

民用可控负荷参与需求响应的控制策略

王燕¹, 杨秀媛^{1*}, 徐剑锋², 卜思齐³, 徐智蔷⁴

(1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京市 海淀区 100192;

2. 国网黑龙江省电力有限公司, 黑龙江省 哈尔滨市 150090;

3. 香港理工大学电机工程系, 香港特别行政区 九龙 999077;

4. 英国南安顿大学物理工程学院, 英国 南安普顿 SO171BJ)

Control Strategy of Civil Controllable Load Participating in Demand Response

WANG Yan¹, YANG Xiuyuan^{1*}, XU Jianfeng², BU Siqi³, XU Zhiqiang⁴

(1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Harbin 150090, Heilongjiang Province, China; 3. Department of Electrical Engineering, The Hongkong Polytechnic University, Kowloon 999077, Hong Kong S.A.R., China; 4. School of Physical Sciences and Engineering, University of Southampton, Southampton SO171BJ, UK)

摘要: 在电力负荷高峰持续增长和新能源大规模接入电网的发展趋势下, 为了实现新能源消纳、平抑电网波动, 可采取需求侧民用可控负荷参与需求响应的手段进行调控, 特别是对家庭可控负荷的控制, 从单一家庭控制扩展至多个家庭, 最终实现大规模负荷群控制。对近年来需求响应模式、负荷分类建模和控制策略 3 方面的研究成果进行了总结, 由负荷用电特点总结出各类负荷通用模型; 着重对比分析多目标优化控制策略、分层控制策略、多时间尺度控制策略和优先级控制策略的特点和不足; 指出了不同控制策略在可控负荷参与需求响应调控中的进一步研究方向, 并结合我国国情, 从民用可控负荷参与需求响应调控的视角对需求响应的发展前景进行了展望。

关键词: 新能源消纳; 电力系统; 需求响应; 可控负荷; 控制策略; 智能电网

ABSTRACT: Under the development trend of continuous growth of the peak of power load and large scale renewable energy penetration, in order to achieve renewable energy accommodation and stabilize power grid fluctuation, the means of demand side civil controllable load participating in demand response can be adopted for regulation. In particular, the control of family controllable load is extended from single family control to multiple families, and finally large-scale load group control can be realized.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377011)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377011).

Firstly, the research results of demand response mode, load classification modeling and control strategy in recent years were summarized, and the general models of various loads were summarized based on the characteristics of load power consumption. Then, the characteristics and shortcomings of multi-objective optimization control strategy, hierarchical control strategy, multi-time scale control strategy and priority control strategy were analyzed. Finally, the further research direction of different control strategies in the control of demand response was pointed out. And combined with the situation of our country, the development prospect of demand response was prospected from the perspective of civil controllable load participating in demand response regulation.

KEY WORDS: renewable energy accommodation; power system; demand response; controllable load; control strategy; smart grid

0 引言

近年来, 我国电力负荷峰值增长速度较快, 负荷峰值不断刷新, 负荷曲线尖峰化趋势明显, 导致在负荷高峰时段电力供需不平衡问题日益突出, 电网运行成本增加。而且电能终端能源消费中比重不断提高, 《中国电力展望报告 2019》预测, 2025、2035 和 2050 年全社会用电量将分别达到 9.4 万亿~9.8 万亿、11.5 万亿~12.5 万亿和 12.4 万亿~13.9 万亿 kW h。

同时, 依赖传统化石能源的生产模式正在改变, 能源供给正朝着低碳化、清洁化发展, 清洁能源成为主体能源是大势所趋^[1]。在此背景下, 我国风电装机容量呈现逐年上升趋势, 2019 年风电装机容量达到了 2010 年的 7.1 倍^[2-3]。据国网能源研究院预测, 到 2050 年, 75%以上的发电用能来自清洁能源, 其中以风电、光伏为代表的新能源发电将成为第一大电源, 发电量占比达到 40%左右。风电提供清洁电能的同时, 自身的波动性和间歇性等给电力系统实现供需平衡带来了巨大挑战, 仅仅依靠传统的发电侧调节方法来调节电力供应的方式已经无法适应高比例可再生能源接入电网的供需调节需求^[4-6]。因此采用新型供需调节方式应对大规模新能源平稳地接入电网具有重大现实意义。

需求响应(demand response, DR)是一种新型的供需调节方式, 可以使用户侧可控负荷资源来替代电网供应侧资源^[7]。需求响应是指电力用户根据电力市场的价格信号或激励信号做出响应, 改变原有的电力消费计划, 以应对负荷高峰的出现, 平抑负荷波动、促进新能源消纳^[8], 提高电力系统运行的安全性和稳定性。并且, 进行需求响应具有显著的经济效益和社会效益。对于电力用户, 可以减少电费支出; 对于电网企业, 可以削减高峰用电负荷, 在电力供应紧张时有效缓解限电压力, 可以提高电网设备利用率, 促进电网安全、经济运行, 延缓或减少电网建设所需投资; 对于社会, 可以减少一次能源的消耗量, 减少对发、供电资源的占用, 从而促进环境保护与资源节约。

同时, 国际能源署指出, 需求响应市场潜力巨大, 应鼓励现有电力市场提出新的商业模式, 如聚合^[9]、虚拟电厂和其他分布式能源平台等。新业务模型为实现需求响应提供了广阔前景, 在需求响应项目中建筑物负荷参与需求响应发展潜力巨大。

在我国的未来规划期内, 负荷用电占比方面, 虽然工业部门仍然是主要的电力需求部门, 但是其比例逐年降低。与此同时, 建筑物用电逐年攀升且增长迅速, 在 2050 年将超过工业部门, 约占

全社会用电量的 43%^[10]。建筑可分为 3 类: 工业建筑、商业建筑以及民用建筑。在过去, 需求响应主要面向工业用户和大型商业用户, 因为工业用户和商业用户统一化管理水平高, 可快速准确地对需求响应信号做出反应, 且改变的用户电力需求大^[11]。而对于居民用户, 单个用户可调节负荷容量小, 无法满足参与需求响应的最低容量需求, 但居民用户数量远大于工业与商业用户, 集成后的负荷功率也不容小视。

随着智能电网^[12]技术在我国的发展, 智能化的家电负荷具备双向通信能力^[13], 为民用负荷参与需求响应提供了技术支撑。首先对单个家庭可控负荷实现精准控制参与需求响应, 然后扩展至多个家庭, 实现大规模的可控负荷集群控制^[14], 使民用负荷成为一种理想的需求侧可参与需求响应的资源。通过合理地控制民用负荷中的可控负荷参与需求响应, 对改善居民负荷功率曲线、降低电力系统建设运行费用、提高运行效率、促进新能源消纳具有重要意义。

基于电力负荷峰值增长迅速以及未来新能源将逐步替代传统一次能源发电的背景, 本文介绍了需求响应模式以及民用负荷分类, 详细说明了可控负荷控制策略的研究现状, 并对控制策略进行分类总结, 归纳了 4 种典型策略的特点和不足, 对未来研究方向进行了展望。

1 需求响应模式及负荷分类

1.1 需求响应原理

需求响应指电力用户根据电力价格、电力政策的动态改变而响应电力供应, 暂时改变其固有的用电习惯, 以达到减少或推移某时段的用电负荷, 保证电网系统稳定性的行为^[15], 原理如图 1 所示。

1.2 需求响应模式

根据响应信号性质不同, 需求响应可划分为基于价格的需求响应和基于激励的需求响应。

1.2.1 基于价格的需求响应

基于价格的需求响应是指用户根据收到的价格信号相应地调整电力需求的响应。价格机制是市场机制的核心, 公平合理的电价能够提供准确的经济信号, 实现电力资源的优化配置。基于价

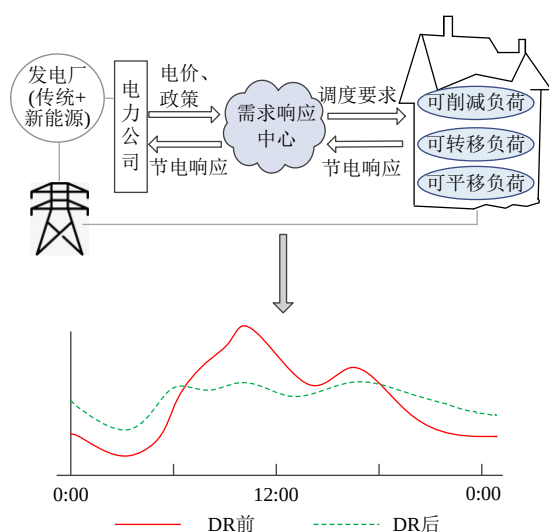


图1 需求响应概念图

Fig. 1 Concept map of demand response

格的需求响应一般包括以下3种方式：分时电价(time-of-use, TOU)^[16]、实时电价(real time pricing, RTP)^[17]和尖峰电价(critical peak pricing, CPP)。对3种电价方式需求响应特点和功能总结如表1所示。

表1 基于价格的需求响应总结

Tab. 1 Summary of price based demand response

类型	特点及功能
分时电价	实现难度低，更新周期长，反映较长周期内电能成本变化
实时电价	更新周期较短，反映电力系统在短周期内的供电成本变化
尖峰电价	机制新，实现难度大，可应对紧急情况出现，可避免价格风险

1.2.2 基于激励的需求响应

基于激励的需求响应是指需求响应实施机构根据电力系统供需状况制定相应政策，用户在系统需要或电力紧张时改变用电状态，以此获得直接补偿或其他时段的优惠电价的响应。用户获得激励的方式有独立于现有电价政策的直接补偿以及在现有电价基础上给予折扣优惠等。基于激励的需求响应分为以下5种：直接负荷控制(direct load control, DLC)、可中断负荷(interruptible load, IL)、紧急需求响应(emergency demand response, EDR)、需求侧竞价(demand side bidding, DSB)和辅助服务项目(ancillary service program, ASP)。各需求响应的说明如表2所示。

表2 基于激励的需求响应总结

Tab. 1 Summary of incentive based demand response

类型	说明
直接负荷控制	用电高峰或供电紧张时，远程控制或者关闭用户的用电负荷。给予用户一定的中断补偿
可中断负荷	电网高峰时段，根据与供电公司签订的合同，用户主动中断部分用电。未履约，将受到处罚
紧急需求响应	电网出现紧急情况时，参与用户按照指令主动削减负荷。EDR是自愿参与的，不参与不受罚
需求侧竞价	用户通过竞价或者合同订购的方式参与DR(日前市场DR、实时市场DR)。参与日前市场是强制性的，参与实时市场是自愿的
辅助服务项目	用户提供削减负荷作为电网运行备用，参与用户在响应速度、响应容量等方面有条件限制

1.3 民用负荷的分类

1.3.1 负荷具体分类

常规上，许多用电负荷需求必须随时满足，这是一种“刚性”特征，不可干预调节，此类负荷称之为“不可控负荷”。但相对来说，有些负荷可以根据需要在一定的范围内进行调整，称为“可控负荷”^[18]。民用负荷具体分类如图2所示。

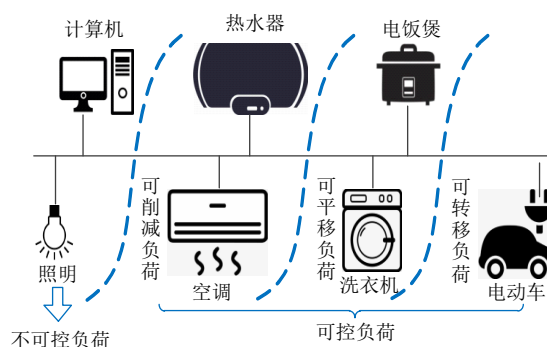


图2 民用负荷分类

Fig. 2 Classification of civil load

1.3.2 不可控负荷

不可控负荷的运行状况不可随意改变，其断电会给用户的生活造成较大影响，如照明、计算机等家电负荷。居民用户不会因为电价高、花费过大，而去改变此类负荷的运行时间。

1.3.3 可控负荷

可控负荷也可称之为可调节负荷，用电时间及规律较为稳定，且其短时间断电几乎不影响居民正常生活，便于参与DR控制。可基于电价和新能源发电情况，积极主动参与电网运行控制，灵活地改变和选择自身的运行情况。可控负荷可

基于电价的模式,由电价较高的时段转移到电价较低的时段运行;也可以基于有序用电的模式,从新能源发电较少的时段转移到新能源发电较多的时段。总之,通过对可控负荷的控制可提高电网的运行效率。但是可控负荷的控制和转移必须满足其运行条件,而且应最大限度地满足居民的正常生活的需求。

根据可控负荷的用电特点分为以下3类:

1) 可削减负荷。可承受一定中断或降功率、减少时间运行的负荷,根据供需情况对其进行部分或全部削减,如空调、热水器^[19],可以通过设定温度的方式对其用电功率进行削减调节^[20]。该类负荷的运行特性为

$$\begin{cases} \theta_{in}^{t+1} = \theta_{in}^t \cdot e^{-\Delta t/\xi} + R_{eq} \cdot q_a^t \cdot K_X \cdot (1 - e^{-\Delta t/\xi}) + \\ \theta_{out}^t \cdot (1 - e^{-\Delta t/\xi}), \forall t \in [t_a^s, t_a^e - 1] \\ \theta_a^{\min} \leq \theta_{in}^t \leq \theta_a^{\max}, \forall t \in [t_a^s, t_a^e] \\ q_a^{\min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{\max} \cdot s_a^t, q_a^{\min} < q_a^{\max}, \forall t \in [t_a^s, t_a^e] \\ s_a^t = 0, \forall t \notin [t_a^s, t_a^e] \\ \sum_{\tau=\tau+1}^{\tau+H_a} s_a^\tau \geq H_a \cdot (s_a^{\tau+1} - s_a^\tau), \tau \in [t_a^s - 1, t_a^e - H_a] \\ \sum_{t=t_a^s}^{t_a^s+\lambda_a} s_a^t \geq 1, \lambda_a = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_{in}^t 为房间内的温度; θ_{out}^t 为房间外的温度; R_{eq} 为房间的等效热阻; q_a^t 为设备功耗; K_X 为电能转化系数; 常数 $\xi = M_{air} \cdot C \cdot R_{eq}$, 其中 M_{air} 是房间内的空气质量, C 是常压下的空气热容量; Δt 为时间间隔; $\theta_a^{\min}$ 、 $\theta_a^{\max}$ 分别为室温下限与上限; s_a^t 为 0-1 变量, 值为 1 表示用电设备开启, 值为 0 表示用电设备关闭; $q_a^{\min}$ 、 $q_a^{\max}$ 为设备功耗上下限; $[t_a^s, t_a^e]$ 表示设备的可运行区间; H_a 为设备运行的持续时间段; λ_a 为用户提前设置的最大延迟时间, 对于不可延迟设备, λ_a 为 0。

2) 可转移负荷。用电时段的用电量可灵活调节, 用电时段允许中断且持续时间不固定, 只需满足转移前后的负荷需求总量不变, 如电动汽车这种具有储能性质的负荷^[21-22], 其运行特性可表

示为

$$\begin{cases} b_a^{t+1} = K_{CWDS}^1 q_a^t + (1 - K_{CWDS}^2) b_a^t, \forall t \in [t_a^s, t_a^e - 1] \\ K_a^{\min} B_c = E_a^{\min} \leq b_a^t \leq E_a^{\max} = K_a^{\max} B_c, \\ \forall t \in [t_a^s, t_a^e] \\ q_a^{\min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{\max} \cdot s_a^t, q_a^{\min} < q_a^{\max} \\ s_a^t = 0, \forall t \notin [t_a^s, t_a^e] \\ E_a^{t_e} \geq E_a^{t_a} \end{cases} \quad (2)$$

式中: b_a^t 为 t 时段电池的电能储存量; K_{CWDS}^1 为电池电能消耗与电能存储之间的转化系数; K_{CWDS}^2 为电池漏电系数; B_c 为电池容量; $K_a^{\min}$ 和 $K_a^{\max}$ 分别为设备储能上下限选择系数; $E_a^{t_e}$ 表示优化周期结束时储能状态; $E_a^{t_a}$ 表示储能限定值; $E_a^{\min}$ 、 $E_a^{\max}$ 分别为储能下限和上限。

3) 可平移负荷。用电时段灵活性强, 但是工作期间不可中断, 可根据此类负荷可运行时间范围合理规划负荷开始运行的时间, 优化家庭用电管理。如洗衣机、洗碗机、电饭煲等。其运行特性可由式(3)表示:

$$\begin{cases} q_a^{\min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{\max} \cdot s_a^t, q_a^{\min} = q_a^N = q_a^{\max} \\ s_a^t = 0, \forall t \notin [t_a^s, t_a^e] \\ \sum_{\tau=\tau+1}^{\tau+H_a} s_a^\tau \geq H_a \cdot (s_a^{\tau+1} - s_a^\tau), \tau \in [t_a^s - 1, t_a^e - H_a] \\ \sum_{t=t_a^s}^{t_a^s+\lambda_a} s_a^t \geq 1, 0 < \lambda_a < t_a^e - t_a^s - H_a \end{cases} \quad (3)$$

式中 q_a^N 为设备额定能耗。

2 需求响应控制策略

需求响应策略的制定与需求响应对象、需求响应模式等有关。针对不同的控制对象特性, 采用不同的控制策略, 通过对需求侧负荷的调控改善用户用电习惯, 达到降低电网最大负荷、系统装机容量, 减少运行费用的目标。

2.1 多目标优化控制策略

合理进行需求响应可实现新能源的消纳、改善负荷曲线、减少用电费用等目的。显然, 如何实现需求响应效果最优是一个典型的多目标优化

问题(multi-objective optimization problem, MOP)。一般的 MOP 由 n 个变量参数、 m 个目标函数和 k 个约束条件组成，目标函数、约束条件与变量之间是函数关系，数学定义如下^[23]：

$$\begin{cases} \min y = F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \\ \text{subject to } e(x) = (e_1(x), e_2(x), \dots, e_k(x)), x \in \Omega \\ \text{where } x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\} \end{cases} \quad (4)$$

多目标优化问题涉及到多个目标的优化，这些目标并不是独立存在的，它们往往是通过决策变量耦合在一起且处于相互竞争的状态，而且每个目标具有不同的单位和量纲，因此很难客观地评价多目标问题的解。它们的竞争和复杂性使得对其优化变得十分困难。在民用可控负荷参与需求响应的研究中，不同学者研究的侧重点不同，因此目标函数也不同，需求响应多目标优化控制策略，通常先确定目标函数以及约束条件，在此基础上建立多目标优化的、民用可控负荷参与需求响应的需求侧负荷模型。

以文献[24]为例，该文献以平抑电网负荷波动和楼宇用户用电成本最小为目标，采用将多目标优化问题转化为单目标优化问题的方式进行求解，具体目标函数和约束条件如下。

1) 目标函数。

以平抑负荷波动为目标，目标函数为

$$F_1 = \min \sum_{t=1}^T (P_{L,t} - \sum_{i=1}^n P_{i,t} + \sum_{j=1}^m P_{j,t}) \quad (5)$$

式中： T 为全天划分时段数； $P_{L,t}$ 为 t 时段日基础不可调负荷功率，可通过负荷预测得出； n 为楼宇内分布式电源数量； $P_{i,t}$ 为第 i 个分布式电源在第 t 个时段的输出功率，包含风力发电、光伏电池及电动汽车放电等功率； m 为楼宇内可控负荷数量； $P_{j,t}$ 为第 j 个可控负荷在第 t 个时段消耗的有功功率，包含空调、照明设施及电动汽车充电。

以智能楼宇内设备用电成本最小为目标，其目标函数为

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T [c_t \sum_{j=1}^m P_{j,t} \cdot t_j - \sum_{i=1}^n (c_0 P_{i,t} \cdot t_i - C_{i,t})] \quad (6)$$

$$C_{i,t} = \frac{C_{ai}}{24P_{ei}} \cdot \frac{r(1+r)L_i}{r(1+r)L_i - 1} P_{i,t} \quad (7)$$

式中： c_t 为全天电网实时电价； t_j 为第 j 个可控负荷在第 t 个时段的用电时长； c_0 为用户售电电价； t_i 为第 i 个分布式电源在第 t 个时段的售电时长； $C_{i,t}$ 为各分布式电源单位使用时间折旧及维护成本； C_{ai} 为第 i 个分布式电源单位容量安装成本； P_{ei} 为第 i 个分布式电源额定功率； r 表示折现率； L_i 为第 i 个分布式电源使用寿命。

将式(5)、(6)进行归一化处理，得到

$$\min F = \lambda_1 \frac{F_1}{F_{1\max}} + \lambda_2 \frac{F_2}{F_{2\max}} \quad (8)$$

式中： F 为将 2 个单目标转化为多目标优化后的目标函数； $F_{1\max}$ 、 $F_{2\max}$ 分别为 F_1 、 F_2 的最大值，用于规范多目标优化函数； λ_1 、 λ_2 分别为 F_1 、 F_2 对应的权重系数，其数值以保证 2 个目标函数同时收敛为目的。

2) 约束条件。

分布式电源输出功率约束为

$$P_{i\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i\max} \quad (9)$$

$$R_{id} \cdot \Delta t \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_{iu} \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中： $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ 分别为第 i 个分布式电源输出功率最小值和最大值； R_{id} 、 R_{iu} 分别为第 i 个分布式电源向下和向上爬坡速率。

微电网系统与配电网传输功率约束为

$$0 \leq P_{S,t} \leq P_{S\max} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{B,t} \leq P_{B\max} \quad (12)$$

式中： $P_{S\max}$ 为向配电网售电最大有功功率； $P_{B\max}$ 为从配电网购电最大有功功率。

售电及用电时长约束为

$$t_i < t \quad (13)$$

$$t_j < t \quad (14)$$

文献[25-26]均采用非支配排序遗传算法-II (NSGA-II)对 Pareto 非支配解集进行求解生成的 Pareto 解集，通过模糊隶属度法过滤选取最优解。只是 2 篇文献面向的研究对象以及优化目标不同：文献[25]以供电公司、风电厂商利润最大，

用户用电费用最小为目标的同时,设计的优化运行策略可以实现风电的消纳,提高风电生产商的经济效益;文献[26]针对风电与电动汽车协同调度的多目标优化模型进行研究,以负荷方差和车主支付费用最小为目标,并协调优化发电侧资源消纳风电。文献[27]采用新型并行多目标微分进化(parallel multi-objective differential evolution, PMODE)算法对以系统运行成本及污染排放最小化为目标的微网源-荷协调多目标优化调度模型进行求解,可有效实现节能减排和提升风光消纳率,并通过与 NSGA-II 和常规 MODE 算法对比,验证了 PMODE 算法的优越性,可调度和常规智能算法寻优深度和速度间的矛盾。

上述需求响应多目标优化控制方法值得借鉴,同时,对于多目标问题的求解,除上述文献所使用的方法外,还有其它方法,如群集智能算法、人工免疫算法、神经网络算法等。在求解不同的多目标优化问题时,如何选取最合适的优化算法使得优化效果达到最佳仍有很高的研究价值,并且对于优化模型结构以及需求响应效果评价分析的详细程度方面仍有提高空间。

2.2 分层控制策略

在对负荷群参与需求响应控制的研究中,部分文献引入了负荷聚合商(load aggregator, LA)的概念,采用对需求响应整体结构进行分层^[28]的方式来优化模型以及策略研究,分层结构如图3所示。

按照面向对象的不同,可将控制架构分为3层:顶层(系统调度层)为电网控制中心;中层(集群负荷控制层)为负荷聚合商;底层(可控设备控制层)为负荷群。中层为研究的重点,上接电网调度,下达负荷资源。而按照控制目标,控制策略不同,一般以负荷聚合商为分界线分为上下2层:上层针对电网控制中心与负荷聚合商之间设计控制策略;下层负荷聚合商对负荷群进行控制。上下2层给出不同的优化目标,逐层优化。2种划分层次方式虽然名称不同,但本质相同。控制策略求解流程如图4所示。

文献[29-31]均对空调负荷采用双层调度模型。文献[29]对定频空调负荷采用以负荷聚合商

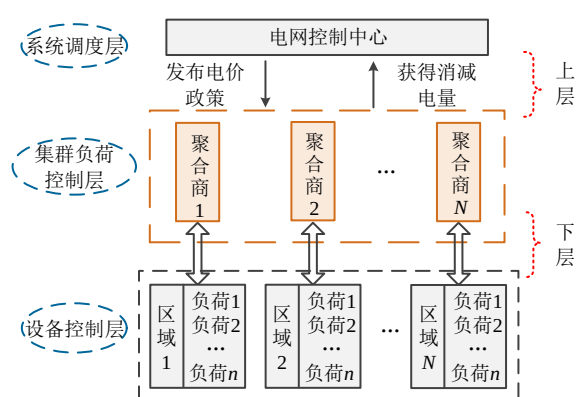


图3 分层结构图

Fig. 3 Hierarchical structure

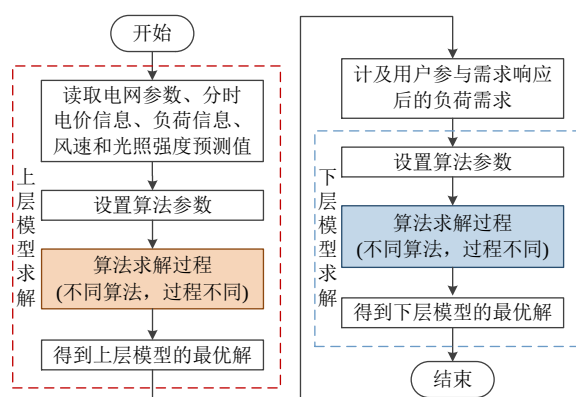


图4 分层结构控制策略求解流程图

Fig. 4 Flow chart of hierarchical control strategy solution

为中介的双层调度模型,上层模型以电力公司负荷调度成本最小化为目标,根据负荷聚合商从下层获取的各时段的空调负荷出力和报价,优化调度计划;下层模型通过优化其管辖范围内空调负荷的控制策略,尽量使实际的空调负荷出力与调度计划保持一致并最大化其利益。但该模型仅面向定频空调,未考虑变频空调的控制方式以及实际用户参与意愿。文献[30]在满足空调负荷响应出力与目标一致的前提下,考虑用户参与需求响应意愿的时变特性,实时调整中央空调终端设备的温度可调裕度,最大化利用其可调节潜力,实现聚合商的利润最大化。因考虑了用户意愿,因此能更真实反映用户用电真实场景。文献[31]根据负荷的用电物理特性将家用可控负荷分为3类,对3类负荷协调参与需求响应的情形进行研究。在上层市场侧,电力公司调度部门与聚合商进行信息交流,确定各参与者在每个时段的调度

计划；在下层用户侧，负荷聚合商管辖区域用户自愿和聚合商签订合同，参与需求响应，实现电网削峰填谷，减少调度成本。

文献[32-34]采用了 3 层控制架构的分层优化。文献[32]针对超大规模空调负荷控制，提出一种基于主从一致性的多智能体分散式协同控制策略，可实现对数量巨大、位置分散的空调资源进行精准负荷控制。除对空调负荷外，分层架构还可应用于其他负荷参与需求响应的研究。文献[33]介绍了一种电动汽车集群的分层分区域的电动汽车控制架构，实现了控制电动汽车跟踪上层控制目标的需求响应控制。文献[34]在集群电动汽车分层控制架构基础上，引入最优能量状态调节量控制策略，对电动汽车充电过程进行实时控制，缓解电动汽车集中充电带来的充电高峰。

上述文献大部分为对某一种负荷(空调、电动汽车)的调控，对于用户拥有多种不同特性的可控负荷的情况研究较少。然而，现实生活中居民用户一般都有多种可控负荷，聚合商针对不同负荷的调控对用户产生的影响不同，从而给予用户的补偿也不尽相同。因此对于多种负荷协同控制，仍有很大的研究空间。并且在对某一种负荷的控制中，对于负荷初始状态的考虑以及负荷运行随机性的研究还有欠缺。

2.3 多时间尺度控制策略

在民用可控负荷需求响应中，多时间尺度滚动控制策略参与对象多为“源-荷”(常规机组、风电场以及可控负荷)；时间尺度的划分多为“日前、日内、实时”。图 5 为典型的多时间尺度调度策略框架图。图 5 中将可控负荷根据参与需求响应需提前通知的时间不同分为 A、B、C 类负荷进行控制。

A 类负荷：提前一天告知用户的负荷，可参与日前调度计划。

B 类负荷：提前 30~60 min 告知用户的负荷，可参与“日前、日内”调度计划。

C 类负荷：提前 5~15 min 告知用户或能实时做出响应的负荷，响应时效性最强，日前、日内、实时调度均可参加。

不同文献划分的方法略有区别，文献[18]将

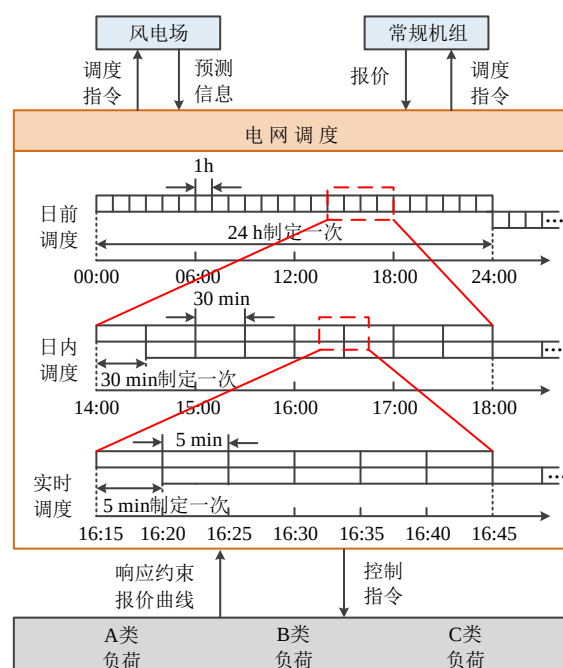


图 5 多时间尺度调度策略框架图

Fig. 5 Framework of multi time scale scheduling strategy

负荷调度的整个过程分为 4 个时间尺度(日前 24h、日内 1h、日内 15 min 和实时)进行负荷调度，在充分利用多时间尺度上负荷资源的前提下，减少风电不确定性对调度决策的影响；文献[35]建立了“日前-实时”的两阶段决策模型，在 2 个时间尺度上协调优化可再生能源和负荷侧资源。针对不同的研究重点，选择不同的划分方式。通过不同时间尺度源-荷资源的相互配合，可以充分发挥各类可控负荷的调节能力(不同时间尺度电力负荷响应特性不同，参与需求响应的提前通知时间、响应速度、响应持续时间也不同)，从而缓解可再生能源出力的波动，如协同消纳风电。

文献[36]中考虑了电价型需求响应资源，以激励型资源参与“日前-日内-实时”需求响应策略为研究重点，设计了基于场景的随机规划(scenario-based stochastic programming, SSP)与基于机会约束的随机规划(chance-constrained programming, CCP)相结合的滚动调度模型，并给出多时间尺度调度策略滚动求解流程图，如图 6 所示。文献[37]采用负荷聚合控制的方式参与电力系统的日前-日内协同优化调度，可有效减少常规机组开机数量，降低系统的弃风量，提升

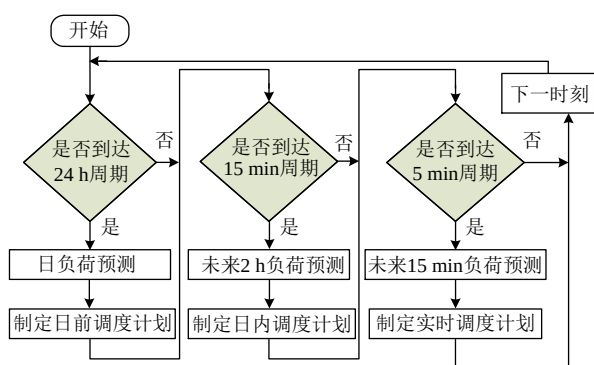


图6 多时间尺度调度策略滚动求解流程图

Fig. 6 Flow chart of rolling solution for multi time scale scheduling strategy

系统运行经济性。以上文献均建立确定性的 DR 模型参与调度，而忽视了实际响应的不确定性。文献[38-39]均对价格型和激励型 DR 进行研究，且基于消费者心理学原理考虑到可控负荷的不确定性，对多时间尺度 DR 研究考虑得更加全面。文献[38]将价格型和激励型 DR 与常规机组、风电、紧急调峰资源在不同时间尺度上进行优化配置，设计了一种刚性约束和弹性约束相结合的激励型 DR 机制，更加贴近实际负荷情况，增强了源-荷互动的效果。文献[39]建立可转移负荷、可平移负荷和可削减负荷 3 类响应模型，基于可控负荷的多时间尺度特性，将可控负荷、常规机组和风电功率在 3 个时间尺度上协调优化，能够实现削峰填谷，提高风电消纳，并降低电网调度的成本。

多时间尺度间的相互配合，通过源-荷两侧资源互动，可解决可控负荷参与需求响应时间层面和对象层面的问题，可通过逐级细化，降低可再生能源预测误差给系统带来的负面影响；可以充分挖掘各类可控负荷参与需求响应项目的潜力，不同特性的负荷参与不同时间尺度的调节，从而缓解可再生能源出力波动，提高系统的经济性和风电上网率。

2.4 优先级控制策略

优先级控制策略的控制对象为家庭中的部分可控负荷，以负荷的重要程度、可中断性以及可调控性对用电负荷优先级进行划分，通过判断用电设备的优先级，以一定调度顺序对该部分负荷

的通断状态进行控制，从而实现峰谷负荷的均衡。控制策略流程如图 7^[40]所示。

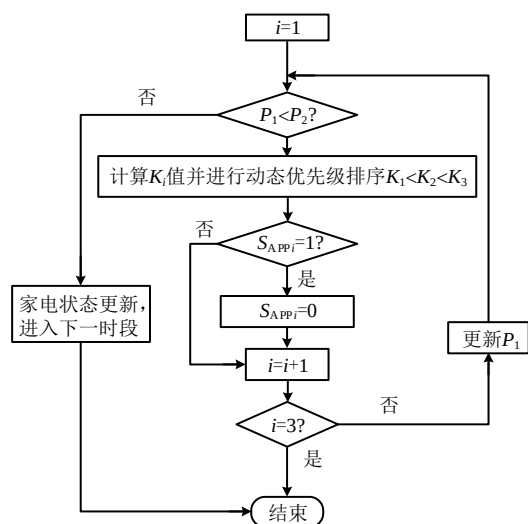


图7 家电优先级控制策略响应流程图

Fig. 7 Response flow chart of priority control strategy for home appliances

该策略的目标为在需求响应期间，满足用电要求的前提下，按照家电的动态优先级 K_i 由低到高进行控制，尽量满足用户舒适度需求。图 7 中， P_1 为被控家电总功率； P_2 为需求响应给定功率限制； S_{APPi} 为 0-1 变量，值为 1 表示设备通电，值为 0 表示断电。

文献[40]提出动态优先级概念，以舒适度指数表征家电动态优先级，设计控制方案，以空调、热水器以及电动汽车为研究对象，通过仿真验证表明，该方案可实现负荷曲线的移峰填谷，在尽量不影响用户舒适度的前提下节约电费。但过于频繁地切换家电的动态优先级，将极大影响家电的使用寿命，且容易造成电网波动。文献[41]根据家电的功率和分时电价实现对家电的优先级排序进行 DR 控制，按照分时时段对分时电价信息进行模糊化处理，得到电价优先级；对可控负荷和可转移负荷按照功率值进行模糊化，并赋予对应的家电设备优先级，将分时电价优先级与家电优先级按照矩阵乘法进行相乘，得到对应的 DR 操作规则矩阵，对家电进行 DR 控制。并且 DR 时间开始前进行 DR 预控制，以这种控制方式来减少用户的整体费用支出和缓解电网负荷。该方案避免了频繁切换家电优先级的情形，保证家电

完成实际工作(执行 DR 控制策略)后再调度其他家电,并未影响家电的实际工作寿命。文献[42]定义了二维优先级的概念,当出现家电使用冲突时,计算该时段开启家电的二维优先级,优先级较小的选择关闭,以暂缓使用来应对当用户未按计划执行用电而导致家庭总功率超出功率阈值范围的情况。以上 3 篇文献针对的研究对象均为家庭中空调、热水器以及电动汽车,文献[43]扩大研究范围,同时将洗衣机以及洗碗机考虑到优先级控制中,并在原有智能家电控制算法中增加电网闲时的填谷作用,有效利用了用电低谷期的容量闲置。

现有采用优先级控制策略进行需求响应的文献中,多以分时电价为背景,如何在尖峰电机、实时电价的背景下采用该策略进行研究,实现负荷曲线的优化,还需进行深入研究。且目前的研究多为针对某一户家庭的研究,如何扩大研究范围,针对多户家庭、负荷群进行研究,仍有很大研究空间。

上述文献从多目标优化控制策略、分层结构控制策略、多时间尺度控制策略和优先级控制策略 4 个层面,对民用可控负荷参与需求响应的典型控制策略进行阐述,总结归纳了当前的研究现状,分析并总结其控制特点和不足之处,如表 3 所示。需要说明的是,文中所列举的 4 个层面的控制策略,相互之间是存在联系的,而并非彼此独立。

3 结论

1) 对需求侧资源进行合理控制,可以实现负荷的削峰填谷,缓解电网供电压力,并为用户节约用电费用,也可以提高系统能源消纳能力。针对不同的目标,可采用不同的控制策略对可控负荷进行控制。各种方法的有效性尚需实践检验。在未来的研究中应分析所提控制策略是否具有实践的价值,是否符合我国的国情。

2) 目前的研究重点为对大负荷或者某种负荷进行集中控制,以负荷聚合商为单位,而如何协调负荷聚合商与各小负荷的分散控制可作为下一步的研究方向。并且现有研究均对控制条件进行

表 3 需求响应控制策略比较

Tab. 3 Comparison of demand response control strategies

类别	控制特点	不足之处
多目标优化控制策略	优化目标明确,针对不同的优化目标,建立不同的优化模型,可同时考虑能效以及经济性	计算难度大,目标越多,运算量越大
分层结构控制策略	结构层次清晰,可实现分散自治-集中调控	负荷聚合商的引入,多以成本作为优化目标,对电网负荷波动方面研究欠缺
多时间尺度控制策略	最大化挖掘了各类可控负荷需求响应的潜力,合理利用了可控负荷多时间尺度的特性,面对风电预测存在误差的情况,实现多级协调,逐步细化	弱化了聚合商与分散的各小负荷间的控制
优先级控制策略	对多种负荷同时进行控制,控制对象多样	研究范围小,未考虑用户群的情况

了一定程度的理想化,如何考虑负荷的参数差异、用户行为的随机性,使研究场景更符合实际,还需进一步研究。

3) 随着智能家电的普及和广泛应用,居民家电的需求响应作用将越来越显著。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 能源发展“十三五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2016.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The thirteenth five-year plan of energy development[R]. Beijing: National Energy Administration 2016.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 128.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2019:128.
- [3] 国家能源局. 2019 年全国电力工业统计数据[R]. 北京: 国家能源局, 2019.
National Energy Administration. National power industry statistics 2019[R]. Beijing: National Energy Administration, 2019.
- [4] 杨东升,王道浩,周博文,等. 泛在电力物联网的关键技术与应用前景[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 107-114.
YANG D S, WANG D H, ZHOU B W, et al. Key

- technologies and application prospects of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 107-114.
- [5] 戚永志, 黄越辉, 王伟胜, 等. 高比例清洁能源下水风光消纳能力分析方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 55-63.
- QI Y Z, HUANG Y H, WANG W S, et al. A study on hydro-wind-solar consumption analysis method for high proportion of clean energy[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 55-63.
- [6] 施涛, 李春来, 朱慧敏. 考虑功率预测不确定性的风电消纳随机调度[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(4): 55-59.
- SHI T, LI C L, ZHU H M. Stochastic dispatching of wind power accommodation considering uncertainty of power prediction[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(4): 55-59.
- [7] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
- ZHANG Q, WANG X F, WANG J X, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [8] 孙毅, 王欣, 许鹏, 等. 基于预切换状态的电热水器负荷群调控策略[J]. 现代电力, 2019, 36(5): 68-75.
- SUN Y, WANG X, XU P, et al. Control strategy of water heater group based on pre-switching state[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(5): 68-75.
- [9] 钱佳慧, 尹鹏, 邓学华, 等. 分时电价激励下考虑负荷聚集商的日前经济调度[J]. 现代电力, 2019, 36(4): 31-37.
- QIAN J H, YIN P, DENG X H, et al. The day-ahead economic dispatch considering time-of-use pricing incentives for load aggregators[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(4): 31-37.
- [10] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望2018[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- State Grid Energy Research Institute Co., LTD. China's energy and power development outlook 2018[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [11] XU F, LAI L L. Novel active time based demand response for industrial consumers in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1564-1573.
- [12] 陈麒宇. 泛在电力物联网实施策略研究[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 99-106.
- CHEN Q Y. Research on implementation strategy of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 99-106.
- [13] 阳小丹, 李扬. 家庭用电响应模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 51-56.
- YANG X D, LI Y. Research on household electricity response mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 51-56.
- [14] 陆青, 郁浩, 赵康丽, 等. 分时电价下基于供用电双方博弈的家庭用户需求响应[J]. 现代电力, 2019, 36(6): 68-74.
- LU Q, YU H, ZHAO K L, et al. Demand response of household users based on game between power supply and consumption side under time-of-use price[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(6): 68-74.
- [15] NUNNA H S, KUMAR V S, Doolla S. Demand response in smart distribution system with multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1641-1649.
- [16] YANG P, TANG G, NEHORAI A. Optimal time-of-use electricity pricing using game theory[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech & Signal Processing. IEEE, 2012.
- [17] FINN P. Demand side management of industrial electricity consumption: promoting the use of renewable energy through real-time pricing[J]. Applied Energy, 2014, 113(6): 11-21.
- [18] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664-3673.
- YANG S C, LIU J T, YAO J G, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3664-3673.
- [19] KONDOH J, LU N, HAMMERSTROM D J. An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1309-1316.
- [20] 刘蓉晖, 李子林, 杨秀, 等. 考虑用户侧可控负荷的社区综合能源系统日前优化调度[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2842-2850.
- LIU R H, LI Z L, YANG X, et al. Optimal dispatch of community integrated energy system considering user-side flexible load[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(10): 2842-2850.
- [21] SHAFIE K M, HEYDARIAN F E, OSORIO G J, et al. Optimal behavior of electric vehicle parking lots as demand response aggregation agents[J]. IEEE

- Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2654-2666.
- [22] WATSON J D, WATSON N R, LESTAS I. Optimized dispatch of energy storage systems in unbalanced distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(2): 639-650.
- [23] 林铿云, 董加礼. 多目标优化的方法与理论[M]. 长春: 吉林教育出版社, 1992: 125-128.
- LIN C Y, DONG J L. Methods and theories of multi-objective optimization[M]. Changchun: Jilin Education Press, 1992: 125-128.
- [24] 颜庆国, 杨永标, 高辉, 等. 智能楼宇可调资源优化控制建模及仿真分析[J]. 电器与能效管理技术, 2016(10): 31-36.
- YAN Q G, YANG Y B, GAO H, et al. Modeling and simulation analysis for intelligent building adjustable resources optimization control[J]. Dianqi Yu Nengxiao Guanli Jishu, 2016(10): 31-36.
- [25] 何后裕, 郭健翔, 王永利. 面向配电网风电消纳的冰蓄冷空调系统多目标优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 180-187.
- HE H Y, GUO J X, WANG Y L. Research on multi-objective optimization strategy for ice storage air conditioning system for distribution network wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 180-187.
- [26] 侯建朝, 胡群丰, 谭忠富. 计及需求响应的风电-电动汽车协同调度多目标优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 22-27.
- HOU J C, HU Q F, TAN Z F. Multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 22-27.
- [27] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 60-68.
- PENG C H, LIU B, ZUO C X, et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 60-68.
- [28] XU Z, CALLAWAY D S, HU Z, et al. Hierarchical coordination of heterogeneous flexible loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4206-4216.
- [29] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 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 C W, LI Q Y, LI Y. 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.
- [30] 王丹, 兰宇, 贾宏杰, 等. 基于弹性温度可调裕度的中央空调集群需求响应双层优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 118-126.
- WANG D, LAN Y, JIA H J, et al. Double-layer optimization strategy of cluster central air-conditioner demand response based on elastic temperature adjustable margin[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 118-126.
- [31] 刘晓峰, 高丙团, 罗京, 等. 基于非合作博弈的居民负荷分层调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 54-60.
- LIU X F, GAO B T, LUO J, et al. Non-cooperative game based hierarchical dispatch model of residential loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 54-60.
- [32] 王蓓蓓, 胡晓青, 顾伟扬, 等. 分层控制架构下大规模空调负荷参与调峰的分散式协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3514-3528.
- WANG B B, HU X Q, GU W Y, et al. Hierarchical control architecture and decentralized cooperative control strategy for large scale air conditioning load participating in peak load regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3514-3528.
- [33] 孙强, 许方园, 唐佳, 等. 基于需求响应的电动汽车集群充电负荷建模及容量边界控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2638-2645.
- SUN Q, XU F Y, TANG J, et al. Study on modeling of aggregated charging load of electric vehicles and control strategy by adjusting capacity boundaries based on demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2638-2645.
- [34] 王丹, 孙冬冬, 胡庆娥, 等. 基于最优能量状态调节的电动汽车需求响应及其对配电网的影响[J]. 电力建设, 2018, 39(5): 86-94.
- WANG D, SUN D D, HU Q E, et al. Demand response of electric vehicles based on optimal energy status regulation and its impact on distribution network[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5): 86-94.
- [35] MUNOZ E G, ALCARAZ G G, CABRERA N G. Two-phase short-term scheduling approach with intermittent renewable energy resources and demand response[J]. IEEE Latin America Transactions, 2015, 13(1): 181-187.
- [36] 包宇庆, 王蓓蓓, 李扬, 等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17):

- 4589-4600.
- BAO Y Q, WANG B B, LI Y, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4589-4600.
- [37] 贾雨龙, 米增强, 王俊杰, 等. 柔性负荷聚合商参与电力系统的多时间尺度协同优化调度策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 17-26.
- JIA Y L, MI Z Q, WANG J J, et al. Mutli-time scale collaborative optimal scheduling strategy with flexible load aggregator participating in power system[J]. Journal of North China Electric Power University(Nature Science), 2019, 46(6): 17-26.
- [38] 孙宇军, 王岩, 王蓓蓓, 等. 考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 106-113.
- SUN Y J, WANG Y, WANG B B, et al. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 106-113.
- [39] 赵冬梅, 宋原, 王云龙, 等. 考虑可控负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 21-32.
- ZHAO D M, SONG Y, WANG Y L, et al. Coordinated scheduling model with multiple time scales considering response uncertainty of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 21-32.
- [40] 汤奕, 鲁针针, 宁佳, 等. 基于电力需求响应的智能家电管理控制方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 93-99.
- TANG Y, LU Z Z, NING J, et al. Management and control scheme for intelligent home appliances based on electricity demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 93-99.
- [41] 付蔚, 敬章浩, 罗志勇, 等. 基于分时电价的智能家电控制方案[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 717-723.
- FU W, JING Z H, LUO Z Y, et al. A time-of-use pricing based control scheme for intelligent household appliances[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 717-723.
- [42] 孙毅, 裴俊亦, 景栋盛. 考虑用户行为不确定性的智能家电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 109-117.
- SUN Y, PEI J Y, JING D S. Smart home appliance control strategy considering user behavior uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 109-117.
- [43] 何沁春, 杨秀媛. 泛在电力物联网中将家电可控负荷转化成智能负荷的方法研究[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 94-102.
- HE Q C, YANG X Y. Research on methods for converting controllable loads of household appliances into intelligent loads in the ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 94-102.

收稿日期: 2020-04-01。

作者简介:



王燕

王燕(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为控制工程新能源发电, 1049698158@qq.com;



杨秀媛

杨秀媛(1962), 女, 教授, 主要从事含新能源的电力系统分析与规划方面的研究工作, 本文通信作者, yangxy0912@163.com;



徐剑锋

徐剑锋(1975), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化, 435618905@qq.com;



卜思齐

卜思齐(1984), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事电力电子化和智能化电力系统稳定控制分析与运行规划研究, siqi.bu@polyu.edu.hk;



徐智蔷

徐智蔷(1977), 女, 博士, 研究员, 研究方向为电力电缆及其在电力物联网中应用, zhq.xu@soton.ac.uk。

(责任编辑 辛培裕)