

计及空调负荷等多类型需求侧资源的虚拟电厂优化运行策略

吴宛潞¹, 韩 帅¹, 郭小璇¹, 孙乐平¹, 高赐威²

(1. 广西电网有限责任公司 电力科学研究院, 广西 南宁 530000;

2. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

Optimized operation strategy of multi-type demand side resources in virtual power plant considering air conditioning load

WU Wanlu¹, HAN Shuai¹, GUO Xiaoxuan¹, SUN Leping¹, GAO Ciwei²

(1. Electric power research institute, State Grid Guangxi Electric Power Co., Ltd., 530000, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

摘要:针对楼宇空调与其他类型需求侧资源的虚拟电厂内部协调优化问题,在对楼宇空调建模分析基础上,比较了楼宇空调启停控制和连续调节方式下用电量和室内温度变化特点,确定了适合于楼宇空调与虚拟电厂内部其他需求侧资源协调运行调节方式。进一步地,考虑楼宇用户舒适度分档和需求响应补偿价格,以区域供能成本最低为目标函数,建立了计及空调负荷的多类型需求响应资源的虚拟电厂协调优化模型,采用线性化方法处理非线性函数,将其转化为混合整数线性规划模型。算例表明:考虑用户舒适度的楼宇空调与虚拟电厂聚合的其他类型需求侧资源协调供能模式可有效的减少区域弃电量,同时降低楼宇本身耗电量,使得楼宇用户获取补偿收益。

关键词:需求侧资源;楼宇空调;协调优化;需求响应

Abstract: Aiming at the problem of operating in coordination with building air conditioner (BAC) and other types of demand side resources, in virtual power plant (VPP) the variation characteristics of indoor temperature and electricity consumption under the start-stop control and continuous regulation mode of BAC are compared based on modeling and analysis of BAC, thus the regulation mode adapted to coordinating the operation of BAC and other demand side resources in VPP is chosen. Furthermore, considering user's comfort grading and demand response compensation price, taking the lowest cost of regional energy supply as the objective function, a coordinative optimization model of multi-type demand side resources in VPP considering air conditioning load is established. Linearization method is used to deal with the non-linear function and optimization model is transformed into mixed integer linear programming model. The example shows that the coordinated energy supply mode of BAC and other demand-side resources in VPP considering users' comfort can effectively reduce regional load shedding and the power consumption of building, so that building users can obtain compensation benefits.

Key words: demand side resources; building air conditioner; coordinative optimization; demand response

0 引言

需求响应是智能电网的核心技术之一,能够有效抑制可再生能源发电随机波动,缓解系统调度负荷负担,促进节能减排。楼宇空调作为虚拟电厂典型负荷需求响应资源^[1-3],利用所属建筑环境具备热存储能力,能够在特定时间内将电能转化为热能进行存储,并且在一定温度范围内对人体无明显影响,因此,可参与电网调度,并获取补偿收益。

收稿日期:2019-08-25;修回日期:2019-10-03

基金项目:广西电网公司科技项目资助(GXKJXM20170391)

This work is supported by Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Corporation (No. GXKJXM20170391)

在需求响应项目中,除了负荷资源,广义需求侧资源^[4-7]还包括分布式发电(distributed generation, DG)资源和储能资源。通过合理地协调利用虚拟电厂聚合的多类型需求侧资源,引导用户参与入网调度进行削峰填谷的问题引起众多学者的关注。文献[6]提出了规模化公共楼宇中央空调负荷统一参与电网日前削峰的组合调控模型,为与其他类型需求侧资源协调优化提供了建模基础。文献[7]考虑需求响应补偿价,提出了基于需求响应的建筑楼宇综合能源系统优化调度模型,可有效降低峰谷差。

上述研究对虚拟电厂多类型需求侧资源协调运行做出有意义探索,但针对选择合适楼宇空调调节时间尺度、调节方式与虚拟电厂聚合的其他类型需求侧资源协调问题涉及不够深入。本文在前人

研究基础上,分析了楼宇空调启停控制和连续调节方式下用电量和室内温度变化特点,确定了适合于楼宇空调与虚拟电厂内部其他需求侧资源协调运行调节方式。进一步地,考虑楼宇用户舒适度分档和需求响应补偿价格,以区域供能成本最低为目标函数,建立了计及空调负荷等多类型需求响应资源的虚拟电厂协调优化模型。算例表明本文所构模型可有效的减少区域弃电量,同时降低楼宇用户本身耗电量,使得楼宇用户获取补偿收益。

1 楼宇空调模型及调节方式选取

1.1 楼宇空调模型

空调系统建模是空调负荷参与需求响应基础,主要包含所属建筑物的热力学建模和空调机组的电热转化建模两个方面内容。其中,热力学建模重点描述建筑物室内温度与制冷(热)量的时变关系;而空调电热转化建模描述了空调制冷(热)量与功率之间的定量关系。两者共同建立了室内温度与功率的内在联系,为制定空调负荷的需求响应策略提供了依据。图1为等效热参数电路。

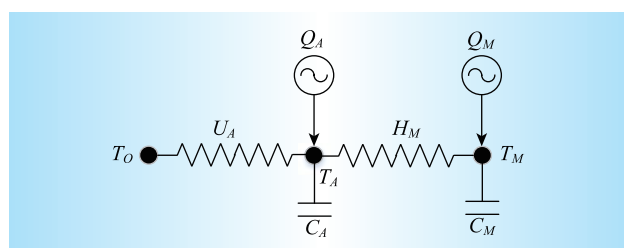


图1 等效热参数电路

Fig. 1 Equivalent thermal parameter model

如图1所示,考虑到室内空气和墙体温度的差异性时,本文在构建建筑物的热力学模型时,采用基于电路模拟的等效热参数(equivalent thermal parameters,ETP)模型^[1]。

$$Q_A - U_A(T_A - T_o) - H_M(T_A - T_M) - C_A \frac{dT_A}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$Q_M - H_M(T_M - T_A) - C_M \frac{dT_M}{dt} = 0 \quad (2)$$

式中: Q_A 为输送到室内空气热/冷量,具体包括加热/冷却系统产生的热/冷量、太阳辐射热量和电器产生的热量; Q_M 为部分比例室内空气热/冷量输送到墙体; T_A 、 T_M 和 T_o 分别为室内温度、墙体温度和室外温度; U_A 、 H_M 分别为室内空气热损失系数、墙体表面电导; C_A 、 C_M 分别为室内空气和墙体的等效比热容。

进一步,在常数边界条件 T_o 、 Q_A 或 Q_M 及初始时刻 $t=0$ 对应的条件 T_{A0} 和 dT_{A0}/dt ,可以推导出在空调作用下建筑楼宇的室温和墙体温度时变方程

$$T_A = A_1 e^{r_1 t} + A_2 e^{r_2 t} + \frac{d}{c} \quad (3)$$

$$T_M = A_1 A_3 e^{r_1 t} + A_2 A_4 e^{r_2 t} + g + \frac{d}{c} \quad (4)$$

值得注意的是, c 、 r_1 、 r_2 、 A_3 、 A_4 均是常数参数; A_1 、 A_2 是与初始时刻或前一时刻室内温度及其关于时间导数有关的参数; d 、 g 是与热/冷却系统产生的热/冷量有关的决策变量。

1.2 调节方式比较

建筑楼宇空调负荷调节方式分为刚性控制和柔性控制,前者主要是启停控制,后者包括末端设备轮停控制、冷冻水出水温度控制等。其中,冷冻水出水温度控制本质上是对制冷机输出功率的调节,本文忽略冷水系统热惯性等因素,比较启停控制和功率连续调节方式下用电量和室内温度变化特点,这里启停控制是指空调在单位调度时段内如果开机,则以额定功率运行。同时,考虑到室外温度、太阳辐射时变特点,分别选取单位调度时段为1 min、2 min、3 min和5 min,以1栋建筑楼宇整个调度周期用电量最小为优化目标比较不同单位调度时段影响,这里遵循室温时变方程(3)、方程(4)和空调电冷功率转换方程,并限制室内温度不超过78.8°F(26°C),其他参数参考3.1算例设计,仿真结果如表1、图2所示。

表1 不同单位调度时段用电量

Table 1 Power consumption under different unit dispatching periods

	kWh			
单位调度时段	1 min	2 min	3 min	5 min
启停控制	10 594.6	10 799.3	10 824.8	11 387.8
连续调节	10 067.6	10 067.6	10 067.6	10 067.6

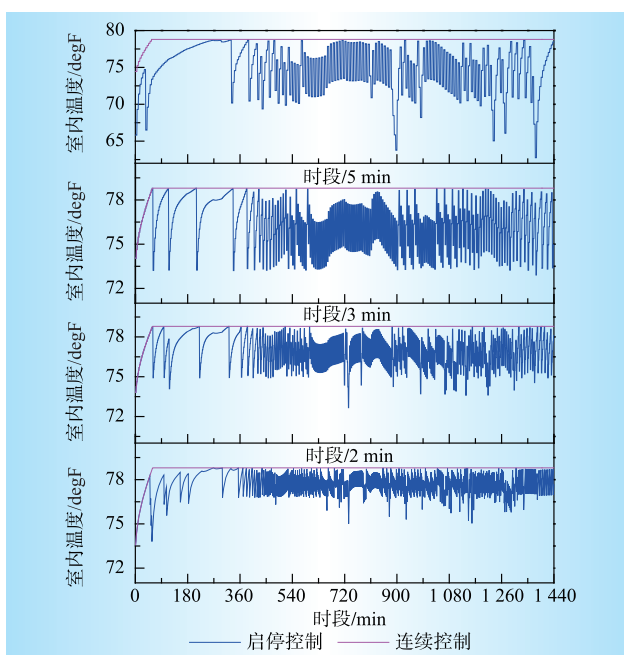


图2 楼宇室内温度曲线

Fig. 2 Indoor temperature curves

分析表1可知,连续调节方式下楼宇空调的用电量要比启停控制方式小,且连续调节方式下用电量不随单位调度时段取值变化,而启动控制方式下用电量随单位调度时段取值增加而增加。

结合图2分析可知,连续调节方式下室内温度变化相比启停控制方式较平滑。启动控制方式下室内温度变化幅度随着单位调度时段取值增加而变大,而连续调节方式下室内温度增至其上限就不再变化,且不随单位时段取值变化。

综上,连续调节方式更适合与其他分布式电源协调运行,考虑到室外环境时变特点,单位调度时段可取值5 min。

2 虚拟电厂多类型需求响应资源优化模型

2.1 目标函数

文中虚拟电厂的优化运行的目标是在满足各分布式单元正常运行的约束条件下,通过合理安排各可控单元的出力计划,使区域供能运行费用最少。光伏(photovoltaic, PV)等可再生能源机组,相对于燃料发电机组,其成本很小,通常可以不计。

$$\sum_{t=1}^{N_t} (C_{GT,t} + C_{grid,t} + C_{BAC,t}) \quad (5)$$

式中: N_t 为运行时段; $C_{GT,t}$ 、 $C_{grid,t}$ 和 $C_{BAC,t}$ 分别为 t 时段的燃气轮机成本、购电成本和调用楼宇空调的补偿费用。

燃气轮机(gas turbine, GT)成本主要是GT的生产费用。

$$C_{GT,t} = c_g g_{GT,t} / (LHV \cdot \eta_{GT,t}) \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中: c_g 为燃气价格; LHV 为天然气的低位热值; $\eta_{GT,t}$ 为 t 时段燃气轮机发电效率; Δt 为单位调度时段。

购电成本为从外部电网购电费用

$$C_{grid,t} = c_{grid} g_{grid,t} \Delta t \quad (7)$$

式中: c_{grid} 为从外部电网购电价格; $g_{grid,t}$ 为 t 时段联络线输送率。

楼宇空调补偿费用采取按节电量补偿方法。

$$C_{BAC,t} = c_{HVAC} \sum_{c=1}^{N_c} (P_{c,t} - P_{c,e,t}) \Delta t \quad (8)$$

式中: N_c 为楼宇数量; c_{HVAC} 为单位节电量补偿费用; $P_{c,t}$ 为 t 时段第 c 楼宇空调耗电功率; $P_{c,e,t}$ 为 t 时段楼宇空调 c 的不参与需求响应的耗电功率。

2.2 约束条件

目标函数主要满足的约束条件包括BAC约束、储能约束、GT运行约束、光伏发电约束、功率平衡约束以及联络输送功率限值约束。

2.2.1 BAC约束

夏季人体感觉舒适的室温范围 $24^\circ\text{C} \sim 27^\circ\text{C}$ ^[3]。为此设置3档舒适度等级,温度上限分别为 26°C 、 27°C 、 28°C 。为减轻计算工作量,文中考虑楼宇空调运行周期内只处于参与需求响应和不参与需求响应两种运行状态中1种,且参与需求响应,仅受控于1档。

$$P_{c,t} = B_{c,e} P_{c,e,t} + \sum_{m=1}^3 B_{c,m} P_{c,m,t} \quad (9)$$

$$B_{c,e} + \sum_{m=1}^3 B_{c,m} = 1 \quad (10)$$

式中: $P_{c,m,t}$ 为 t 时段楼宇空调 c 受控于第 m 档的耗电功率; 布尔变量 $B_{c,e}$ 、 $B_{c,m}$ 分别为楼宇空调是否处于不受控状态、受控于第 m 档状态,是则取1。

2.2.2 储能约束

$$S_{ES}^{\min} \leq S_{ES,t} \leq S_{ES}^{\max} \quad (11)$$

$$0 \leq g_{dis,t} \leq g_{dis}^{\max} u_{dis,t} \quad (12)$$

$$0 \leq g_{ch,t} \leq g_{ch}^{\max} u_{ch,t} \quad (13)$$

$$u_{dis,t} + u_{ch,t} \leq 1 \quad (14)$$

$$S_{ES,0} = S_{ES}^{\text{ini}} \quad (15)$$

$$S_{ES,24} = S_{ES}^{\text{end}} \quad (16)$$

$$S_{ES,t} = S_{ES,t-1} + \eta_{ch} g_{ch,t} \Delta t - g_{dis,t} / \eta_{dis} \Delta t \quad (17)$$

式中: $S_{ES,t}$ 为 t 时段储能蓄电量; $S_{ES}^{\max}$ 、 $S_{ES}^{\min}$ 分别为储能蓄电量上、下限; $g_{ch}^{\max}$ 、 $g_{dis}^{\max}$ 分别为储能充、放电功率上限; 布尔变量 $u_{ch,t}$ 、 $u_{dis,t}$ 分别为 t 时段储能充是否处于充、放电状态,是则置1,否则置0; S_{ES}^{ini} 、 S_{ES}^{end} 分别为储能始、末时段蓄电量; η_{ch} 、 η_{dis} 为储能充、放电效率。

2.2.3 微型燃气轮机约束

$$\eta_{GT,t} = k_1 + k_2 \cdot g_{GT,t} / g_{GT}^{\max} + k_3 \cdot (g_{GT,t} / g_{GT}^{\max})^2 + k_4 \cdot (g_{GT,t} / g_{GT}^{\max})^3 \quad (18)$$

$$0 \leq g_{GT,t} \leq g_{GT}^{\max} \quad (19)$$

式中: $g_{GT}^{\max}$ 为微型燃气轮机的额定电功率; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 均为GT发电效率系数。

2.2.4 光伏发电约束

$$0 \leq g_{PV,t} \leq g_{PV,t}^{\text{pre}} \quad (20)$$

式中: $g_{PV,t}$ 为 t 时段光伏发电; $g_{PV,t}^{\text{pre}}$ 为 t 时段光伏发电预测值。

2.2.5 功率平衡约束

考虑到空调负荷为优化变量,本文将区域负荷分为空调负荷和其他负荷预测值两部分。

$$g_{PV,t} + g_{GT,t} + g_{dis,t} - g_{ch,t} + g_{grid,t} = \sum_{c=1}^{N_c} P_{c,t} + P_{d,t} \quad (21)$$

式中: $P_{d,t}$ 为 t 时段区域其他负荷预测值。

2.2.6 联络线约束

结合分布式电源“并网不上网”运行现状,将联络线输送功率方向限制为外部电网向区域单向输电。

$$0 \leq g_{\text{grid},t} \leq g_{\text{grid},\max} \quad (22)$$

式中: $g_{\text{grid},\max}$ 为联络线输送率上限。

上述优化模型中非线性函数主要是式(6)、式(18),采用分段线性化方法^[8]处理后,整个优化模型转化为混合整数线性规划模型。

3 算例分析

3.1 算例设计

本文算例选以5栋楼宇空调负荷、2台燃气轮机、1个光伏发电机组和1个储能系统构成虚拟电厂。总调度时段数为 $N_t=288$,单位调度时段为5 min。假设每栋楼宇中央空调参数相同。每栋商业楼宇标准层面积为1 225 m²,地上层数为28层,窗墙比为0.7,对应建筑及空调参数见表2。燃气轮机额定功率为5 MW,其发电效率系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 取值为0.106 8、0.417 4、-0.309 5、0.075 3。联络线输送功率上限为9 MW。储能系统容量为2 MWh,其蓄电量上、下限分别设为容量的95%和15%,充、放电功率分别为电池容量的40%和30%,充、放电效率均为90%,假设电网电价为0.528 3 元/kWh,燃气价格是2.6 元/m³,楼宇空调补偿价格是3 元/kWh。

表2 楼宇及空调参数

Table 2 Parameters of building and air conditioners

最大/最小 制冷量/kW	COP	$U_A /$ (Btu° F ⁻¹ h ⁻¹)	$C_a /$ (Btu° F ⁻¹)	$H_M /$ (Btu° F ⁻¹ h ⁻¹)	$C_M /$ (Btu° F ⁻¹)
5 988/0	3.9	148 147	160 347	821 784	631 507

区域光伏出力、其他负荷、空调负荷及室外温度预测值见图3,这里空调负荷预测值是以建筑楼宇整个调度周期用电量最小为优化目标,且室内温度限制为77°F(25℃)的得到结果,同1.2节。

3.2 算例分析

图3为负荷、光伏出力及室外环境温度预测值。结合图3,该区域负荷早高峰出现在133—162时段和晚高峰出现在235—252时段。在负荷高峰时段,可能出现容量缺额,需要启动楼宇负荷参与需求响应。因此,算例中楼宇空调限制在高峰负荷时段参与需求响应。虚拟电厂出力优化结果如图4。

图4中总负荷包含的空调负荷是启动楼宇空调参与需求响应结果,不同于图3中空调负荷。由于从外部电网购电价格低,优先从外部电网购电。在较高负荷时段,联络线输送功率达到限值,燃气轮机被调用供电。储能在负荷低谷充电、负荷高峰时放电,起到削峰填谷作用。当区域电源不足以满足负荷需求时,则启动费用较高的楼宇空调参与调度。

表3给出了楼宇空调实施舒适度分3档,参与需求

响应的结果。分析可知,相比楼宇空调不参与需求响应,楼宇空调参与需求响应减少区域弃电量为244.7 kWh,同时自身节省电量374.4 kWh,补偿费用为1 123.3元。

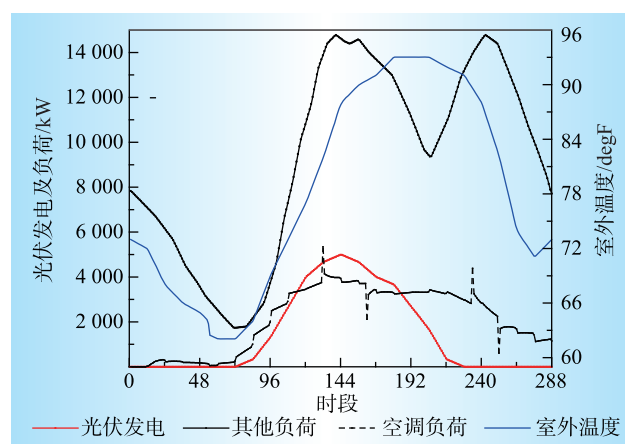


图3 负荷、光伏出力及室外环境温度预测值

Fig. 3 Forecast value of load, photovoltaic power and outdoor air temperature

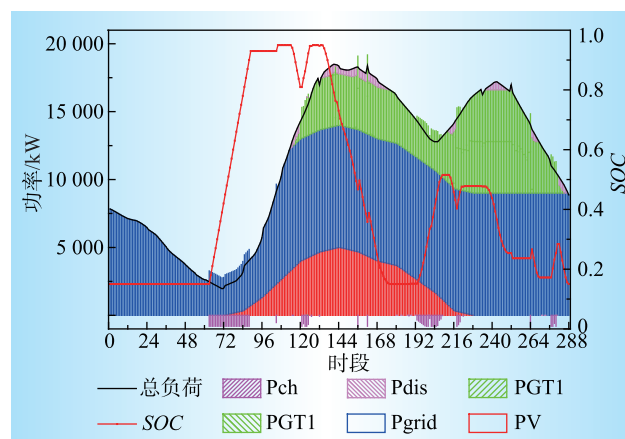


图4 虚拟电厂出力优化结果

Fig. 4 Optimized results of VPP

表3 实施3档优化结果

Table 3 Optimization results of 3-grade periods

分类	电量/kWh	费用/元
区域减少弃电	244.7	
楼宇空调节电	374.4	1 123.3
从外电网购电	178 484.8	94 293.5
燃气轮机发电	60 394.2	56 532.6
合计		151 949.4

各栋楼宇空调参与需求响应结果如表4所示。

表4 楼宇空调参与需求响应结果

Table 4 Results of building air conditioners participating in demand response

分档	不参与 需求响应	参与需求响应		
		一档	二档	三档
楼宇1	1	0	0	0
楼宇2	0	0	0	1
楼宇3	1	0	0	0
楼宇4	0	0	0	1
楼宇5	0	1	0	0

4 结束语

本文研究计及空调负荷等多类型需求侧资源的虚拟电厂优化运行策略,考虑楼宇用户舒适度分档和需求响应补偿价格,建立了计及空调负荷的虚拟电厂多类型需求侧资源协调优化模型,仿真结果表明,考虑舒适度分档的楼宇空调与虚拟电厂内部其他类型需求侧资源协调优化,可减少空调耗电量,同时减少区域用电弃电量,提高供电可靠性。文中未考虑冷水系统热惯性等因素对虚拟电厂多类型需求侧资源协调优化策略的影响。考虑冷水系统热惯性虚拟电厂多类型需求侧资源协调优化策略,将作为下一步研究的重点。D

参考文献:

- [1] 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 System, 2016, 40(14):158-167.
- [2] 王蓓蓓,朱峰,嵇文路,等. 中央空调降负荷潜力建模及影响因素分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(19):44-52.
WANG Beibei, ZHU Feng, JI Wenlu, et al. Load cutting potential modeling of central air-conditioning and analysis on influencing factors[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(19):44-52.
- [3] 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 System 2013, 37(5): 49-54.
- [4] 邢龙,张沛超,方陈,等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化,2013,37(12):7-12.
XING Long, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12):7-12.
- [5] 刘吉臻,李明扬,房方,等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5 103-5 111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(29): 5 103-5 111.
- [6] 徐青山,杨辰星,颜庆国. 计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J]. 电网技术,2016,40(1):156-163.
XU Qingshan, YANG Chenxing, YAN Qingguo. Strategy of day-ahead power peak load shedding considering thermal equilibrium inertia of large - scale air conditioning loads [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 156-163.
- [7] 张雪纯,高广玲,张智晟等. 基于需求响应的建筑楼宇综合能源系统优化调度[J]. 电力需求侧管理,2019,21(4):28-34.
ZHANG Xuechun, GAO GuangLing, ZHANG Zhisheng, et al. Optimal scheduling of building integrated energy system based on demand response [J]. Power Demand Side Management, 21(4): 28-34.
- [8] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):1-8.
WU Xiong, WANG Xuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8.

作者简介:

吴宛潞(1994),女,广西南宁人,硕士,助理工程师,主要从事电力需求侧管理、用电分析工作。

(责任编辑 柴明哲)

广告索引

国家电网有限公司 (封面)
国网江苏省电力有限公司信息通信分公司 (封二)
《电力需求侧管理》2020年选题方向 (封三)

南京国云电力有限公司 (封底)
《电力需求侧管理》中国科技核心期刊 (广01)