李群英,冯利民,许宇辉,等. 基于水源热泵技术的风电消纳模式[J]. 电力系统自动化,2012,36(17):25-27.
LI Qunying, FENG Limin, XU Yuhui, et al. Accommodation mode of wind power based on water source heat pump technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 25-27.
- [8] 艾欣,赵阅群,周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1596-1603.
AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1596-1603.
- [9] XU Z, DIAO R, LU S, et al. Modeling of electric water heaters for demand response: a baseline PDE model [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2203-2210.
- [10] DIAO R, LU S, ELIZONDO M, et al. Electric water heater modeling and control strategies for demand response [C] // Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [11] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1318-1327.
- [12] SHAAD M, MOMENI A, DIDUCH C P, et al. Parameter identifica-

- tion of thermal models for domestic electric water heaters in a direct load control program [C] // Electrical & Computer Engineering, Montreal, Canada; IEEE, 2012; 1-5.
- [13] NEL P J C, BOOYSEN M J, VAN DER MERWE A B. A computationally inexpensive energy model for horizontal electrical water heaters with scheduling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 48-56.
- [14] LU N, CHASSIN D P. A state-queueing model of thermostatically controlled appliances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1666-1673.
- [15] 高赐威, 李倩玉, 李扬, 等. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555. GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang, et al. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [16] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589. ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [17] 刘萌, 褚晓东, 张文, 等. 基于多样性保持的空调负荷群调度控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3674-3682. LIU Meng, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Dispatch and control strategies for air-conditioning load groups based on maintenance of load diversity [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3674-3682.
- [18] 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.
- [19] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9. ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaoshong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [20] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028. WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [21] BOOYSEN M J, ENGELBRECHT J A A, MOLINARO A. Proof of concept; large-scale monitor and control of household water heating in near real-time [C] // International Conference on Applied Energy, Pretoria, South Africa: [s.n.], 2013: 1-4.
- [22] 吴俊奇, 乔晓峰, 李庚, 等. 国内外用水舒适度研究进展 [J]. 给水排水, 2016, 42(5): 136-141. WU Junqi, QIAO Xiaofeng, LI Geng, et al. Research progress of the comfort degree of water use in China and abroad [J]. Water and Wastewater Engineering, 2016, 42(5): 136-141.
- [23] 张玉成, 徐大纹, 王筱娟. 基于加权马尔可夫链的主动用户行为预测模型 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(10): 3334-3337. ZHANG Yucheng, XU Dawen, WANG Xiaojuan. Forecasting model of active user behavior based on weighted Markov chain [J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(10): 3334-3337.

作者简介:



刘向军

刘向军 (1970—), 女, 河北唐山人, 副教授, 博士, 主要从事信号处理、嵌入式系统与智能控制等领域的研究与教学工作 (E-mail: lxjun@ncepu.edu.cn);

叶秋子 (1994—), 女, 广东广州人, 硕士研究生, 主要研究方向为需求侧管理、需求响应 (E-mail: ye_qzi@ncepu.edu.cn);

曾璐琨 (1992—), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 主要研究方向为需求侧管理、需求响应 (E-mail: 13811528862@163.com);

李彬 (1983—), 男, 北京人, 副教授, 博士, 主要研究方向为需求侧管理、电力系统自动化与信息化等 (E-mail: direfish@163.com);

孙毅 (1972—), 男, 辽宁朝阳人, 教授, 博士, 主要研究方向为需求侧管理、电力系统自动化与信息化等 (E-mail: sy@ncepu.edu.cn)。

Wind power accommodation strategy of aggregated electric water heater based on CPS interaction frame

LIU Xiangjun¹, YE Qiuzi¹, ZENG Lukun¹, LI Bin¹, SUN Yi¹, YANG Bin², MA Yonghong¹

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

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: It can effectively accommodate renewable energy by controlling the aggregated thermostatically controlled loads. Aiming at the problem of user comfort and energy consumption efficiency in the scene of smart aggregated thermostatically controlled loads accommodating renewable energy, a mapping model of typical thermostatically controlled load, i.e. EWH (Electric Water Heater) is proposed under the interaction frame of renewable energy accommodation based on cyber-physical system. On the premise of considering the perception of user behaviour information, a partition method of EWH group based on HRTR (Heat-Residual Time Ratio) and a control strategy of renewable energy accommodation with the consideration of partition difference are proposed. The simulation and comparison of different control strategies show that the proposed strategy can better accommodate renewable energy and ensure high user comfort.

Key words: CPS; renewable energy accommodation; thermostatically controlled load; load control

附录：

表 A1 热水器主要仿真参数设置

Table A1 Main simulation parameters setting of EWH

符号	符号含义	取值
c	水的比热容	$4.2\times10^3\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$
ρ	水的密度	10^3 kg/m^3
T_{inlet}	入口水温	18°C
P	加热元件 额定功率	3000W
η	能量转化效率	90%
Δt	量化间隔	60s
V_{tank}	热水器的容积	150L
r	热水器的半径	0.219 m
L	热水器的长度	1.0 m
T_{am}	室内温度	25°C
R	热水器的热阻	$25\text{ m}^2\cdot^{\circ}\text{C/W}$
f_{hot}	出水速率	$\frac{1}{60}\text{ L/s}$

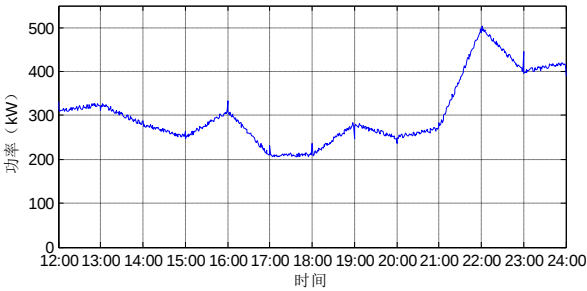


图 A1 风电出力曲线

FigA1 Wind power output curve