

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 11 月 1 日 (01.11.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/196456 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/46 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/074413
- (22) 国际申请日: 2018 年 1 月 29 日 (29.01.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201710296092.6 2017年4月28日 (28.04.2017) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国江苏省南京市四牌楼 2 号,
Jiangsu 210096 (CN)。
- (72) 发明人: 顾伟(GU, Wei); 中国江苏省南京市四牌楼
2 号, Jiangsu 210096 (CN)。 吴晨雨(WU, Chenyu);
中国江苏省南京市四牌楼 2 号, Jiangsu 210096
(CN)。 吴志(WU, Zhi); 中国江苏省南京市四
牌楼 2 号, Jiangsu 210096 (CN)。 周苏洋(ZHOU,

Suyang); 中国江苏省南京市四牌楼 2 号, Jiangsu
210096 (CN)。 蒋平(JIANG, Ping); 中国江苏省
南京市四牌楼 2 号, Jiangsu 210096 (CN)。

(74) 代理人: 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) (NANJING SUGAO PATENT AND
TRADEMARK FIRM (ORDINARY PARTNERSHI));
中国江苏省南京市中山东路 198 号龙台国际
大厦 1912 室, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: MODELING METHOD FOR HEAT AND ELECTRICITY COMBINED OPTIMIZED SCHEDULING MODEL

(54) 发明名称: 一种热电联合优化调度模型的建模方法

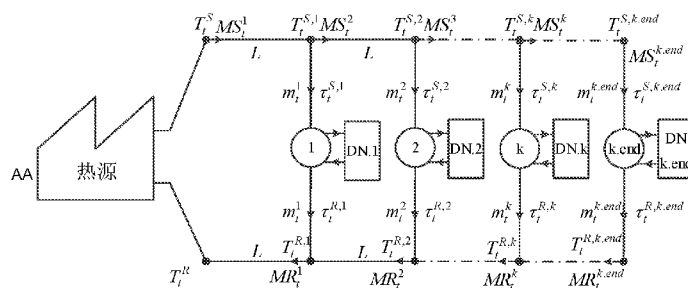


图 1

AA Heat source

(57) Abstract: Disclosed in the present invention is a modeling method for a heat and electricity combined optimized scheduling model, the heat and electricity combined optimized scheduling model being a mixed integer programming model used for a district heating system. The district heating system comprises a heat source, a heating network and a heat load, the heating network comprising a heating transfer network and a heating distribution network, divided into multiple heating supply regions according to heat load and distance from a heat source, and a day being divided into multiple time segments; omitting heating distribution network heating transfer loss, establishing a heating transfer network model taking into consideration heating network transfer delay in accordance with the heating transfer network; establishing a terminal user model capable of reflecting indoor temperatures, in accordance with the heat load; establishing a combined optimization model including conventional units, wind power units, combined heat and power generation units, electric boilers and heat storage tanks, in accordance with the heat source. The present invention realizes ultra-short-term heat and energy combined emergency scheduling, providing an important safeguard for safe and stable operation of a system, decreasing combustion of fossil fuels and increasing ability of the system to absorb wind power, having social and economic benefits.

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

- 发明人资格 (细则4.17(iv))

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明公开了一种热电联合优化调度模型的建模方法, 所述热电联合优化调度模型是一个混合整数规划模型, 用于区域供热系统, 所述区域供热系统包括热源、热网和热负荷, 所述热网包括输热网和配热网, 根据热负荷与热源的距离划分出多个供热区, 并将一天划分为多个时段; 省略配热网的热传输损耗, 根据输热网建立考虑热网传输延时的输热网模型; 根据热负荷建立能够反映室内温度的终端热用户模型; 根据热源建立包含常规机组、风电机组、热电联产机组、电锅炉和储热罐在内的联合优化调度模型。本发明实现超短期热电联合紧急调度, 为系统的安全稳定运行提供了重要保障, 减少了化石燃料的燃烧, 提高系统对风电的消纳能力, 具有一定的社会和经济效益。

一种热电联合优化调度模型的建模方法

技术领域

本发明涉及电力系统和热力系统的联合经济调度领域，具体涉及一种热电联合优化调度模型的建模方法。

背景技术

风能是当前世界上最具有大规模商业化开发潜力的可再生能源。大规模开发利用风能发电，已成为世界各国解决能源问题和环境问题，改善能源结构，保证国民经济可持续发展的有效措施。吉林省可再生能源储量丰富，具备建设国家级清洁能源基地的条件。其中风电可装机容量 5400 万千瓦，是国家确定的 9 个千万千瓦风电基地之一。

中国“三北”地区风能资源丰富，但能源结构不合理，例如吉林省的热电矛盾异常突出。全省热电联产机组装机容量达到 1314.84 万千瓦，占燃煤火电装机的 74%，比全省统调最小负荷多 800 万千瓦，比统调最大负荷多 400 万千瓦。进入供暖期后，电网调峰难度极大，即使热电联产机组全部按照最小方式运行，在夜晚低负荷期，风电仍被迫大量参与调峰。在春节等极端低负荷期，风电机组和纯凝机组必须全停，仍有 300 多万千瓦电力无法消纳，必须采取紧急措施并得到东北电网联络线支持才能保证电网安全。受此影响，吉林省弃风问题非常严重，近几年弃风率连续位列全国前列，供热中期风电大面积弃风，夜间风电全停成为常态，累计弃风率达到 31.1%。

发明内容

发明目的：为了解决现有技术存在的问题，实现超短期热电联合紧急调度，并促进风电的消纳，本发明提供一种热电联合优化调度模型的建模方法。

技术方案：一种热电联合优化调度模型的建模方法，所述热电联合优化调度模型是一个混合整数规划模型，用于区域供热系统，所述区域供热系统包括热源、热网和热负荷，所述热网包括输热网和配热网，建模方法包括以下步骤：

步骤一：根据热负荷与热源的距离划分出多个供热区，并将一天划分为多个时段；

步骤二：省略配热网的热传输损耗，根据输热网建立考虑热网传输延时的输热网模型；

步骤三：根据热负荷建立能够反映室内温度的终端热用户模型；

步骤四：根据热源建立包含常规机组、风电机组、热电联产机组、电锅炉和储热罐在内的联合优化调度模型。

有益效果：与现有技术相比，本发明具有以下优点：

(1) 将供热管网中热水的传输时间考虑在优化调度中, 使调度模型更加接近实际情况, 体现供热管网的延时特性, 利用此特性可以实现供热与供电的错峰调节。

(2) 热负荷节点不再被视为简单的负荷节点, 而是根据环境温度计算得到的热负荷需求节点, 充分利用建筑物的热惯性保持室内温度, 同时参与供热与供电的错峰调节。

(3) 本方法构建的热网模型和电网潮流约束本质上都是线性的, 整个优化模型是混合整数规划, 大部分现有的优化软件可以快速的解决此类问题。本发明为系统的安全稳定运行提供了重要保障, 减少了化石燃料的燃烧, 提高系统对风电的消纳能力, 具有一定的社会和经济效益。

附图说明

图 1 为热网结构图;

图 2 (a) 为使用传统建模方法的平均室内温度变化曲线;

图 2 (b) 为使用热电联合优化调度模型的建模方法的平均室内温度变化曲线;

图 3 (a) 为热源全部热出力对比图;

图 3 (b) 为风电消纳对比图;

图 3 (c) 为热电联产机组 2 的出力对比图出力对比图;

图 3 (d) 为常规机组 1 与常规机组 2 叠加的发电功率的对比图;

图 4 (a) 为三种日内环境温度曲线;

图 4 (b) 为温度分别是图 4 (a) 时的风电预测曲线;

图 5 (a) 为储热罐初始储热量对风电消纳的影响;

图 5 (b) 为充/放热功率对风电消纳的影响。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明。

一种热电联合优化调度模型的建模方法, 其特征在于, 所述热电联合优化调度模型是一个混合整数规划模型, 用于区域供热系统, 所述区域供热系统包括热源、热网和热负荷, 所述热网包括输热网 (一次热网) 和配热网 (二次热网), 一次热网如附图 1 所示, 图中的圆表示热交换站, 矩形表示二次热网。建模方法包括以下步骤:

步骤一: 根据热负荷与热源的距离划分出多个供热区, 并将一天划分为多个时段。

步骤二: 省略配热网的热传输损耗, 根据输热网建立考虑热网传输延时的输热网模型。

将输热网中的热水传输速度考虑在内,分别计算各供热区各时段内的热量损耗,建立输热网的汇流节点模型,从而描述整个输热网的稳态热力传输模型。

首先,根据水流速度和调度时间间隔计算单位管道长度,见式(1):

$$L = v \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中, L 为单位管道长度, v 为水流速度, Δt 为调度时间间隔;

(1) 根据热传递的基本原理,土壤的热阻 R_e 可以由式(2)计算得到。得到土壤的热阻值之后,便可以根据式(3)和式(4)计算一定长度内的管道内热水的温度损耗:

$$R_e = \frac{1}{2\pi\lambda_e} \ln \left(\frac{2(h + \lambda_e / \alpha_r)}{d_{ex}} + \sqrt{\left(\frac{2(h + \lambda_e / \alpha_r)}{d_{ex}} \right)^2 - 1} \right) \quad t \in \Gamma \quad (2)$$

$$\Delta T_t^{S,k} = \frac{(1+\beta)L}{c_{water}MS_t^k} \cdot \frac{(T_t^{S,k} - T_t^{surf}) \cdot 2\pi\lambda_b}{\ln(d_{ex}/d_{in}) + 2\pi\lambda_b R_e} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (3)$$

$$\Delta T_t^{R,k} = \frac{(1+\beta)L}{c_{water}MR_t^k} \cdot \frac{(T_t^{R,k} - T_t^{surf}) \cdot 2\pi\lambda_b}{\ln(d_{ex}/d_{in}) + 2\pi\lambda_b R_e} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (4)$$

式中, R_e 为土壤的热阻, $\Delta T_t^{S,k}$ 表示在第 k 个供热区第 t 个时段内的供水网络的温度损耗, $\Delta T_t^{R,k}$ 表示在第 k 个供热区第 t 个时段内的回水网络的温度损耗, h 代表供热管道的中心到土壤表面的距离, λ_e 为土壤热导系数, α_r 为土壤表面的热量传输系数, d_{in} 和 d_{ex} 分别表示管道的内径和外径, β 代表由附件造成的热损耗的附加因子, λ_b 代表管道表面绝热材料的热导, c_{water} 代表水的比热容, T_t^{surf} 表示 t 时刻的土壤表面温度, MS_t^k 和 MR_t^k 分别代表在第 k 个供热区中 t 时刻的供水管道与回水管道中的热水质流量, $T_t^{S,k}$ 和 $T_t^{R,k}$ 分别代表在 $\mathbf{K}$ 区域 t 时刻的供水管道与回水管网的水温, Γ 表示调度时刻集合, $\mathbf{K}$ 代表热负荷供热区集合;

(2) 考虑延时的节点质流量连续性约束:

$$\begin{cases} MS_t^k = m_{t+1}^k + MS_{t+1}^{k+1} \\ MS_t^{k.end} = m_t^{k.end} \end{cases} \quad \forall k, k+1 \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (5)$$

$$\begin{cases} MR_t^k = m_t^k + MR_{t-1}^{k+1} \\ MR_t^{k.end} = m_t^{k.end} \end{cases} \quad \forall k, k+1 \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (6)$$

式中, $k.end$ 代表最后一个供热区, m_t^k 表示流过第 k 个换热站的热水质流量;

(3) 汇流节点处的水温:

$$MR_{t+1}^k \cdot T_{t+1}^{R,k} = m_t^k \tau_{t+1}^{R,k} + MR_t^{k+1} (T_t^{R,k+1} - \Delta T_t^{R,k+1}) \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (7)$$

$\tau_t^{S,k}$ 和 $\tau_t^{R,k}$ 分别表示在 t 时刻在第 k 个换热站的供水温度和回水温度;

(4) 相邻供热区管道内热水温度损耗:

$$\begin{cases} T_{t+1}^{S,1} = T_t^S - \Delta T_t^{S,1} \\ T_{t+1}^{S,k+1} = T_t^{S,k} - \Delta T_t^{S,k} \\ T_{t+1}^R = T_t^{R,k} - \Delta T_t^{R,k} \\ T_t^{S,k} = \tau_t^{S,k} \end{cases} \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (8)$$

(5) 管道流量限制:

$$0 \leq m_t^k \leq \bar{m}^k \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (9)$$

$$0 \leq MS_t^k \leq \overline{MS}^k \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (10)$$

$$0 \leq MR_t^k \leq \overline{MR}^k \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (11)$$

式中, $\bar{m}^k$ 表示流经第 k 个换热站的最大质流量, $\overline{MS}^k$ 和 $\overline{MR}^k$ 分别表示第 k 个供水管道和回水管道的最大质流量;

(6) 压力损失:

$$PS_t^k - PS_t^{k+1} = \frac{\mu \cdot f_k \cdot (MS_t^k)^2}{(d_{in}^k)^5 (\rho_t^k)^2} \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (12)$$

$$PR_t^{k+1} - PR_t^k = \frac{\mu \cdot f_k \cdot (MR_t^k)^2}{(d_{in}^k)^5 (\rho_t^k)^2} \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma \quad (13)$$

PS_t^k 和 PR_t^k 分别表示在第 k 个区域 t 时刻供水管道和回水管道压力, μ 表示管道压力系数, f_k 表示在第 k 个供热区的摩擦系数, d_{in}^k 表示第 k 个供热区域的管道内径, ρ_t^k 是第 k 个供热区域在时刻 t 的热水密度;

(7) 换热站热交换功率:

$$c_{water} \cdot m_t^k \cdot (\tau_t^{S,k} - \tau_t^{R,k}) = H_{t,k} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (14)$$

$$\underline{\tau}^{R,k} \leq \tau_t^{R,k} \leq \bar{\tau}^{R,k} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (15)$$

式中, $H_{t,k}$ 为换热站热交换功率, $\underline{\tau}^{R,k}$ 为第 k 个换热站的回水温度下限, $\bar{\tau}^{R,k}$

为第 k 个换热站的回水温度上限。

步骤三：根据热负荷建立能够反映室内温度的终端热用户模型。

省略配热网的热传输损耗，由于忽略了配热网的热传输损耗，所以换热站从输热网吸收的热量，就是传输给用户侧的热量。然后根据热力工程相关设计公式，分别计算房屋的围护结构热损耗、冷风侵入热损耗和冷风渗透热损耗，最终得到一片供暖区域内的平均室内温度，从而衡量用户的热舒适度。在该模型中，平均室内温度是衡量热舒适度的唯一指标。

居民住宅也可以看做是拥有巨大热惯性的储热装置，热量可以储存在室内空气、门窗和家具中。建筑物的热惯性可以减小供热峰值并降低室内温度的变化速率，利用这种热惯性可以实现供暖与供电的错峰调节，从而促进风电的消纳。

(1) 围护机构热损耗

由于真正热传递过程十分复杂，包括对流、传导和辐射，为了简化热传递过程，在这里只采用稳态环境下的热损耗计算公式求解建筑物的围护结构热损耗：

$$Q_{t,k}^{\text{BE}} = A_k F_{e,k} (\theta_{t,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{out}}) (1 + x_k^g) (1 + x_k^{\text{ch}}) \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (16)$$

$$\theta_{\min}^{\text{in}} \leq \theta_{t,k}^{\text{in}} \leq \theta_{\max}^{\text{in}} \quad (17)$$

$$-\theta_{\text{ch}} \leq \theta_{t+1,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{in}} \leq \theta_{\text{ch}} \quad (18)$$

式中， $Q_{t,k}^{\text{BE}}$ 为建筑物的围护结构热损耗， x_k^g 和 x_k^{ch} 分别是在第 k 个热负荷区的房屋高度修正系数和房屋朝向修正系数， A_k 代表第 k 个热负荷区的建筑物围护结构面积， $F_{e,k}$ 表示第 k 个热负荷区域的房屋围护结构的热传递系数， $\theta_{t,k}^{\text{in}}$ 表示 t 时刻在第 k 个热负荷区域的平均室内温度， $\theta_{t,k}^{\text{out}}$ 表示表示 t 时刻在第 k 个热负荷区域的室外温度， $\theta_{\min}^{\text{in}}$ 和 $\theta_{\max}^{\text{in}}$ 分别表示最低平均室内温度和最高平均室内温度， θ_{ch} 表示单位调度时间内的平均室内温度最大变化率， Γ 表示调度时刻集合， $\mathbf{K}$ 代表热负荷供热区集合；

(2) 冷风渗透热损耗

在风力和热压造成的室内外压差作用下，室外的冷风空气通过门、窗等缝隙渗入室内，被加热后逸出，把这部分冷空气从室外温度加热到室内温度所消耗的热量，成为冷风渗透热损耗：

$$Q_{t,k}^{\text{Inf}} = 0.278 \text{Num} \cdot V_k c_p \rho_t^{\text{out}} (\theta_{t,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{out}}) \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (19)$$

式中， $Q_{t,k}^{\text{Inf}}$ 为冷风渗透热损耗，0.278 表示单位转化因子， Num 表示每小时

的换气次数, V_k 表示第 k 个热负荷区域的总室内体积, c_p 表示冷空气的定压比热容, ρ_t^{out} 表示 t 时刻的室外空气密度;

(3) 冷风侵入热损耗

在冬季受风压和热压的作用下, 冷空气又开启的外门入侵室内, 把这部分冷空气加热到室内温度所消耗的热量称为冷风侵入热损耗:

$$Q_{t,k}^{\text{Ven}} = 0.278 \cdot Ven \cdot c_p \rho_t^{\text{out}} (\theta_{t,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{out}}) \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (20)$$

式中, $Q_{t,k}^{\text{Ven}}$ 为冷风侵入热损耗, Ven 表示每小时的冷风侵入量;

(4) 可表征建筑热惯性的平均室内温度的计算

为了简化计算, 做出如下假设: 建筑物内的空气温度是一致的, 且可以用 $\theta_{t,k}^{\text{in}}$ 描述; 建筑物的热质温度分布是均衡的, 这就意味着在热质的表面热扩散过程速度远大于对流换热; 建筑物单位时间内得到的全部热量都可以被 H_t^k 统一表示;

基于以上假设, 平均室内温度的计算可由式 (21) 表示:

$$Q_{t,k}^{\text{BE}} + Q_{t,k}^{\text{Inf}} + Q_{t,k}^{\text{Ven}} + C_M M_k (\theta_{t+1,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{in}}) / \Delta t = H_{t,k} \quad (21)$$

$H_{t,k}$ 为平均室内温度, C_M 表示热质的比热容, M_k 表示在第 k 个热负荷区域内的热质的质量, C_M 与 M_k 的乘积可以通过工程实验获得。

步骤四: 根据热源建立包含常规机组、风电机组、热电联产机组、电锅炉和储热罐在内的联合优化调度模型。建立热网模型和区域热用户模型的最终目的是消纳风电并减小化石燃料的燃烧。所以最终要构建一个包含各种供电供热设备的联合优化调度模型以检验所建热网模型和热用户模型的有效性和实用性。

(1) 热电联产机组模型

$$0 \leq h_{i,t} \leq \bar{h}_i \quad \forall i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}, t \in \Gamma \quad (22)$$

$$\begin{cases} p_{i,t} \leq \bar{p}_i - C_i^1 \cdot h_{i,t} \\ p_{i,t} \geq \max \{ C_i^{\text{max}} \cdot h_{i,t} + C_i, \underline{p}_i - C_i^2 \cdot h_{i,t} \} \end{cases} \quad \forall i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}, t \in \Gamma \quad (23)$$

$p_{i,t}$ 为热电联产机组发电功率, $\bar{p}_i$ 为热电联产机组发电功率上限, $\underline{p}_i$ 热电联产机组发电功率下限, C_i^{max} 、 C_i^1 、 C_i^2 为热电联产机组的热电耦合特性因子, $h_{i,t}$ 表示热电联产机组的供热功率, $\bar{h}_i$ 表示最大供热功率, $\mathbf{I}^{\text{CHP}}$ 表示热电联产机组的编号集合;

(2) 电锅炉模型

$$0 \leq BH_{u,t} \leq \overline{BH}_u \quad \forall u \in \mathbf{U}, t \in \Gamma \quad (24)$$

$$BH_{u,t} = \eta \cdot BP_{u,t} \quad \forall u \in \mathbf{U}, t \in \Gamma \quad (25)$$

$BH_{u,t}$ 表示电锅炉 u 在 t 时刻的供热功率, $BP_{u,t}$ 表示电锅炉的消耗的电功率, η 表示电锅炉的热效率, $\overline{BH}_u$ 表示带锅炉的最大供热功率, $\mathbf{U}$ 表示电锅炉的编号集合, Γ 表示调度时刻集合;

(3) 根据储热罐在一天的充放热总量是相同的建立储热罐模型

$$S_{w,t+1} = S_{w,t} + CS_{w,t} - DCS_{w,t} \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma \quad (26)$$

$$f_{w,t} \in \{0,1\} \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma \quad (27)$$

$$0 \leq S_{w,t} \leq \overline{S}_w \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma \quad (28)$$

$$0 \leq CS_{w,t} \leq f_{w,t} \cdot \overline{CS}_w \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma \quad (29)$$

$$0 \leq DCS_{w,t} \leq (1 - f_{w,t}) \cdot \overline{DCS}_w \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma \quad (30)$$

$$\sum_{w \in \mathbf{W}} \sum_{t \in \Gamma} CS_{w,t} = \sum_{w \in \mathbf{W}} \sum_{t \in \Gamma} DCS_{w,t} \quad (31)$$

$S_{w,t}$ 表示储热罐 w 在 t 时刻的储热量, $CS_{w,t}$ 表示储热罐 w 在 t 时刻的充热功率, $DCS_{w,t}$ 表示储热罐 w 在 t 时刻的放热功率, $f_{w,t}$ 用来表示储热罐的状态, 0 表示储热罐正在放热, 1 表示储热罐正在蓄热, $\overline{S}_w$ 表示储热罐 w 的最大储热能力, $\overline{CS}_w$ 表示储热罐的最大蓄热功率, $\overline{DCS}_w$ 表示储热罐 w 的最大放热功率, $\mathbf{W}$ 表示储热罐编号的集合; 式 (31) 表示储热罐在一天的充放热总量是相同的。

(4) 电功率平衡

$$\sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CG}}} p_{i,t} + \sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}} p_{i,t} + \sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{WP}}} p_{i,t} = \sum_{u \in \mathbf{U}} BP_{u,t} + \sum_{n \in \mathbf{I}^{\text{Load}}} LD_{n,t} \quad \forall t \in \Gamma \quad (32)$$

$\mathbf{I}^{\text{CG}}$ 、 $\mathbf{I}^{\text{WP}}$ 和 $\mathbf{I}^{\text{Load}}$ 分别代表常规机组编号、风电场编号以及电负荷节点的编号, $LD_{n,t}$ 表示接在 n 号母线上的在 t 时刻的负荷功率;

(5) 热功率约束

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} BH_{u,t} + \sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}} h_{i,t} \geq \sum_{k \in \mathbf{K}} Q_{t+k,k}^{\text{Total}} + \sum_{w \in \mathbf{W}} f_{w,t} \cdot CS_{w,t} + (1 - f_{w,t}) \cdot DCS_{w,t} \quad (33)$$

$$Q_{t+k,k}^{\text{Total}} = Q_{t+k,k}^{\text{BE}} + Q_{t+k,k}^{\text{Inf}} + Q_{t+k,k}^{\text{Ven}} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (34)$$

$Q_{t+k,k}^{\text{Total}}$ 为在 k 个供热区域内在 $t+k$ 个时刻的总建筑耗热功率;

(6) 机组爬坡速率约束

$$\begin{aligned} -rdown_i \cdot \Delta t \leq p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq rup_i \cdot \Delta t \\ \forall i \in \mathbf{I}^{CHP} \cup \mathbf{I}^{CG}, t \in \Gamma \end{aligned} \quad (35)$$

rup_i 和 $rdown_i$ 分别表示机组的最大向上爬坡速率和向下爬坡速率, Δt 为调度时间间隔;

(7) 系统旋转储备约束

$$\sum_{i \in \mathbf{I}^{CG}} \min \{ \bar{p}_i - p_{i,t}, \Delta t \cdot rup_i \} \geq SR^{up} \quad \forall t \in \Gamma \quad (36)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}^{CG}} \min \{ p_{i,t} - \underline{p}_i, \Delta t \cdot rdown_i \} \geq SR^{down} \quad \forall t \in \Gamma \quad (37)$$

SR^{up} 和 SR^{down} 分别表示系统所要求的最大向上旋转储备约束和向下旋转储备约束;

(8) 系统潮流约束

$$\left| \sum_{n \in \mathbf{I}^{bus}} SF_{l,n} \cdot \left(\sum_{i \in S_n^{CG} \cup S_n^{CHP}} p_{i,t} + \sum_{i \in S_n^{WP}} p_{i,t} - LD_{n,t} \right) \right| \leq F_l \quad \forall l \in \mathbf{I}^{Line}, t \in \Gamma \quad (38)$$

式中, $SF_{l,n}$ 表示从母线 n 到线路 l 的转移因子, F_l 表示线路 l 的最大传输能力, $\mathbf{I}^{Line}$ 表示线路编号的集合, s_n^{CG} 为常规机组的索引集合, s_n^{CHP} 为热电联产机组的索引集合, s_n^{WP} 为风电机组的索引集合。

建模过程中用到的参数均可以通过现有技术获得。

综上所述, 由多个子模型共同构建出了一个热电联合优化调度模型, 其本质是一个混合整数规划模型。

实施例的供热系统部分采用我国东北地区某市的区域供热系统, 为了使供电和供热机组容量相匹配, 电力系统部分提取该省的部分机组和部分实际运行的电网资料。表格一展示了全部参加调度的设备信息, 包括常规机组 1、常规机组 2、热电联产机组 1、热电联产机组 2 的设备信息。表格二展示了该算例所用到的全部基础参数。程序由 Yalmip 语言在 Matlab R2014b 平台上编写完成, 并使用 Cplex 求解器求解该程序构建的混合整数规划问题。

表 1 参与调度的设备类型及其容量

机组类型	容量	机组类型	容量
常规机组 1	2×350MW	电锅炉	2×140MW
常规机组 2	3×350MW	储热罐	1×1280MW
热电联产机组 1	2×350MW	风电场	700MW
热电联产机组 2	2×250MW		

表 2 参与调度的设备类型及其容量

参数	数值	参数	数值
λ_e	2.4 W/m ² °C	x_k^g	0.02
α_r	15 W/m ² °C	x_k^{ch}	-0.15
d_{in}	2 m	Num	0.1/h
d_{ex}	2.114 m	Ven	15 m ² /h
T_t^{surf}	-3 °C	$C_M \cdot M_k$	1GJ/°C
λ_b	0.023 W/m ² °C	C_p	1KJ/kg °C
β	0.1	η	0.95
R_b	0.384m °C/W	θ_{min}^{in}	20 °C
R_e	0.049 m °C/W	θ_{max}^{in}	24 °C
F_e	0.44 W/m ² °C	θ_{ch}	1 °C

实施例一

实施例一中，暂不考虑系统潮流约束，供热管网压力损失以及储热罐。由于热水的传输时间要远大于电力的传输时间，所以越远的热负荷区域越需要考虑热水的传输延时。在传统的优化调度中，热网延时没有考虑在内，且热源的输出功率时刻很随着热负荷，这会导致热负荷达到峰值的时间段与电负荷相重合，为了保证用户的需求不得已使设备处于过载运行的状态，从而容易导致系统发生故障。在传统的优化调度中，热负荷平衡约束由式（39）-（40）表示。

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} BH_{u,t} + \sum_{i \in \mathbf{I}^{CHP}} h_{i,t} = \sum_{k \in \mathbf{K}} Q_{i,k}^{Total} \quad \forall t \in \Gamma \quad (39)$$

$$Q_{i,k}^{Total} = Q_{i,k}^{BE} + Q_{i,k}^{Inf} + Q_{i,k}^{Ven} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K} \quad (40)$$

在这个实施例中，热负荷区域被分成四个部分，附图 2 分别展示了使用传统模型和本发明提出的模型后，平均室内温度的变化情况，图中两条水平的虚线分别表示的是温度上限与温度下限。由图可知，离热源越远的热负荷区域，平均室内温度的波动幅度越大。甚至在最远的区域，平均室内温度的最大值超过了最高允许温度。这会导致部分热用户因室内温度过高而打开窗户通风，这会导致一部分的资源浪费。实际情况中，离热源较远的热用户的室内温度会比较低，因此供热公司也经常被投诉。幸运的是，由于建筑物的热惯性，热用户的室内温度在大部分时间波动在可接受的范围内。

附图 3 展示了使用传统优化调度模型和本发明提出的优化模型的优化结果，

图 3 (a) 中的斜线填充部分表示热源热出力调整, 图 3 (b) 中的斜线填充部分表示多消纳的风电, 图 3 (c) 中的斜线填充部分表示供热机组电出力调整, 图 3 (d) 中的斜线填充部分表示电力系统旋转储备容量。在这两种方法中, 电锅炉一直都以最大功率工作。优化结果显示, 传统的优化调度模型的发电成本是\$149 120, 本发明提出的优化调度结果是\$142 470。本发明提出的优化模型一天内可多消纳 270MWh 的风电, 这是由于错峰调节使热电联产机组更灵活的运行。在本发明提出的模型中, 热源不再紧急跟随热负荷的波动, 而是充分利用是室内温度的变化范围。这个变化可以降低热电联产机组的热出力并降低热电联产机组的电出力, 从而腾出更多的空间消纳风电。

实施例二

实施例二将一座即将在 2017 年底完成的大型储热罐考虑在了本发明提出的优化调度模型中。通过实施例分析展示了储热罐的相关参数对风电消纳的影响。附图 4 展示了三种平均温度不同环境室内温度变化曲线和风电预测曲线。

附图 5 展示了储热罐初始储热量以及充/放热功率对风电消纳的影响。从附图 5 (a) 可知, 储热罐的初始储热量可以提高风电消纳率。当初始容量小于 300MWh 且环境温度跟随 T3 时优化模型无可行解, 这是因为热源无法向热用户提供最基本的供热量。此外, 当初始容量增加到 1100MWh 以上时, 风电的消纳量不再进一步增加。这是因为热储备容量已经足以应付一天内的热需求波动, 更大的容量只会造成初始投资成本的增加, 对风电消纳不再会有促进作用。

一般来讲, 较大的充/放热功率有利于减小弃风量。然而, 在这个实施例中当充热功率大于 100MW 且放热功率大于 450MW 时, 进一步提高充/放热功率对风电的消纳起不到支持作用。这是因为即使供热系统方面为风电的消纳提供了充足的空间, 但是由于系统必须要有一定的旋转储备容量, 常规机组无法进一步压低其电出力, 所以无法进一步消纳风电。该实施例显示出了虽然进行热电联合优化调度这种耦合关系依然不可能被完全解耦, 但是储热罐可以极大的松弛供热与供电的耦合关系。

权利要求书

1、一种热电联合优化调度模型的建模方法，其特征在于，所述热电联合优化调度模型是一个混合整数规划模型，用于区域供热系统，所述区域供热系统包括热源、热网和热负荷，所述热网包括输热网和配热网，建模方法包括以下步骤：

步骤一：根据热负荷与热源的距离划分出多个供热区，并将一天划分为多个时段；

步骤二：省略配热网的热传输损耗，根据输热网建立考虑热网传输延时的输热网模型；

步骤三：根据热负荷建立能够反映室内温度的终端热用户模型；

步骤四：根据热源建立包含常规机组、风电机组、热电联产机组、电锅炉和储热罐在内的联合优化调度模型。

2、根据权利要求1所述的热电联合优化调度模型的建模方法，其特征在于，所述步骤一中建立输热网模型的方法为：分别计算各供热区各时段内的热量损耗，建立输热网的汇流节点模型，描述整个输热网的稳态热力传输模型。

3、根据权利要求2所述的热电联合优化调度模型的建模方法，其特征在于，所述步骤一中建立输热网模型的方法为：

根据水流速度和调度时间间隔计算单位管道长度：

$$L = v \cdot \Delta t$$

式中，L 为单位管道长度，v 为水流速度， Δt 为调度时间间隔；

(1) 根据热传递的基本原理，计算土壤的热阻以及单位管道长度内的热水的温度损耗：

$$R_e = \frac{1}{2\pi\lambda_e} \ln \left(\frac{2(h + \lambda_e / \alpha_r)}{d_{ex}} + \sqrt{\left(\frac{2(h + \lambda_e / \alpha_r)}{d_{ex}} \right)^2 - 1} \right) \quad t \in \Gamma$$

$$\Delta T_t^{S,k} = \frac{(1 + \beta)L}{c_{water} MS_t^k} \cdot \frac{(T_t^{S,k} - T_t^{surf}) \cdot 2\pi\lambda_b}{\ln(d_{ex} / d_{in}) + 2\pi\lambda_b R_e} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

$$\Delta T_t^{R,k} = \frac{(1 + \beta)L}{c_{water} MR_t^k} \cdot \frac{(T_t^{R,k} - T_t^{surf}) \cdot 2\pi\lambda_b}{\ln(d_{ex} / d_{in}) + 2\pi\lambda_b R_e} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

式中， R_e 为土壤的热阻， $\Delta T_t^{S,k}$ 表示在第 k 个供热区第 t 个时段内的供水网络的温度损耗， $\Delta T_t^{R,k}$ 表示在第 k 个供热区第 t 个时段内的回水网络的温度损耗， h 代表供热管道的中心到土壤表面的距离， λ_e 为土壤热导系数， α_r 为土壤表面的热量传输系数， d_{in} 和 d_{ex} 分别表示管道的内径和外径， β 代表由附件造成的热损耗的附加因子， λ_b 代表管道表面绝热材料的热导， c_{water} 代表水的比热容， T_t^{surf} 表

示 t 时刻的土壤表面温度, MS_t^k 和 MR_t^k 分别代表在第 k 个供热区中 t 时刻的供水管道与回水管道中的热水质流量, $T_t^{S,k}$ 和 $T_t^{R,k}$ 分别代表在 $\mathbf{K}$ 区域 t 时刻的供水管道与回水管网的水温, Γ 表示调度时刻集合, $\mathbf{K}$ 代表热负荷供热区集合;

(2) 考虑延时的节点质流量连续性约束:

$$\begin{cases} MS_t^k = m_{t+1}^k + MS_{t+1}^{k+1} \\ MS_t^{k.end} = m_t^{k.end} \end{cases} \quad \forall k, k+1 \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

$$\begin{cases} MR_t^k = m_t^k + MR_{t-1}^{k+1} \\ MR_t^{k.end} = m_t^{k.end} \end{cases} \quad \forall k, k+1 \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

式中, $k.end$ 代表最后一个供热区, m_t^k 表示流过第 k 个换热站的热水质流量;

(3) 汇流节点处的水温:

$$MR_{t+1}^k \cdot T_{t+1}^{R,k} = m_t^k \tau_{t+1}^{R,k} + MR_t^{k+1} (T_t^{R,k+1} - \Delta T_t^{R,k+1}) \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

$\tau_t^{S,k}$ 和 $\tau_t^{R,k}$ 分别表示在 t 时刻在第 k 个换热站的供水温度和回水温度;

(4) 相邻供热区管内热水温度损耗:

$$\begin{cases} T_{t+1}^{S,1} = T_t^S - \Delta T_t^{S,1} \\ T_{t+1}^{S,k+1} = T_t^{S,k} - \Delta T_t^{S,k} \\ T_{t+1}^R = T_t^{R,k} - \Delta T_t^{R,k} \\ T_t^{S,k} = \tau_t^{S,k} \end{cases} \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

(5) 管道流量限制:

$$0 \leq m_t^k \leq \bar{m}^k \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

$$0 \leq MS_t^k \leq \overline{MS}^k \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

$$0 \leq MR_t^k \leq \overline{MR}^k \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

式中, $\bar{m}^k$ 表示流经第 k 个换热站的最大质流量, $\overline{MS}^k$ 和 $\overline{MR}^k$ 分别表示第 k 个供水管道和回水管道的最大质流量;

(6) 压力损失:

$$PS_t^k - PS_t^{k+1} = \frac{\mu \cdot f_k \cdot (MS_t^k)^2}{(d_m^k)^5 (\rho_t^k)^2} \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

$$PR_t^{k+1} - PR_t^k = \frac{\mu \cdot f_k \cdot (MR_t^k)^2}{(d_{in}^k)^5 (\rho_t^k)^2} \quad \forall k \in \mathbf{K}, t \in \Gamma$$

PS_t^k 和 PR_t^k 分别表示在第 k 个区域 t 时刻供水管道和回水管道压力, μ 表示管道压力系数, f_k 表示在第 k 个供热区的摩擦系数, d_{in}^k 表示第 k 个供热区域的管道内径, ρ_t^k 是第 k 个供热区域在时刻 t 的热水密度;

(7) 换热站热交换功率:

$$c_{water} \cdot m_t^k \cdot (\tau_t^{S,k} - \tau_t^{R,k}) = H_{t,k} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

$$\underline{\tau}^{R,k} \leq \tau_t^{R,k} \leq \bar{\tau}^{R,k} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

式中, $H_{t,k}$ 为换热站热交换功率, $\underline{\tau}^{R,k}$ 为第 k 个换热站的回水温度下限, $\bar{\tau}^{R,k}$ 为第 k 个换热站的回水温度上限。

4、根据权利要求 1 至 3 任一所述的热电联合优化调度模型的建模方法, 其特征在于, 所述步骤三中建立终端热用户模型的方法为: 省略配热网的热传输损耗, 换热站从所述输热网吸收的热量, 就是传输给用户侧的热量, 根据热力工程分别计算供暖区中的房屋的围护结构热损耗、冷风侵入热损耗和冷风渗透热损耗, 得到一片供暖区内的平均室内温度, 从而衡量用户的热舒适度。

5、根据权利要求 4 所述的热电联合优化调度模型的建模方法, 其特征在于, 供暖区内的平均室内温度为:

(1) 围护机构热损耗

由于真正热传递过程十分复杂, 包括对流、传导和辐射, 为了简化热传递过程, 在这里只采用稳态环境下的热损耗计算公式求解建筑物的围护结构热损耗:

$$Q_{t,k}^{BE} = A_k F_{e,k} (\theta_{t,k}^{in} - \theta_{t,k}^{out}) (1 + x_k^g) (1 + x_k^{ch}) \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

$$\theta_{min}^{in} \leq \theta_{t,k}^{in} \leq \theta_{max}^{in}$$

$$-\theta_{ch} \leq \theta_{t+1,k}^{in} - \theta_{t,k}^{in} \leq \theta_{ch}$$

式中, $Q_{t,k}^{BE}$ 为建筑物的围护结构热损耗, x_k^g 和 x_k^{ch} 分别是在第 k 个热负荷区的房屋高度修正系数和房屋朝向修正系数, A_k 代表第 k 个热负荷区的建筑物围护结构面积, $F_{e,k}$ 表示第 k 个热负荷区域的房屋围护结构的热传递系数, $\theta_{t,k}^{in}$ 表示 t 时刻在第 k 个热负荷区域的平均室内温度, $\theta_{t,k}^{out}$ 表示表示 t 时刻在第 k 个热负荷区域的室外温度, θ_{min}^{in} 和 θ_{max}^{in} 分别表示最低平均室内温度和最高平均室内温度,

θ_{ch} 表示单位调度时间内的平均室内温度最大变化率, Γ 表示调度时刻集合, $\mathbf{K}$ 代表热负荷供热区集合;

(2) 冷风渗透热损耗

在风力和热压造成的室内外压差作用下, 室外的冷风空气通过门、窗等缝隙渗入室内, 被加热后逸出, 把这部分冷空气从室外温度加热到室内温度所消耗的热量, 成为冷风渗透热损耗:

$$Q_{t,k}^{\text{Inf}} = 0.278 \text{Num} \cdot V_k c_p \rho_t^{\text{out}} (\theta_{t,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{out}}) \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

式中, $Q_{t,k}^{\text{Inf}}$ 为冷风渗透热损耗, 0.278表示单位转化因子, Num 表示每小时的换气次数, V_k 表示第 k 个热负荷区域的总室内体积, c_p 表示冷空气的定压比热容, ρ_t^{out} 表示 t 时刻的室外空气密度;

(3) 冷风侵入热损耗

在冬季受风压和热压的作用下, 冷空气又开启的外门入侵室内, 把这部分冷空气加热到室内温度所消耗的热量称为冷风侵入热损耗:

$$Q_{t,k}^{\text{Ven}} = 0.278 \cdot \text{Ven} \cdot c_p \rho_t^{\text{out}} (\theta_{t,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{out}}) \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

式中, $Q_{t,k}^{\text{Ven}}$ 为冷风侵入热损耗, Ven 表示每小时的冷风侵入量;

(4) 可表征建筑热惯性的平均室内温度的计算

为了简化计算, 做出如下假设: 建筑物内的空气温度是一致的, 且可以用 $\theta_{t,k}^{\text{in}}$ 描述; 建筑物的热质温度分布是均衡的, 这就意味着在热质的表面热扩散过程速度远大于对流换热; 建筑物单位时间内得到的全部热量都可以被 H_t^k 统一表示;

基于以上假设, 平均室内温度为:

$$Q_{t,k}^{\text{BE}} + Q_{t,k}^{\text{Inf}} + Q_{t,k}^{\text{Ven}} + C_M M_k (\theta_{t+1,k}^{\text{in}} - \theta_{t,k}^{\text{in}}) / \Delta t = H_{t,k}$$

$H_{t,k}$ 为平均室内温度, C_M 表示热质的比热容, M_k 表示在第 k 个热负荷区域内的热质的质量, C_M 与 M_k 的乘积可以通过工程实验获得。

6、根据权利要求 1 至 3 任一所述的热电联合优化调度模型的建模方法, 其特征在于, 所述步骤四中建立联合优化调度模型的方法为:

(1) 热电联产机组模型

$$0 \leq h_{i,t} \leq \bar{h}_i \quad \forall i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}, t \in \Gamma$$

$$\begin{cases} p_{i,t} \leq \bar{p}_i - C_i^1 \cdot h_{i,t} \\ p_{i,t} \geq \max \{ C_i^{\max} \cdot h_{i,t} + C_i, \underline{p}_i - C_i^2 \cdot h_{i,t} \} \end{cases} \quad \forall i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}, t \in \Gamma$$

$p_{i,t}$ 为热电联产机组发电功率, $\bar{p}_i$ 为热电联产机组发电功率上限, $\underline{p}_i$ 热电联产机组发电功率下限, $C_i^{\max}$ 、 C_i^1 、 C_i^2 为热电联产机组的热电耦合特性因子, $h_{i,t}$ 表示热电联产机组的供热功率, $\bar{h}_i$ 表示最大供热功率, $\mathbf{I}^{\text{CHP}}$ 表示热电联产机组的编号集合;

(2) 电锅炉模型

$$0 \leq BH_{u,t} \leq \overline{BH}_u \quad \forall u \in \mathbf{U}, t \in \Gamma$$

$$BH_{u,t} = \eta \cdot BP_{u,t} \quad \forall u \in \mathbf{U}, t \in \Gamma$$

$BH_{u,t}$ 表示电锅炉 u 在 t 时刻的供热功率, $BP_{u,t}$ 表示电锅炉的消耗的电功率, η 表示电锅炉的热效率, $\overline{BH}_u$ 表示带锅炉的最大供热功率, $\mathbf{U}$ 表示电锅炉的编号集合, Γ 表示调度时刻集合;

(3) 根据储热罐在一天的充放热总量是相同的建立储热罐模型

$$S_{w,t+1} = S_{w,t} + CS_{w,t} - DCS_{w,t} \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma$$

$$f_{w,t} \in \{0, 1\} \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma$$

$$0 \leq S_{w,t} \leq \bar{S}_w \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma$$

$$0 \leq CS_{w,t} \leq f_{w,t} \cdot \overline{CS}_w \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma$$

$$0 \leq DCS_{w,t} \leq (1 - f_{w,t}) \cdot \overline{DCS}_w \quad \forall w \in \mathbf{W}, t \in \Gamma$$

$$\sum_{w \in \mathbf{W}} \sum_{t \in \Gamma} CS_{w,t} = \sum_{w \in \mathbf{W}} \sum_{t \in \Gamma} DCS_{w,t}$$

$S_{w,t}$ 表示储热罐 w 在 t 时刻的储热量, $CS_{w,t}$ 表示储热罐 w 在 t 时刻的充热功率, $DCS_{w,t}$ 表示储热罐 w 在 t 时刻的放热功率, $f_{w,t}$ 用来表示储热罐的状态, 0表示储热罐正在放热, 1表示储热罐正在蓄热, $\bar{S}_w$ 表示储热罐 w 的最大储热能力, $\overline{CS}_w$ 表示储热罐的最大蓄热功率, $\overline{DCS}_w$ 表示储热罐 w 的最大放热功率, $\mathbf{W}$ 表示储热罐编号的集合;

(4) 电功率平衡

$$\sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CG}}} p_{i,t} + \sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}} p_{i,t} + \sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{WP}}} p_{i,t} = \sum_{u \in \mathbf{U}} BP_{u,t} + \sum_{n \in \mathbf{I}^{\text{Load}}} LD_{n,t} \quad \forall t \in \Gamma$$

$\mathbf{I}^{\text{CG}}$ 、 $\mathbf{I}^{\text{WP}}$ 和 $\mathbf{I}^{\text{Load}}$ 分别代表常规机组编号、风电场编号以及电负荷节点的编号,

$LD_{n,t}$ 表示接在 n 号母线上的在 t 时刻的负荷功率;

(5) 热功率约束

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} BH_{u,t} + \sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}}} h_{i,t} \geq \sum_{k \in \mathbf{K}} Q_{t+k,k}^{\text{Total}} + \sum_{w \in \mathbf{W}} f_{w,t} \cdot CS_{w,t} + (1 - f_{w,t}) \cdot DCS_{w,t}$$

$$Q_{t+k,k}^{\text{Total}} = Q_{t+k,k}^{\text{BE}} + Q_{t+k,k}^{\text{Inf}} + Q_{t+k,k}^{\text{Ven}} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \mathbf{K}$$

$Q_{t+k,k}^{\text{Total}}$ 为在 k 个供热区域内在 $t+k$ 个时刻的总建筑耗热功率;

(6) 机组爬坡速率约束

$$-rdown_i \cdot \Delta t \leq p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq rup_i \cdot \Delta t$$

$$\forall i \in \mathbf{I}^{\text{CHP}} \cup \mathbf{I}^{\text{CG}}, t \in \Gamma$$

rup_i 和 $rdown_i$ 分别表示机组的最大向上爬坡速率和向下爬坡速率, Δt 为调度时间间隔;

(7) 系统旋转储备约束

$$\sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CG}}} \min\{\bar{p}_i - p_{i,t}, \Delta t \cdot rup_i\} \geq SR^{\text{up}} \quad \forall t \in \Gamma$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}^{\text{CG}}} \min\{p_{i,t} - \underline{p}_i, \Delta t \cdot rdown_i\} \geq SR^{\text{down}} \quad \forall t \in \Gamma$$

SR^{up} 和 SR^{down} 分别表示系统所要求的最大向上旋转储备约束和向下旋转储备约束;

(8) 系统潮流约束

$$\left| \sum_{n \in \mathbf{I}^{\text{bus}}} SF_{l,n} \cdot \left(\sum_{i \in S_n^{\text{CG}} \cup S_n^{\text{CHP}}} p_{i,t} + \sum_{i \in S_n^{\text{WP}}} p_{i,t} - LD_{n,t} \right) \right| \leq F_l \quad \forall l \in \mathbf{I}^{\text{Line}}, t \in \Gamma$$

式中, $SF_{l,n}$ 表示从母线 n 到线路 l 的转移因子, F_l 表示线路 l 的最大传输能力, $\mathbf{I}^{\text{Line}}$ 表示线路编号的集合, S_n^{CG} 为常规机组的索引集合, S_n^{CHP} 为热电联产机组的索引集合, S_n^{WP} 为风电机组的索引集合。

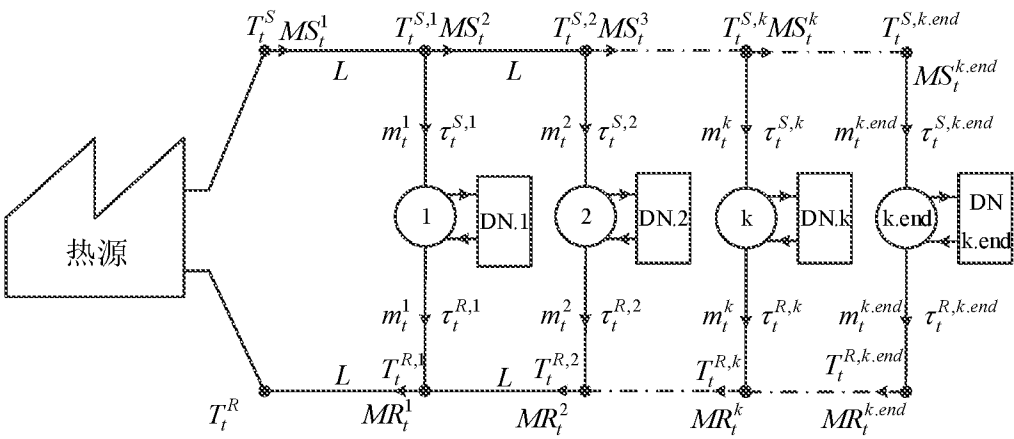


图 1

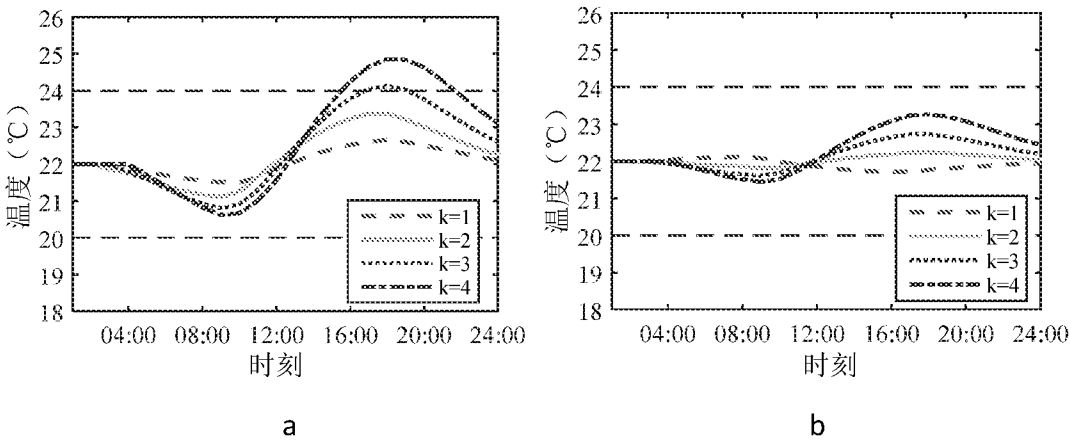


图 2

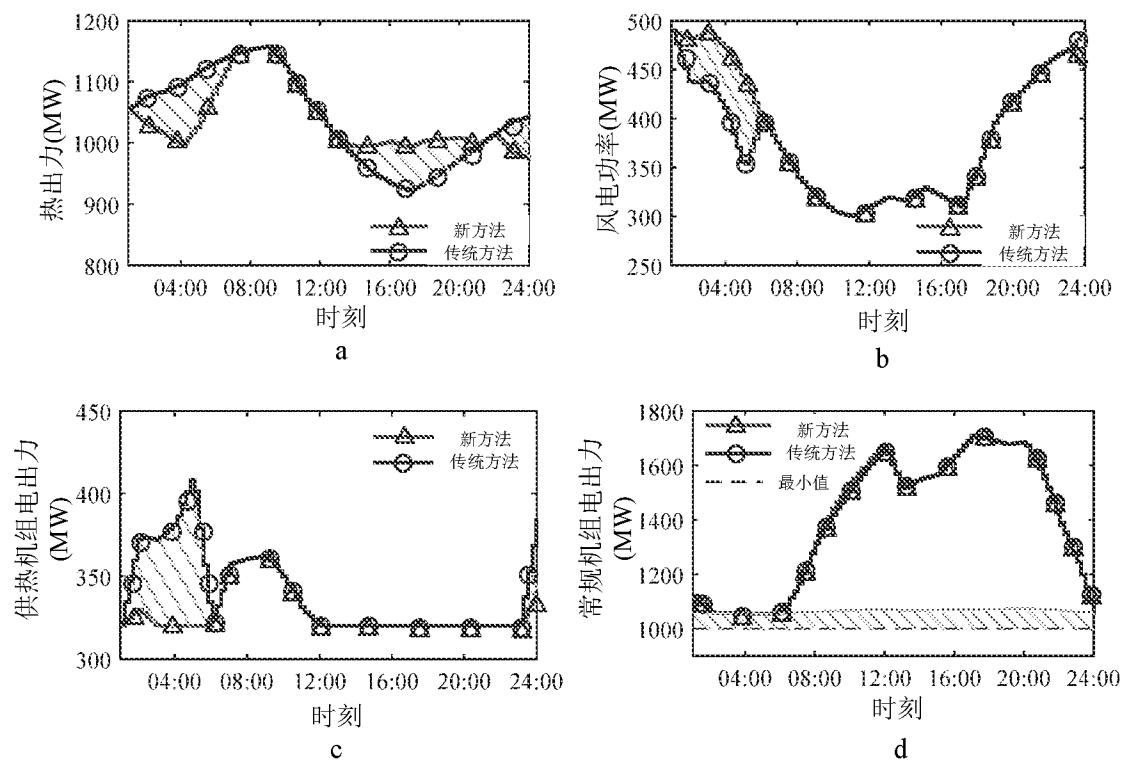


图 3

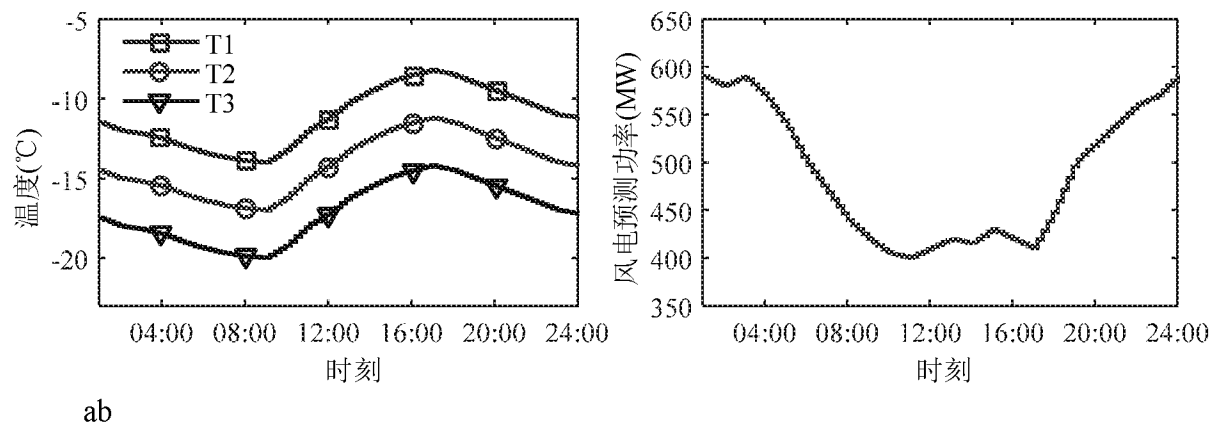
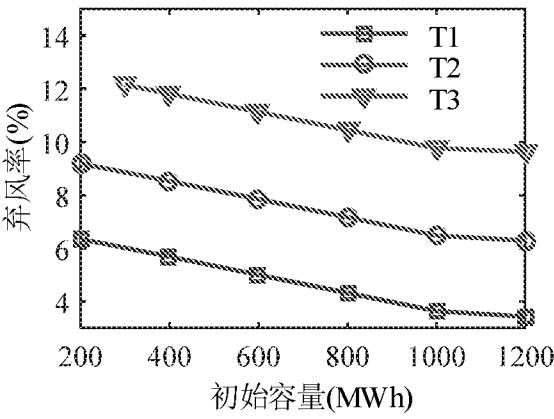
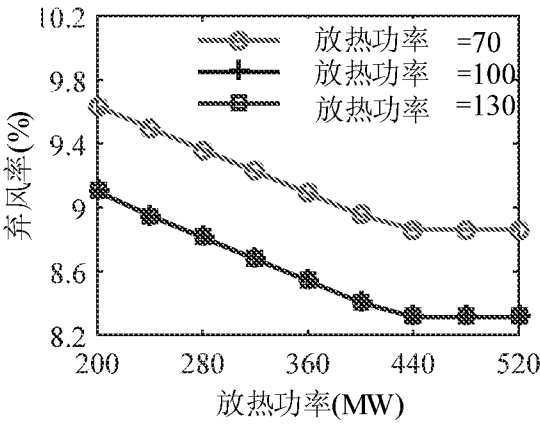


图 4



a



b

图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/074413

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/46 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, DWPI, CNABS: 热电, 优化, 调度, 建模, 模型, 供热, 负荷, 热源, heat, power, optimization, dispatch, model, source, load, supply

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 105807633 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY), 27 July 2016 (27.07.2016), description, paragraphs 39-82, and figures 1-4	1-2, 4
PX	CN 106998079 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 01 August 2017 (01.08.2017), claims 1-6	1-6
A	CN 104734168 A (SHANDONG UNIVERSITY), 24 June 2015 (24.06.2015), entire document	1-6
A	CN 106447113 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 22 February 2017 (22.02.2017), entire document	1-6
A	US 8396572 B2 (SIEMENS CORP.), 12 March 2013 (12.03.2013), entire document	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 15 March 2018	Date of mailing of the international search report 23 March 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer PAN, Li Telephone No. (86-10) 62411325

International application No.
PCT/CN2018/074413

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/074413

A. 主题的分类

H02J 3/46(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H02J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNKI, DWPI, CNABS: 热电, 优化, 调度, 建模, 模型, 供热, 负荷, 热源, heat, power, optimization, dispatch, model, source, load, supply

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	CN 105807633 A (大连理工大学) 2016年 7月 27日 (2016 - 07 - 27) 说明书第39-82段, 附图1-4	1-2, 4
PX	CN 106998079 A (东南大学) 2017年 8月 1日 (2017 - 08 - 01) 权利要求1-6	1-6
A	CN 104734168 A (山东大学) 2015年 6月 24日 (2015 - 06 - 24) 全文	1-6
A	CN 106447113 A (东南大学) 2017年 2月 22日 (2017 - 02 - 22) 全文	1-6
A	US 8396572 B2 (SIEMENS CORP) 2013年 3月 12日 (2013 - 03 - 12) 全文	1-6

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 3月 15日

国际检索报告邮寄日期

2018年 3月 23日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

潘莉

电话号码 (86-10)62411325

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/074413

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	105807633	A	2016年 7月 27日	无			
CN	106998079	A	2017年 8月 1日	无			
CN	104734168	A	2015年 6月 24日	CN	104734168	B	2017年 1月 25日
CN	106447113	A	2017年 2月 22日	无			
US	8396572	B2	2013年 3月 12日	US	2011066258	A1	2011年 3月 17日