

新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究

印欣¹, 张锋², 阿地利·巴拉提¹, 常喜强¹, 陈武晖^{2*},
李长军¹, 李雪明³, 袁少伟⁴

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830000; 2. 太原理工大学
电气与动力工程学院, 山西省 太原市 030024; 3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省
南京市 210003; 4. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830000)

Study on Participation of Electricity-driven Thermal Load in Real-time Scheduling of New Power System

YIN Xin¹, ZHANG Feng², ADILI Balati¹, CHANG Xiqiang¹, CHEN Wuhui^{2*},
LI Changjun¹, LI Xueming³, YUAN Shaowei⁴

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China;
3. Guodian Nanrui Technology Co., Ltd., Nanjing 210003, Jiangsu Province, China;
4. State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

摘要: 以新能源为主的新型电力系统的功率平衡面临着重要的技术挑战, 以灵活负荷参与电力系统调节是提升新型电力系统有功平衡能力的重要途径。针对电热负荷季节性、时段性特征明显, 新能源“极寒极热无风”“晚峰无光”, 电热负荷在新型电力系统中呈现反调峰的趋势。针对这一问题, 全面分析了电热负荷时空特性和用能特性, 深入挖掘其调节潜力, 着重分析了电热可控负荷的控制场景, 并系统地给出了电热负荷的柔性调度策略, 完成电热负荷的柔性控制调节, 实现全时间尺度的网荷协同优化和灵活调度, 从而验证了该电网电热负荷实时参与调度的可行性。

关键词: 新能源; 新型电力系统; 源网荷储; 电热负荷; 可调节负荷资源; 柔性控制

ABSTRACT: The power balance of the new power system mainly based on new energy is facing an important technical challenge, and the participation of flexible load in power system regulation is an important way to enhance the active balance capability of the new power system. In view of the obvious seasonal and temporal characteristics of the electric and thermal loads, the new energy sources are “extremely cold

and hot without wind” and “late peak without light”, and the thermoelectric loads in the new power system show the trend of anti-peak regulation. To address this problem, this paper analyzed the spatial and temporal characteristics and energy-use characteristics of electric and thermal loads, explored their regulation potential, focused on the control scenarios of electric and thermal controllable loads, and systematically gave a flexible scheduling strategy for electric and thermal loads to complete the flexible control and regulation of electric and thermal loads. The results realize the network-load cooperative optimization and flexible scheduling on the whole time scale, and thus verify the feasibility of the real-time participation of electric and thermal loads in the scheduling of the grid.

KEY WORDS: new energy; new power system; source network load storage; electric and thermal loads; adjustable load resources; flexible control

0 引言

为适应“双碳”目标要求, 以新能源为主的新型电力系统构建迅速推进^[1-4]。在此形势下, 以化石能源为燃料的出力可控的常规机组在系统中占比越来越小, 出力不可控且随机波动的新能源发电机组占比越来越高, 将成为主力机组。与传统电力系统相比, 新型电力系统发电侧的有功功率调节能力下降, 仅靠少量常规机组调节电力系

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A01007-1); 国家自然科学基金项目(51977098)。

Project Supported by Major Science and Technology Projects of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022A01007-1); National Natural Science Foundation of China (51977098).

统的有功平衡几乎无法实现，有功功率调节技术成为实现以新能源为主的新型电力系统的关键技术挑战^[5]。因此，充分挖掘电力系统中负荷侧可调节资源参与有功功率调节，是提升以新能源为主的新型电力系统有功调节能力的重要途径^[6-7]。

随着我国对“煤改电”等清洁取暖改造政策扶持力度的加大，电采暖已成为各电网迎峰度冬最主要的负荷，其无序发展将极大影响新型电力系统运行^[8-9]。截至2021年10月，某电网电热用户共计94.5万户，容量为1 290.5万kW，其中：分散式电热用户有89.9万户，容量为676.7万kW；集中式电热用户有4.7万户，容量为613.7万kW。2021—2022年供暖季最大负荷约为631.7万kW，约占电热负荷额定容量的26%。近年来，特别是在冬季负荷高峰期，部分地区电网受到水电站蓄水保灌、火电供暖等影响，电源侧调节能力大幅降低，导致冬季晚高峰电力供需矛盾加剧。多数地区也受到电采暖负荷激增的影响，出现发电侧灵活调节尚显资源不足的问题^[10-12]。以上分析表明，电网亟需深入拓展以电供热为代表的新型电力系统负荷可调节能力，通过对电热负荷的柔性调度，提升电网供需互动水平。

国内外学者在电热负荷等可调负荷建模及调节能力评估方面进行了研究。文献[13-14]基于标准用户模型对电热用户负荷可调节能力进行评估，提出了一种基于温度预报的户用电热负荷可调节能力评估方法。文献[15]提出了弃风储热供暖协调调度策略，研究表明，利用弃风电不仅可以促进新能源消纳，同时还可以降低以电供热的成本。文献[16]采用多目标优化方法和基于离散选择模型的决策方法，对用户的差异化响应行为进行模拟，以求得单类用户的电负荷特性。文献[17-18]仿真分析了电热负荷的可调控容量和调控响应持续时间，并提出了电热负荷的“接力式”控制与“轮控”策略。文献[19]从分散式电热负荷控制需求的角度出发，分析了基于区块链的分散式电热负荷协同控制方案的适用性。文献[20]针对配电网与蓄热式电热负荷的匹配特性，提出了一种蓄热式电热负荷与配电网台区的匹配策略。文献[21]采用修正多目标粒子群算法，以系统运营成

本最小和系统污染排放量最小为目标，建立了多目标负荷调度模型。文献[22]建立了基于BP神经网络的负荷值预测模型，运用遗传算法和蛙跳算法对BP神经网络进行优化操作。文献[23]提出了一种考虑需求响应的热电联产深度调峰联合优化调峰方法，发电侧在热电联产机组上安装蓄热装置，打破了“以热定电”的传统。文献[24]建立了基于需求响应的电热水器与用水量的数学模型，采用热水器控制策略有效提高电网负荷率，降低负荷峰值。目前，大量研究着重对电热负荷柔性调节进行理论分析，但针对不同地域的负荷容量和特征，其实际应用却存在很大差异。

为此，本文基于某电网电热负荷的时空分布特点和用能特性，深入分析了直热式电锅炉和碳晶电热板等可调节负荷资源，给出了3种电热可控负荷的控制场景，提出了系统的柔性电热负荷调度策略，并通过算例分析验证了其可行性。

1 电热负荷时空分布特点和用能特性

1.1 电热负荷时空分布特点

表1汇集了2021年某地区电热负荷容量分布情况，可以看出，从地域特点来看，区域1主要以集中式电热负荷为主，区域2主要以分散式电热负荷为主。

表1 某地区电热负荷容量分布
Tab. 1 Capacity distribution of electric and thermal loads in a certain area 万kW

区域	电热负荷容量	分散式电热负荷		集中式电热负荷	
		直热式	蓄热式	直热式	蓄热式
1	634.1	76.9	197.2	80.4	279.6
2	656.4	59.9	342.8	56.8	196.9

从城市发展情况来看，城市群落较发达的区域1采用集中式电热负荷较多，农业地区较发达的区域2采用分散式电热负荷较多。

表2为某地区电热负荷最大负荷分布情况，可以看出，无论是区域1还是区域2，集中式电热最大负荷较高，分散式电热最大负荷较低。

从电热负荷用户数量分析其分布情况，如表3所示，可以看出，集中式电热负荷涉及用户较少，分散式电热负荷涉及用户较多。

表2 某地区电热最大负荷分布情况

Tab. 2 Distribution of maximum electric and thermal loads in a certain area					万 kW
区域	预计电热最大负荷	分散式电热最大负荷		集中式电热最大负荷	
		直热式	蓄热式	直热式	蓄热式
1	412.6	50.9	126.5	43.2	192
2	201.1	10.8	87.8	45.7	56.8

表3 某地区电热负荷用户分布情况

Tab. 3 User distribution of electric and thermal loads in a certain area					万户
区域	电热负荷用户	分散式电热负荷用户		集中式电热负荷用户	
		直热式	蓄热式	直热式	蓄热式
1	12.62	1.43	7.78	0.07	3.34
2	81.92	0.17	79.68	0.19	1.07

以2020年12月全网范围电热平均用电负荷为例,如图1所示,从时间角度分析,全网电热平均用电负荷为155.8万kW(占电热负荷容量的22%),电热最大用电负荷为182.4万kW(占电热负荷容量的26%,一般出现在02:00左右),电热最小用电负荷132.3万kW(一般出现在平段13:00左右),峰谷差为50.1万kW。

根据某区域2020年12月各地区电热日负荷数据(以用电采集系统每日96点数据为准,覆盖所有建档的电热负荷专用表计),选取负荷最大的4个地区来分析,如图2所示,电热负荷均呈类似特性,谷段(23:00—次日09:00,14:00—16:00)负荷较大,平段负荷较小,峰谷差一般为10%~20%。

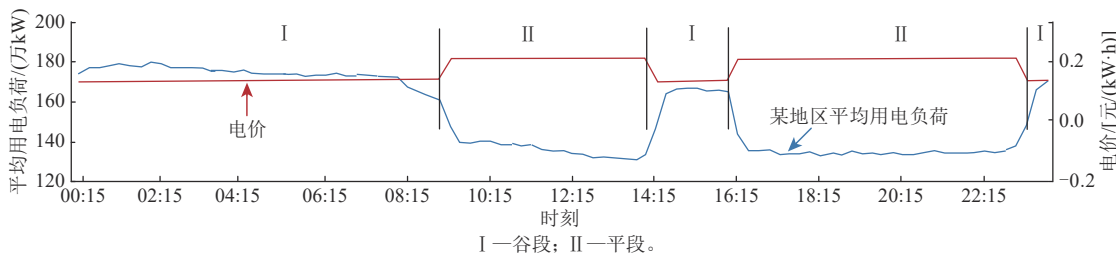


图1 某地区电网2020年12月电热平均用电负荷曲线

Fig. 1 Average power load curve of electric heating in a regional power grid in December 2020

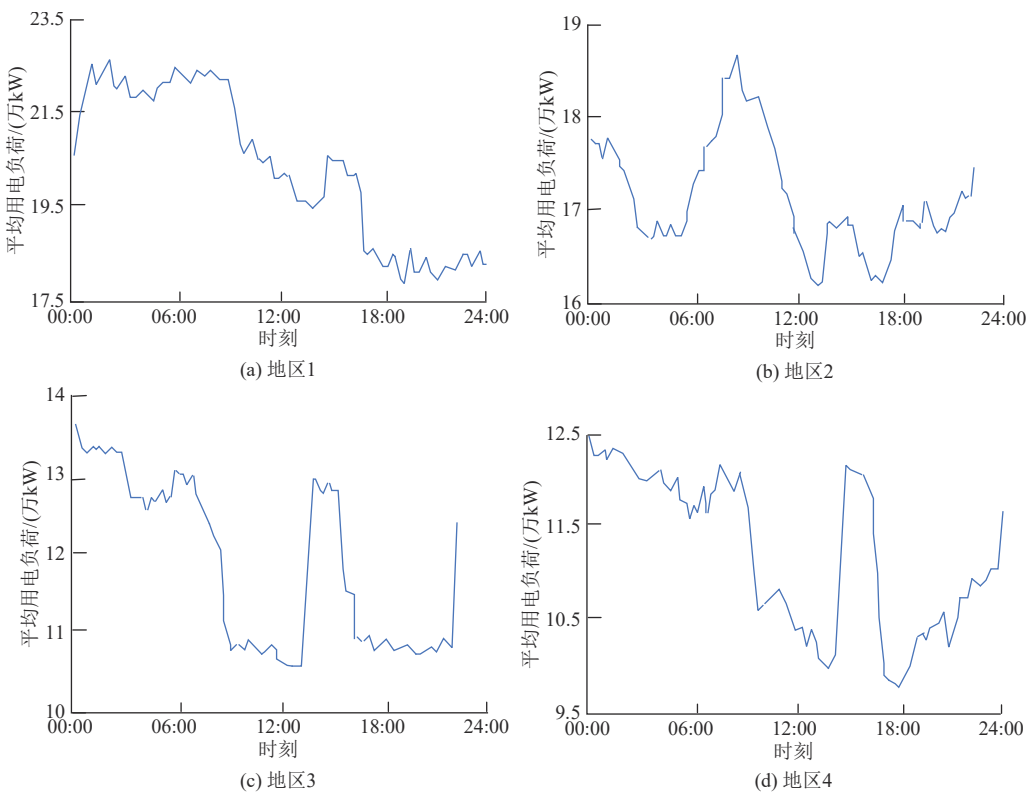


图2 4个负荷最大地区2020年12月电热平均用电负荷曲线

Fig. 2 Average power load curve of electric heating in 4 regions with the highest load in December 2020

1.2 电热负荷用能特性

从不同行业角度来看，集中式电热负荷受价格、用户习惯及温差等多重因素影响，主要呈现4种典型特性，如图3所示。学校、幼儿园等单位一般采用蓄热式供暖，低谷蓄满，高峰释放；夜间不生产的中小企业采用直热式供暖，白天集中供热，晚上停用，晚高峰基本无调节空间；24 h生产运行的企事业单位采用直热式供暖，用电负

荷曲线全天基本保持平稳，但晚高峰期间仍有一定调节空间；寄宿中学及政府机构同样采用直热式供暖，但早晚高峰用能明显较大，晚高峰期间调节空间充足。

因此，在集中式电热负荷中，蓄热式电热负荷受峰谷电价影响，已在晚高峰响应调峰，没有可调节容量改造空间。直热式电热负荷晚高峰部分具有可调节空间，但改造容量有限^[25]。

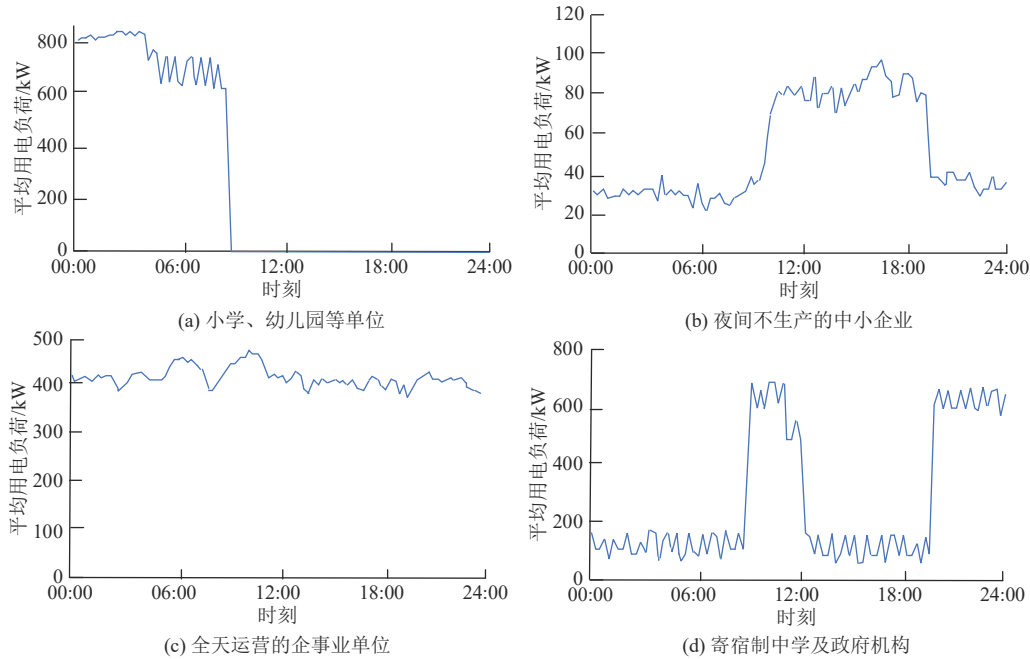


图3 典型行业2020年12月电热平均用电负荷曲线

Fig. 3 Typical industry's average electricity load curve for electric heating in December 2020

分散式电热负荷的主要用户包括“煤改电”用户和自行报装用户，其中采用碳晶电热板方式的 用户占比较高，主要以直热式为主，且不受价格影响，晚高峰可调节容量改造空间较大。电热负荷中蓄热式量少且无峰谷价差，主要受用户习惯和温差影响大。分散式电热负荷典型日负荷曲线如图4所示。

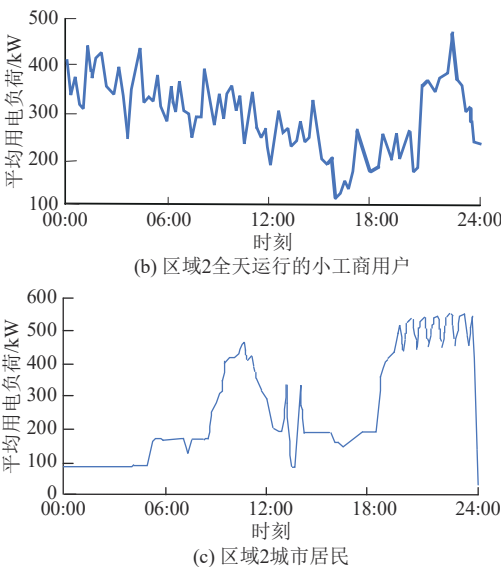
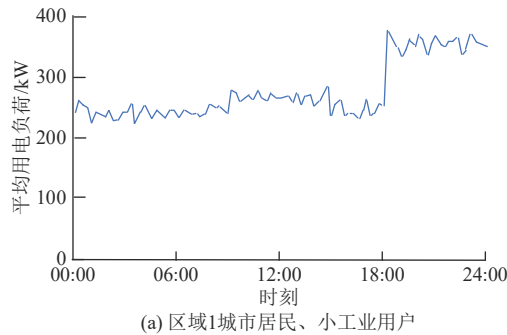


图4 分散式电热负荷典型日负荷曲线

Fig. 4 Typical daily load curve of distributed electric and thermal loads

2 电热可调节负荷资源分析

通过对电热负荷用能特性的分析可以看出，在集中式和分散式电热负荷中，总是存在具有一定可调节空间的直热式负荷。

2.1 直热式电锅炉可调节负荷资源

根据不同行业集中式电热负荷特性，晚高峰期间均可以提供不同比例的可调节负荷资源，可调节比例与环境温度、建筑物采暖特性有关，可以通过向电锅炉控制系统下发调节指令实现负荷柔性调节^[26]。

针对当地电热负荷用户感知过程，该地区研究机构进行了典型建筑物蓄放热特性分析，结果表明：室外温度为-10℃时，各类建筑物室内温度放热时间为0.33~1.09 h/℃，以电锅炉电加热负荷占比约90%计算，采用晚高峰期间(以连续4 h计)电锅炉电加热负荷轮停方式，用户室内温度每降低1℃，可以提供总负荷10%~25%可调节负荷量。

2.2 碳晶电热板可调节负荷资源分析

根据分散式电热负荷特性，晚高峰期间可以提供一定比例的可调节负荷资源，可以通过轮流短时关闭碳晶电热板、发热电缆等电热负荷设备实现负荷柔性调节^[27]，可行方式具体如下。

方式1(分时轮停)：采用晚高峰期间(以连续4 h计)分散式电热用户轮停方式，用户室内温度每降低1℃，可以提供总负荷10%~25%可调节负荷量。

方式2(分组轮停)：采用晚高峰期间(以连续4 h计)分散式电热用户室内采暖设备分组轮停方式，用户室内温度每降低1℃，可以提供总负荷16%~33%可调节负荷量。

该区域将电热可调节、可中断负荷接入两级部署的源网荷储协同控制平台，目前具备电热可控负荷49.73万kW。其中，分散式可控负荷总量为5.06万kW；集中式电锅炉可控负荷总量为44.67万kW。表4为各地区电热可调节负荷。

3 电热可控负荷控制场景

1) 通过增加电热可控负荷促进清洁能源消纳
风电功率预测系统可对风电输出功率进行实

表4 各地区电热可调节负荷

Tab. 4 Electric and thermal adjustable loads in

each region		万kW
地区序号	预计电热最大负荷	可调节负荷
1	103.5	20.7
2	25.0	5.0
3	28.9	6.3
4	34.5	2.5
5	0.7	0.0
6	11.4	0.0
7	28.8	0.0
8	76.1	0.0
9	10.8	4.4
10	92.9	0.0
11	25.9	0.0
12	50.0	0.0
13	55.6	10.8
14	1.6	0.0
15	68.0	0.0
总计	631.7	49.7

时预测，当电网出现日计划需要消纳的电量时，地区调度员接收到上一级调度相关指令，源网荷储平台通过以邀约电热负荷用户的控制方式下发控制指令，包含需要的响应时间、响应规模以及持续时长。用户侧通过负荷控制终端接收相关指令，根据自身实际情况选择同意或者不同意，选择后，系统会接收到相关信息并加以记录。在实际负荷响应时段，系统同样会记录用户实际响应时间、响应规模以及持续时长，实现电热负荷参与电网日前、日内调峰，促进新能源消纳。

2) 通过减少电热可控负荷降低电网运行风险

当电网出现设备故障、断面受限、设备过载情况时，地区调度机构通过自动化系统源网荷储平台，将调控指令下发至各区数据库；数据库转发指令至相应电热负荷用户的末端负荷控制设备，通过短信平台提醒用户；用户可在规定时间内进行确认和执行，实现电热负荷参与电网日前、日内调峰，降低电网运行风险。

3) 通过电热可控负荷保障大电网的安全

当电网出现紧急情况时，按照与用户签订的协议，调度员可以通过自动化系统对可控电热负荷进行柔性控制，这样就实现了对可控负荷的秒级控制，以保障大电网的安全。

通过对电热负荷的柔性调度,有利于电源侧减少发电煤耗,提高新能源消纳水平;有利于降低电网运行风险,保证电网安全经济运行;有利于减少负荷被动切除,提高用电满意度。

4 电热负荷柔性调度策略

4.1 电热负荷柔性调度流程

电热负荷柔性调度包括日前调度和日内调度。其中,日前调度应先判断当前是否达到日前调度周期,若达到,需输入日前电热负荷预测值,以此来求解日前调度模型,制定调度计划,确定当前大工业负荷的可转移量、可平移量和可削减量。

其中:可转移负荷是指在调度期间,用户通过改变其生产生活方式,将某一时刻的部分负荷转移到另一时刻,总负荷不发生改变;可平移负荷是指在调度前一天对负荷进行预测,在不改变系统整体负荷的情况下实现调峰处理;可削减负荷是指在调度过程中具有削峰能力的负荷。三者统称为柔性负荷。

日内调度同样应先判断是否达到日内调度周期,然后在日前调度的基础上,提前对当前电网的电能产量及可调整量进行预测,以此来求解调度模型,生成日内削减负荷的调度计划。电热负荷柔性调度拓扑具体流程如图5所示。

4.2 调度模型目标函数

日前调度模型以电网内部机组的发、启、停成本,产蒸汽成本及柔性调度成本之和最小为目标函数,具体表达式如下:

$$\min M = \min \left[\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in C} Y_{t,i}^F + \sum_{i \in C} Y_{t,i}^O + M_{t,i} + Q_{t,i}^P + Q_{t,i}^T + Y_t \right) \right] \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_t = Y_x + Y_p + Y_z \\ Y_x = M_x \cdot p_x \cdot \Delta t \\ Y_p = M_p \cdot S_p \cdot F_{c1} \\ Y_z = M_z \cdot S_z \cdot F_{c2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 为目标函数总成本; T 为调度周期; C 为机组集合; $Y_{t,i}^F$ 、 $Y_{t,i}^O$ 分别为在时段 t 内机组 i 的燃烧成本、运行成本; $M_{t,i}$ 为在时段 t 内机组 i 与电网的交易成本; $Q_{t,i}^P$ 、 $Q_{t,i}^T$ 分别为在时段 t 内机组 i 的蒸汽收益、蒸汽传输成本; Y_t 为负荷柔性调度成本;

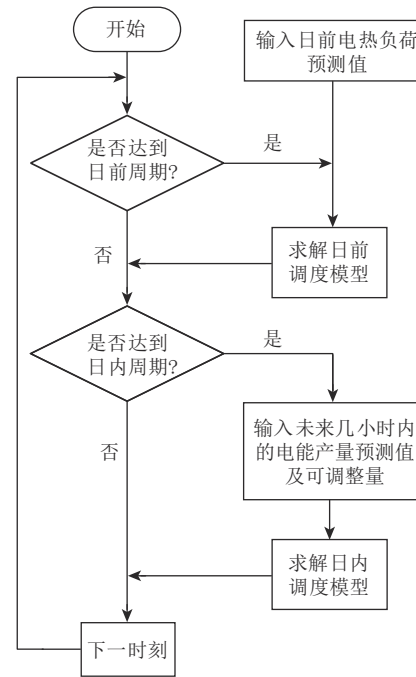


图5 电热负荷柔性调度拓扑图

Fig. 5 Flexible dispatch topology diagram of electric and thermal loads

Y_x 、 Y_p 、 Y_z 分别为大工业负荷可削减、可平移、可转移成本; M_x 、 M_p 、 M_z 分别为负荷单位容量的削减补偿、平移补偿和转移补偿; p_x 为机组可削减功率; S_p 、 S_z 分别为平移和转移负荷容量; F_{c1} 、 F_{c2} 分别为系统平移和转移指令。

而日内调度模型中无蒸汽传输成本,且只包含机组的可削减成本,其目标函数具体表达式为

$$\min M = \min \left[\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in C} Y_{t,i}^F + \sum_{i \in C} Y_{t,i}^O + M_{t,i} + Q_{t,i}^P + Y_x \right) \right] \quad (3)$$

4.3 调度模型平衡约束

1) 电力平衡约束

$$\sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in C} E_{t,i,s}^g - E_{t,i,s}^s + E_{t,i,s}^b \right] = \sum_{t \in T} L_t^c \quad (4)$$

式中: $E_{t,i,s}^g$ 、 $E_{t,i,s}^s$ 分别为在时段 t 内机组 i 的产电量和自身消耗电量; $E_{t,i,s}^b$ 为在时段 t 内的交易电量净收益; L_t^c 为在时段 t 内的系统电负荷量。

2) 系统热平衡约束

$$\sum_{t \in T} \left[G_{t,s} - T_{t,s} + \sum_{i \in C} h_{t,i,s}^g - G_{t,i,s}^s \right] = \sum_{t \in T} L_t^h \quad (5)$$

式中: $G_{t,s}$ 为在时段 t 内系统的总蒸汽储量; $T_{t,s}$ 为在时段 t 内蒸汽在传输过程中的损失量; $h_{t,i,s}^g$ 为在时段 t 内机组 i 的产气量; $G_{t,i,s}^s$ 为在时段 t 内系统

自身的消耗量; L_t^h 为在时段 t 内系统的热负荷量。

3) 机组的启停约束

日前调度模型中含有机组的启停, 而日内调度模型中不含有该约束, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta c_{i,t,s} \geq c_{i,t,s} - c_{i,t-1,s} \\ \Delta c_{i,t,s} \leq 1 - c_{i,t-1,s} \\ \Delta c_{i,t,s} \leq c_{i,t-1,s} \\ \sum_{t \in T} \Delta c_{i,t,s} \leq N_{i,s} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta c_{i,t,s}$ 为在时段 t 内机组 i 的启停变化量; $c_{i,t,s}$ 为在时段 t 内机组 i 的状态, 0 表示停用, 1 表示启动; $N_{i,s}$ 为系统允许的最大机组开启量。

4) 柔性负荷约束

$$\begin{cases} p_z^{\min} \leq p_z \leq p_z^{\max} \\ \sum_{t \in T} p_{o,z}^i(t) \cdot \Delta t = \sum_{t' \in T} p_{n,z}^{i'}(t') \cdot \Delta t' \end{cases} \quad (7)$$

式中: $p_z^{\max}$ 、 $p_z^{\min}$ 分别为可转移负荷 p_z 的上、下限; $p_{o,z}^i(t)$ 、 $p_{n,z}^{i'}(t')$ 分别为可转移负荷在原始时段 t 、新时段 t' 内的功率。

可削减负荷的目的是在系统允许的前提下, 采取分时电价在高峰时期削减部分机组的用电量, 进而减少系统用电量, 实现经济性。其表达式为

$$p_x^{\min} \leq p_x \leq p_x^{\max} \quad (8)$$

式中 $p_x^{\max}$ 、 $p_x^{\min}$ 分别为可削减功率 p_x 的上、下限。

可平移负荷的目的是改变负荷的用电时段, 要求平移前后负荷总量保持一致。其表达式为

$$p_p(t) = p_p^x(t + \Delta t) \quad (9)$$

式中: $p_p(t)$ 为原始负荷量; $p_p^x(t + \Delta t)$ 为平移时间段内的负荷量。

5 算例分析

为验证上述调度策略的可行性, 现对某地区电网实时调度进行仿真实验。已知该电网内包含 1 台 100 MW 的火电机组、1 组 20 MW 的光伏电站和 1 组 50 MW 的风电机组, 火电机组在额定工况下效率为 70%。将上述调度模型编写为 MILP 程序后, 对该地区电网分别进行日前优化调度和日内优化调度。

日前调度策略主要是靠改变机组的启停状态来改变机组的电量输出。日前调度前后电热负荷平衡出力对比及柔性电热负荷响应分别如图 6、7

所示。可以看出, 柔性电热负荷参与调度前, 负荷的峰谷差为 51.36 MW, 加入柔性电热负荷后, 峰谷差降为 32.8 MW, 比调度优化前降低了约 36.12%, 可平移负荷和可削减负荷在降低峰谷差方面起主要作用, 表明日前调度策略中加入柔性电热负荷可有效降低负荷峰谷差, 改善用电质量。

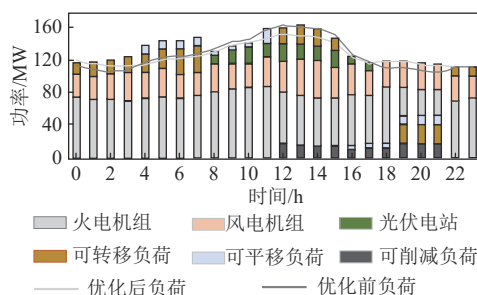


图6 日前调度前后电热负荷平衡出力对比

Fig. 6 Output balance comparison of electric and thermal loads before and after day-ahead dispatch

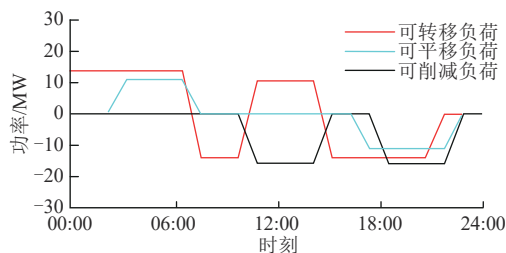


图7 日前调度前后柔性电热负荷响应情况

Fig. 7 Response of flexible electric and thermal loads before and after day-ahead dispatch

日内调度前后电热负荷平衡出力对比及柔性电热负荷响应如图 8、9 所示。可以看出, 日内调度优化前, 电热负荷峰谷差约为 75.47 MW, 日内调度优化后, 峰谷差降为 59.24 MW, 比调度优化前降低了约 21.51%。在日内调度过程中, 只有可削减电热负荷出力, 分析结果表明, 日内调度优

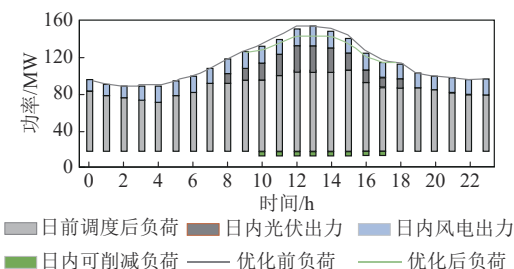


图8 日内调度前后电热负荷平衡出力对比

Fig. 8 Output balance comparison of electric and thermal loads before and after intra-day dispatch

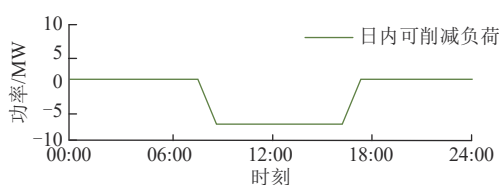


图9 日内调度前后柔性电热负荷响应图

Fig. 9 Response of flexible electric and thermal loads before and after intra-day dispatch

化也可以有效调整电热负荷峰谷差,实现对负荷的柔性调节。

6 结论

从某电网电热负荷参与实时调度的可行性问题出发,分析了电热负荷时空分布特点和用能特性,提出了3种可能的电热可控负荷控制场景,给出了系统的柔性电热负荷调度策略,验证了该电网电热负荷实时参与调度的可行性。通过分析得出如下结论:

1) 从负荷的时空分布特点来看,集中式或分散式电热负荷很大程度上取决于该区域的城市发展情况,其中,城市发展较好的区域多采用集中式,而以农业为主的区域主要采用分散式,但总体来看,分散式电热负荷涉及用户还是远大于集中式,不同区域的日负荷曲线均呈现类似特性。从负荷用能特性来看,集中式电采暖负荷中蓄热式没有可调节容量改造空间,但直热式晚高峰仍有部分具有可调节空间,分散式主要以直热式为主,晚高峰可调节容量改造空间较大。

2) 在不影响用户正常供暖的情况下,直热式电锅炉和碳晶电热板电热负荷在晚高峰期间均可以提供一定比例的可调节负荷资源,不同的电热负荷资源可采用相应的运行方式进行柔性调节。

3) 在不同的控制场景下,可以通过增加或减少电热可控负荷来促进清洁能源消纳、降低电网运行风险及保障大电网的安全。

4) 柔性电热负荷参与实时调度可有效降低负荷峰谷差,改善用电质量。

参考文献

[1] 陈皓勇. “双碳”目标下的电能价值分析与市场机制

设计[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 141-150.

CHEN H Y. Electricity value analysis and market mechanism design under carbon-neutral goal[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 141-150.

[2] 杨立滨, 张磊, 刘艳章, 等. 基于分布式框架的新能源场站并网性能评估[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 137-144.

YANG L B, ZHANG L, LIU Y Z, et al. Grid-connection performance evaluation of renewable energy station under distributed framework[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(5): 137-144.

[3] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.

LIU Y K, ZHANG W J, ZHANG Y, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.

[4] 汲国强, 吴姗姗, 谭显东, 等. 2021年我国电力供需形势分析及展望[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 568-575.

JI G Q, WU S S, TAN X D, et al. Analysis and prospect of China's power supply and demand situation in 2021[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 568-575.

[5] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.

LI J L, GUO Z D, ZENG W, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.

[6] 任景, 周鑫, 薛晨, 等. 发用两侧参与调峰的现货市场联合出清模式设计[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 26-33.

REN J, ZHOU X, XUE C, et al. Spot market joint clearing mode with both sides of generation and customer participating in peak regulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 26-33.

[7] 邹政林, 刘杰, 徐沈智, 等. “面向高比例新能源接入的源-荷-储灵活性资源协调规划[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 107-117.

HUAN Z L, LIU J, XU S Z, et al. Source-load-storage flexibility resource coordinated planning for high proportion of renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 107-117.

[8] 李少林, 陈满满. “煤改气”“煤改电”政策对绿色发展的影响研究[J]. 财经问题研究, 2019(7): 49-56.

- LI S L, CHEN M M. Research on the impact of "coal to gas" and "coal to electricity" policy on green development [J]. Research on Financial Issues, 2019(7): 49-56.
- [9] 安佳坤, 杨洋, 胡诗尧, 等. 煤改电政策的分析与建议[J]. 上海电气技术, 2019, 12(3): 20-23.
- AN J K, YANG Y, HU S X, et al. Analysis and recommendations of coal-to-electricity policy[J]. Shanghai Electric Technology, 2019, 12(3): 20-23.
- [10] LIU W, WANG X, ZHANG Y, et al. Template guidelines for the preparation of the final paper study and application of peak-load regulating capacity for heating units[C]//2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen, China: IEEE, 2014: 1635-1638.
- [11] GAO M, GUAN H H, LI Q B, et al. Cooperative optimal operation strategy of household electric heating [C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018: 1-5.
- [12] 苏宜靖, 吴华华, 徐立中, 等. 面向新型电力系统的第三方独立主体辅助服务市场探索与实践[J]. 浙江电力, 2022, 41(8): 25-30.
- SU Y J, WU H H, XU L Z, et al. Exploration and practice of the third-party independent entity auxiliary service market for new power systems[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(8): 25-30.
- [13] 黄亚峰, 朱玉杰, 穆钢, 等. 基于温度预报的户用电采暖负荷可调节能力评估[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2487-2493.
- HUANG Y F, ZHU Y J, MU G, et al. Evaluation of the adjustable capacity of household electric heating load based on temperature forecast[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2487-2493.
- [14] 朱玉杰. 电采暖负荷可调节能力评估与集群控制策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
- ZHU Y J. Research on the evaluation of electric heating load adjustable ability and cluster control strategy[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2019.
- [15] 葛维春. 大规模弃风储热供暖协调计算方法[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 291-295.
- GE W C. A coordinated calculation method of abandoned large-scale wind heat storage for heating[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(4): 291-295.
- [16] 王志强, 王珊, 张馨月, 等. 计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 67-73.
- WANG Z Q, WANG S, ZHANG X Y, et al. Modeling of regional electric heating load characteristics taking into account the differences in user response behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 67-73.
- [17] 张华鲁, 严干贵, 石杰, 等. 蓄热式电采暖柔性负荷特性建模及可调潜力研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2108-2116.
- ZHANG H L, YAN G G, SHI J, et al. Modeling of flexible load characteristics of thermal storage electric heating and research on adjustable potential[J]. High Voltage Technology, 2022, 48(6): 2108-2116.
- [18] 刘啸天. 分散式电采暖负荷群调节能力评估及提升技术研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
- LIU X T. Research on the evaluation and promotion technology of distributed electric heating load group regulation ability[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2020.
- [19] 侯萌, 李彬, 祁兵, 等. 区块链技术在分散式电采暖控制中的应用展望[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(6): 49-53.
- HOU M, LI B, QI B, et al. Application prospect of blockchain technology in distributed electric heating control[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(6): 49-53.
- [20] 董晓颖, 李拓, 苏娟, 等. 配电网与蓄热式电采暖负荷的优化匹配策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(5): 24-28.
- DONG X Y, LI T, SU J, et al. Optimal matching strategy of distribution network and thermal storage electric heating load[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5): 24-28.
- [21] 雷映, 刘明真, 林开敏. 基于协调负荷调度模型的蓄热采暖解耦方法[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 55-62.
- LEI Y, LIU M Z, LIN K M. Decoupling method of thermal storage heating based on coordinated load dispatching model[J]. China Electric Power, 2019, 52(7): 55-62.
- [22] 郇潼. 电采暖群负荷平衡控制策略研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2019.
- HUAN T. Research on load balance control strategy of electric heating group[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019.
- [23] REN J, MA X, ZHANG X, et al. Joint optimal deep peak regulation of renewable-rich power system with responsive load heating storage enabled CHP and flexible thermal plants[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China: IEEE, 2020: 2673-2678.

- [24] LI H C, WANG X W, YUAN Y B, et al. Simulation and analysis of electric water heater load regulation model based on direct load control[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [25] YANG Y L, WANG F C, YAN G G, et al. The regulating characteristic analysis for distributed electric heating load in Northern China[C]//2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Chengdu, China: IEEE, 2020: 187-192.
- [26] HAN N, GONG T, GONG F, et al. Evaluation and cluster control of electric heating flexible load adjustable capacity[C]//2020 Management Science Informatization and Economic Innovation Development Conference (MSIED). Guangzhou, China: IEEE, 2020: 425-428.
- [27] 杨玉龙, 王彤, 穆钢, 等. 基于实测数据的分布式电采暖负荷群调峰能力评估[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 95-101.
- YANG Y L, WANG T, MU G, et al. Evaluation of

peak-shaving ability of distributed electric heating load group based on measured data[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 95-101.

收稿日期: 2021-11-15。

作者简介:



印欣

印欣(1988), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析及源网荷储协同调度, yinchaoji1@163.com;



陈武晖

陈武晖(1974), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制, 本文通信作者, chenwuhui@tyut.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)