计及灰水负荷预测的区域型热补偿系统调控策略

张虹¹,王辛玮¹,王明晨²,李佳旺³,白洋⁴,张玉海⁴
(1.东北电力大学现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林吉林 132012;
2.国网翼北电力有限公司张家口供电公司,河北张家口 075000;
3.国网翼北电力有限公司承德供电公司,河北承德 067000;
4.国网吉林省电力有限公司吉林供电公司,吉林吉林 132000)

摘要:传统供暖手段以热电联产机组作为主要热源,由于热电联产机组具有电热耦合的特性,因此运行时会 产生热电负荷不匹配问题。为缓解这一问题,提出了一种集中供暖与区域型热补偿系统共同参与的供暖手 段。对用户侧的灰水生产情况进行灰水生产活动预测,量化预计可回收热能,并结合光热电站的余热,将二 者一同作为集中供暖的补偿热源。根据用户侧的热负荷特性以及光热电站和灰水热能回流系统的供热特 性,构建区域型热补偿系统的运行优化模型,使用模型预测控制方法制定系统模型的调控策略。最后,通过 设置算例仿真对比可知,所提出的调控策略能够回收利用原本废弃的热能,在实现供暖目标的同时保证了系统的经济性和环保性。

关键词:集中供暖;热能回流;区域型热补偿系统;灰水负荷预测;热电负荷不匹配 中**图分类号:**TM73;TK01 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202304027

0 引言

在碳达峰、碳中和的目标背景下,我国能源体系 的主要任务是促进能源低碳转型、建立更加环保高 效的能源体系^[1-2]。集中供暖是西北地区常见的供 暖手段,结合西北地区常见的光热电站^[3],利用生产 生活中的余热对传统供暖进行热补偿,这对于缓解 传统供暖能源消耗量大的问题、促进系统环保转型 具有重要的研究意义。

随着环保需求的逐渐上升,国内外学者对如何 高效地回收利用生产生活余热进行了研究^[4]。文献 [5]在光热电站机组中设置余热回收装置,利用余热 发电提高机组的发电效率与能源利用率。文献[6] 提出一种将光热电站与热电联产机组相结合的综合 能源系统,该系统能够将二者的余热结合,向外输出 温度可控的热能。然而,上述文献只考虑发电侧的 余热回收潜能,忽略了对用户侧余热回收问题的研 究。相关学者对用户侧余热利用的研究主要集中在 室内余热、家用电器运行热增益^[7]、生活热水等方 面。其中,灰水是家庭生活中沐浴、清洁等用户行为 生产的生活废热水。文献[8-9]利用蒙特卡罗方法 对灰水负荷进行预测,以缓解水资源短缺的问题。 文献[10]采用灰水负荷预测模型(grey water fore-

收稿日期:2022-07-11;修回日期:2023-03-17

在线出版日期:2023-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777027);吉林省 教育厅科学技术研究项目(JJKH20210093KJ)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777027) and the Scientific Research Project of Jilin Provincial Department of Education(JJKH20210093KJ) casting model,GWFM)对用户灰水负荷进行预测,为 排水系统建设提供数据支撑。上述文献中的灰水预 测行为仅针对灰水负荷的产量,缺少对用户侧灰水 热能预测和回收的研究。灰水热回收利用潜力较 高,通过热能再利用进行节能降耗势在必行。

当热电联产机组采用"以电定热"的运行策略 时,以满足电负荷的需求为首要目标,输出的热能有 时无法满足用户的热负荷需求。针对这种热电负荷 不匹配的问题,文献[11]提出一种具有分散式决策 能力的区域热电系统优化方法,提高了系统运行时 的热电灵活性。文献[12]利用新能源系统进行电热 之间的转换,改善传统供暖手段中热力系统供应不 足的问题。文献[13]研究区域电-热综合能源系统 的阶梯型碳交易机制,提高了系统热电解耦能力。 文献[14]提出一种可跨区域备用共享风能的多区域 互联电热联合系统协同优化调度模型,增加了综合 能源系统的能源调动潜力。然而,上述研究仅从电 热相互转换或利用现有热能进行区域间转换的角度 缓解热电负荷不匹配的问题,对于利用能源系统部 分可回收热能、改善传统供暖手段下热电负荷不匹 配问题的研究较少。

针对上述问题,本文对用户生活使用的灰水负 荷进行预测,以供暖手段为研究主体,构建区域型热 补偿系统的数学模型,结合灰水负荷预测、电价和环 境成本等因素,采用模型预测控制(model predictive control,MPC)对模型进行调控。最后通过设置 算例进行分析,验证本文优化调控方法的有效性。

1 区域型热补偿系统运行框架

在集中供暖为主要供暖手段的背景下,为改善

热电联产机组"以电定热"方式运行时存在的热电负荷不匹配问题,本文以光热电站余热影响范围内的 社区为研究对象,构建区域型热补偿系统,其管理框 架如图1所示。图中,区域型热补偿系统由光热电 站余热回收系统以及周围社区内的灰水热量回流系 统组成。



Fig.1 Regional thermal compensation system

余热回收系统设置在光热电站中,汽轮机排出 的低温蒸汽经由换热器将热能转移到储热罐中;灰 水热能回流系统设置在用户侧,灰水经过简单处理 后流过灰水热能回流系统,经由热泵与换热器进行 能量交换,通过热介质将热能储存到相变储热罐中。 在供暖阶段,为了补偿能源系统中与电能不匹配的 热能部分,令区域型热补偿系统参与供暖,灰水热能 回流系统与余热回收系统通过换热器向社区输入 热能。

2 灰水负荷预测

灰水负荷决定了灰水热能回流系统储热阶段可 回收热能,而灰水负荷主要由用户的活动状态所决 定。为准确预测灰水生产情况,进行如下准备工作: 构建时刻集合 $\Omega_{\rm K}$,基本元素为将全天以1min为时 间单位进行划分得到的各时刻开始节点;活动状态 集合 $\Omega_{\rm U}$,基本元素为人员的活动状态;住宅集合 $\Omega_{\rm R}$,基本元素为单个的用户住宅。人员活动状态概 率离散化描述步骤如下。

1)构建各时间节点马尔可夫链状态转移矩阵 f(k),其基本元素为通过各时刻用户活动状态转变 计算得到马尔可夫链一步转移概率 $f_{s,l}(k)$ 。

$$f_{g,l}(k) = \frac{n_{g,l}(k)}{\sum_{h=1}^{L} n_{g,h}(k)} \quad g, l \in \Omega_{\mathrm{U}}; k \in \Omega_{\mathrm{K}} \quad (1)$$

$$f(k) = \begin{bmatrix} f_{1}(k) \\ \vdots \\ f_{g}(k) \\ \vdots \\ f_{L}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1,1}(k) & \cdots & f_{1,g}(k) & \cdots & f_{1,L}(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{g,1}(k) & \cdots & f_{g,g}(k) & \cdots & f_{g,L}(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{L,1}(k) & \cdots & f_{L,g}(k) & \cdots & f_{L,L}(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $n_{g,l}(k)$ 为样本空间内k时刻由活动状态g在 k+1时刻转变为活动状态l的样本总数;L为活动状态总数。 2)使用蒙特卡罗方法对以初始时刻人员活动为 基本事件的样本空间进行计算模拟,能够得到住宅*i* 内室内人员的最初活动状态序列*u_{i,0}*,结合初始时刻 状态转移矩阵 *f*(0),可计算得到*u_{i,1}*,逐步进行计 算,可得到住宅*i*内室内人员的全天活动序列*u_i*。

$$\boldsymbol{u}_{i,0} = [u_{i,0,1}, u_{i,0,2}, \cdots, u_{i,0,v}] \quad i \in \Omega_{\mathrm{R}}$$
(3)

 $\boldsymbol{u}_{i} = [\boldsymbol{u}_{i,0}, \boldsymbol{u}_{i,1}, \cdots, \boldsymbol{u}_{i,96}] \quad i \in \Omega_{\mathbb{R}}$ (4) 式中:v为室内人员总数。

将完整调控周期活动状态序列 u_i 与附录 A 表 A1 所示的灰水生产活动相结合,能够确定住宅内单 一人员对应灰水生产情况,再将住宅内所有人员的 灰水生产情况汇总,可得住宅内灰水生产活动全天 发生情况 r_i为:

$$\boldsymbol{r}_{i} = [r_{i,1}(k), r_{i,2}(k), \cdots, r_{i,a}(k), \cdots, r_{i,m}(k)]$$

$$\boldsymbol{a} \in \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{G},i}, \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{G},i} \subseteq \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{G}}, \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{G}} \subseteq \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{U}} \qquad (5)$$

式中: $r_{i,a}(k)$ 为住宅i内k时刻灰水生产活动a的实施情况;m为灰水生产活动总数; $\Omega_{c,i}$ 为住宅i内灰水生产活动集合; Ω_c 为灰水生产活动集合。

灰水在进入灰水热能回流系统时,其额定质量 流量以及额定温度服从正态分布,住宅i内k时刻灰 水生产活动a的质量流量概率密度函数f_{m.a.i.k}和温 度概率密度函数f_{1.a.i.k}分别为:

$$f_{m,a,i,k}(x) = \frac{1}{\sigma_{m,a,i,k}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_{m,a,i,k})^2}{2\sigma_{m,a,i,k}^2}\right] (6)$$

$$f_{\mathrm{T},a,i,k}(x) = \frac{1}{\sigma_{\mathrm{T},a,i,k} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_{\mathrm{T},a,i,k})^2}{2\sigma_{\mathrm{T},a,i,k}^2} \right]$$
(7)

式中: $\sigma_{m,a,i,k}$ 、 $\mu_{m,a,i,k}$ 分别为 $f_{m,a,i,k}$ 的尺度参数、位置 参数; $\sigma_{T,a,i,k}$ 、 $\mu_{T,a,i,k}$ 分别为 $f_{T,a,i,k}$ 的尺度参数、位置 参数。

设住宅i内k时刻灰水生产活动a最终流入灰水 热能回流系统时的灰水质量流量和温度分别为 $m_{a,i}(k)和T_{a,i}(k),二者可以分别表示为:$

$$m_{a,i}(k) = O_{a,i} f_{m,a,i,k} r_{i,a}(k)$$
(8)

$$T_{a,i}(k) = O_{a,i} f_{T_{a,i},k} r_{i,a}(k)$$

$$(9)$$

式中:O_{a,i}为住宅i内灰水生产活动a存在情况。 根据式(8)、(9),可对住宅内室内灰水生产情况

进行预测,并作为优化调控过程中计算的基础。

3 区域型热补偿系统工作模型

3.1 余热回收系统

余热回收系统回收光热电站中低温蒸汽的热能,储存到余热储热罐中。光热电站正常工作时,*k*时刻余热回收系统的储热功率*p*_{eb}(*k*)可表示为^[15]:

 $p_{ch}(k) = \eta_{h} \Big(m_{ii}(k) H_{ii}(k) - m_{io}(k) H_{io}(k) \Big) \quad (10)$ 式中: η_{h} 为换热器传热效率; $H_{ii}(k)$ 为k时刻余热储

热罐入口处蒸汽焓值;m_i(k)为k时刻余热储热罐入口处蒸汽质量流量;H_{io}(k)为k时刻余热储热罐出口 处蒸汽焓值;m_{io}(k)为k时刻余热储热罐出口处蒸汽 质量流量。

在储热阶段结束后,余热储热罐储存的热能 Q_{ch} 可表示为:

$$Q_{\rm ch} = \sum_{k=0}^{k_{\rm c}} p_{\rm ch}(k)$$
 (11)

式中:*p*_{ch}(*k*)为*k*时刻余热回收系统的储热功率;*k*_o为余热回收系统储热阶段结束时间。

余热储热罐通过换热器与供暖热介质进行一次 换热。根据换热器的工作特性,这一过程的动态模型可表示为^[15]:

$$M_{esr}C_{esr}\Delta T_{co}(k) = m_{esr}(k)C_{esr}(T_{ci}(k) - T_{co}(k)) + m_{g}(k)C_{g}(T_{gic}(k) - T_{goc}(k))$$
(12)
$$M_{g}C_{g}\Delta T_{goc}(k) = m_{g}(k)C_{g}(T_{gic}(k) - T_{goc}(k)) + m_{esr}(k)C_{esr}(T_{ci}(k) - T_{co}(k))$$
(13)

式中: M_{esr} 为余热储热罐内热介质质量; M_{g} 为供热介 质质量; C_{esr} 为与余热储热罐相连的换热器中换热质 的定压比热容; C_{g} 为供热介质的定压比热容; $m_{esr}(k)$ 为k时刻与余热储热罐相连的换热器中换热质的质 量流量; $m_{g}(k)$ 为k时刻供热介质的质量流量; $T_{ei}(k)$ 为k时刻与余热储热罐相连的换热器中换热质的入 口温度; $T_{eo}(k)$ 为k时刻与余热储热罐相连的换热器 中换热质的出口温度; $T_{gie}(k)$ 为k时刻与余热储热系 统交换热能的供热介质入口温度; $T_{goe}(k)$ 为k时刻与 余热储热系统交换热能的供热介质出口温度。

3.2 灰水热能回流系统

灰水热能回流系统以社区为运行单位,采用相 变储热罐作为热能储存装置^[16-17]。根据第2章中得 到的灰水生产状况预测结果,计算得到*k*时刻灰水 热能回流系统储热功率的预测值 *p*₀(*k*)为^[18]:

$$p_{\rm p}(k) = C(k)C_{\rm w} \sum_{i=1}^{n} \sum_{a=1}^{m} m_{a,i}(k)(T_{a,i}(k) - T_{\rm p}) \quad (14)$$

式中:C(k)为k时刻热泵的性能系数; C_* 为灰水定压 比热容; T_p 为余热储罐中储热质温度;n为社区内用 户总数。

相变储热罐在回收阶段储存的热能 Q_{pem} 可表示为:

$$Q_{\rm pcm} = \sum_{k=0}^{k_{\rm p}} p_{\rm p}(k)$$
 (15)

式中:k,为灰水热能回流系统储热阶段结束时间。

供暖阶段,相变储热罐通过换热器与供热介质 进行二次换热。根据换热器的工作特性,这一过程 的动态模型可表示为:

$$M_{\rm pr}C_{\rm pr}\Delta T_{\rm po}(k) = m_{\rm pr}(k)C_{\rm pr}(T_{\rm pi}(k) - T_{\rm po}(k)) + m_{\rm g}(k)C_{\rm g}(T_{\rm gip}(k) - T_{\rm gop}(k))$$
(16)
$$M_{\rm g}C_{\rm g}\Delta T_{\rm gop}(k) = m_{\rm g}(k)C_{\rm g}(T_{\rm gip}(k) - T_{\rm gop}(k)) +$$

$$m_{\rm pr}(k)C_{\rm pr}(T_{\rm pi}(k) - T_{\rm po}(k)) \qquad (17)$$

式中: $M_{\mu\nu}$ 为相变储热罐内混合热介质质量; $C_{\mu\nu}$ 为相 变储热罐内热介质对应状态的定压比热容; $m_{\mu\nu}(k)$ 为k时刻与相变储热罐相连的换热器中换热质的质 量流量; $T_{\mu\nu}(k)$ 为k时刻与相变储热罐相连的换热器 中换热质的入口温度; $T_{\mu\nu}(k)$ 为k时刻与相变储热罐 相连的换热器中换热质的出口温度; $T_{gip}(k)$ 为k时刻 灰水热能回流系统交换热能的供热介质入口温度; $T_{gop}(k)$ 为k时刻与灰水热能回流系统交换热能的供 热介质出口温度。

将式(12)、(13)和式(16)、(17)整合后,可得区 域型热补偿系统的空间状态方程为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(k) \\ \boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k) \end{cases}$$
(18)

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} T_{co} & T_{po} & T_{goc} & T_{gop} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(19)

$$= \begin{bmatrix} T_{ci} & T_{ni} & T_{sic} & T_{sin} & m_{csr} & m_{nr} & m_{s} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(20)

式中:x为系统的状态变量;u为系统的控制变量;y为系统的输出变量。令 k_1 =1/(M_gC_g), k_2 =1/($M_{est}C_{est}$)、 k_3 =1/($M_{\mu r}C_{\mu r}$),可得区域型热补偿系统的系数矩阵 A、B和C分别见附录A式(A1)—(A3)。

4 区域型热补偿系统调控策略

4.1 目标函数

在对供暖过程进行优化调控时,需要考虑用户 的购电成本、购热成本和环境成本,因此目标函数可 以表示为:

min
$$C_{\rm r} = \sum_{k=k_0}^{N_{\rm h}} (C_{\rm E}(k) + C_{\rm H}(k) + C_{\rm ENV}(k))$$
 (21)

式中: $C_{\rm r}$ 、 $C_{\rm E}(k)$ 、 $C_{\rm H}(k)$ 和 $C_{\rm ENV}(k)$ 分别为日总运行成本、k时刻购电成本、k时刻购热成本和k时刻环境成本; k_0 为优化调控的起始时间; N_k 为一个完整调控周期的总时间。

$$C_{\rm E}(k)$$
、 $C_{\rm H}(k)$ 和 $C_{\rm ENV}(k)$ 分别可表示为:

$$C_{\rm E}(k) = c_{\rm e}(k) p_{\rm e}(k) \tag{22}$$

$$C_{\rm H}(k) = c_{\rm h}(k) p_{\rm h}(k) \tag{23}$$

$$C_{\rm ENV}(k) = c_{\rm ee} p_{\rm e}(k) + c_{\rm he} p_{\rm h}(k)$$
 (24)

式中: $c_{e}(k)$ 为k时刻分时电价; $p_{e}(k)$ 、 $p_{h}(k)$ 分别为k时刻用户的外部购电功率、外部购热功率; $c_{h}(k)$ 为k时刻外部购热的单位价格; c_{ee} 为阶梯式电功率环境成本系数; c_{he} 为阶梯式热功率环境成本系数^[19]。

4.2 系统运行约束

本文系统运行约束包括热泵工作功率和爬坡约

束、余热储热罐储热约束、相变储热罐储热约束、热 电负荷不匹配约束以及热舒适度约束。

1)热电负荷不匹配约束。

$$P_{n}^{\min} \leq P_{n}(k) \leq P_{n}^{\max}$$
(25)

$$P_{\rm n}(k) = u(k)p_{\rm h}(k)/p_{\rm e}(k)$$
 (26)

式中: $P_n(k)$ 为k时刻热电负荷不匹配程度;u(k)为k时刻热电联产机组的额定热电比; P_n^{\min} 、 P_n^{\max} 分别为允许的热电负荷不匹配最小值和最大值。

$$0 \leq T_{\rm n} \leq T_{\rm n}^{\rm max} \tag{27}$$

式中:*T*_n为系统运行周期内热电负荷不匹配时间; *T*_n^{max}为完整周期内保证系统正常运行的热电负荷不 匹配最长时间。

2)热舒适度约束。

区域型热补偿系统向用户侧输出的温度需要保 证室内温度在一定的热舒适范围内^[20],即:

$$T_{in}^{\min} \leq T_{in}(k) \leq T_{in}^{\max}$$
(28)
式中: $T_{in}(k)$ 为 k 时刻室内温度; T_{in}^{\min} 和 T_{in}^{\max} 分别为满

足用户热舒适度的最低温度和最高温度。

其余约束条件见附录A式(A4)--(A7)。

4.3 MPC 策略

本文所采用的 MPC 方法是一种在工业控制领 域被广泛应用的优化调控方法,在进行优化调控时, 其控制方案能够根据系统的最新状态进行实时更 新,因此其鲁棒性相较于传统优化策略得到了提升, 具体原理见附录A图A1。

在对区域型热补偿系统进行优化调控时,分别 设置包含 N_p、N_e个时段的预测时域、控制时域(其中 N_p>N_e),根据当前时刻系统各处热介质温度和预测 时域内的灰水负荷预测情况,能够确定控制时域内 系统运行最优调控策略,执行控制时域内的首个决 策命令,从而得到该时刻系统向用户侧输出的热能。 完成本轮优化调控后,预测时域与控制时域同时向 下一时刻滚动,并根据实际输出结果,对预测输出结 果进行修正,作为该时刻的初始数据,从而对系统进 行新一轮优化调控,其具体流程见附录A图A2。在 MATLAB环境下调用IPOPT求解器对上述问题进行 求解,求解步骤如下。

步骤1:*k*时刻对灰水负荷进行预测,结果如式 (8)和式(9)所示。

步骤 2:对区域型热补偿系统进行建模,如式 (18)所示,确定区域型热补偿系统的运行状态。通 过求解目标函数式(21),并调用 IPOPT求解器进一 步确定 k 时刻热补偿区域系统的优化运行方案。

步骤3:判断*k*时刻是否为系统设定时间周期的 最终时间,若不是,则滚动至*k*+1时刻,更新系统参数,重复滚动优化。

步骤4:输出整个时间周期*K*={0,1,…,*k*,…, 96}的区域热补偿系统参与供暖的调控方案。

5 算例分析

5.1 基础数据

本文数据来源于国家统计局发布的全国时间利 用调查公报,含有用户侧灰水生产活动等相关历史 数据。灰水负荷预测所用相关数据,见附录A表A1。 区域型热补偿系统的结构如图1所示,算例主要参 数见附录A表A2,分时电价参数见附录A图A3。区 域型热补偿系统的完整优化调控周期为24h,每隔 15 min取一个时间断面,预测时域选取4h。

5.2 灰水负荷预测结果分析

为验证住宅灰水负荷预测的准确性,随机选取 1000户具有西北省份特征并符合区域型要求的住 宅,以冬季典型日为背景,对灰水负荷和流入灰水热 能回流系统的灰水温度以及质量流量进行预测,并 结合实际情况进行对比,结果如图2和图3所示。

分析图3可知:在一个完整的调控周期内,使用 马尔可夫预测方法预测的温度标准差为4.85%,平 均绝对值误差百分比为6.01%,对质量流量的预测 标准差为5.22%,平均绝对值误差百分比为6.43%; 使用时间序列分析方法对温度的预测标准差为 5.46%,平均绝对值误差百分比为6.72%,对质量流 量的预测标准差为5.93%,平均绝对值误差百分比 为6.89%。通过预测结果对比分析可知,本文所用 预测方法对灰水热能的预测精度相对较高。

5.3 调控策略效果分析

设置如下3个算例场景进行仿真验证:算例1, 区域型热补偿系统不进行调控,传统供暖系统将室







22

temperature and mass flow

内温度作为优化调控目标;算例2,区域型热补偿系统参与供暖调控,考虑固定电价和环境成本因素;算例3,对区域型热补偿系统进行优化调控,考虑分时电价和环境成本因素。

算例3下区域型热补偿系统中灰水热能回流系 统和余热回收系统在储热阶段的工作状态,见图4。





分析图4可知,灰水热能回流系统的热能回收 率在70.4%~87.5%之间,热泵的性能系数在1.26~ 4.6之间。

根据灰水负荷预测结果,灰水热能回流系统在 高电价时段分别降低了12.7%和4.6%的储热功率, 削减了部分购电成本;余热回收系统的热能回收效 率在71.5%~82.1%之间。在灰水负荷高峰期,优先 选择灰水热能作为主要热源,余热回收系统的储热 功率降低了13.3%。

各算例下的热功率与热负荷如图5所示。





由图 5 可知,热电联产机组的热电功率和社 区的热电负荷是不匹配的。例如,20:30 后社区电负 荷下降、热负荷上升,导致热电联产机组无法提供充 足的热能,需要额外生产热能进行补充。01:30— 05:00 为全天电负荷低谷时段,但热负荷处于较高水 平。算例1下,热功率与热负荷全天的平均差值为 0.26 MW,最大差值为0.61 MW,一个完整调控周期内 有70.3%的时段,热电联产机组处于无法满足社区热 负荷的状态。算例2下区域型热补偿系统参与供暖, 热功率与热负荷全天的平均差值为0.087 MW,最大 差值为0.31 MW。算例3下区域型热补偿系统参与 供暖,热功率与热负荷全天的平均差值为0.09 MW, 最大差值为0.28 MW。由此可知,区域型热补偿系 统参与供暖后,弥补了部分社区内原本未被热电联 产机组满足的热负荷需求。

各算例下系统运行功率如图6所示。分析图6 可知,算例2下区域型热补偿系统参与调控后,运行 期间热电负荷比平均值为1.02,最大值为1.06,最小 值为0.93,由于热的变化是缓慢的,因此热电负荷比 控制在一定范围内即可满足用户热负荷需求。算例 3下区域型热补偿系统参与调控并考虑了分时电 价,在电价上升(07:15、14:15)前的时段,区域型热补 偿系统热功率分别提高了13.2%、9.5%,在电价下降 (21:00、22:00)前的时段,区域型热补偿系统热功率 分别减少了7.31%、6.20%。对完整优化调控周期进 行分析,区域型热补偿系统将20.7%的高电价时段 热负荷需求转移至低电价时段。调控运行期间,热 电负荷比平均值为1.03,最大值为1.08,最小值为 0.92,使热电负荷不匹配的问题得到了缓解。



Fig.6 Operation power of system under each example

各算例下供暖效果统计情况如图7所示。



图7 各算例下供暖效果统计

Fig.7 Heating effect statistics under each example

由图7可知,算例1仅以供暖效果作为优化目标,室内温度在20.5~22.2 ℃之间波动,温度变化幅度较小。算例2加入了区域型热补偿系统,考虑固定电价和成本因素,室内温度在19.8~22.5 ℃之间波动,室内温度仍能够在热舒适度范围内。算例3加入了区域型热补偿系统,考虑分时电价和成本因素, 室内温度在19.8~22.6 ℃之间波动,室内温度仍能够在热舒适度范围内。可见,灰水生产活动的不确定性导致区域型热补偿系统内用户的室内温度具有一定的波动性,但仍可使其满足热舒适度要求。

各算例下经济成本分析结果如表1所示。

表1 各算例下经济成本分析

Table 1 Economic cost analysis under each example

| 算例 | 购电 成本 / 元 | 购热 成本 / 元 | 环境 成本 / 元 | 总成 本 / 元 |
|----|--------------|---------------|--------------|-------------|
| 1 | 0 | 3 321.25 | 807.08 | 4128.33 |
| 2 | 220.34 | 3 0 2 8 . 3 2 | 743.50 | 3992.16 |
| 3 | 157.02 | 3 0 3 2.65 | 744.21 | 3933.88 |

从表1可以看出:相比于算例1,算例2的购热 成本下降了8.8%,环境成本下降了7.9%,总成本下 降了3.3%;算例3考虑了分时电价和成本因素,购 热成本下降了8.7%,环境成本下降了7.8%,总成本 下降了4.7%。相比于算例1,算例2和算例3虽然相 应增加了购电成本,但由于环境成本和购热成本的 降低,总成本均低于传统供暖方式。可见,区域型热 补偿系统参与供暖优化调控后,对于降低传统供暖 方式的经济成本和环境成本有着积极的作用。

6 结论

本文构建了区域型热补偿系统模型,采用 MPC 方法对供暖手段进行调控,通过算例分析得出如下 结论:

1)区域型热补偿系统在热电联产机组无法满足 社区热负荷需求时与社区进行热交换,向社区提供 部分热负荷,将社区热负荷与电负荷的比值控制在 0.9~1.1内,缓解了供暖时的热电负荷不匹配问题;

2)利用马尔可夫模型对灰水生产活动进行预测,通过对应活动的概率分布参数预测灰水负荷热能,预测精度比时间序列分析方法提升了11.2%,有效地提高了区域型热补偿系统的运行效率;

3)区域型热补偿系统参与供暖调控,优先使用 灰水负荷热能弥补热功率缺额,考虑分时电价、环境 成本等因素,利用区域型热补偿系统的储热特性,可 转移20.7%的热负荷,从而降低了系统的运行成本。

在后续的工作中,将重点研究如何将本文提出 的动态模型与碳税定价策略相结合,从而进一步促 进传统供暖方式的经济和低碳运行。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1] 邱伟强,王茂春,林振智,等."双碳"目标下面向新能源消纳场 景的共享储能综合评价[J].电力自动化设备,2021,41(10): 244-255.

QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):244-255.

[2] 唐成虹,王靖韬,曾博,等. 计及含蒸汽热泵工业园区能量品位 转换的综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化,2023,47(2): 191-199.

TANG Chenghong, WANG Jingtao, ZENG Bo, et al. Optimal dispatch for integrated energy considering energy grade conversion in industrial park with steam heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2):191-199.

[3] 崔杨,张家瑞,王铮,等. 计及含储热光热电站与电锅炉联合运 行的供热期弃风消纳策略[J]. 高电压技术,2021,47(6):2250-2258.

CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Strategy of wind curtailment accommodation in heating season by considering joint operation of concentrated solar power plant and electric boiler[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2250-2258.

[4]张嘉睿,穆云飞,贾宏杰,等.考虑停电时段用户热需求的蓄热 式电采暖日前优化调度方法[J].电力系统自动化,2020,44 (21):15-22.

ZHANG Jiarui, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Day-ahead optimal scheduling method for regenerative electric heating considering thermal demand of users during power outage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21):15-22.

[5] 彭春华,陈婧,郑聪.基于机会约束高斯混合模型的含光热电站热电联供型微网鲁棒经济调度[J].电力自动化设备,2021,41(4):77-84,93.

PENG Chunhua, CHEN Jing, ZHENG Cong. Robust economic dispatch of CSP-CHPMG based on chance constrained Gaussian mixture model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):77-84, 93.

[6] 潘华,姚正,林顺富,等. 基于信息间隙决策理论的含光热电站及热泵的综合能源系统低碳调度优化[J]. 现代电力,2022,39
 (2):169-183.

PAN Hua, YAO Zheng, LIN Shunfu, et al. Low-carbon dispatch optimization of integrated energy system including solar power plant and heat pump based on information gap decision theory[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(2):169-183.

 [7]张虹,王明晨,白洋,等. 计及家用电器电热特性的分散式电采 暖集群经济低碳调控策略[J]. 中国电机工程学报,2022,42 (11):4013-4026.
 ZHANG Hong, WANG Mingchen, BAI Yang, et al. Economy low-carbon control strategy of decentralized electric heating

cluster considering electrical and thermal characteristics of household appliances [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (11):4013-4026.

- [8] AMARIS G, DAWSON R, GIRONÁS J, et al. From mathematical models to policy design: predicting greywater reuse scheme effectiveness and water reclamation benefits based on individuals' preferences [J]. Sustainable Cities and Society, 2021,74:103120.
- [9] LIU S, BUTLER D, MEMON F, et al. Impact of system factors on the water saving efficiency of household grey water recycling [J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 24(1/2/3):226-235.
- [10] WU Huaan, ZENG Bo, ZHOU Meng. Forecasting the water demand in Chongqing, China using a grey prediction model and recommendations for the sustainable development of urban water consumption[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(11):1386.
- [11] 韩赫,张沛超,孙宏宇,等. 能量流-信息流-价值流协同的区域
 热电系统分散式能量管理方法[J]. 中国电机工程学报,2020,
 40(17):5454-5467.
 HAN He,ZHANG Peichao,SUN Hongyu, et al. Decentralized

energy management method for district heat-electric system based on synergies of energy-information-value flows[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17):5454-5467.

- [12] 陈胜,卫志农,顾伟,等.碳中和目标下的能源系统转型与变革:多能流协同技术[J].电力自动化设备,2021,41(9):3-12.
 CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(9):3-12.
- [13] 林卓然,王守相,王绍敏,等.考虑阶梯型碳交易机制的区域 电-热综合能源系统分布协同调度方法[J].电网技术,2023,47 (1):217-229.

LIN Zhuoran, WANG Shouxiang, WANG Shaomin, et al. Dis-

tributed coordinated dispatching of district electric-thermal integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism[J]. Power System Technology,2023,47(1):217-229.

[14] 刘威,张亚超,谢仕炜. 计及跨区备用共享的多区域电热联合 系统分布式协同优化调度[J]. 电网技术,2022,46(8):3203-3217.

LIU Wei,ZHANG Yachao,XIE Shiwei. Distributed coordinated optimal scheduling of multi-regional combined heat and power system considering cross-regional reserve sharing[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3203-3217.

- [15] 林克曼,王召珩,吴峰,等.光伏-光热联合发电系统动态建模 与功率协调控制[J].电力自动化设备,2021,41(9):110-117.
 LIN Keman,WANG Zhaoheng,WU Feng, et al. Dynamic modeling and coordinated control strategy of hybrid PV-CSP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(9): 110-117.
- [16] 王子铭,孙亮,孙立国,等. 基于相变储能热阻模型的 CCHP型 微能源网优化调度[J]. 东北电力大学学报,2022,42(1):96-103.
 WANG Ziming, SUN Liang, SUN Liguo, et al. Optimization scheduling of CCHP micro-energy network based on phase change energy storage thermal resistance model[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2022,42(1):96-103.
- [17] 胡志豪,冯忠楠,魏繁荣,等. 计及热力不确定性的智能建筑 电-热联合鲁棒经济调度[J]. 中国电机工程学报,2020,40 (12):3907-3919.
 HU Zhihao,FENG Zhongnan,WEI Fanrong, et al. Robust dispatch for electrical-thermal combined intelligent building considering impacts of uncertain-ties on thermal side [J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(12):3907-3919.
- [18] 施金晓,邰能灵,李珂,等. 计及需求侧管理的热泵-储能型微 电网能量优化策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):146-151. SHI Jinxiao, TAI Nengling, LI Ke, et al. Energy optimization strategy considering demand-side management for microgrid with heat pump and hybrid energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):146-151.
- [19] 王丹,黄德裕,胡庆娥,等.基于电-热联合市场出清的综合需 求响应建模及策略[J].电力系统自动化,2020,44(12):13-21.
 WANG Dan, HUANG Deyu, HU Qing'e, et al. Modeling and strategy of integrated demand response based on joint electricity-heat clearing market[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(12):13-21.
- [20] 林俐,顾嘉,王钤. 面向风电消纳的考虑热网特性及热舒适度 弹性的电热联合优化调度[J]. 电网技术,2019,43(10):3648-3661.

LIN Li, GU Jia, WANG Qian. Optimal dispatching of combined heat-power system considering characteristics of thermal network and thermal comfort elasticity for wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2019, 43 (10) : 3648-3661.

作者简介:

张 虹(1973—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为综 合能源系统管理、电力系统稳定与控制(E-mail: jdlzh2000@ 126.com);

王辛玮(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为清洁 供暖系统管理与控制和光热发电(E-mail:865853578@qq. com);

王明晨(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为清 洁采暖系统管理与控制和电力需求侧管理(E-mail: 932156143@qq.com)。

Regulation strategy of regional thermal compensation system considering grey water load forecasting

ZHANG Hong¹, WANG Xinwei¹, WANG Mingchen², LI Jiawang³, BAI Yang⁴, ZHANG Yuhai⁴

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Zhangjiakou Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China;

3. Chengde Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067000, China;

4. Jilin Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Jilin 132000, China)

Abstract: The traditional heating means take cogeneration units as the main heat sources. Because the cogeneration units have the electrothermal coupling characteristics, so the thermoelectric load mismatch may occur during the operation. In order to solve this problem, a heating method involving the central heating and regional thermal compensation system is proposed. As for the condition of grey water production on the user side, forecasting the grey water production activities, quantifying the estimated recoverable heat energy, and combined the residual heat of the solar power station as the supplements of central heating source. The operation optimization model of regional thermal compensation system is built according to the thermal load characteristics on the user side and the heating characteristics of the solar power station and thermal reflux system, and the regulation strategy of system model is formulated by using the model predictive control method. Finally, the examples are set for simulation comparison, and the results show that the proposed regulation strategy can recycle and use the original wasted heating power, achieve the heating target while ensuring the economy and environmental of system.

Key words: central heating; energy reflux; regional thermal compensation system; grey water load forecasting; thermoelectric load mismatch

(上接第8页 continued from page 8)

Collaborative operation optimization of cross-border integrated energy system considering joint trading of carbon and green certificates

LUO Zhao¹, LIU Hongzhi¹, ZHAO Weijie², SHEN Xin³, LÜ Xin¹, JIA Yunrui¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Kunming Bureau, EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China;

3. Metering Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: In view of the different energy market mechanisms in adjacent countries and the large difficulty of multilateral coordination dispatch, a collaborative operation optimization method of cross-border integrated energy system considering joint trading of carbon and green certificates is proposed. Based on the location of integrated energy systems in different countries, the model of cross-border integrated energy system considering loss of heating grid and power grid is proposed. Based on the consideration of cross-border energy flow and transformation, the cross-border green certificates and carbon trading are introduced, and a collaborative operation optimization model of cross-border integrated energy system considering joint trading of carbon and green certificates is built. The analysis of simulative results based on the built model shows that the introduction of trading of carbon and green certificates in cross-border integrated energy system can reduce the operating cost of integrated energy systems in different countries, meanwhile improve energy optimization allocation.

Key words: cross-border energy interconnection; trading of carbon and green certificates; collaborative optimal scheduling; low-carbon

| Table A1 Grey water production activities and their parameters | | | | | | |
|--|---------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|--|
| 序号 | 灰水生产活动 | 概率分布参数 | | | | |
| | | $\mu_{\mathrm{m},a,i,k}$ | $\sigma_{\mathrm{m},a,i,k}$ | $\mu_{\mathrm{T},a,i,k}$ | $\sigma_{{\scriptscriptstyle \mathrm{T}},a,i,k}$ | |
| 1 | 淋浴 | 3.91 | 0.75 | 40.2 | 7.2 | |
| 2 | 沐浴 | 4.55 | 1.05 | 39.4 | 10.5 | |
| 3 | 清洗衣物 | 4.25 | 0.92 | 35.5 | 7.3 | |
| 4 | 清洁餐具(手) | 1.23 | 0.34 | 34.5 | 7.0 | |
| 5 | 清洁餐具(机) | 1.15 | 0.26 | 36.2 | 6.8 | |
| 6 | 日常清洁 | 0.66 | 0.02 | 32.6 | 4.5 | |
| 7 | 其他 | 0.23 | 0.03 | 33.8 | 4.2 | |

表 A1 灰水生产活动及其参数

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -k_2 m_{\rm csr} C_{\rm csr} & 0 & -k_2 m_{\rm g} C_{\rm g} & 0 \\ 0 & -k_3 m_{\rm pr} C_{\rm pr} & 0 & -k_3 m_{\rm g} C_{\rm g} \\ -k_1 m_{\rm csr} C_{\rm csr} & 0 & -k_1 m_{\rm g} C_{\rm g} & 0 \\ 0 & -k_1 m_{\rm pr} C_{\rm pr} & 0 & -k_1 m_{\rm g} C_{\rm g} \end{bmatrix}$$
(A1)

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} k_2 m_{csr} C_{csr} & 0 & k_2 m_g C_g & 0 & k_2 C_{csr} (T_{ci} - T_{co}) & 0 & k_2 C_g (T_{gic} - T_{goc}) \\ 0 & k_3 m_{pr} C_{pr} & 0 & k_3 m_g C_g & 0 & k_3 C_{pr} (T_{pi} - T_{po}) & k_3 C_g (T_{gip} - T_{gop}) \\ k_1 m_{csr} C_{csr} & 0 & k_1 m_{gr} C_g & 0 & k_1 C_{csr} (T_{ci} - T_{co}) & 0 & k_1 C_g (T_{gic} - T_{goc}) \\ 0 & k_1 m_{pr} C_{pr} & 0 & k_1 m_{gr} C_g & 0 & k_1 C_{pr} (T_{pi} - T_{po}) & k_1 C_g (T_{gip} - T_{gop}) \end{bmatrix}$$
(A2)

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(A3)

1)热泵工作功率和爬坡约束。

灰水热能回流系统中的热泵运行约束为:

$$0 \le p_{\rm h}(k) \le p_{\rm h}^{\rm max} \tag{A4}$$

$$u_{\rm h}^{\rm min} \le p_{\rm h}(k+1) - p_{\rm h}(k) \le u_{\rm h}^{\rm max} \tag{A5}$$

式中: $p_h(k)$ 为k时刻热泵运行功率; p_h^{max} 为热泵运行功率上限; u_h^{max} 和 u_h^{min} 分别为热泵向上和向下爬坡速率极限。

2)余热储热罐储热约束。

为使余热储热罐正常工作,其储热量约束为:

$$0 \le Q_{\rm ch}(k) \le Q_{\rm ch}^{\rm max} \tag{A6}$$

式中: Q_{ch}^{max} 为相变储热罐的储热上限。

3)相变储热罐储热约束。

$$Q_{\rm pcm}^{\rm min} \le Q_{\rm pcm}(k) \le Q_{\rm pcm}^{\rm max} \tag{A7}$$

式中: Q_{pcm} 为避免相变储热罐熔盐结块的储热下限; Q_{pcm} 为相变储热罐的储热上限。



图 A1 MPC 原理 Fig.A1 Principle of MPC



图 A2 MPC 优化调控流程 Fig.A2 Regulation process of MPC optimization

表 A2 算例主要参数

| Table A2 Main example parameters | | | | |
|----------------------------------|--------------|--|--|--|
| 参数 | 数值 | | | |
| 相变储热罐容量 | 200 kW • h | | | |
| 相变储热系统热介质比热容 | 150 J/g | | | |
| 相变储热系统热介质质量 | 120 kg | | | |
| 热泵额定功率 | 350 kW | | | |
| 热泵爬坡速率限制 | 65 kW • h | | | |
| 热泵性能系数 | 0.65~0.82 | | | |
| 换热器传热效率 | 0.75 | | | |
| 余热储热罐容量 | 300 kW • h | | | |
| 余热储热系统热介质比热容 | 85 J/g | | | |
| 余热储热系统热介质质量 | 140 kg | | | |
| 热舒适度范围 | 19.5~24.0 °C | | | |
| 热电负荷比范围 | 0.9~1.1 | | | |



图 A3 电价参数

Fig.A3 Parameters of electricity price