

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211476

考虑用户调节行为多样性的空调负荷聚合商日前调度策略

范德金, 张 姝, 王 杨, 肖先勇

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 空调负荷作为重要的柔性负荷资源之一, 通过负荷聚合商参与电网调控, 对改善夏季电网的负荷特性具有重要意义。然而聚合商通过分组控制方式无法最大化地利用空调的可调潜力, 并且对用户舒适度有一定影响。从负荷聚合商的角度出发, 对用户空调负荷分别采用温度设定值控制, 以保持用户调节行为的多样性。在最大化挖掘负荷可调潜力的同时保证用户舒适度, 提出了一种基于用户空调负荷温度控制的负荷聚合商日前调度双层优化模型。模型上层以负荷聚合商利益最大为优化目标, 下层考虑用户舒适度差异以用户整体不舒适度水平最小为优化目标。采用粒子群整数规划算法进行求解获得单台空调设备设定温度的调节量。通过仿真验证表明, 所提日前调度策略可以在给电网提供一定削峰能力的同时, 充分挖掘空调负荷的可调潜力, 保证负荷聚合商获得最大化利益并且用户舒适度水平更高。

关键词: 负荷聚合商; 双层调度模型; 温度设定值控制; 调节多样性; 不舒适度水平

Day ahead scheduling strategy for air conditioning load aggregators considering user regulation behavior diversity

FAN Dejin, ZHANG Shu, WANG Yang, XIAO Xianyong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As one of the important flexible load resources, air conditioning participates in power grid regulation through load aggregators. This is of significance in improving the load characteristics of a power grid in summer. However, aggregators cannot maximize the adjustable potential of air conditioning through group control, and it has a certain impact on user comfort. From the point of view of load aggregators, the temperature setting values are used to control the user air conditioning load in order to maintain the diversity of user regulation behavior. In order to maximize the potential of load adjustment while ensuring user comfort, a two-level optimization model of day ahead scheduling for load aggregators based on user air conditioning load temperature control is proposed. The upper layer of the model takes the maximum benefit of the load aggregator as the optimization objective, and the lower layer considers the difference of user comfort and the minimum level of overall user discomfort as the optimization objective. The particle swarm integer programming algorithm is used to obtain the adjustment of the set temperature of a single piece of air conditioning equipment. The simulation results show that the day ahead scheduling strategy can provide certain peak clipping capability to the power grid while fully tapping the adjustable potential of the air-conditioning load to ensure that the load aggregator obtains the maximum benefit and the user comfort level is higher.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007126 and No. U2166209).

Key words: load aggregator; double layer scheduling model; temperature set value control; regulating diversity; discomfort level

0 引言

目前, 各个地区空调负荷峰荷占比普遍在 20%

以上, 北京、上海、江苏、浙江等发达地区占比甚至超过 50%, 并且这一比例还在逐年上升, 空调负荷已成为影响电网夏季峰谷差的主要因素^[1]。空调负荷具有规模大、可控性强、调节潜力巨大的特点, 随着智能电网技术、5G 通信技术和智能家居技

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007126; U2166209)

术的发展,通过负荷聚合商^[2]对大量分散空调负荷进行聚合和调控,使其参与电力供需平衡调节,对改善夏季电网负荷特性具有重要意义。

空调负荷的调控主要包括控制方式和调度优化两个方面。在控制方面,常用的控制方式有直接负荷控制(Direct Load Control, DLC)和需求侧竞价(Demand Side Bidding, DSB)等^[3]。现有空调负荷参与调度的控制方式主要为直接负荷控制,其中常用的DLC有3种:开关控制、周期性暂停控制和温度控制。开关控制就是通过直接控制空调负荷的开停实现负荷调节。文献[4]利用空调负荷开停情况确定可调容量,建立了DLC的空调负荷双层优化调度和控制模型,但是调控仅停留在功率层面。文献[5]采用分组控制的方法对空调负荷进行开关控制,实现了良好的削峰效果。周期性暂停控制就是通过改变空调负荷运行温度上下限,对空调负荷实施周期性的暂停控制,常常用于中央空调领域^[3]。文献[6-7]对中央空调负荷周期性暂停控制的可行性和实用性进行细致的分析。由于开关控制和周期性暂停控制过程中忽略了用户的舒适性,而温度控制^[8]能够更好地表达用户感受的变化。因此,在众多的研究中大量使用。文献[9]提出一种基于负荷温度的密度聚类集群控制策略,实现以温度设定值为响应信号对负荷群进行控制。文献[10]在温度控制的基础上,建立了温差-功率小时级调度模型。在实现对空调负荷集群控制的基础上,进一步进行空调负荷的调度。由于空调负荷规模大、型号不同、所处环境各异,往往运行参数呈现多样性^[11]。文献[12]计及空调负荷参与调控初始状态的不确定性,进行空调负荷优化调度。文献[13]概述了基于多样性保持的空调负荷群控制机制,建立了负荷群控制代价模型,提出了一种计及空调负荷群控制的源-荷协同优化调度模型。以上研究只考虑了空调负荷自身参数的多样性和负荷聚合商层面的功率调节,并没有深入量化用户空调负荷的温度设定值。由于用户的不同温度喜好和使用习惯,以及空调负荷自身参数的差异性,为了充分挖掘负荷的可调节潜力,需要对每个用户空调负荷的多样性进行研究,从而得到参与调控的调节量。

随着电力行业的改革,需求侧响应^[14-19]成为未来电网发展的主要方向,负荷聚合商将作为参与调度市场的主要角色。当前空调负荷参与调度主要从电网的角度出发^[20-22],用户的舒适度作为考虑因素^[23-27],而很少研究是从负荷商的角度出发,考虑负荷聚合商到用户层面的运行优化。文献[21]提出了双层调度模型,上层考虑电网调度成本,下层通

过市场方式激励负荷进行调控;文献[28]在调度误差的基础上建立双层调度模型;文献[29]中上层评估负荷调节能力,抑制电网交换功率波动,下层考虑降低调节成本。以上关于双层调度的相关文献没有深入考虑负荷聚合商的利益以及负荷调控行为的差异性。本文从负荷聚合商的角度出发建立负荷聚合商双层优化调度模型:在负荷聚合商层面,以负荷聚合商最大利益为目标,求得最优日负荷曲线,给电网提供一定的削峰能力;在用户层面,考虑了用户舒适度水平的差异,通过对每个用户的舒适度水平进行分析,将用户群整体不舒适度作为优化目标,通过引入粒子群整数规划算法,最终得到用户空调温度设定值的具体调节量,保证了用户调节行为的多样性。最后通过仿真分析,对比分析了用户响应度和不同控制方式下调度策略的结果,验证了调度策略的正确性和可行性,相比于分组控制^[5]方式,能够使得负荷聚合商在获得最大利益的同时,充分利用负荷可调潜力,降低调节行为对用户舒适度水平的影响。

1 负荷聚合商的负荷温度控制框架

基于智能电网的高级量测体系(Advanced Metering Infrastructure, AMI)可以实时获得用户负荷数据。在此基础上,单个空调负荷采用温度设定值控制方式,负荷聚合商参与电网需求侧响应控制框架如图1所示。首先,负荷聚合商根据电网和空调负荷提供的信息,得到最优的空调负荷设定温度调节量;随后,通过控制终端分别向空调负荷的智能温度控制器发送控制信号,控制器再对空调负荷的温度设定值进行调整,实现负荷聚合商对空调负荷的控制。

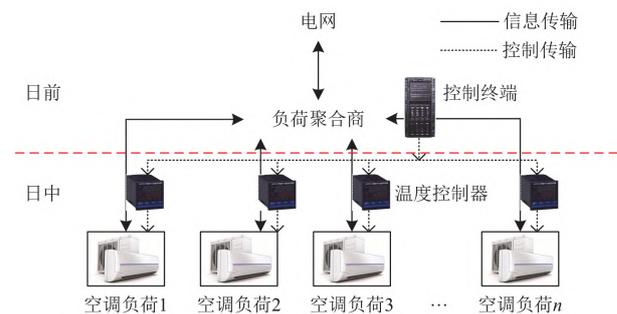


图1 负荷聚合商参与电网需求侧响应控制框架

Fig. 1 Framework of load aggregators participating in the grid demand-side response control

2 空调负荷聚合模型

2.1 单台空调负荷等效模型

针对单个空调负荷模型,常用等效热参数模型

进行描述^[10-13]。等效热参数(Equivalent Thermal Parameter, ETP)模型就是通过将空调负荷所处空间与外界进行能量交换的过程, 用一个包含等效热阻和等效热容的电路来描述。这种模型往往适用于家庭用户的空调模型建模。图2是单个空调负荷的二阶等效热参数模型。

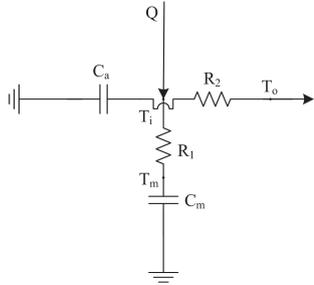


图2 单个空调负荷的二阶等效热参数模型

Fig. 2 Second-order equivalent thermal model of a single air conditioning load

由图2可以得到空调负荷模型的状态空间表达式为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{T}_i(t) \\ \dot{T}_m(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} T_i(t) \\ T_m(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{T}_i(t) = \frac{dT_i(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\dot{T}_m(t) = \frac{dT_m(t)}{dt} \quad (4)$$

$$u(t) = s(t) \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_a} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) & \frac{1}{C_a R_1} \\ \frac{1}{C_m R_1} & -\frac{1}{C_m R_1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_a} \left(\frac{T_o(t)}{R_2} + Q \right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $T_i(t)$ 、 $T_m(t)$ 、 $T_o(t)$ 分别表示 t 时刻室内温度、建筑物墙体温度和室外温度; R_1 和 R_2 分别表示室内空气和室外、室内空气和墙体的等效热阻; C_a 和 C_m 分别为室内和墙体的等效热容; Q 表示空调负荷与室内的热交换量; $s(t)$ 表示 t 时刻空调负荷的开停情况。则 $t+1$ 时刻空调负荷的开停计算方式为

$$s(t+1) = \begin{cases} 1, & T_i(t+1) > T_{\text{set}} + 0.5\delta \\ 0, & T_i(t+1) < T_{\text{set}} - 0.5\delta \\ s(t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_{set} 表示空调负荷设定温度; δ 表示温度死区。当 $s(t)=1$ 时表示空调负荷开启, 当 $s(t)=0$ 时表示空调负荷关闭。当室内温度大于温度最大限值时, 负荷开启; 当室内温度小于温度最小限值时, 负荷关闭。当忽略墙体参数时, 室内温度表达式被简化, 表达式如下所述。

空调负荷关闭时:

$$T_i(t+1) = T_o(t+1) - (T_o(t+1) - T_i(t))e^{-1/RC_a} \quad (9)$$

空调负荷开启时:

$$T_i(t+1) = T_o(t+1) - QR - (T_o(t+1) - QR - T_i(t))e^{-1/RC_a} \quad (10)$$

式中: $P = Q/\eta$; P 表示空调负荷的电功率; η 表示能效比。

利用式(9)和式(10)可以得到空调负荷的开启时间 t_{on} 和关闭时间 t_{off} , 其表达式分别为

$$t_{\text{on}} = C_a R \ln \left(1 + \frac{\delta}{QR + T_{\text{set}} - 0.5\delta - T_o} \right) \quad (11)$$

$$t_{\text{off}} = C_a R \ln \left(1 + \frac{\delta}{T_o - T_{\text{set}} - 0.5\delta} \right) \quad (12)$$

室内温度变化如图3所示。

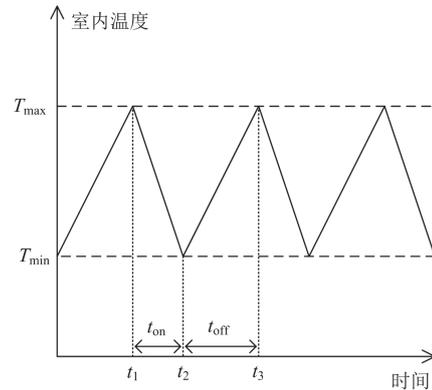


图3 室内温度变化

Fig. 3 Indoor temperature variation

2.2 空调负荷聚合功率模型

对于负荷聚合商而言, 其更加关心的是多个空调负荷聚合后的总功率。 N 个空调负荷聚合功率可以表示为

$$P_{\text{agg}} = \sum_{i=1}^N s(i) \cdot P_i \quad (13)$$

式中: $s(i)$ 表示其对应的开停状态; P_i 表示单个空调负荷的电功率。可以看出空调负荷的聚合功率只与处于开启状态的空调负荷有关。

当各空调负荷的设定温度不发生改变时, 可以

利用空调负荷的占空比(开机时间占整个开停周期的比例)来求得单台空调负荷的平均功率,由式(11)和式(12)可以将占空比表示为

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{\ln\left(1 + \frac{\delta}{QR + T_{set} - 0.5\delta - T_o}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\delta}{QR + T_{set} - 0.5\delta - T_o}\right) + \ln\left(1 + \frac{\delta}{T_o - T_{set} - 0.5\delta}\right)} \quad (14)$$

当每个空调负荷都独立运行,负荷聚合商包含足够多的空调负荷时,空调负荷聚合功率也可以近似表示为

$$P_{agg} = \sum_{i=1}^N s(i) \cdot P_i = \sum_{i=1}^N P_{avg,i} \quad (15)$$

式中, $P_{avg,i} = D_i P_i$ 。

由式(14)和式(15)分析可知,当温度设定值提高时,占空比减小,同一时刻处于开启状态的空调负荷数量减少,相应的聚合功率就会减少。

3 面向负荷聚合商的双层优化调度模型

在得到空调负荷聚合功率之后,建立负荷聚合商双层优化调度模型,如图4所示。

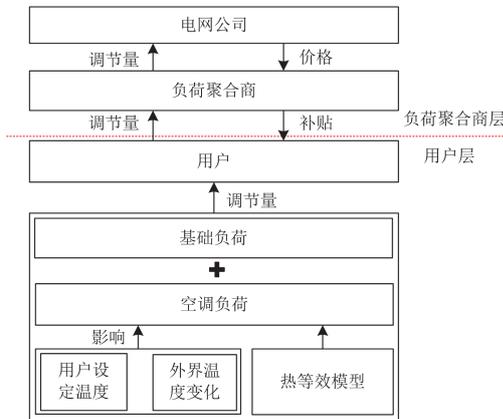


图4 负荷聚合商双层优化调度模型

Fig. 4 A two-layer optimal scheduling model for load aggregator

1) 负荷聚合商层面: 首先根据历史气象数据预测第2天气温变化情况,得到空调负荷各时刻的最大调节能力。根据电网以往夏季负荷数据预测日基础负荷,以负荷聚合商的收益最大为优化目标,在调节能力范围内进行优化,得到空调负荷各时刻调节量,最终得到负荷聚合商管辖下的区域最优日负荷曲线。

2) 空调用户层面: 以上层优化得到的最优日负荷曲线为约束,分别计算各个用户的不舒适度水平,以用户整体不舒适度水平最小为优化目标,对空调负荷的运行方式进行优化,得到各空调负荷不同的温度设定值调节量,保证用户调节行为的多样性。

3.1 负荷聚合商层面优化模型

在负荷聚合商层面,考虑电网公司和负荷聚合商以及负荷聚合商和用户之间的交易行为。负荷聚合商向电网提供需求侧响应资源,电网支付一定的费用;用户向负荷聚合商提供调节服务,聚合商给与用户一定的补贴。

从文献[10]中得到,负荷聚合商参与需求侧响应的电价通常采用需求侧响应市场的实时电价,其电价与负荷总量存在着一定的线性关系,如式(16)所示。

$$p_{dr} = aP_{all} + b \quad (16)$$

式中: p_{dr} 表示某一时段需求侧市场的实时电价; P_{all} 表示此时网络中的负荷总量; a 和 b 表示正的电价系数。当总负荷增加时,相应的实时电价也会升高。负荷聚合商给用户的补贴与需求侧响应削减量成二次函数关系,如式(17)所示。

$$B = k \cdot P_{dr}^2 = k(L_{before} - L)^2 \quad (17)$$

$$L = L_{base} + L_{ac} \quad (18)$$

式中: B 表示负荷聚合商给用户的总补贴; k 为聚合商对用户的补贴费用系数; P_{dr} 表示此时的需求侧响应量; L_{before} 表示需求侧响应前的总负荷; L 表示需求侧响应后的总负荷; L_{base} 表示电网基础负荷; L_{ac} 表示空调负荷。

由式(16)和式(17)可以得到负荷聚合商的收益函数为

$$G = p_{dr} \cdot P_{dr} - B = \sum_{t=t_1}^{t_2} (aP_{all,t} + b) \cdot P_{dr,t} - \sum_{t=t_1}^{t_2} k \cdot P_{dr,t}^2 \quad (19)$$

因此,负荷聚合商层面的优化目标函数为

$$\max G = \max \left(\sum_{t=t_1}^{t_2} (aP_{all,t} + b) \cdot P_{dr,t} - \sum_{t=t_1}^{t_2} k \cdot P_{dr,t}^2 \right) \quad (20)$$

其中,优化约束条件为

$$P_{dr,t,\min} \leq P_{dr,t} \leq P_{dr,t,\max} \quad (21)$$

式中, $P_{dr,t,\min}$ 和 $P_{dr,t,\max}$ 分别表示某一时刻需求侧响应量的最小值和最大值。

在负荷聚合商层面,利用序列二次规划计算得到的优化结果,进一步得到理想情况下负荷聚合商的最优日负荷曲线。

3.2 用户层面优化模型

在用户层面,优化重心在于用户的舒适度。

Fanger 热舒适度模型是对用户的不舒适度进行量化, 描述用户对室温不满意度的常用模型, 由于不舒适度主要与室内温度有关, 因此假定其他因素都是常数, 然后利用插值法对用户不舒适度水平和室内温度进行拟合, 拟合后的表达式简化为^[30]

$$PPD = \alpha(T_{\text{set}}^k - T_{\text{set}}^0)^2 \quad (22)$$

式中: PPD 表示用户对室内温度不满意度; α 为比例系数; T_{set}^k 表示调节之后的温度设定值; T_{set}^0 表示用户温度期望值, 即最开始的空调负荷设定值。因此, 单个用户不舒适水平表示为

$$\chi = (T_{\text{set}}^k - T_{\text{set}}^0)^2 \quad (23)$$

用户具有不同的期望温度导致用户在相同温度下不舒适度水平是不同的, 故需要对每个用户的不舒适度水平进行单独计算, 用户调节行为也需要单独计算, 用户层面优化目标为用户整体不舒适度水平最低, 表示为

$$\min \sum \chi = \min \sum (T_{\text{set}}^k - T_{\text{set}}^0)^2 \quad (24)$$

文献[31]中指出, 当外界温度变化超过 3°C 时, 人体会明显地感到不舒适。本文旨在为电网提供消减负荷服务, 调节之后的温度设定值 T_{set}^k 不低于用户温度期望值 T_{set}^0 , 即 $T_{\text{set}}^k \geq T_{\text{set}}^0$, 所以, 温度优化约束为

$$0 \leq T_{\text{set}}^k - T_{\text{set}}^0 \leq 3 \quad (25)$$

前文分析了温度调节对空调负荷聚合功率的影响, 所以在进行优化的同时, 还需要考虑温度设定值改变之后的空调负荷聚合功率约束。

由于负荷聚合商管辖下的空调负荷具有异质性, 导致温度控制得到的日负荷曲线与聚合商层面得到的最优日负荷曲线不会完全一致, 所以将温度设定值改变之后的日负荷曲线与上层最优日负荷曲线之间的拟合率作为用户层面优化模型的功率约束。优化约束可表示为

$$R_{\text{new}} \geq 0.95 \quad (26)$$

式中, R_{new} 表示曲线拟合率, 其值越接近 1, 拟合率越高, 本文取拟合率大于 0.95。拟合率计算表达式^[32]为

$$R_{\text{new}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (y_{i,t} - y_t)^2}{\sum y_t^2}} \quad (27)$$

式中: $y_{i,t}$ 表示 t 时刻实际值; y_t 表示 t 时刻目标值。

由于粒子群算法计算速度快、算法逻辑清楚, 经常被用来求解优化个体数量较多的优化问题。由于用户调节行为呈现多样性, 当前空调负荷的设定温度调节量都为整数, 需要得到每个用户的具体温度调节量时, 本文引入基于粒子群算法的整数规划,

对用户层面优化模型进行求解。在粒子群算法中, 为了得到每个用户的温度调节量, 算法优化变量数目与用户总数相同, 在此基础上, 通过对粒子群算法的位置更新公式进行改进, 之后进行整数规划^[33], 改进后的粒子位置 $x(t)$ 更新表达式为

$$x(t+1) = \begin{cases} x(t)+1, & g(t+1) > 0 \\ x(t)-1, & g(t+1) < 0 \\ x(t)+\text{sig}(c), & g(t+1) = 0 \end{cases} \quad (28)$$

式中, $g(t+1)$ 为粒子的方向改变量。

$$g(t+1) = c_1 r_1(t)(p_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2(t)(p_g(t) - x_i(t)) \quad (29)$$

式中, c_1 、 $r_1(t)$ 、 $p_i(t)$ 、 c_2 、 $r_2(t)$ 、 $p_g(t)$ 所表示的参数意义和标准粒子群算法相同。式(28)中 $\text{sig}(c)$ 的表达式为

$$\text{sig}(c) = \begin{cases} 1, & c \leq 1/3 \\ 0, & 1/3 < c \leq 2/3 \\ -1, & c > 2/3 \end{cases} \quad (30)$$

式中, $c \sim U(0,1)$ 。

计算流程与标准粒子群算法一致^[27]。

4 仿真分析

假设某地区的空调负荷聚合商管理空调负荷 1000 台, 由于用户对室内温度喜好各不相同, 这里假设各空调负荷的初始温度设定值满足均匀分布 $U(24,26)$ 。由于空调负荷所处的环境空间不同, 空调负荷热等效参数往往具有不确定性, 因此假设空调热等效参数都满足正态分布, 得到的空调负荷参数如表 1 所示^[19]。

表 1 空调负荷参数表

Table 1 Air conditioning load parameter

	热阻 R	热容 C_a	半温度死区 0.5δ	电功率 P_{rated}
均值	2	2	0.3	14
标准差	0.2	0.2	0.03	1.4
上下限	(1.5,2.5)	(1.5,2.5)	(0.25,1)	(10,18)

4.1 温度控制对聚合功率的影响

在外界温度为 36°C 的情况下, 分别将全部空调负荷的设定温度值上调 1°C 、 2°C 和 3°C , 得到不同温度设定值下的空调负荷占空比如表 2 所示, 可以看出, 随着设定温度值上调, 空调负荷占空比减小。

随着设定温度的调高, 占空比减小, 同一时刻整个空调负荷群处于开启状态的负荷台数也相应地减少。不同温度设定值下, 空调负荷聚合功率变化如图 5 所示, 可知设定温度的调高最后将导致整个空调负荷群的聚合功率也减少。

表 2 不同温度设定值下的空调负荷占比
Table 2 Load duty ratio of air conditioning at different temperature setting values

温度设定	上调 0 °C	上调 1 °C	上调 2 °C	上调 3 °C
占比	0.1379	0.1250	0.1111	0.1000

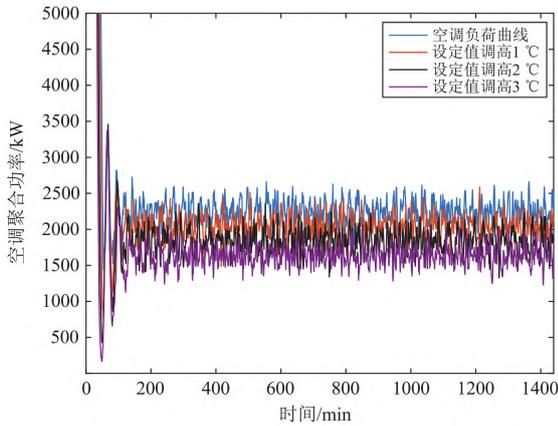


图 5 不同温度设定值下，空调负荷聚合功率变化

Fig. 5 Variation of aggregated power of air conditioning load under different temperature setting values

从图 5 的结果可以看出，对空调负荷的温度设定值进行控制，整个空调负荷群的聚合功率会随之改变。

4.2 调度策略仿真分析

假设负荷聚合商所在地区某一天的预测夏季基础负荷^[34]和室外温度变化^[35]如图 6 所示。电网需求侧响应实时价格系数 a 和 b 分别为 8.25×10^{-5} 和 0.2，负荷聚合商给用户的补贴系数为 0.000 45 元/kW²^[10]。假设用户在温度首次超过 28 °C 的 2 h 之内随机开启空调负荷，最后一次低于 28 °C 时关闭负荷。

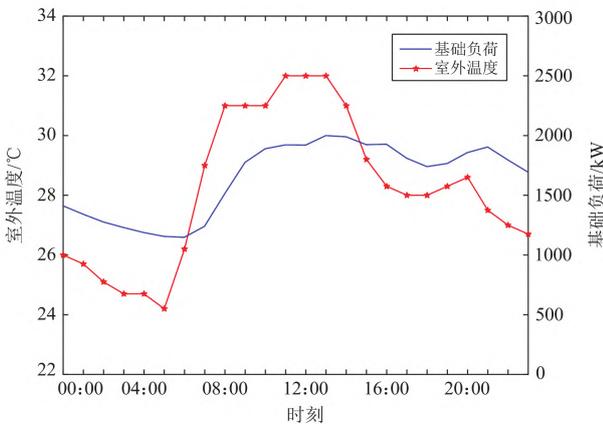


图 6 夏季基础负荷和室外温度变化

Fig. 6 Summer base load and outdoor temperature change

利用 Matlab 中的工具包 cplex12.8 对负荷聚合商层面优化模型进行求解，在保证负荷聚合商利益最大的情况下，得到最优日负荷曲线，此时，负荷聚合商可以获得的最大利益为 1337 元。

峰谷差率往往被用来代表日负荷曲线的平稳度，其一般表达式为

$$p_{\text{diff}} = \frac{\max(L) - \min(L)}{\max(L)} \quad (31)$$

式中： p_{diff} 表示峰谷差率； $\max(L)$ 、 $\min(L)$ 分别表示日负荷的最大值和最小值。经过计算得到，原始日负荷曲线的峰谷差率为 0.7717，最优日负荷曲线的峰谷差率为 0.7421，峰谷差率有一定下降。

在得到最优日负荷曲线后，将其作为用户层面优化模型的目标日负荷曲线，在使得用户不舒适度水平最低的情况下，利用粒子群算法进行整数规划，得到负荷聚合商调度后实际日负荷曲线，如图 7 所示，此时日负荷曲线与目标日负荷曲线的拟合率为 0.9649。

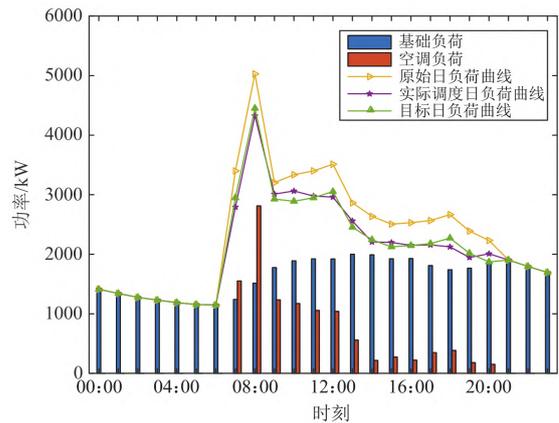


图 7 负荷聚合商调度后实际日负荷曲线

Fig. 7 Actual daily load curve after load aggregator dispatching

优化得到的日负荷曲线的峰谷差率为 0.7346，负荷聚合商可以获得的利益为 1239.7 元，与目标日负荷曲线的对应参数十分接近，此时，负荷聚合商给用户的补贴为 1206.9 元。

通过对用户层面优化模型进行求解，得到各空调负荷温度设定值的调节量，各空调负荷调节量如图 8 所示，其中调节量为 3 °C 的空调负荷台数为 67 台；调节量为 2 °C 的台数为 290 台；调节量为 1 °C 的台数为 447 台；不调节的台数为 96 台。此时，各设定温度下的空调负荷台数如表 3 所示。

从图 8 可以看出，不同编号的用户负荷得到的温度调节量是不同的，用户调节行为呈现多样性。

负荷聚合商通过对空调负荷的温度设定值的控制, 不仅实现了负荷聚合商的利益最大化, 同时保证了用户的舒适度水平, 还为电网提供了一定的削峰能力。

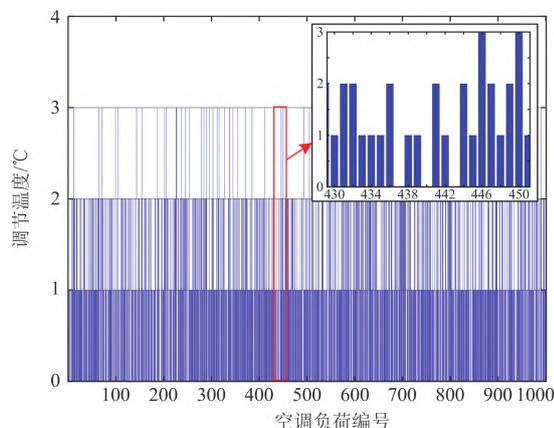


图8 各空调负荷调节量

Fig. 8 Adjustment of each air conditioning load

表3 各设定温度下的空调负荷台数

Table 3 Number of air conditioning load units at each set temperature

温度设定值/℃	24	25	26	27	28	29
台数	34	160	313	319	147	27

4.3 调度策略适应性分析

4.3.1 不同响应度对调度策略的影响

由于用户实际是否参与日前调度计划具有随机性, 可通过日前向用户确认是否参与调控。为了进一步研究负荷聚合商双层调度模型在不同响应度下的可行性, 本节分别考虑全部用户完全响应、80%的用户响应和50%的用户响应的情况下, 可获得不同用户响应度情况下日负荷曲线, 如图9所示。

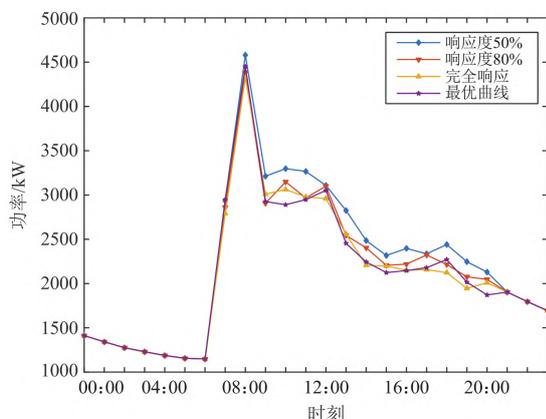


图9 不同用户响应度情况下日负荷曲线

Fig. 9 Daily load curve under different user response levels

表4表示不同用户响应度各温度调节量下的空调负荷台数, 其中完全响应、80%和50%响应下调节量为3℃的空调负荷台数占比分别为6.700%、7.625%和26.400%, 可以看出, 随着用户响应度的降低, 空调负荷调节量为3℃的空调负荷占比逐渐上升。在保证空调负荷调节行为多样性的同时, 不同用户响应程度下, 都能够实现对空调负荷的聚合功率最优调控。

表4 不同用户响应度各温度调节量下的空调负荷台数

Table 4 Number of air conditioning load with various temperature adjustment under different user response levels

温度调节量/℃	0	1	2	3
完全响应	96	447	390	67
80%响应	100	322	317	61
50%响应	129	106	133	132

不同用户响应度下日负荷曲线参数如表5所示, 其中, 用户响应度为80%时, 拟合率为0.9609; 用户响应度为50%, 拟合率为0.9171。从图10中不同响应度下空调负荷聚合功率也可以看出, 此时空调负荷聚合功率曲线也有很高的相似度。可见, 无论用户的响应度为多少, 此策略都能够保证负荷聚合商的利益最大化, 在不同用户响应度下, 具有很强的适应性。

表5 不同用户响应度下日负荷曲线参数

Table 5 Daily load curve parameters under different user response levels

	拟合率	峰谷差
完全响应	0.9649	0.7346
80%响应	0.9609	0.7383
50%响应	0.9171	0.7493

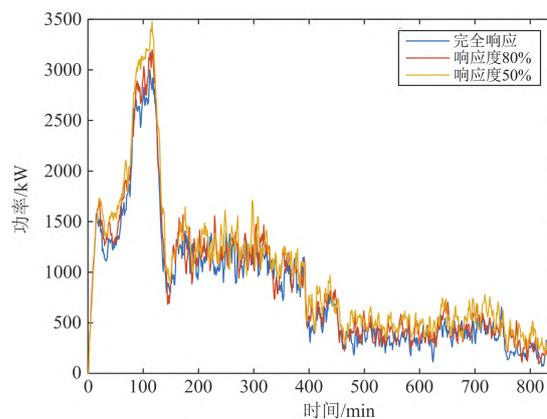


图10 不同响应度下空调负荷聚合功率

Fig. 10 Aggregated power of air conditioning load under different response levels

4.3.2 不同控制方式对调度策略的影响

针对空调负荷的聚合调度，当前的调度方法多采用分组控制^[5]的方式。但是，由于分组控制是对组内负荷进行集中统一控制，无法细化调控间隔，可能出现调节不足或过度调节的问题。本节在对空调负荷额定功率进行聚类分组的基础上，对各组温度设定值调节量组内相同、组外各异，进行优化调度，最后得到不同控制方式下日负荷曲线参数见表 6。

表 6 不同控制方式下日负荷曲线参数
Table 6 Daily load curve parameters under different control methods

控制方式	拟合率	聚合商收益/元	不舒适度水平
单台控制	0.9649	1239.7	2610
分组控制(10 组)	0.9612	1214.9	2928
分组控制(5 组)	0.9536	1196.8	5175
分组控制(3 组)	0.9505	1185.2	3258

将分组控制策略与本文所用策略进行对比，可知两种控制方式在使得负荷聚合商获得最大利益的情况下，本文所采用的单台空调控制能够更好地保证用户调节行为的多样性。同时得到日负荷曲线与最优负荷曲线拟合度更高，负荷聚合商的收益更大。由此说明采用本文所提调度策略能够考虑用户的差异性，更加充分地挖掘空调的调控潜力，同时依据舒适度水平可知，本文策略用户整体不舒适度水平更低，说明本文控制策略产生的调节行为对用户影响更小。

随着新型控制技术、智能家居技术和通信设备的发展，通过 5G、智能家居云等新技术可以实现设备的快速调控，使得对单台空调负荷的精细化控制成为可能。同时，本文研究空调负荷集群参与日前调度，有充足的时间来进行控制信号的下发，可以忽略通信中可能产生的时延问题。因此，针对具备智能调控的场景，在日前调度阶段考虑多样化调节的单台控制方式具备更高的调控精度，更好地保障负荷聚合商的收益和用户的舒适度水平，能够进一步促进空调负荷集群调控潜力的挖掘。

5 结论

本文研究了一种考虑用户调节行为多样性的空调负荷聚合商日前调峰优化调度策略。该策略基于单个空调负荷温度控制展开，面向负荷聚合商建立了双层优化调度模型。上层优化考虑空调负荷聚合商的收益，下层优化考虑用户的最佳舒适度水平。最后基于空调温度设定值控制，获得了负荷聚合商管辖区内单个空调的调控方案，保证了调节行为的多样性。该调控策略考虑单个空调运行参数，通过

对空调负荷温度设定值进行差异化调节，在保证空调负荷聚合商最大利益的前提下，最大限度地保障不同用户的舒适度，改善电网负荷的峰谷差。通过算例对比表明：

1) 该策略在不同用户响应度情况下均能够保障负荷聚合商的收益和用户舒适度，具有良好的适应性；

2) 与基于分组控制的调度策略相比较，本策略能够在保证用户调度多样性的同时，充分挖掘负荷的调控潜力，降低调控行为对用户舒适度的影响。

由于本文负荷聚合商参与电网日前调度，次日温度变化和电网基础负荷需要通过预测获得。对于日中运行时，与日前计划相比会出现一定的误差，可通过实时调度、辅助服务市场进行调控，调节日前调度策略的误差。

参考文献

[1] 杨秀, 傅广努, 刘方, 等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 699-708.
 YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 699-708.

[2] 任惠, 陆海涛, 卢锦玲, 等. 考虑信息物理系统耦合和用户响应差异的负荷聚合商需求响应特性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3927-3936.
 REN Hui, LU Haitao, LU Jinling, et al. Analysis of LA demand response characteristics considering cyber physical system coupling and user's response difference[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3927-3936.

[3] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
 SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167.

[4] 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 Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. 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.

[5] CHU C, JONG T, HUANG Y. Mitigating DLC constraints of air-conditioning loads using a group-DLC method[C] // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting,

- June 24-28, 2007, FL, USA: 1-6.
- [6] 杜小瑾, 李瑶虹, 李佳, 等. 中央空调轮停技术方案比较[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(3): 31-32.
DU Xiaojin, LI Yaohong, LI Jia, et al. Comparison on technical schemes of duty-cycling control in central air-conditioning system[J]. Power Demand Side Management, 2006, 8(3): 31-32.
- [7] HUI X, YANG G. Central air-conditioning terminal intelligent control system, 2012 second international conference on instrumentation, measurement, computer, communication and control[C] // 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, December 8-10, 2012, Harbin, China: 1029-1032.
- [8] 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.
- [9] 孙毅, 陈一童, 李彬, 等. 基于温度密度聚类的热泵负荷集群控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 46-52.
SUN Yi, CHEN Yitong, LI Bin, et al. Control strategy of heat pump load cluster based on temperature density clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 46-52.
- [10] 郝金宝, 张勇军, 刘泽槐, 等. 基于空调负荷温差-功率特性的博弈分层优化调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 70-78.
HAO Jinbao, ZHANG Yongjun, LIU Zehuai, et al. Hierarchical game optimization scheduling based on temperature difference and power characteristics of air-conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 70-78.
- [11] 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.
- [12] 徐青山, 吴泉, 杨斌. 考虑状态差异性聚类的空调负荷直接负荷控制动态优化方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 33-42.
XU Qingshan, WU Xiao, YANG Bin. Dynamic optimization method of direct load control for air-conditioning load considering status diversity clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 33-42.
- [13] 刘萌, 梁雯, 张岩, 等. 计及空调负荷群控制的源-荷协同优化调度模型[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1230-1238.
LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Yan, et al. Cooperative generation-load optimal dispatching model considering air-conditioning load group control[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1230-1238.
- [14] 黄剑平, 陈皓勇, 林镇佳, 等. 需求侧响应背景下分时电价研究与实践综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 178-187.
HUANG Jianping, CHEN Haoyong, LIN Zhenjia, et al. A summary of time-of-use research and practice in a demand response environment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 178-187.
- [15] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [16] YANG Hejun, ZHANG Xinyu, MA Yinghao, et al. Critical peak rebate strategy and application to demand response[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 357-370.
- [17] 杨奇, 王丹, 何伟, 等. 基于社会清洁福利最大化的电热联合双边竞价市场出清优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 112-122.
YANG Qi, WANG Dan, HE Wei, et al. Research on clearing optimization of electricity-heat coordinated double auction market based on social clean welfare maximization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 112-122.
- [18] 卢仁军, 李然, 王健, 等. 考虑需求侧响应的新能源接入下的配电网无功规划研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 46-51.
LU Renjun, LI Ran, WANG Jian, et al. Reactive power planning of distribution network with renewable energy resource considering demand side response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 46-51.
- [19] 宋爽, 李中伟, 刘勇, 等. 住宅小区负荷群用电优化策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(8): 57-66.
SONG Shuang, LI Zhongwei, LIU Yong, et al. Study on the optimization strategy of power consumption of load groups in residential quarters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 57-66.
- [20] 姚焱, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17):

4987-4998, 5296.
 YAO Yao, ZHANG Peichao, WANG Yongquan. A two-layer control method for thermostatically controlled loads to provide fast frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.

[21] SONG M, SUN W, WANG Y, et al. Hierarchical scheduling of aggregated TCL flexibility for transactive energy in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2452-2463.

[22] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.

[23] CHEN Y, LUO F, DONG Z, et al. A day-ahead scheduling framework for thermostatically controlled loads with thermal inertia and thermal comfort model[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 568-578.

[24] ZHAO H, WU Q, HUANG S, et al. Hierarchical control of thermostatically controlled loads for primary frequency support[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2986-2998.

[25] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.
 YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.

[26] YAO Y, ZHANG P. Unified control strategy of heterogeneous thermostatically controlled loads with market-based mechanism[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(6): 1231-1239.

[27] 赵兵, 王增平, 孙毅. 计及差异化用能需求的集群空调负荷优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 22-27.
 ZHAO Bing, WANG Zengping, SUN Yi. Optimal control strategy of cluster air conditioning load considering differential energy demand[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 22-27.

[28] XIA Mingchao, SONG Yuguang, CHEN Qifang. Hierarchical control of thermostatically controlled loads oriented smart buildings[J]. Applied Energy, 2019, 254.

[29] WEI Congying, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Coordination optimization of multiple thermostatically controlled load groups in distribution network with renewable energy[J]. Applied Energy, 2018, 231: 456-467.

[30] 刘士浩. 面向智能电网频率调节的温控负荷控制策略与奖励机制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
 LIU Shihao. Thermostatically controlled loads control strategy and reward mechanism for smart grid frequency regulation[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

[31] 黄倩倩, 李俊. 环境温度突变时人体热感觉变化机制研究进展[J]. 纺织学报, 2020, 41(4): 188-194.
 HUANG Qianqian, LI Jun. Research progress on mechanism of human thermal sensation under ambient temperature step change[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(4): 188-194.

[32] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨[J]. 中国卫生统计, 2002(1): 9-11.
 ZHANG Shiqiang. Approach on the fitting optimization index of curve regression[J]. Chinese Health Statistics, 2002(1): 9-11.

[33] 祁辉, 熊鹰, 周树民. 基于粒子群算法的整数规划问题的求解算法[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 26-29.
 QI Hui, XIONG Ying, ZHOU Shumin. Solution to integer programming problem based on particle swarm optimization[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 26-29.

[34] 黄润. 电动汽车入网对电网负荷影响的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
 HUANG Run. Impacts of electric vehicles charging on the load of power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

[35] 宋玉光. 面向智能楼宇的主动配电网温控类柔性负荷优化控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
 SONG Yuguang. Research on thermostatically controlled flexible loads optima control strategy for active distribution network orienting smart buildings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2022-03-30

作者简介:

范德金(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力负荷特性分析与调控; E-mail: fandejin@stu.scu.edu.cn

张 姝(1988—), 女, 通信作者, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为配电网保护与故障定位、电力负荷特性与建模、电力扰动分析; E-mail: ZS20061621@163.com

王 杨(1990—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新型电力系统电能质量分析与控制、宽频振荡广域监测、溯源与抑制、非线性控制理论在新型电力系统中的应用等。E-mail: fwang@scu.edu.cn

(编辑 许 威)