

考虑分布式煤改电负荷接入的配电网 运行调度控制策略研究

侯泽东, 王晓园, 朱洪, 菅东祥, 郭伟, 谢文成, 段德毅

(国网新疆电力有限公司吐鲁番供电公司, 新疆吐鲁番 838000)

摘要:大规模的煤改电用负荷的投入对本身薄弱的配电网造成较大的负担。高峰时期用户使用电供暖设备数量持续增加, 使用时长逐渐延长, 造成局部台区、线路重载及过载运行, 给吐鲁番电网安全稳定运行带来了威胁。在考虑“煤改电”负荷接入配电网的网架下, 首先, 通过调研吐鲁番“煤改电”工程接入模式和设备种类, 建立“煤改电”标准化配置模式及产品分类统计; 然后, 基于电路模拟的等效热参数模型建立运行典型电供暖配置模式下的运行机理模型, 研究直接负荷控制技术进行“煤改电”负荷控制。选取吐鲁番市完成“煤改电”工程改造的台区重过载运行进行实例分析, 调度控制策略成功将变压器运行在安全边界以内, 且不影响用户采暖的热舒适度。

关键词:调度控制; 煤改电; 电网运行安全; 热舒适度; 直接负荷控制技术

中图分类号: TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)06-0041-09

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230607

Research on Dispatching Control Strategy Considering Distributed Coal-to-Electricity Load Access to Distribution Network

HOU Zedong, WANG Xiaoyuan, ZHU Hong, JIAN Dongxiang, GUO Wei, XIE Wencheng, DUAN Deyi
(State Grid Turpan Electric Power Supply Company, Turpan 838000, Xinjiang, China)

Abstract: The large scale load input of coal-to-electricity has caused a great load burden to the weak distribution network, and during the peak period, the number of electric heating equipment used by users continues to increase and the use time gradually extends, resulting in heavy load and overload operation of local stations and lines, which has brought threats to the safe and stable operation of Turpan power grid. In consideration of grid frame for coal-to-electricity load access to distribution network, the access mode and equipment types of coal-to-electricity project in Turpan are firstly investigated, and the standardized configuration mode of coal-to-electricity and product classification statistics are established. Then, based on the equivalent thermal parameter model of circuit simulation, the operating mechanism model of typical electric heating configuration mode is established, direct load control (DLC) technology is studied for load control of coal-to-electricity conversion. Finally, the heavy overload operation areas in Turpan that has completed coal-to-electricity conversion is analyzed, and the operation of transformers is controlled within the boundary by the dispatching control strategy successfully, which does not affect the thermal comfort of user heating.

Key words: dispatching control; coal-to-electricity conversion; grid operation safety; thermal comfort; DLC technology

0 引言

散煤燃烧是造成大气污染的重要原因之一, 每年燃煤锅炉和北方农村烧煤取暖需要消耗大量煤炭, 对环境产生了较大危害, 而电能具有清洁、安全、便捷等优势, 实施电能替代是有效防治大气污染的

重要举措之一。2020年9月22日, 中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2023年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。” 能源与电力领域一直是国家实现碳达峰、碳中和战略目标的关键领域和主战场。2021年, 吐鲁番市开始进行31

万居民供电设施改造以及 365 条 10 kV 线路“煤改电”(二期)配套电网基础建设。考虑到“煤改电”的负荷增长速率过快、负荷压力高、温度昼夜变动大且主要集中在冬季供暖压力高峰期的特点,加上客户用电供暖压力长期、短期大幅增长,给电力的承载能力和用电调控水平带来了一定难度。

统计吐鲁番电网 2022 年“迎峰度冬”期间配电网运行设备监测异常数据,冬季采暖保供电期间 10 kV 线路监测异常 11 条,均因夜间“煤改电”负荷突增造成重载运行;配电变压器监测异常共计 1842 台,因“煤改电”负荷突增造成配电变压器运行异常 1422 台(配电变压器重载 986 台、配电变压器过载 436 台),占保电期间变压器异常运行的 77.20%。显然,电供暖负荷突增造成配电变压器重过载运行在配电变压器异常设备监测中所占比例较高,降低了供电可靠性。

由于“煤改电”供暖设备安装相对集中,往往处于配电网末端的台区,因此大规模“煤改电”供暖设备的投入对本身薄弱的配电网造成较大的负荷负担。高峰时期用户使用电供暖设备数量持续增加、使用时长逐渐延长,造成局部台区、线路重载、过载,容易引发电网故障,严重威胁电网的安全稳定运行,同时也降低了用户的用能体验。而短时间内要提升网架的供电能力存在一定的困难,因此考虑保供热时伸缩性的特征,以配电网的协调运行作为切入点,从调度运行控制的角度出发,在不影响用户供暖舒适度的前提下,对“煤改电”用户的用能进行有序控制,保证电力用户的采暖需求。

1 “煤改电”典型负荷及其运行机理

1.1 “煤改电”标准化模式

电供暖设备按接入电网模式的不同分为集中式供暖和分散式供暖,其中:分散式电供暖设备电热转换率高,电能直接在终端转换为热能,没有热能输配热损失,节能效果好;集中供暖方式需要设置热水管道系统,向终端热用户输送热量,因而存在管网热损耗和循环水泵能耗。按照产生热的原理分为电热

式和电驱动热泵式;按照有无蓄热装置,电热式又分为直热式和蓄热式。相关产品分类见表 1。

表 1 电供暖产品及分类

电供暖类型	电供暖产品	
分散式	直热类	碳晶板 发热电缆 电热膜 踢脚线电暖器
	蓄热类	电油灯、碳纤维、电热丝等电散热器 户式电锅炉(无蓄热)
	热泵类	蓄热式电锅炉 户式蓄热式电锅炉
	直热类	户式空气源热泵
	蓄热类	电锅炉
集中式	蓄热类	蓄热式电锅炉 热泵+电蓄热联合机组
	热泵类	地源热泵、空气源热泵

1.2 典型电供暖设备的运行机理

1.2.1 直热类(热泵类)设备运行机理模型

基于电供热装置和建筑系统中良好的热储能特点,直热类(热泵类)产品的电功率由房间、室外环境共同确定,因此,在对直热类、热泵类电供热装置进行机理特性建模中,往往采用能量守恒原理建模房间和环境之间的能量转换情况,从而寻求系统的电-温特性关联^[1]。目前一般为基于电路仿真的等效热参数(equivalent thermal parameters,ETP)模型以及基于系统冷热负载平衡的建模,而目前则大多使用 ETP 模型的二阶微分形式,来表述对“煤改电”负荷的暂态热平衡关系,如图 1 所示为直热类、热泵类温控负荷-建筑系统中的 ETP 模型。

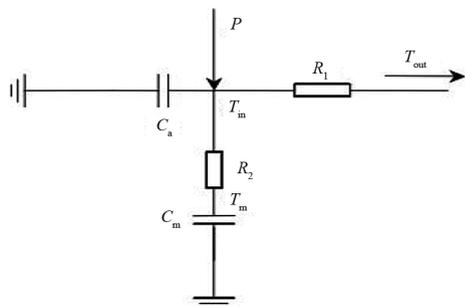


图 1 直热类(热泵类)设备 ETP 模型

图 1 中: C_a 为空气比热容, $J/^\circ C$; P 为直热类(热泵类)装置的总供热能量, kW ; T_{out} 为户外温度, $^\circ C$; T_m 为室内温度, $^\circ C$; T_m 为室内固体温度, $^\circ C$; R_1 、 R_2 分别为室内空气热阻和室内固体热阻。

根据图1所示模型,其状态空间方程可表述为:

$$\begin{bmatrix} T_{in}^{t+1} \\ T_m \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} T_{in}^t \\ T_m \end{bmatrix} + Bu, u = 1 \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_1 C_a} + \frac{1}{R_2 C_a}\right) & \frac{1}{R_2 C_a} \\ \frac{1}{R_2 C_m} & -\frac{1}{R_2 C_m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{T_{out}}{R_1 C_a} + \frac{P}{C_a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于式(1)一式(3)的ETP模型,直热类(热泵类)在工作过程中可进一步简化,得到电供暖设备功率与室温的关系为:

$$T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - (T_{out}^{t+1} - T_{in}^t) \varepsilon, s = 1 \quad (4)$$

$$T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - \eta P_t / \rho - (T_{out}^{t+1} - \eta P_t / \rho - T_{in}^t) \varepsilon, s = 0 \quad (5)$$

式中: s 为直热类(热泵类)装置的运行位置, $s=1$ 为装置关闭, $s=0$ 为装置开启; T_{in}^t 为 t 时刻的室内温度; T_{in}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻的室内温度; T_{out}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻的户外温度; ε 为散热系数, $\varepsilon = e^{-\tau/T_c}$, τ 为控制时间段, T_c 为时间常数,此处 ε 取0.96; η 为电供暖装置制热效率; ρ 为导热系数, $1/(\text{kW} \cdot \text{C}^{-1})$,此处取0.18; P_t 为 t 时刻电供暖装置额定制热耗功率, ηP_t 为 t 时刻额定制热量^[2]。

通常将式(5)简写为

$$T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} + P_t R - (T_{out}^{t+1} + P_t R - T_{in}^t) \varepsilon, s = 0 \quad (6)$$

式中, R 为等效热阻。

实际计算时将式(4)、式(6)表述为

$$T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - (T_{out}^{t+1} - T_{in}^t) \varepsilon + R(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^m s_{t,i} P_i \quad (7)$$

式中: $s_{t,i}$ 为第 i 台电供暖设备在 t 时刻的启停状态; m 为装设的电供暖设备数量; P_i 为第 i 台电供暖设备的热功率。

在电供暖设备开启、关闭过程中,室内温度变化量为

$$\Delta T(t, s_t) = T_{in}^{t+1} - T_{in}^t =$$

$$(1 - \varepsilon) T_{out}^{t+1} + R(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^m s_{t,i} P_i - (1 - \varepsilon) T_{in}^t \quad (8)$$

室内温度的递推函数关系为

$$\begin{cases} T_{in}^{t+1} = T_{in}^t + \sum_i \Delta T_i \\ \Delta T_i = (1 - \varepsilon) (T_{out}^{t+1} - T_{in}^t) + R(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^m s_{t,i} P_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_{in}^t 为 t 时刻室内设置温度; ΔT_i 为两时刻间温差。

显然,电供暖负荷对室内温度的变化作用,不仅与电供暖设备的启停状态有关,还与此刻室内的温度有关。

1.2.2 蓄热类电供暖设备运行机理模型

蓄热式电供暖设备有直热式电供暖装置和蓄热装置两部分组成,其中蓄热装置作为主要储能部件,能够灵活切换供暖运行方式,在电网低谷时段用户热量需求使用直接式电供暖设备供暖;同时将一部分热量储存在储能元件,在电网高峰时段使用蓄热装置释放热能量来平衡直热式供热量与用户热量需求,在不影响用户热舒适的情况下同时参与电力削峰填谷。

1) 蓄热装置蓄热与释放

根据蓄热式电供暖设备的组成,蓄热式电供暖设备的工作过程也分为直热类电供暖装置供暖和蓄热装置蓄热、释放过程,直热式电供暖装置供暖在上面已作具体分析,这里不再赘述。下面重点分析蓄热装置的蓄热与释放过程和运行机理模型。

① 蓄热装置蓄释热量约束

$$E_{HS}(T+1) = E_{HS}(T) (1 - \sigma_{HS}) - \left[\eta_{HS} I_{HS,C}(T) P_{HS,C} + \frac{1}{\eta_{HS,D}} I_{HS,D}(T) P_{HS,D} \right] \tau \quad (10)$$

$$I_{HS,C}(T) + I_{HS,D}(T) \in (0, 1) \quad (11)$$

$$E_{HS \min} \leq E_{HS}(T+1) \leq E_{HS \max} \quad (12)$$

式中: σ_{HS} 为蓄热装置的热量耗散率; $E_{HS}(T)$ 为蓄热装置在 T 时刻的蓄热量; $E_{HS \max}$ 与 $E_{HS \min}$ 分别为蓄热装置的蓄热量上、下限; $I_{HS,C}$ 为蓄热装置的蓄热状态变量; $\eta_{HS,C}$ 为蓄热装置的蓄热能效率; $I_{HS,D}$ 为蓄热装置的散热状态变量; $\eta_{HS,D}$ 为蓄热装置的散热效率。

②蓄热装置蓄释热功率约束

$$\begin{cases} I_{\text{HS,C}} P_{\text{HS,C min}} + I_{\text{HS,D}} P_{\text{HS,D min}} \leq P_{\text{HS,C/HS,D}} \\ I_{\text{HS,C}} P_{\text{HS,C max}} + I_{\text{HS,D}} P_{\text{HS,D max}} \leq P_{\text{HS,C/HS,D}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{HS,C min}}$ 和 $P_{\text{HS,C max}}$ 分别为蓄热装置的最小、最大蓄热输出功率; $P_{\text{HS,D min}}$ 和 $P_{\text{HS,D max}}$ 分别为蓄热装置的最小、最大散热能量输出功率。

2 可控制“煤改电”负荷评价

2.1 配电网运行安全性评价

电网安全是电网在运行过程中的一个特点,它反映了电网在遇到可能的干扰后继续向用户提供电力的能力。目前的评价指标主要以电网公司和用户为对象进行,同时也会计及综合效益的作用^[3]。配电变压器处于电网的末端,国外有些研究单位通过引入变压器负载率、运行年份等来对变压器运行状况分析^[4]。

变压器的负载率是“某一时段”该设备的视在功率与额定容量的比值,能反映变压器在“某一时段内”的运行状况,相对于以往设计规划阶段对经济性、三相不平衡方面的研究,负载率更加符合配电变压器的实际工作特性与需要,计算公式为

$$\mu = \sqrt{3} UI / S_N \quad (14)$$

式中: μ 为配电变压器运行负载率,%; U 为配电变压器运行线电压,kV; I 为配电变压器运行线电流,A; S_N 为配电变压器额定容量,kVA。

依据配电变压器负载率将设备划分为警告级和限制级。警告级:设备重载运行,80%≤最大负载率<100%,原则上可开发容量为0,但仍然可以接入少量负荷,需要持续监测台区并做好台区预测及事故应急处置措施。限制级:设备过载运行,最大负载率≥100%,原则上计算可开放容量为0,限制接入负荷,需要持续监测台区,并尽快落实台区升级改造或进行需求侧负荷资源调度。

2.2 用户热舒适度评价

国际标准化组织(international organization for standardization,ISO)有关热舒适度 ISO 7730 系列标准由 ISO/TC 159 人类工效学-物理环境分委会制定^[5],现行的热舒适度标准版本是 ISO 7730—2005

《热环境人类工效学—基于 PMV-PPD 计算确定的热舒适及局部热舒适判据的分析测定和解析》,采用了丹麦范格尔教授的 PMV-PPD 模型来评价热舒适度,ISO 基于 PMV-PDD 模型提出对人体热平衡特性建立《适中的热环境—PMV 与 PPD 指标的确定及热舒适条件的确定》(ISO 7730)热舒适度模型。

人体对外界的温度感受与体温变化的热量感受模型即为一个预测平均值模型(predicted mean vote,PMV)。在稳态热环境下,通过 ISO 模型得出 PMV 指标值与人体热感觉值对应关系,如表 2 所示。

表 2 PMV 指标值与舒适度

指标值	含义
-3	冷
-2	凉
-1	稍凉
0	舒适
1	稍暖
2	暖
3	热

ISO 7730 热舒适度模型指出 P_{MV} 指标值在 $-0.5 \sim 0.5$ 区间均为人体感受的舒适温度区间,最近舒适温度为 $P_{\text{MV}}=0$ 。参照 ASHRAE 55 标准^[6]简化 ISO 7730 热舒适度模型。

$$P_{\text{MV}} = 0.208T_{\text{in}} - 5.276 \quad (15)$$

式中: P_{MV} 为热感觉 PMV 指标值; T_{in} 为室内温度。

显然,室内温度增加时, P_{MV} 增大,室内温度降低时, P_{MV} 减小,两者呈正向线性关系。根据式(15)所建立的简化热舒适度模型,可得出人的体感温度可接受范围为 $[23.0, 27.8]^\circ\text{C}$,当室内温低于 23.0°C 或着高于 27.8°C 时,则超出了人体的舒适范围,用户将感到不舒服,此区间以外的温度范围定为人体不可接受温度区域。

3 “煤改电”负荷调度控制策略

3.1 直接负荷控制技术概述

直接负荷控制(direct load control,DLC)是指在用户同意的前提下,调度侧使用智能终端直接控制管理用户的一部分负荷,对电网运行性能优化研究的同时实现最大程度的清洁能源消纳^[7],能够参与 DLC 的负荷具有一下特点:1)快速响应能力,负荷

能够快速响应电力调度控制中心的控制指令,响应时间一般小于 15 min^[8],是参与电力系统负荷快速调节的基础;2) 具备能量储存能力,保证负荷短时服务质量不会有较大影响;3) 容易形成规模化效应,一定规模的负荷能够影响负荷曲线的峰谷差,这是实现 DLC 的关键^[9]。从“煤改电”标准化配置的供暖设备可以看出,供暖负荷类能量为单相能量传输负荷,电力调度控制中心通过无线公网远程遥控电供暖设备智能终端直接管理用户用电。

DLC 在高级量测体系(A-MI)的支持下由负荷管理中心发布指令,通过负荷控制设备执行控制命令,实现负荷分类、分时控制^[10],DLC 技术的典型结构如图 2 所示。

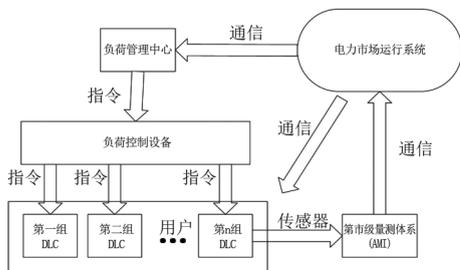


图 2 DLC 典型结构

首先,电供暖负荷单向能量传输控制模型根据调度需求和负荷容量,把参与 DLC 的负荷分成 N 组^[8];然后,把电力系统负荷曲线按时段绘制成阶梯状^[11],如图 3 所示。

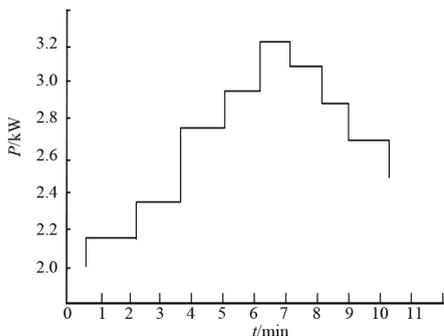


图 3 阶梯状负荷曲线

设 t 时段第 n 组 DLC 实际受控负荷 P_{nt} 为

$$P_{nt} = \beta_{nt} P_{Nn}, \quad \beta \in [-1, 1] \quad (16)$$

式中: P_{nt} 为第 n 组 DLC 实际受控负荷; P_{Nn} 为第 n 组 DLC 受控负荷额定功率; β_{nt} 为控制指令, $\beta_{nt} \in [-1, 0]$

对应降低负荷指令, $\beta_{nt} = 0$ 保持负荷不变, $\beta_{nt} \in (-1, 0]$ 对应提高负荷指令。

综上所述, t 时段 N 组内 DLC 总受控负荷为

$$P_t = \sum_{n=1}^N P_{nt} = \sum_{n=1}^N \beta_{nt} P_{Nn}, \quad \beta_{nt} \in [-1, 1] \quad (17)$$

DLC 执行完成减少负荷指令之后,受控负荷开始正常运行。受控期间被削减的用电量需求在控制结束后将部分或全部偿还用电设备,试图恢复到甚至高于其被控制前的负荷水平,从而导致后续负荷突然增大,这部分在 DLC 受控结束后产生的超过未参与 DLC 时的负荷被称为反弹负荷^[12]。当前许多文献都研究了反弹负荷的数学模型,然而由于不同类型的负荷所处的运行环境不同,反弹负荷的准确。对于温控负荷的反弹负荷通常使用 3 阶自回归模型^[13],设第 n 组 DLC 的滞后电量需求为

$$P_{nt}^b = aP_{n(t-1)} + bP_{n(t-2)} + cP_{n(t-3)} \quad (18)$$

式中: P_{nt}^b 为第 t 时段、第 n 组 DLC 的反弹负荷; $P_{n(t-1)}$ 、 $P_{n(t-2)}$ 、 $P_{n(t-3)}$ 分别为第 $t-1$ 、 $t-2$ 、 $t-3$ 时段第 n 组 DLC 实际受控负荷; a 、 b 、 c 为相应时段的控制系数。

结合实际受控负荷与反弹负荷,从式(16)、式(18)可知,第 t 时段、第 n 组用户总负荷改变量为

$$\Delta P_{nt} = P_{nt}^b - P_{nt} \quad (19)$$

基于 DLC 的配电网运行调度控制策略是一个数学层面的复杂多目标优化问题,求解方法从最初的传统优化算法(例如线性规划、多目标线性规划、动态规划^[14]、模糊线性规划、模糊动态规划等)发展到目前的启发式优化算法(例如多目标进化算法、遗传算法、蚁群算法等)。

3.2 调度控制策略

变压器作为联系用户与电力调度控制中心的重要媒介,向下为用户提供负荷,向上准实时上报运行情况(目前新疆上报负荷曲线频次为 15 min/次),调度侧确定变压器需要削减容量的大小。通过电网拓扑关系向下分析出“煤改电”用户信息,再基于 DLC 控制计算通过远程控制装置循环控制用户的电供暖设备,用户参与负荷控制的结构如图 4 所示。调度侧对参与的“煤改电”负荷开展轮控,整个控制过程中必须满足用户舒适度需求,即室内温度

[23.0,27.8]℃,要求用户的室内温度不能超过该区间。

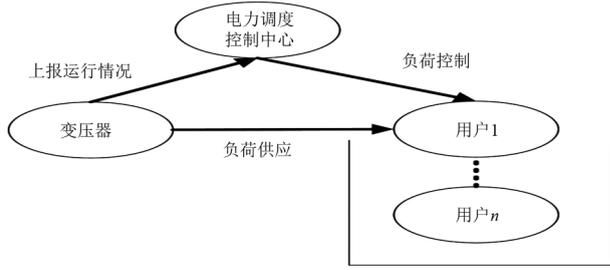


图4 用户负荷参与 DLC 结构

3.2.1 可控“煤改电”负荷预测

假设 t 时段电供暖设备的平均额定功率为 \bar{P} , 控制周期内室外环境温度设为恒定值 T_{out} , 根据电供暖设备的热动力模型式(4)、式(5), 结合室内温度控制区间 $[T_{in,min}, T_{in,max}] = [23.0, 27.8]^\circ\text{C}$, 可计算负荷控制周期 τ_c 以及电供暖设备的开启时间 τ_{on} 和关闭时间 τ_{off} , 计算公式^[2]为:

$$T_{max} = T_{out}(1 - \varepsilon^{\tau_{off}}) + T_{min}\varepsilon^{\tau_{off}} \quad (20)$$

$$T_{min} = (T_{out} - \eta\bar{P}/A)(1 - \varepsilon^{\tau_{on}}) + T_{max}\varepsilon^{\tau_{on}} \quad (21)$$

$$\tau_c = \tau_{off} + \tau_{on} \quad (22)$$

假设变压器下有 m 台电供暖设备, 并将这些电供暖负荷平均分成 n 组进行轮控, 轮控策略如图5所示。

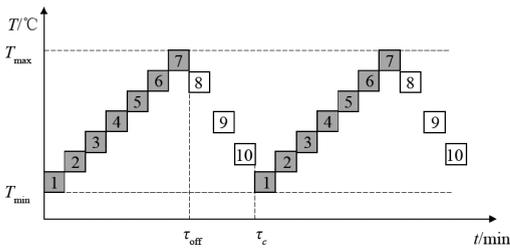


图5 电供暖负荷轮控策略

每组电供暖负荷在一个 τ_c 控制周期内的“开启”状态(白色)时间为 τ_{on} , “关闭”状态(黑色)时间为 τ_{off} 。当室内温度达到人体感受的最低舒适温度 T_{min} 时, 电供暖负荷控制状态进入“关闭”状态, 电供暖负荷恢复正常供暖, 室内温度开始上升; 当室内温度达到人体感受的最高舒适温度 T_{max} 时, 电供暖负荷控制状态进入“开启”状态, 停止电供暖负荷供暖, 温度开始下降。

设 1 个控制状态时间间隔为 ω , 则一个 τ_c 控制周期内有 τ_c/ω 个控制状态。每组电供暖设备在同一时刻处于不同状态, 进入下一个控制状态时总有

一组电供暖设备处于“开启”状态, 同时另一组电供暖设备处于“关闭”状态, 保证每个控制状态下的处于“开启”状态的电供暖设备相同, 即 τ_{on}/τ_c 比例相同。这样就可以得到第 t 时段参与 DLC 行动的“煤改电”负荷可控容量为

$$C_t = \frac{\tau_{off}}{\tau_c} \times m\bar{P} \quad (23)$$

式中, $m\bar{P}$ 为变压器下“煤改电”额定功率。

3.2.2 调度控制策略

1) 调度控制计划模型

调度侧提前一日计算配电变压器各时段的“煤改电”可控负荷, 以配电变压器不出现重过载运行为原则(负载率 $\mu = 80\%$) 对需求侧负荷资源进行分析, 分配系统缺额, 制定调度控制计划。

在宏观侧, 以配电变压器不出现重过载运行决策出配电变压器削减量的调度控制计划。假设次日负荷调度控制共分为 M 个时段, 每个时段间隔为 Δx , 该变压器在第 x 时段 ($x = 1, 2, 3, \dots, M$) 应进行电力削减量为 $C(x)$, 调度侧按照重过载边界条件计算并分配给该变压器的削减量为 $D(x)$, 按照该变压器在 M 个时段内削减量最少为目标建立调度控制模型为:

$$\min \sum_{x=1}^M D(x) \quad (24)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq D(x) \leq C(x) \quad (25)$$

$$\sum_{x=1}^M D(x) \geq C(x) \quad (26)$$

在微观侧, 以最小化“煤改电”负荷实际削减量与调度侧控制计划间的偏差实施 DLC, 满足规定的调度计划。假设调度侧分配给配电变压器的削减量为 $D(x)$, 该变压器接带“煤改电”用户 m 家(每家一台电供暖设备), 第 x 时段的功率分别为 $P_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, m$), $s_i(x)$ 表示第 i 家用户电供暖设备在第 x 时段的控制状态, $s_i(x) = 0$ 说明第 i 家用户电供暖设备控制状态处于“关闭”状态, 即电供暖设备开启; $s_i(x) = 1$ 说明第 i 家用户电供暖设备控制状态处于“开启”状态, 即电供暖设备关闭。该变压器接带用户组的控制变量记为 $\Phi(x) = \{s_1(x), s_2(x), \dots, s_m(x)\}$, 表示第 x 时段 m 家用户的电供暖设备的受控状态组合, 则第 x 时段该变压器所能提供的“煤改电”负荷组实际供应电力

削减量为

$$G(x) = \sum_{i=1}^m s_i(x) \times P_i(x) \quad (27)$$

从而确定第 x 时段,该变压器对“煤改电”负荷组的需求响应资源供应量与调度计划的偏差为

$$e(x) = G(x) - D(x) \quad (28)$$

2) 约束条件

① 可控“煤改电”负荷约束

调度侧实施 DLC 的同时还需要考虑用户的热舒适度,室内环境温度不能超出 $[T_{in,min}, T_{in,max}]$,调度侧分配给变压器的负荷削减量 $D(x)$ 不能超过该变压器的可控“煤改电”负荷 C_t , DLC 需求响应控制量约束为

$$D(x) \leq C_t \quad (29)$$

② DLC 需求响应控制量约束

由于实时测量室温需要给用户电供暖设备安装温度传感器设备,安装难度较大,所以基于电供暖设备的运行机理模型,用电供暖设备持续运行时间来代替实时温度变化量,提供 DLC 决策模型的约束条件,电供暖设备 i 处于连续“开启”状态的时间 $\tau_i^{on}(x)$ 和处于连续“关闭”状态的时间 $\tau_i^{off}(x)$ 的计算公式^[2]为:

$$\tau_i^{on}(x) = \{\tau_i^{on}(x-1) + [1 - s_i(x)] \Delta x\} [1 - s_i(x)] \quad (30)$$

$$\tau_i^{off}(x) = \{\tau_i^{off}(x-1) + s_i(x) \Delta x\} s_i(x) \quad (31)$$

进行 DLC 行动的同时室内温度不能超出 $[T_{min}, T_{max}]$,电供暖设备 i 处于连续“关闭”状态的时间 $\tau_i^{off}(x)$ 不能超出 τ_{off} ,室内温度变化量约束为

$$\tau_i^{off}(x) \leq \tau_{off} \quad (32)$$

理想情况下:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \tau_i^{on}(i)}{\sum_{i=1}^m \tau_i^{off}(i)} \geq \frac{\tau_{on}}{\tau_{off}}, \sum_{i=1}^m \tau_i^{off}(i) \neq 0 \quad (33)$$

式中:初始状态为 $\tau_i^{off}(0) = 0$; $\tau_i^{on}(0) = \tau_i^{off}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

3) 决策模型

当调度侧分配给变压器的负荷削减量 $D(x)$ 与变压器开展“煤改电”负荷削减量相同时,由电供暖设备的运行机理即热舒适度模型可知,此时室内温

度变化最小,引起用户感受到的舒适度变化最小,但求解过程中可使偏差 $e(x)$ 尽可能小。根据调度控制模型及约束条件整理出决策模型为

$$\begin{cases} \min e(x) = G(x) - D(x), e(x) \geq 0 \\ D(x) = D(x), D(x) \leq C_t \\ D(x) = C_t, D(x) > C_t \end{cases} \quad (34)$$

$$\text{s.t. } \tau_i^{off}(x) \leq \tau_{off} \quad (35)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m \tau_i^{on}(i)}{\sum_{i=1}^m \tau_i^{off}(i)} \geq \frac{\tau_{on}}{\tau_{off}}, \sum_{i=1}^m \tau_i^{off}(i) \neq 0 \quad (36)$$

上述模型为非线性多目标优化问题,决策变量为: $\Phi(x) = \{s_1(x), s_2(x), \dots, s_m(x)\}$, $x = 1, 2, 3, \dots, M$ 。

4 案例分析

2022年12月吐鲁番市持续低温,导致多台配电变压器出现重过载运行现象,选取其中“煤改电”用户改造完成的典型台区进行案例分析。10 kV 高昌线 95 号杆变压器额定容量为 400 kVA,通过查看配用电调度感知系统可知该变压器接带的“煤改电”总负荷为 210 kW,“煤改电”用户为 70 户,均为分布式“煤改电”用户,使用的电供暖设备为分散式直热类,该变压器 2021 年 12 月 5 日负荷晚高峰期间(19:30—00:30)的负荷曲线与负载率如图 6 所示。

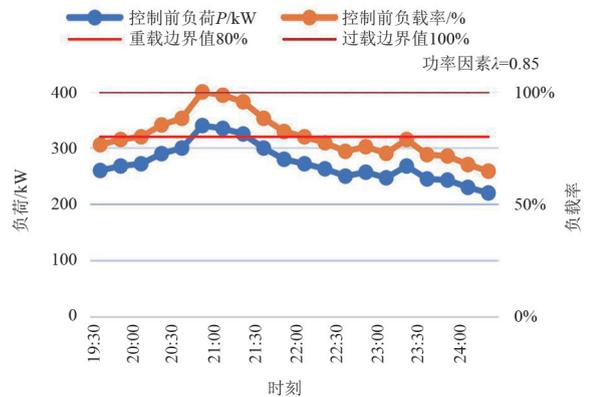


图 6 配电变压器负荷与负载率曲线

由图 6 中负载率曲线可知,该变压器在 20:15—21:45 区间出现重过载运行现象,甚至在 20:45 时出现过载运行。变压器长时间的重过载运行会对设备安全稳定运行造成威胁,若不及时处置可能产生

大范围长时间停电情况。

负荷采集时间段为 15 min, 20:15—21:45 共为 7 个时间段, 根据图 3 中的负荷曲线与重载边界值计算出 1~7 个时段所需削减功率如表 3 所示。

表 3 各时段所需削减功率

时间段/15 min	准实时功率 P/kW	需削减功率 D/kW
1	290	18
2	300	28
3	340	68
4	335	63
5	325	53
6	300	28
7	280	8

假设 10 kV 高昌线 95 号杆变压器接带“煤改电”用户的电供暖设备平均制热功率为 3 kW, 平均能效比(制热率)为 2.7, 用户热舒适度为 [23.0, 27.8] °C, 20:15—21:45 期间室外环境温度为 0 °C, 由此可得到电供暖设备额热动力学模型为:

$$T_{in}^{v+1} = 0 - 0.96(0 - T_{in}^v), s = 1 \quad (37)$$

$$T_{in}^{v+1} = 0 - 45 - 0.96(0 - 45 - T_{in}^v), s = 0 \quad (38)$$

根据可控“煤改电”负荷预测模型式(20)、式(21)、式(22)可求解负荷控制周期 τ_c 为 13.77 min, 电供暖设备处于“开启”控制状态时间 τ_{on} 为 9.1 min, 处于“关闭”控制状态时间 τ_{off} 为 4.67 min。

根据 DLC 可控容量预测式(25), 可得出 20:15—21:45 期间能参与控制行动的“煤改电”负荷为 71.19 kW。

显然, 实际可执行负荷削减量大于 20:50—21:45 期间调度侧要求的每个时间段削减需求量, 因此实际进行“煤改电”负荷削减可按表 3 的要求执行。为简化计算, 将 70 家“煤改电”用户分为 7 组进行轮控, 每组 10 家电供暖设备在实施调度控制策略时行动一致, 各负荷组的制热功率如表 4 所示。

表 4 各负荷组的制热功率

负荷组编号	制热功率/kW
1	25
2	26
3	31
4	36
5	40
6	24
7	28

设负荷控制时间间隔 $\omega = 1$ min, 在 20:15—21:45 期间 7 个时段内执行 105 次控制, 每个时段执行 15 次相同控制方式, 需要各负荷组提供的响应资源由式(31)的决策模型得出:

$$\min e(x) = G(x) - D(x), e(x) \geq 0 \quad (39)$$

$$\text{s.t. } \tau_i^{\text{off}}(x) \leq 4.67 \quad (40)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^7 \tau_i^{\text{on}}(i)}{\sum_{i=1}^7 \tau_i^{\text{off}}(i)} \geq \frac{4.67}{9.1}, \sum_{i=1}^7 \tau_i^{\text{off}}(i) \neq 0 \quad (41)$$

式中: $G(x) = \sum_{i=1}^7 s_i(x) \times P_i$, $s_i(x) = \{0, 1\}$;

$$D(x) = \begin{cases} 18, & x = 1, \dots, 15 \\ 28, & x = 15, \dots, 30 \\ 68, & x = 31, \dots, 45 \\ 63, & x = 46, \dots, 60 \\ 53, & x = 61, \dots, 75 \\ 28, & x = 76, \dots, 90 \\ 8, & x = 91, \dots, 105 \end{cases}$$

CPLEX 是目前国际上顶尖的线性规划、整数规划和某些非线性规划问题求解软件包, 它可用于求解线性规划问题、二次规划问题、二次约束规划问题与混合整数问题^[15], 基于 Matlab 的 CPLEX 优化平台编写非线性多目标优化算法程序, 通过调用 ILOG CPLEX 算法求解决策变量。 $\Phi(x) = \{s_1(x), s_2(x), s_3(x), s_4(x), s_5(x), s_6(x), s_7(x)\}$, $x = 1, 2, 3, \dots, 105$ 。程序流程如图 7 所示。

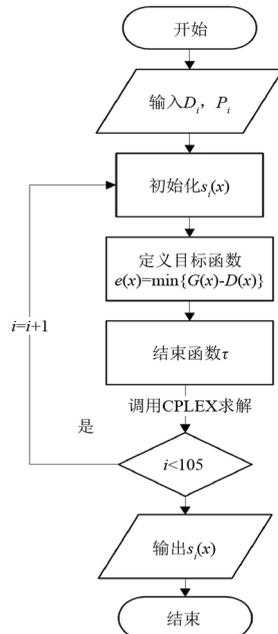


图 7 多目标优化算法程序流程

在变压器重过载期间(20:15—21:45),通过与实施“煤改电”负荷调度控制策略前负荷曲线与负载率图进行对比,变压器负载率均未超过重载边界值,保持在变压器健康运行的要求范围内,如图8所示。

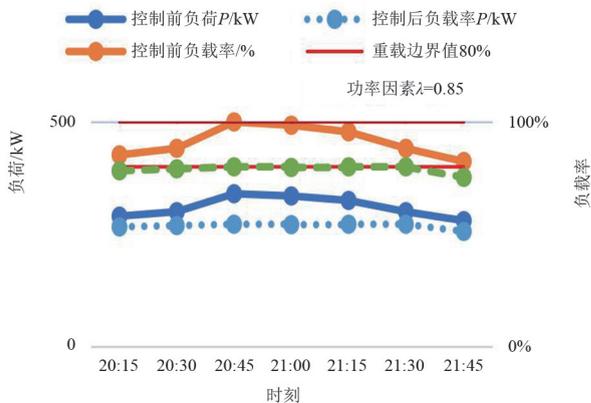


图8 负荷控制前后负荷曲线对比

5 结论

上面通过实地调研吐鲁番市“煤改电”工程推进程度以及配电网设备监测异常情况,冬季“迎峰度冬”保供电期间因“煤改电”负荷短时间、大规模增长造成10 kV线路、配电变压器重过载运行所占比例较大,严重威胁电网的安全稳定运行,而短时间提升网架的供电能力存在一定的困难。通过调研吐鲁番市“煤改电”工程接入模式和设备种类,建立“煤改电”标准化配置模式,使用变压器负载率作为实施负荷控制后的运行评价指标,利用ISO制定PMV指标值简化热舒适度模型,基于DLC技术设计了配电网运行调度控制策略,具体分析策略实施过程中的目标函数、约束条件以及决策模型。最后,选取吐鲁番市完成“煤改电”工程改造的台区重过载运行进行实例分析,通过Matlab程序求解出负荷控制结果显示,调度控制策略成功将变压器运行在安全边界以内,且不影响用户采暖的热舒适度,具有一定的有效性和实用性。

参考文献

[1] 王珊.面向“煤改电”地区计及用户舒适度的需求侧响应策略研究[D].北京:华北电力大学,2019.

[2] 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.

[3] 李锦飏,陈湘潭.需求侧响应技术浅析[J].中外能源,2021,26(5):16-22.

[4] BIGDELI M,VAKILIAN M,RAHIMPOUR E. A New Method for Detection and Evaluation of Winding Mechanical Faults in Transformer through Transfer Function Measurements[J]. Advances in Electricat and Computer Engineering, 2011, 11(2):23-30.

[5] 景胜蓝,李百战,李楠,等.基于热感觉指标确定热舒适判断的一项国际标准简介[J].暖通空调,2010,40(8):110-113.

[6] ASHRAE Standard Committee. Thermal Environmental Condition For Human Occupancy Standard: ANSI/ASHRAE 55-2004[S/OL]. [2023-04-01]. <https://max.book118.com/html/2015/0929/26387537.shtml>.

[7] 罗金满,刘丽媛,刘飘,等.考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):167-173.

[8] 曹世光,李卫东,柳焯,等.计及直接负荷控制的动态优化调度模型[J].中国电机工程学报,1998,18(3):160-162.

[9] 赵阅群.面向能源互联网的直接负荷控制模型与仿真研究[D].北京:华北电力大学,2016.

[10] ZHU Lan,YAN Zheng,LEE Wei-Jen, et al. Direct Load Control in Microgrids to Enhance the Performance of Integrated Resources Planning[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5):3553-3560.

[11] 柳焯.电力系统动态负荷瓶颈分析[J].哈尔滨工业大学学报,1994,26(6):69-74.

[12] 梁捷,梁广明.计及反弹负荷平抑的空调集群直接负荷控制研究[J].东北电力技术,2021,42(11):31-34.

[13] 赵阅群,艾欣,周树鹏.直接负荷控制技术[J].电气应用,2016,35(6):48-55.

[14] MOLINA A,GABALDON A,FUENTES J A, et al. Implementation and assessment of physically based electrical load models: Application to direct load control residential programmes[C]//IEEE Proceedings of Generation,Transmission and Distribution,2003,15:61-65.

[15] 蒋争明,关青苗.基于CPLEX和C++语言求解优化问题的过程[J].电脑知识与技术,2015,11(23):49-50.

作者简介:

侯泽东(1993),男,硕士,研究方向是电力系统、配电自动化、源网荷储协同控制。

(收稿日期:2023-07-02)