

基于中央空调虚拟储能模型的调峰策略研究

郭旭歆¹,高赐威¹,王朝亮²,李磊²,刘炜²

(1. 东南大学 电气工程学院,南京 210096;2. 国网浙江省电力有限公司,杭州 311100)

Peak adjustment strategy based on central air conditioning virtual energy storage model

GUO Xuxin¹, GAO Ciwei¹, WANG Chaoliang², LI Lei², LIU Wei²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

摘要:中央空调负荷已成为高峰负荷的主要组成部分,利用中央空调缓解电网高峰负荷已经成为一种有效手段。首先分析中央空调系统,结合中央空调的启停控制和柔性控制建立了调控方式,并结合室内热过程模型分析了中央空调的调控潜力。获取虚拟充放电功率、虚拟储能电量、虚拟储能荷电状态参数,并通过虚拟储能充放电效率参数描述不同控制方式下的差异,将中央空调模型转化为虚拟储能模型。基于虚拟储能模型,以削减的负荷量尽量靠近计划削减负荷为目标,提出了虚拟储能群组削峰策略,并通过算例验证了该削峰策略的效果。

关键词:中央空调;群组削峰策略;柔性控制;虚拟储能模型

Abstract: Central air conditioning load has become the main component of peak load, alleviating peak load by central air conditioning has become an effective mean. Firstly, the central air conditioning system is analyzed, the control mode combining with the start-stop control and flexible control of the central air conditioning is established, and the potential of the central air conditioning is analyzed combined with the indoor thermal process model. The parameters of virtual charge-discharge power, virtual energy storage capacity and virtual energy storage state are obtained. The differences between different control modes are described by virtual energy storage charge-discharge efficiency, and the central air conditioning model is transferred to virtual energy storage model. Based on the virtual energy storage model, a peak adjustment strategy for virtual energy storage group is proposed to reduce the peak load as far as possible to the planned load reduction. The simulation results verify the effectiveness of the peak adjustment strategy.

Key words: central air conditioning; group peak adjustment strategy; flexible control; virtual energy storage model

0 引言

近年来电网负荷快速增长,对电网的调峰能力提出了更高的要求。利用大体量的中央空调缓解电网峰谷差的方法应运而生,中央空调通过热量的存储与释放实现电能的虚拟存储和释放,参与电力系统调峰^[1-3]。

目前空调负荷参与电力系统调峰方面的研究主要集中于分组周期性暂停技术和空调集中性群控。文献[4]分析了空调系统周期性暂停用电技术,在不影响用户舒适度的情况下,以极小的经济代价为电网避免可观的系统峰荷容量。文献[5]对3种空调轮停技术:通信规约控制、干接点控制和智能减载控制进行优选,实现了夏季高峰负荷时期的削峰填谷。文献[6]通过建立热力学模型和人体舒适度模型,结

合空调启停控制技术建立空调虚拟储能模型,但仅研究了空调本体的启停控制技术,无法实现对空调负荷的柔性控制。文献[7]将空调负荷和储能系统相结合,构建了空调负荷虚拟电厂模型,并提出了一种主动配电网多目标调度优化方法。文献[8]通过直接负荷控制的集群空调负荷,实现了风电场输出功率波动就地消纳。

本文分别分析中央空调启停控制方式和冷冻水出水温度控制方式,将中央空调模型等效为虚拟储能模型。构建了虚拟储能模型的运行参数,提出了基于虚拟储能模型的中央空调削峰策略,并通过算例验证了策略的有效性。

1 虚拟储能模型

中央空调制冷主机消耗电功率产生冷量,并将冷量存储在房间内,这一特性使得中央空调具有储能性质,可以实现电能消耗的转移。因此构建中央

收稿日期:2022-04-18;修回日期:2022-05-20

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5400-202019491A-0-0-00)。

空调虚拟储能模型,并针对两种控制方式下的参数进行建模分析。

1.1 虚拟储能充放电功率

假设中央空调原处于额定工作状态下,通过改变其工作状态实现虚拟充放电,因此虚拟储能元件的充放电功率即为调控前后的功率差值,即

$$P_{\text{vir}}(t) = P'(t) - P(t) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{vir}}(t)$ 为 t 时刻虚拟储能元件的充放电功率,正值代表处于充电状态,负值代表处于放电状态; $P(t)$ 为调控之前中央空调消耗的功率; $P'(t)$ 为调控之后中央空调消耗的功率。

改变其工作状态的主要措施主要有启停制冷主机和改变制冷主机冷冻水的出水温度,下面针对这两种措施产生的功率变化进行分析。

(1) 启停制冷主机

对制冷主机进行调控,将其启动至额定工作状态,此时虚拟储能元件处于充电状态,充电功率为 P_N 。将制冷主机关停时,虚拟储能元件处于放电状态,放电功率为 $-P_N$ 。

考虑到对设备的损害,因此对中央空调制冷主机不宜进行频繁启停控制,本文限制在一个调峰周期内对同一台制冷主机进行启动控制和关停控制的次数之和不超过2次。

(2) 改变制冷主机冷冻水出水温度

中央空调制冷主机中的冷冻水是将冷量传递至房间的冷媒,冷冻水温度越低,制冷主机消耗的功率则越大。通常冷冻水温度设定值范围为7~15℃,并且冷冻水温度平均每升高1℃,主机能耗就降低2.5%,即

$$P_{\text{vir}}(t) = \lambda(T_{\text{chilled}} - T'_{\text{chilled}})P_N \quad (2)$$

式中: $\lambda = 2.5\%$; T_{chilled} 为调控之前冷冻水温度; T'_{chilled} 为调控之后冷冻水温度。

冷冻水温度调节实现了虚拟储能元件的充放电功率灵活控制,同时避免了频繁启停对空调制冷主机的损害。

1.2 虚拟储能电量

虚拟储能元件的电量表征了中央空调资源削负荷的最大能力,中央空调接受调控的过程中其制冷量收到影响,以启动制冷主机为例,其制冷量立刻由零增加至额定制冷量 Q_N 。根据能量守恒原理,任何时段空调房间的温度变化值正比于该时段房间得热量的总和与空调供冷量之差^[9],即

$$C_a \cdot V_k \cdot \rho_a \cdot dT_{\text{in}}(t) = Q_{\text{cl}}(T_{\text{in}}(t))dt + Q_{\text{nw}}(T_{\text{in}}(t))dt - Q_{\text{x}}(dT_{\text{in}}(t)) - Q_{\text{ac}}dt \quad (3)$$

式中: $C_a = 0.28 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 为空气定压重量比热; V_k 为

用户的制冷空间体积,可由建筑面积与层高计算; $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度; $T_{\text{in}}(t)$ 为回风温度,表征了中央空调所有室温的平均量; Q_{cl} 、 Q_{nw} 、 Q_{x} 分别为房间瞬时得热量、新风系统带来的热量和围护结构的蓄热量; Q_{ac} 为制冷量。

通过求解式(3)所示微分方程并令 $\tau = A/B$, 可得到回风温度的表达式

$$T_{\text{in}}(t) = \frac{C - Q_N}{B} - \left[\frac{C - Q_N}{B} - T_{\text{in}}(0) \right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

式中: A, B, C 均为房间热过程参数; $T_{\text{in}}(0)$ 为未实施调控时的回风温度。

式(4)描述了在启动中央空调制冷机组后,回风温度逐渐下降的过程。由于人体对回风温度存在需求,对中央空调的调控应使回风温度保持在人体舒适度范围 $[T_{\text{in}}(0) - \delta, T_{\text{in}}(0) + \delta]$ 内,因此虚拟储能元件的电量值为使得回风温度从舒适度上限 $T_{\text{in}}(0) + \delta$ 逐渐下降至舒适度下限 $T_{\text{in}}(0) - \delta$ 时所消耗的电量为

由式(4)可得到虚拟储能元件的电量值为

$$E = P_N \tau \ln \left[1 + \frac{2\delta}{\frac{Q_N - C}{B} + T_{\text{in}}(0) - \delta} \right] \quad (5)$$

1.3 虚拟储能荷电状态

储能元件荷电状态(state of charge, SOC)为电池剩余电量与电池满电量的比值^[10]。对于中央空调虚拟储能元件而言,当前温度与舒适度下限的差值反映了剩余电量的大小,舒适度上下限的差值反映了满电量的大小。因此定义虚拟储能元件荷电状态^[7]为

$$SOC(t) = \frac{T_{\text{in}}(0) + \delta - T_{\text{in}}(t)}{2\delta} \quad (6)$$

虚拟储能元件的荷电状态的取值范围为 $[0, 1]$ 。当回风温度 $T_{\text{in}}(t) = T_{\text{in}}(0) - \delta$ 时, $SOC = 1$, 虚拟储能元件不具备充电能力仅具备放电能力,当回风温度 $T_{\text{in}}(t) = T_{\text{in}}(0) + \delta$ 时, $SOC = 0$, 虚拟储能元件不具备放电能力仅具备充电能力。

1.4 虚拟储能充放电效率

由于外界环境总对房间提供热量,因此在回风温度 $T_{\text{in}}(t) = T_{\text{in}}(0)$ 时,通过关停制冷主机至 $T_{\text{in}}(t) = T_{\text{in}}(0) + \delta$ 所释放的电量比通过启动制冷主机至 $T_{\text{in}}(t) = T_{\text{in}}(0) - \delta$ 所消耗的电量少,因此引入虚拟储能充放电效率来描述这种差异。

根据前文所采用的方法计算关停制冷主机至回风温度达到温度上限过程释放的电量,表示为

$$E' = P_N \tau \ln \left[1 + \frac{2\delta}{\frac{C}{B} + T_{\text{in}}(0) - \delta} \right] \quad (7)$$

因此当以 E 作为该虚拟元件电量值时,虚拟元件充电效率 $\eta_{\text{ch}}^{\text{on-off}} = 1$, 虚拟元件放电效率 $\eta_{\text{dis}}^{\text{on-off}} = \frac{E'}{E} < 1$ 。

不仅如此,采用调整制冷主机冷冻水温度时的充放电效率也与采用启停控制时的充放电效率不同,下面分析采用调整制冷主机冷冻水温度时的充放电效率。

调整制冷主机冷冻水温度时,中央空调通过冷冻水向房间提供的制冷量按照如下规律改变^[9]

$$Q_{\text{AC}}(t) = a \cdot S_k \cdot C_{\text{water}} \cdot (T_{\text{in}}(t) - T_{\text{chilled}}) \quad (8)$$

式中: a 为冷冻水的温度变化指数; S_k 为单位时间冷冻水流量; C_{water} 为冷冻水的比热容。

同样的,将式(8)带入式(3)得到微分方程并求解,可得回风温度的表达式

$$T_{\text{in}}(t) = \frac{C + D \cdot T_{\text{chilled}}}{B + D} - \left[\frac{C + D \cdot T_{\text{chilled}}}{B + D} - T_{\text{in}}(0) \right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

式中: $D = a \cdot S_k \cdot C_{\text{water}}$ 为已知量。

通过式(9)和式(2)可得到将冷冻水温度由 T_{chilled} 上调至 T'_{chilled} 时,回风温度由下限至上限过程中共释放的电量 $E_{\text{dis}}^{\text{chilled}}$, 即

$$E_{\text{dis}}^{\text{chilled}} = (T_{\text{chilled}} - T'_{\text{chilled}}) \tau P_N \cdot 2.5\% \times \ln \left[1 + \frac{2\delta}{\frac{C + D \cdot T'_{\text{chilled}}}{B + D} - T_{\text{in}}(0) - \delta} \right] \quad (10)$$

此时 $T_{\text{chilled}} < T'_{\text{chilled}}$ 。将冷冻水温度由 T_{chilled} 下调至 T'_{chilled} 时,回风温度由上限至下限过程中共消耗的电量 $E_{\text{ch}}^{\text{chilled}}$, 即

$$E_{\text{ch}}^{\text{chilled}} = (T_{\text{chilled}} - T'_{\text{chilled}}) \tau P_N \cdot 2.5\% \times \ln \left[1 - \frac{2\delta}{\frac{C + D \cdot T'_{\text{chilled}}}{B + D} - T_{\text{in}}(0) + \delta} \right] \quad (11)$$

此时 $T_{\text{chilled}} > T'_{\text{chilled}}$ 。故通过调整冷冻水温度进行的虚拟充放电功率效率为

$$\eta_{\text{dis}}^{\text{chilled}} = \frac{E_{\text{dis}}^{\text{chilled}}}{E} \quad (12)$$

$$\eta_{\text{ch}}^{\text{chilled}} = \frac{E_{\text{ch}}^{\text{chilled}}}{E} \quad (13)$$

式中: $\eta_{\text{dis}}^{\text{chilled}} < \eta_{\text{ch}}^{\text{chilled}}$; E 为虚拟储能元件的电量值,由式(5)推导而来。

2 虚拟储能群组削峰策略

聚合大量中央空调虚拟储能元件在负荷高峰期放电,不仅能够实现移峰填谷,提升电网稳定性,促进电网高效运行,更对社会经济发展和节能减排有着重大意义。

结合前文所建立的虚拟储能元件模型,本文建立了虚拟储能元件优化削峰模型,通过优化模型得

出了虚拟储能元件群组实现削峰的最优策略。

2.1 削峰目标函数

以用户舒适度为代价的过量削减负荷将影响用户参与削峰的积极性,因此削峰的目标应使得削减的负荷尽量靠近计划削减负荷,将调峰总时长分为 m 个时段,每个时段的时长为 Δt , 针对 n 个虚拟储能元件构建削峰目标函数如下

$$\min \sum_{k=1}^m \left| \left(\sum_{i=1}^n P_{\text{vir}}^{i,k} \right) - P_{\text{tar}}^k \right| \quad (14)$$

式中: $P_{\text{vir}}^{i,k}$ 为第 k 时段第 i 个虚拟储能元件的虚拟充放电功率; P_{tar}^k 为第 k 时段的计划削减负荷。

2.2 约束条件

(1) 充放电功率限制约束

由前文所得虚拟储能元件的充放电功率存在限制,假设未对中央空调进行调控时的冷冻水温度处于冷冻水设定范围的中间值,此时该虚拟储能元件的充放电功率取值范围与调控方式关系如下

$$\begin{cases} P_{\text{vir}}^{i,k} = -P_N & \text{关停控制} \\ P_{\text{vir}}^{i,k} \in [P_{\text{dis}}^{\text{max}}, 0) & \text{上调冷冻水水温} \\ P_{\text{vir}}^{i,k} = 0 & \text{闲置} \\ P_{\text{vir}}^{i,k} \in (0, P_{\text{ch}}^{\text{max}}] & \text{下调冷冻水水温} \\ P_{\text{vir}}^{i,k} = P_N & \text{启动控制} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{dis}}^{\text{max}}$ 为上调冷冻水水温至水温上限 $T_{\text{chilled}}^{\text{max}}$ 时的虚拟放电功率; $P_{\text{ch}}^{\text{max}}$ 为下调冷冻水水温至水温下限 $T_{\text{chilled}}^{\text{min}}$ 时的虚拟充电功率。

(2) 荷电状态连续性约束

虚拟储能元件的荷电状态随着储能元件充放电而改变,因此储能元件在 k 时刻的荷电状态 $SOC_i(k)$ 与 $k+1$ 时刻的荷电状态为 $SOC_i(k+1)$ 之间有荷电状态连续性约束如下

$$SOC_i(k+1) = SOC_i(k) + \frac{P_{\text{vir}}^{i,k} \cdot \Delta t}{E \cdot \eta} \quad (16)$$

式中: $\eta = \begin{cases} \eta_{\text{ch}}^{\text{on-off}} & P_{\text{vir}}^{i,k} = P_N \\ \eta_{\text{dis}}^{\text{on-off}} & P_{\text{vir}}^{i,k} = -P_N \\ \eta_{\text{ch}}^{\text{chilled}} & P_{\text{vir}}^{i,k} \in [0, P_{\text{ch}}^{\text{max}}] \\ \eta_{\text{dis}}^{\text{chilled}} & P_{\text{vir}}^{i,k} \in [P_{\text{dis}}^{\text{max}}, 0) \end{cases}$ 为虚拟储能元件充放电效率; $\frac{P_{\text{vir}}^{i,k} \cdot \Delta t}{E \cdot \eta}$ 为虚拟储能元件因充放电行为导致荷电状态的变化量。

(3) 虚拟储能电量约束

任一虚拟储能元件的实际电量不应超过其最大电量值,用荷电状态表示即

$$0 \leq SOC_i(k) \leq 1 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

因此式(14)一式(17)构成了虚拟储能元件削峰优化模型,通过求解模型可获得虚拟储能元件群组最优削峰策略。

3 算例分析

本文以某商业楼宇中央空调为例,构建虚拟储能元件,该商业楼宇中央空调房间热过程参数采用文献[11]中的参数,室内初始温度 $T_{in}(0)=25\text{ }^{\circ}\text{C}$,其余参数如表1所示。

表1 典型商业楼宇中央空调参数

Table 1 Central air conditioning parameters for typical commercial buildings

额定功率/ kW	额定制冷 量/kW	冷冻水 上限/ $^{\circ}\text{C}$	冷冻水 下限/ $^{\circ}\text{C}$	回风温度 可调量/ $^{\circ}\text{C}$
550	5 280	15	7	2

根据式(4)和式(9)计算对中央空调的调控过程中回风温度的变化情况如图1所示,依次为关停控制、启动控制 and 上调冷冻水温度、下调冷冻水温度控制。

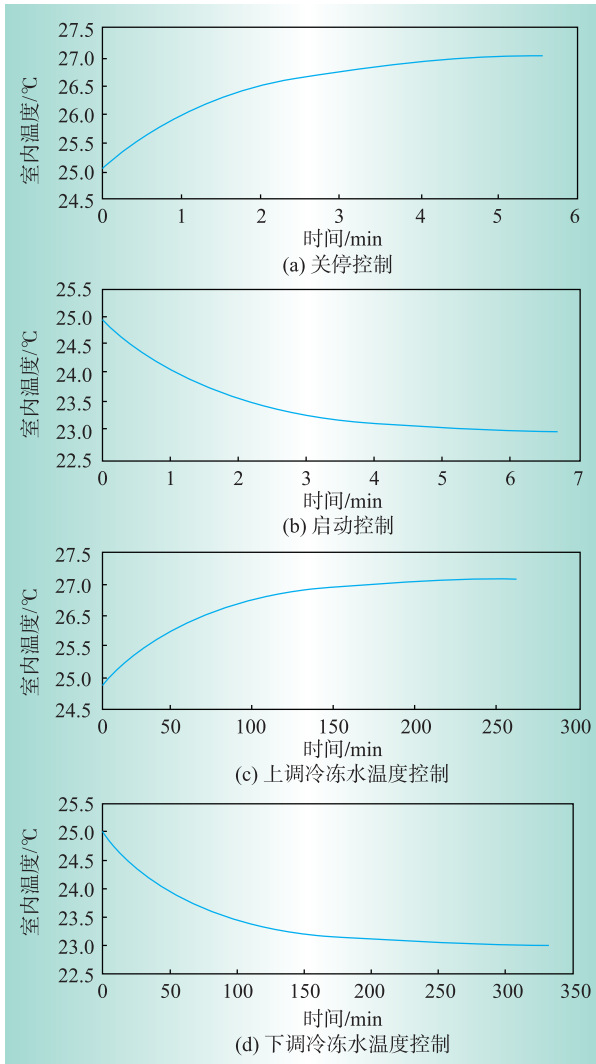


图1 回风温度变化情况

Fig. 1 Variation of return air temperature

由图1可以得知:

(1) 采用关停控制和上调冷冻水温度控制时,由于空调功率降低,回风温度不断上升,直至温度上限即停止对空调的控制。同理,启动控制和下调冷冻水温度控制时,回风温度下降直至下限即停止调控;

(2) 当采用启停控制时虚拟储能元件处于大功率充放电状态,由于受电量限制只能维持较短时间;

(3) 由于外界环境总是向房间提供热量,因此虚拟储能元件放电过程持续时间比充电时间短,虚拟储能元件放电效率较充电效率低。

根据式(5)计算出该虚拟储能元件电量为 $E=127.8\text{ kWh}$ 。根据式(12)、式(13)可计算得出该虚拟储能元件充放电效率值如表2所示。

表2 典型虚拟储能元件充放电效率

Table 2 Charging and discharging efficiency of typical virtual energy storage elements

调控方式	启动控制	关停控制	下调冷冻水温度	上调冷冻水温度
充/放电效率	1.000	0.961	0.762	0.654

采用包含10台中央空调的虚拟储能群组进行错峰仿真,假定各虚拟储能元件初始SOC均为0.5,通过前文所建立的削峰策略计划1 h内削减1 000 kW负荷。经计算可得出各虚拟储能元件SOC值变化情况和总削峰效果,如图2所示。

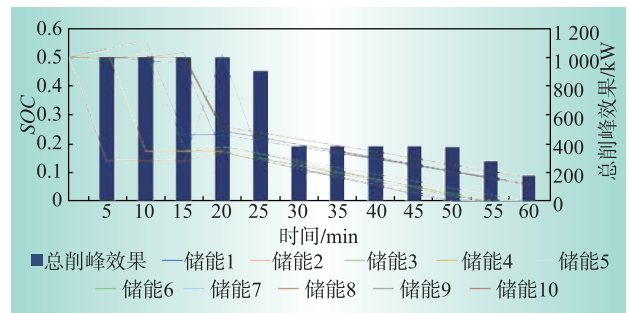


图2 虚拟储能元件SOC值及总削峰效果

Fig. 2 SOC of virtual energy storage element and total peak clipping effects

从图2可知总削减1 000 kW负荷仅维持了约25 min,在此过程中各虚拟储能元件的SOC均逐渐降低至较低水平。在25 min后由于中央空调已不可进行启停控制。

10台电量值 $E=127.8\text{ kWh}$,初始SOC为0.5的虚拟储能元件在不进行预充电的条件下进行削峰,无法实现持续1 h内1 000 kW的负荷削减。增加对削峰时段前的优化调控,通过预制冷措施使得各虚拟储能元件在调峰之前将SOC从0.5升高至1.0,再进行削峰,结果如图3所示。

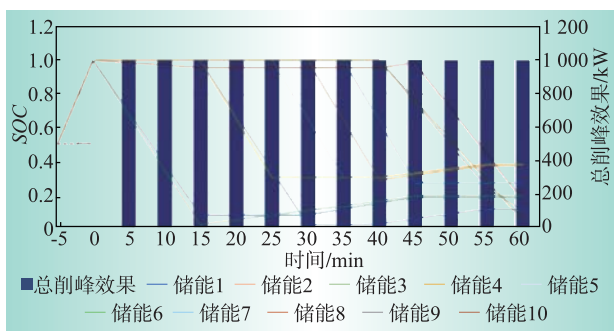


图3 采用预制冷后削峰效果

Fig. 3 Effect of peak cutting after precast cooling

由图3可知,对于同样的虚拟储能元件,采用预制冷措施后,在削峰开始前进行虚拟储能元件充电,则能够完成持续1 h内1 000 kW的负荷削减,完成削峰任务,说明该虚拟储能群组削峰策略有效。

4 结束语

本文以中央空调参与电力系统调峰为目标,建立了中央空调虚拟储能模型,将空调负荷抽象为储能元件。并基于虚拟储能模型以削减负荷量尽量靠近计划削减负荷量为目标,提出了虚拟储能群组削峰策略,算例结果表明虚拟储能元件能够在保证用户使用的的前提下实现削峰任务,并且中央空调采用预制冷策略将大幅提高削峰能力。D

参考文献:

- [1] 朱肖晶,朱兵,王科,等. 中央空调节能控制系统的技术应用分析[J]. 电力需求侧管理,2018,20(2):25-28. ZHU Xiaojing, ZHU Bing, WANG Ke, et al. Application and analysis of energy conservation control system of central air conditioning optimization[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(2):25-28.
- [2] HWANG J C. Assessment of air condition load management by load survey in Taipower[J]. IEEE Power Engineering Review, 2007, 21(10):63.
- [3] ZHANG D, LI S, SUN M, et al. An optimal and learning-based demand response and home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4):1 790-1 801.
- [4] 宋宏坤,王冬利. 集中空调系统周期性暂停用电技术研究[J]. 电力需求侧管理,2004,6(2):12-14. SONG Hongkun, WANG Dongli. Research of central air conditioning system duty cycling control[J]. Power Demand Side Management, 2004, 6(2):12-14.
- [5] 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.
- [6] 王怡岚,童亦斌,黄梅,等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术,2017,41(2):394-401. WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2):394-401.
- [7] 韩笑,周明,李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2018(7):14-23. HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018(7):14-23.
- [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):1 596-1 603. 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):1 596-1 603.
- [9] 辛洁晴,吴亮. 商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):49-54. XIN Jieqing, WU Liang. Hierarchical strategies for duty cycling control of air conditioners in business buildings[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5):49-54.
- [10] 朱丽群,张建秋. 一种联合锂电池健康和荷电状态的新模型[J]. 中国电机工程学报,2018(12):3 613-3 620. ZHU Liqun, ZHANG Jianqiu. A new model of jointed states of charge and health for lithium batteries[J]. Proceedings of the CSEE, 2018(12):3 613-3 620.
- [11] SONG M, GAO C, YAN H, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):5 522-5 534.

作者简介:

郭旭歆(1993),男,江西吉安人,硕士,主要研究方向为虚拟电厂;

高赐威(1977),男,浙江淳安人,通信作者,博士,教授,主要研究方向为电力需求侧管理、电动汽车接入电网、电力规划、电力市场;

王朝亮(1986),男,河北邢台人,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力需求侧管理、电能计量及用电信息采集技术;

李磊(1982),女,浙江金华人,高级工程师,主要研究方向为电力需求侧管理;

刘炜(1991),男,浙江宁波人,博士,工程师,主要研究方向为电力需求侧管理。

(责任编辑 史倩芸)