(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111324849 A
(43)申请公布日 2020.06.23

(21)申请号 202010099334.4

(22)申请日 2020.02.18

(71)申请人 南通大学
地址 226019 江苏省南通市崇川区啬园路9号

(72)发明人 张新松 曹书秀 顾菊平 徐杨杨 陆胜男 郭晓丽 李智

(74)专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200
代理人 朱小兵

(51)Int.Cl.
G06F 17/10(2006.01)
G06Q 10/04(2012.01)
G06Q 50/06(2012.01)

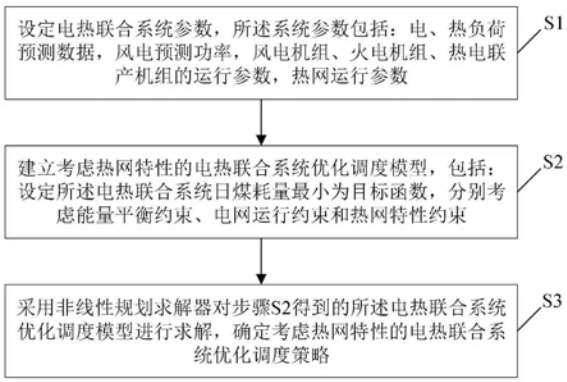
权利要求书4页 说明书8页 附图1页

(54)发明名称

一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法

(57)摘要

本发明公开了一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，包括以下步骤：S1：设定电热联合系统参数；S2：设定电热联合系统日煤耗量最小为目标函数，考虑能量平衡约束、电网运行约束和热网特性约束，建立考虑热网特性的电热联合系统优化调度模型；S3：采用非线性规划求解器对电热联合系统优化调度模型进行求解，确定考虑热网特性的电热联合系统优化调度策略。由于考虑了热网特性，本发明提出的电热联合系统优化调度方法可充分发掘热网储热能力，优化系统运行工况，增加热电联产机组灵活调度空间，促进风电消纳，并提高系统运行的经济性。



CN 111324849 A

1.一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，其特征在于，包括以下步骤：

S1：设定电热联合系统参数，所述系统参数包括：电、热负荷预测数据，风电预测功率，风电机组、火电机组、热电联产机组的运行参数，热网运行参数；

S2：建立考虑热网特性的电热联合系统优化调度模型，包括：设定所述电热联合系统日煤耗量最小为目标函数，分别考虑能量平衡约束、电网运行约束和热网特性约束；

S3：采用非线性规划求解器对步骤S2得到的所述电热联合系统优化调度模型进行求解，确定考虑热网特性的电热联合系统优化调度策略。

2.根据权利要求1所述的考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，其特征在于，步骤S2中所述目标函数采用公式(1)表示：

$C=\min(C_H+C_R)$　(1)

公式(1)中，C为系统日煤耗量；C_H为火电机组日煤耗量；C_R为热电联产机组日煤耗量；

其中，火电机组日煤耗量C_H采用公式(2)表示：

$$C_H=\sum_{t\in\Gamma}\sum_{v\in\Omega_H}a_{2,v}P_{v,t}^2+a_{1,v}P_{v,t}+a_{0,v} \qquad (2)$$

公式(2)中，$a_{2,v}$、$a_{1,v}$、$a_{0,v}$为火电机组v煤耗量系数；$P_{v,t}$为第t个调度时段内火电机组v的发电功率；v为火电机组索引；t为调度时刻索引；Ω_H为火电机组集合；Γ为调度时段集合；

其中，热电联产机组日煤耗量C_R采用公式(3)表示：

$$C_R=\sum_{t\in\Gamma}\sum_{k\in\Omega_R}b_{5,k}P_{R,k,t}^2+b_{4,k}Q_{R,k,t}^2+b_{3,k}P_{R,k,t}+b_{2,k}Q_{R,k,t}+b_{1,k}P_{R,k,t}Q_{R,k,t}+b_{0,k} \qquad (3)$$

公式(3)中，$b_{5,k}$、$b_{4,k}$、$b_{3,k}$、$b_{2,k}$、$b_{1,k}$、$b_{0,k}$为热电联产机组k煤耗量系数；$P_{R,k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k的发电功率；$Q_{R,k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k的产热功率；k为热电联产机组索引；Ω_R为热电联产机组集合。

3.根据权利要求1所述的考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，其特征在于，步骤S2中所述能量平衡约束采用公式(4)表示：

$$\sum_{o\in\Omega_W}P_{W,o,t}+\sum_{k\in\Omega_R}P_{R,k,t}+\sum_{v\in\Omega_H}P_{v,t}=\sum_{m\in\Omega_B}D_{m,t},\quad\forall t\in\Gamma \qquad (4)$$

公式(4)中，$P_{W,o,t}$为第t个调度时段内风电场o的发电功率；$D_{m,t}$为第t个调度时段内电网节点m的用电负荷；o为风电场索引；m为电网节点索引；Ω_W为风电场集合；Ω_B为电网节点集合。

4.根据权利要求1所述的考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，其特征在于，步骤S2中所述电网运行约束包括运行安全约束、机组爬坡约束、旋转备用约束、电网潮流约束；

其中，所述运行安全约束采用公式(5)表示：

$$\begin{cases}P_v^{\min}\le P_{v,t}\le P_v^{\max}\\ P_{R,k}^{\min}\le P_{R,k,t}\le P_{R,k}^{\max}\\ Q_{R,k}^{\min}\le Q_{R,k,t}\le Q_{R,k}^{\max}\\ 0\le P_{W,o,t}\le P_{W,o,t}^{\max}\end{cases}\quad\forall v\in\Omega_H,\ \forall k\in\Omega_R,\ \forall o\in\Omega_W,\ \forall t\in\Gamma \qquad (5)$$

公式(5)中，$P_v^{\max}$、$P_v^{\min}$分别为火电机组v发电功率的最大值、最小值；$P_{\mathrm{R},k}^{\max}$、$P_{\mathrm{R},k}^{\min}$为热电联产机组k发电功率的最大值、最小值；$Q_{\mathrm{R},k}^{\max}$、$Q_{\mathrm{R},k}^{\min}$为热电联产机组k产热功率的最大值、最小值；$P_{\mathrm{W},o,t}^{\max}$为第t个调度时段内风电场o发电功率的最大值；

所述机组爬坡约束采用公式(6)表示：

$$\begin{cases} -P_v^{\mathrm{down}}\Delta t \le P_{v,t}-P_{v,t-1} \le P_v^{\mathrm{up}}\Delta t \\ -P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{down}}\Delta t \le P_{\mathrm{R},k,t}-P_{\mathrm{R},k,t-1} \le P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{up}}\Delta t \end{cases} \quad \forall v\in\Omega_{\mathrm{H}},\ \forall k\in\Omega_{\mathrm{R}},\ \forall t\in\Gamma \tag{6}$$

公式(6)中，P_v^{up}、P_v^{down}分别为火电机组v发电功率向上、向下爬坡速率；$P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{up}}$、$P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{down}}$分别为热电联产机组k发电功率向上、向下爬坡速率；Δt为调度时段间隔；

所述旋转备用约束采用公式(7)表示：

$$\begin{cases} 0 \le r_{v,t}^{\mathrm{up}} \le P_v^{\mathrm{up}}\Delta t \\ r_{v,t}^{\mathrm{up}} \le P_v^{\max}-P_{v,t} \\ 0 \le r_{v,t}^{\mathrm{down}} \le P_v^{\mathrm{down}}\Delta t \\ r_{v,t}^{\mathrm{down}} \le P_{v,t}-P_v^{\min} \\ \sum_{v\in\Omega_{\mathrm{H}}} r_{v,t}^{\mathrm{up}} \ge E_{\mathrm{up}} \\ \sum_{v\in\Omega_{\mathrm{H}}} r_{v,t}^{\mathrm{down}} \ge E_{\mathrm{down}} \end{cases} \quad \forall v\in\Omega_{\mathrm{H}},\ \forall t\in\Gamma \tag{7}$$

公式(7)中，$r_{v,t}^{\mathrm{down}}$、$r_{v,t}^{\mathrm{up}}$分别为第t个调度时段内火电机组v可提供的向下、向上旋转备用容量；E_{down}、E_{up}分别为系统向下、向上旋转备用需求；

所述电网潮流约束采用公式(8)表示：

$$\left|\sum_{m\in\Omega_{\mathrm{B}}} SF_{l,m}\left(\sum_{v\in\Omega_{\mathrm{H}}} P_{v,t}+\sum_{k\in\Omega_{\mathrm{R}}} P_{\mathrm{R},k,t}+\sum_{o\in\Omega_{\mathrm{W}}} P_{\mathrm{W},o,t}-D_{m,t}\right)\right| \le F_l,\quad \forall l\in\Omega_{\mathrm{L}},\ \forall t\in\Gamma \tag{8}$$

公式(8)中，$SF_{l,m}$为电网线路l对节点m输入电功率的偏移因子；F_l为电网线路l的输电容量；l为电网线路索引；Ω_{L}为电网线路集合。

5.根据权利要求1所述的考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，其特征在于，步骤S2中所述热网特性约束包括热电联产机组电热特性约束、温度混合约束、流量连续性约束、管道热延迟约束和温降约束；

其中，所述热电联产机组电热特性约束采用公式(9)表示：

$$\begin{cases} C_{\mathrm{A},k}Q_{\mathrm{R},k,t}+E_k \le P_{\mathrm{R},k,t} \le P_{\mathrm{R},k}^{\max}-C_{\mathrm{B},k}Q_{\mathrm{R},k,t} \\ Q_{\mathrm{R},k,t}=C_{\mathrm{p}}m_{k,t}(T_{\mathrm{yg},k,t}-T_{\mathrm{yh},k,t}) \\ T_{\mathrm{yg}}^{\min} \le T_{\mathrm{yg},k,t} \le T_{\mathrm{yg}}^{\max} \\ T_{\mathrm{yh}}^{\min} \le T_{\mathrm{yh},k,t} \le T_{\mathrm{yh}}^{\max} \end{cases} \quad \forall k\in\Omega_{\mathrm{R}},\ \forall t\in\Gamma \tag{9}$$

公式(9)中，$C_{\mathrm{A},k}$、$C_{\mathrm{B},k}$分别为背压、进气工况下热电联产机组k的热电比；$m_{k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k所在供热管道的热水流量；$T_{\mathrm{yg},k,t}$、$T_{\mathrm{yh},k,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中热电联产机组k所在供热管道的热水温度；$T_{\mathrm{yg}}^{\max}$、$T_{\mathrm{yg}}^{\min}$分别为供水网络中

热电联产机组所在供热管道的热水温度最大值、最小值；T_{yh}^{max}、T_{yh}^{min}分别为回水网络中热电联产机组所在供热管道的热水温度最大值、最小值；C_p为热水的比热容；E_k为常数；

所述温度混合约束采用公式(10)和(11)表示：

$$\begin{cases}\sum_{i\in\Omega_{s,j}}(T_{wh,i,t}^{out}m_{wh,i,t})=T_{jh,j,t}\sum_{i\in\Omega_{s,j}}m_{wh,i,t}\\ T_{wg,i,t}^{in}=T_{jg,j,t}\end{cases}\quad\forall i\in\Omega_{s,j},\ \forall j\in\Omega_n,\ \forall t\in\Gamma \tag{10}$$

$$\begin{cases}\sum_{i\in\Omega_{e,j}}(T_{wg,i,t}^{out}m_{wg,i,t})=T_{jg,j,t}\sum_{i\in\Omega_{e,j}}m_{wg,i,t}\\ T_{wh,i,t}^{in}=T_{jh,j,t}\end{cases}\quad\forall i\in\Omega_{e,j},\ \forall j\in\Omega_n,\ \forall t\in\Gamma \tag{11}$$

公式(10)、(11)中，$T_{wg,i,t}^{in}$、$T_{wh,i,t}^{in}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的首端温度；$T_{wg,i,t}^{out}$、$T_{wh,i,t}^{out}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的末端温度；$T_{jg,j,t}$、$T_{jh,j,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中热网节点j的热水温度；$m_{wg,i,t}$、$m_{wh,i,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的热水流量；i为供热管道索引；j为热网节点索引；$\Omega_{s,j}$、$\Omega_{e,j}$分别为以热网节点j为首端、末端的管道集合；Ω_{node}为热网节点集合；

所述流量连续性约束采用公式(12)和(13)表示：

$$\begin{cases}\sum_{i\in\Omega_{s,j}}m_{wg,i,t}=\sum_{i\in\Omega_{e,j}}m_{wg,i,t}\\ \sum_{i\in\Omega_{s,j}}m_{wh,i,t}=\sum_{i\in\Omega_{e,j}}m_{wh,i,t}\end{cases}\quad\forall j\in\Omega_n,\ \forall t\in\Gamma \tag{12}$$

$$\begin{cases}0\le m_{wg,i,t}\le m_{wg,i}^{max}\\ 0\le m_{wh,i,t}\le m_{wh,i}^{max}\end{cases}\quad\forall i\in\Omega_d,\ \forall t\in\Gamma \tag{13}$$

公式(12)、(13)中，$m_{wg,i}^{max}$、$m_{wh,i}^{max}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热水流量最大值；Ω_d为供热管道集合；

所述管道热延迟约束采用公式(14)表示：

$$\begin{cases}\tau_{wg,i,t}=\text{round}\left[\frac{L_i\Delta t}{v_{wg,i,t}}\right]\\ \tau_{wh,i,t}=\text{round}\left[\frac{L_i\Delta t}{v_{wh,i,t}}\right]\end{cases}\quad\forall i\in\Omega_d,\ \forall t\in\Gamma \tag{14}$$

公式(14)中，$\tau_{wg,i,t}$、$\tau_{wh,i,t}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热延迟时间；L_i为供热管道i的长度；$v_{wg,i,t}$、$v_{wh,i,t}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热水流速；

所述管道温降约束采用公式(15)和(16)表示：

$$\begin{cases}T_{wg,i,t}^{in}-T_{wg,i,t+\tau_{wg,i,t}}^{out}=(1-e^{-\frac{\lambda L_i}{C_p m_{wg,i,t}}})(T_{wg,i,t}^{in}-T_{wo,i,t})\\ T_{wh,i,t}^{in}-T_{wh,i,t+\tau_{wh,i,t}}^{out}=(1-e^{-\frac{\lambda L_i}{C_p m_{wh,i,t}}})(T_{wh,i,t}^{in}-T_{wo,i,t})\end{cases}\quad\forall i\in\Omega_d,\ \forall t\in\Gamma \tag{15}$$

$$\begin{cases} T_{\mathrm{wg}}^{\min} \le T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}} \le T_{\mathrm{wg}}^{\max} \\ T_{\mathrm{wh}}^{\min} \le T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}} \le T_{\mathrm{wh}}^{\max} \\ T_{\mathrm{wg}}^{\min} \le T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{out}} \le T_{\mathrm{wg}}^{\max} \\ T_{\mathrm{wh}}^{\min} \le T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{out}} \le T_{\mathrm{wh}}^{\max} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega_{\mathrm{d}}, \quad \forall t \in \Gamma \tag{16}$$

公式(15)、(16)中，$T_{\mathrm{wg},i,t+\tau_{\mathrm{wg},j,t}}^{\mathrm{out}}$、$T_{\mathrm{wh},i,t+\tau_{\mathrm{wh},j,t}}^{\mathrm{out}}$分别为第t个调度时段内考虑热延迟的供水、回水网络中供热管道i的末端温度；$T_{\mathrm{wo},i,t}$为第t个调度时段内供热管道i的土壤环境温度；$T_{\mathrm{wg}}^{\max}$、$T_{\mathrm{wg}}^{\min}$分别为供水网络中供热管道温度最大值、最小值；$T_{\mathrm{wh}}^{\max}$、$T_{\mathrm{wh}}^{\min}$分别为回水网络中供热管道温度最大值、最小值；λ为供热管道单位长度上的热效率。

一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电热联合系统的运行和控制技术领域，具体涉及一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法。

背景技术

[0002] 近年来，随着化石燃料的逐渐枯竭以及环境污染的日益加剧，加大以风电为代表的可再生能源的开发与利用已成为世界各国的当务之急。受电网调度资源的限制，我国部分电网，尤其风电资源较为丰富的“三北”地区出现了较为普遍的“弃风”现象，严重制约了当前可再生能源的持续发展。

[0003] 对当前“弃风”现象进行深入分析可发现：电力系统、热力系统这两大能源系统相对割裂的调度、运行模式是导致“弃风”的重要原因之一。实际上，电力系统与热力系统通过热电联产机组耦合在一起，形成一个以电力系统为中心的多能源耦合系统。现阶段，“弃风”主要发生在“三北”地区的冬季供暖期，其中，热电联产机组均工作于“以热定电”模式，其调峰能力受到了热力系统的制约，直接降低了电力系统的整体调峰能力，进而导致了电网运行效率下降与大规模“弃风”现象。针对该问题，本发明充分利用热网特性，为提升系统调峰能力和风电接纳能力提供一种新的技术方案。

[0004] 热力系统由热源、热网和热负荷三部分组成，承担着热力生产、输送和交换的职能。其中，热延迟和温度损失是热网特性的两个主要表现形式，由于热水在供热管道内流动缓慢，供热管道首端温降较之末端温降存在传输时延，这就表明了供热管道内储存了一部分的热能。此外，热水由于与供热管道外界环境存在温差，在传输过程中进行热交换而产生了温度损失。然而，现有研究在电热联合系统优化调度仅考虑热功率平衡约束，而忽略热网特性对电热联合系统优化调度的影响，在一定程度上制约了电力系统对风电的接纳，增加了“弃风”。

发明内容

[0005] 本发明针对现有技术中存在的不足，提出了一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法。以电热联合系统日煤耗量最小为目标函数，考虑能量平衡约束、电网运行约束和热网特性约束，建立电热联合系统优化调度模型，采用非线性规划求解器对模型进行求解，最终确定考虑热网特性的电热联合系统优化调度策略。

[0006] 本发明为实现上述发明目的，采取的技术方案如下：

[0007] 一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，包括以下步骤：

[0008] S1：设定电热联合系统参数，所述系统参数包括：电、热负荷预测数据，风电预测功率，风电机组、火电机组、热电联产机组的运行参数，热网运行参数；

[0009] S2：建立考虑热网特性的电热联合系统优化调度模型，包括：设定所述电热联合系统日煤耗量最小为目标函数，分别考虑能量平衡约束、电网运行约束和热网特性约束；

[0010] S3：采用非线性规划求解器对步骤S2得到的所述电热联合系统优化调度模型进行

求解，确定考虑热网特性的电热联合系统优化调度策略。

[0011] 作为本发明的优选技术方案：步骤S2中所述目标函数采用公式(1)表示：

[0012] $C=\min(C_H+C_R)$ (1)

[0013] 公式(1)中，C为系统日煤耗量；C_H为火电机组日煤耗量；C_R为热电联产机组日煤耗量；

[0014] 其中，火电机组日煤耗量C_H采用公式(2)表示：

[0015] $$C_H=\sum_{t\in\Gamma}\sum_{v\in\Omega_H}a_{2,v}P_{v,t}^2+a_{1,v}P_{v,t}+a_{0,v} \quad (2)$$

[0016] 公式(2)中，$a_{2,v}$、$a_{1,v}$、$a_{0,v}$为火电机组v煤耗量系数；$P_{v,t}$为第t个调度时段内火电机组v的发电功率；v为火电机组索引；t为调度时刻索引；Ω_H为火电机组集合；Γ为调度时段集合；

[0017] 其中，热电联产机组日煤耗量C_R采用公式(3)表示：

[0018] $$C_R=\sum_{t\in\Gamma}\sum_{k\in\Omega_R}b_{5,k}P_{R,k,t}^2+b_{4,k}Q_{R,k,t}^2+b_{3,k}P_{R,k,t}+b_{2,k}Q_{R,k,t}+b_{1,k}P_{R,k,t}Q_{R,k,t}+b_{0,k} \quad (3)$$

[0019] 公式(3)中，$b_{5,k}$、$b_{4,k}$、$b_{3,k}$、$b_{2,k}$、$b_{1,k}$、$b_{0,k}$为热电联产机组k煤耗量系数；$P_{R,k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k的发电功率；$Q_{R,k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k的产热功率；k为热电联产机组索引；Ω_R为热电联产机组集合。

[0020] 作为本发明的优选技术方案：步骤S2中所述能量平衡约束采用公式(4)表示：

[0021] $$\sum_{o\in\Omega_W}P_{W,o,t}+\sum_{k\in\Omega_R}P_{R,k,t}+\sum_{v\in\Omega_H}P_{v,t}=\sum_{m\in\Omega_B}D_{m,t},\quad\forall t\in\Gamma \quad (4)$$

[0022] 公式(4)中，$P_{W,o,t}$为第t个调度时段内风电场o的发电功率；$D_{m,t}$为第t个调度时段内电网节点m的用电负荷；o为风电场索引；m为电网节点索引；Ω_W为风电场集合；Ω_B为电网节点集合。

[0023] 作为本发明的优选技术方案：步骤S2中所述电网运行约束包括运行安全约束、机组爬坡约束、旋转备用约束、电网潮流约束；

[0024] 其中，所述运行安全约束采用公式(5)表示：

[0025] $$\begin{cases}P_v^{\min}\le P_{v,t}\le P_v^{\max}\\P_{R,k}^{\min}\le P_{R,k,t}\le P_{R,k}^{\max}\\Q_{R,k}^{\min}\le Q_{R,k,t}\le Q_{R,k}^{\max}\\0\le P_{W,o,t}\le P_{W,o,t}^{\max}\end{cases}\quad\forall v\in\Omega_H,\ \forall k\in\Omega_R,\ \forall o\in\Omega_W,\ \forall t\in\Gamma \quad (5)$$

[0026] 公式(5)中，$P_v^{\max}$、$P_v^{\min}$分别为火电机组v发电功率的最大值、最小值；$P_{R,k}^{\max}$、$P_{R,k}^{\min}$为热电联产机组k发电功率的最大值、最小值；$Q_{R,k}^{\max}$、$Q_{R,k}^{\min}$为热电联产机组k产热功率的最大值、最小值；$P_{W,o,t}^{\max}$为第t个调度时段内风电场o发电功率的最大值；

[0027] 所述机组爬坡约束采用公式(6)表示：

[0028] $$\begin{cases}-P_v^{\text{down}}\Delta t\le P_{v,t}-P_{v,t-1}\le P_v^{\text{up}}\Delta t\\-P_{R,k}^{\text{down}}\Delta t\le P_{R,k,t}-P_{R,k,t-1}\le P_{R,k}^{\text{up}}\Delta t\end{cases}\quad\forall v\in\Omega_H,\ \forall k\in\Omega_R,\ \forall t\in\Gamma \quad (6)$$

[0029] 公式(6)中，P_v^{up}、P_v^{down}分别为火电机组v发电功率向上、向下爬坡速率；$P_{R,k}^{\text{up}}$、$P_{R,k}^{\text{down}}$

分别为热电联产机组k发电功率向上、向下爬坡速率；Δt为调度时段间隔；

[0030] 所述旋转备用约束采用公式(7)表示：

[0031]
$$\begin{cases} 0 \le r_{v,t}^{\mathrm{up}} \le P_v^{\mathrm{up}} \Delta t \\ r_{v,t}^{\mathrm{up}} \le P_v^{\max} - P_{v,t} \\ 0 \le r_{v,t}^{\mathrm{down}} \le P_v^{\mathrm{down}} \Delta t \\ r_{v,t}^{\mathrm{down}} \le P_{v,t} - P_v^{\min} \\ \sum_{v \in \Omega_{\mathrm{H}}} r_{v,t}^{\mathrm{up}} \ge E_{\mathrm{up}} \\ \sum_{v \in \Omega_{\mathrm{H}}} r_{v,t}^{\mathrm{down}} \ge E_{\mathrm{down}} \end{cases} \quad \forall v \in \Omega_{\mathrm{H}}, \quad \forall t \in \Gamma \tag{7}$$

[0032] 公式(7)中，$r_{v,t}^{\mathrm{down}}$、$r_{v,t}^{\mathrm{up}}$分别为第t个调度时段内火电机组v可提供的向下、向上旋转备用容量；E_{down}、E_{up}分别为系统向下、向上旋转备用需求；

[0033] 所述电网潮流约束采用公式(8)表示：

[0034]
$$\left| \sum_{m \in \Omega_{\mathrm{B}}} SF_{l,m} \left(\sum_{v \in \Omega_{\mathrm{H}}} P_{v,t} + \sum_{k \in \Omega_{\mathrm{R}}} P_{\mathrm{R},k,t} + \sum_{o \in \Omega_{\mathrm{W}}} P_{\mathrm{W},o,t} - D_{m,t} \right) \right| \le F_l, \quad \forall l \in \Omega_{\mathrm{L}}, \quad \forall t \in \Gamma \tag{8}$$

[0035] 公式(8)中，$SF_{l,m}$为电网线路l对节点m输入电功率的偏移因子；F_l为电网线路l的输电容量；l为电网线路索引；Ω_{L}为电网线路集合。

[0036] 作为本发明的优选技术方案：步骤S2中所述热网特性约束包括热电联产机组电热特性约束、温度混合约束、流量连续性约束、管道热延迟约束和温降约束；

[0037] 其中，所述热电联产机组电热特性约束采用公式(9)表示：

[0038]
$$\begin{cases} C_{\mathrm{A},k} Q_{\mathrm{R},k,t} + E_k \le P_{\mathrm{R},k,t} \le P_{\mathrm{R},k}^{\max} - C_{\mathrm{B},k} Q_{\mathrm{R},k,t} \\ Q_{\mathrm{R},k,t} = C_{\mathrm{p}} m_{k,t} (T_{\mathrm{yg},k,t} - T_{\mathrm{yh},k,t}) \\ T_{\mathrm{yg}}^{\min} \le T_{\mathrm{yg},k,t} \le T_{\mathrm{yg}}^{\max} \\ T_{\mathrm{yh}}^{\min} \le T_{\mathrm{yh},k,t} \le T_{\mathrm{yh}}^{\max} \end{cases} \quad \forall k \in \Omega_{\mathrm{R}}, \quad \forall t \in \Gamma \tag{9}$$

[0039] 公式(9)中，$C_{\mathrm{A},k}$、$C_{\mathrm{B},k}$分别为背压、进气工况下热电联产机组k的热电比；$m_{k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k所在供热管道的热水流量；$T_{\mathrm{yg},k,t}$、$T_{\mathrm{yh},k,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中热电联产机组k所在供热管道的热水温度；$T_{\mathrm{yg}}^{\max}$、$T_{\mathrm{yg}}^{\min}$分别为供水网络中热电联产机组所在供热管道的热水温度最大值、最小值；$T_{\mathrm{yh}}^{\max}$、$T_{\mathrm{yh}}^{\min}$分别为回水网络中热电联产机组所在供热管道的热水温度最大值、最小值；C_{p}为热水的比热容；E_k为常数；

[0040] 所述温度混合约束采用公式(10)和(11)表示：

[0041]
$$\begin{cases} \sum_{i \in \Omega_{\mathrm{s},j}} (T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{out}} m_{\mathrm{wh},i,t}) = T_{\mathrm{jh},j,t} \sum_{i \in \Omega_{\mathrm{s},j}} m_{\mathrm{wh},i,t} \\ T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}} = T_{\mathrm{jg},j,t} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega_{\mathrm{s},j}, \quad \forall j \in \Omega_{\mathrm{n}}, \quad \forall t \in \Gamma \tag{10}$$

[0042]
$$\begin{cases} \sum_{i \in \Omega_{\mathrm{e},j}} (T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{out}} m_{\mathrm{wg},i,t}) = T_{\mathrm{jg},j,t} \sum_{i \in \Omega_{\mathrm{e},j}} m_{\mathrm{wg},i,t} \\ T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}} = T_{\mathrm{jh},j,t} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega_{\mathrm{e},j}, \quad \forall j \in \Omega_{\mathrm{n}}, \quad \forall t \in \Gamma \tag{11}$$

[0043] 公式(10)、(11)中，$T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}}$、$T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的首端温度；$T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{out}}$、$T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{out}}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的末端温度；$T_{\mathrm{jg},j,t}$、$T_{\mathrm{jh},j,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中热网节点j的热水温度；$m_{\mathrm{wg},i,t}$、$m_{\mathrm{wh},i,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的热水流量；i为供热管道索引；j为热网节点索引；$\Omega_{\mathrm{s},j}$、$\Omega_{\mathrm{e},j}$分别为以热网节点j为首端、末端的管道集合；Ω_{node}为热网节点集合；

[0044] 所述流量连续性约束采用公式(12)和(13)表示：

[0045]
$$\begin{cases}\sum\limits_{i\in\Omega_{\mathrm{s},j}} m_{\mathrm{wg},i,t}=\sum\limits_{i\in\Omega_{\mathrm{e},j}} m_{\mathrm{wg},i,t}\\ \sum\limits_{i\in\Omega_{\mathrm{s},j}} m_{\mathrm{wh},i,t}=\sum\limits_{i\in\Omega_{\mathrm{e},j}} m_{\mathrm{wh},i,t}\end{cases}\quad \forall j\in\Omega_{\mathrm{n}},\quad \forall t\in\Gamma \tag{12}$$

[0046]
$$\begin{cases}0\le m_{\mathrm{wg},i,t}\le m_{\mathrm{wg},i}^{\max}\\ 0\le m_{\mathrm{wh},i,t}\le m_{\mathrm{wh},i}^{\max}\end{cases}\quad \forall i\in\Omega_{\mathrm{d}},\quad \forall t\in\Gamma \tag{13}$$

[0047] 公式(12)、(13)中，$m_{\mathrm{wg},i}^{\max}$、$m_{\mathrm{wh},i}^{\max}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热水流量最大值；Ω_{d}为供热管道集合；

[0048] 所述管道热延迟约束采用公式(14)表示：

[0049]
$$\begin{cases}\tau_{\mathrm{wg},i,t}=\mathrm{round}\left[\dfrac{L_i\Delta t}{v_{\mathrm{wg},i,t}}\right]\\ \tau_{\mathrm{wh},i,t}=\mathrm{round}\left[\dfrac{L_i\Delta t}{v_{\mathrm{wh},i,t}}\right]\end{cases}\quad \forall i\in\Omega_{\mathrm{d}},\quad \forall t\in\Gamma \tag{14}$$

[0050] 公式(14)中，$\tau_{\mathrm{wg},i,t}$、$\tau_{\mathrm{wh},i,t}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热延迟时间；L_i为供热管道i的长度；$v_{\mathrm{wg},i,t}$、$v_{\mathrm{wh},i,t}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热水流速；

[0051] 所述管道温降约束采用公式(15)和(16)表示：

[0052]
$$\begin{cases}T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}}-T_{\mathrm{wg},i,t+\tau_{\mathrm{wg},i,t}}^{\mathrm{out}}=(1-e^{-\frac{\lambda L_i}{C_{\mathrm{p}}m_{\mathrm{wg},i,t}}})(T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}}-T_{\mathrm{wo},i,t})\\ T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}}-T_{\mathrm{wh},i,t+\tau_{\mathrm{wh},i,t}}^{\mathrm{out}}=(1-e^{-\frac{\lambda L_i}{C_{\mathrm{p}}m_{\mathrm{wh},i,t}}})(T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}}-T_{\mathrm{wo},i,t})\end{cases}\quad \forall i\in\Omega_{\mathrm{d}},\quad \forall t\in\Gamma \tag{15}$$

[0053]
$$\begin{cases}T_{\mathrm{wg}}^{\min}\le T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}}\le T_{\mathrm{wg}}^{\max}\\ T_{\mathrm{wh}}^{\min}\le T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}}\le T_{\mathrm{wh}}^{\max}\\ T_{\mathrm{wg}}^{\min}\le T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{out}}\le T_{\mathrm{wg}}^{\max}\\ T_{\mathrm{wh}}^{\min}\le T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{out}}\le T_{\mathrm{wh}}^{\max}\end{cases}\quad \forall i\in\Omega_{\mathrm{d}},\quad \forall t\in\Gamma \tag{16}$$

[0054] 公式(15)、(16)中，$T_{\mathrm{wg},i,t+\tau_{\mathrm{wg},i,t}}^{\mathrm{out}}$、$T_{\mathrm{wh},i,t+\tau_{\mathrm{wh},i,t}}^{\mathrm{out}}$分别为第t个调度时段内考虑热延迟的供水、回水网络中供热管道i的末端温度；$T_{\mathrm{wo},i,t}$为第t个调度时段内供热管道i的土壤环境温度；$T_{\mathrm{wg}}^{\max}$、$T_{\mathrm{wg}}^{\min}$分别为供水网络中供热管道温度最大值、最小值；$T_{\mathrm{wh}}^{\max}$、$T_{\mathrm{wh}}^{\min}$分别为回水网络中供热管道温度最大值、最小值；λ为供热管道单位长度上的热效率。

[0055] 本发明所述考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，采用以上技术方案与现

有技术相比，具有以下技术效果：

[0056] (1)可充分发掘热网储热能力，优化系统运行工况。(2)增加热电联产机组灵活调度空间，促进风电消纳，提高系统运行的经济性。

附图说明

[0057] 图1为考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法流程图。

具体实施方式

[0058] 下面结合附图对本发明做进一步的详细说明。

[0059] 如图1所示，本发明提出了一种考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，包括以下步骤：

[0060] S1：设定电热联合系统参数，主要包括：电、热负荷预测数据，风电预测功率，风电机组、火电机组、热电联产机组的运行参数，热网运行参数；

[0061] S2：以电热联合系统日煤耗量最小为目标函数，综合考虑能量平衡约束、电网运行约束和热网特性约束，建立考虑热网特性的电热联合系统优化调度模型；

[0062] 电热联合系统优化调度模型的目标函数采用下式表示：

[0063] $C=\min(C_H+C_R)$ (1)

[0064] 式中，C为系统日煤耗量；C_H为火电机组日煤耗量；C_R为热电联产机组日煤耗量；

[0065] 其中，火电机组日煤耗量C_H采用下式表示：

[0066] $$C_H=\sum_{t\in\Gamma}\sum_{v\in\Omega_H}a_{2,v}P_{v,t}^2+a_{1,v}P_{v,t}+a_{0,v} \quad (2)$$

[0067] 式中，$a_{2,v}$、$a_{1,v}$、$a_{0,v}$为火电机组v煤耗量系数；$P_{v,t}$为第t个调度时段内火电机组v的发电功率；v为火电机组索引；t为调度时刻索引；Ω_H为火电机组集合；Γ为调度时段集合；

[0068] 其中，热电联产机组日煤耗量C_R采用下式表示：

[0069] $$C_R=\sum_{t\in\Gamma}\sum_{k\in\Omega_R}b_{5,k}P_{R,k,t}^2+b_{4,k}Q_{R,k,t}^2+b_{3,k}P_{R,k,t}+b_{2,k}Q_{R,k,t}+b_{1,k}P_{R,k,t}Q_{R,k,t}+b_{0,k} \quad (3)$$

[0070] 式中，$b_{5,k}$、$b_{4,k}$、$b_{3,k}$、$b_{2,k}$、$b_{1,k}$、$b_{0,k}$为热电联产机组k煤耗量系数；$P_{R,k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k的发电功率；$Q_{R,k,t}$为第t个调度时段内热电联产机组k的产热功率；k为热电联产机组索引；Ω_R为热电联产机组集合；

[0071] 电热联合系统优化调度模型的约束条件包括能量平衡约束、电网运行约束和热网特性约束。其中，能量平衡约束采用下式表示：

[0072] $$\sum_{o\in\Omega_W}P_{W,o,t}+\sum_{k\in\Omega_R}P_{R,k,t}+\sum_{v\in\Omega_H}P_{v,t}=\sum_{m\in\Omega_B}D_{m,t},\quad\forall t\in\Gamma \quad (4)$$

[0073] 式中，$P_{W,o,t}$为第t个调度时段内风电场o的发电功率；$D_{m,t}$为第t个调度时段内电网节点m的用电负荷；o为风电场索引；m为电网节点索引；Ω_W为风电场集合；Ω_B为电网节点集合；

[0074] 电网运行约束包括运行安全约束、机组爬坡约束、旋转备用约束、电网潮流约束。其中，运行安全约束采用下式表示：

[0075] $$\begin{cases} P_v^{\min} \le P_{v,t} \le P_v^{\max} \\ P_{\mathrm{R},k}^{\min} \le P_{\mathrm{R},k,t} \le P_{\mathrm{R},k}^{\max} \\ Q_{\mathrm{R},k}^{\min} \le Q_{\mathrm{R},k,t} \le Q_{\mathrm{R},k}^{\max} \\ 0 \le P_{\mathrm{W},o,t} \le P_{\mathrm{W},o,t}^{\max} \end{cases} \quad \forall v \in \Omega_{\mathrm{H}},\ \forall k \in \Omega_{\mathrm{R}},\ \forall o \in \Omega_{\mathrm{W}},\ \forall t \in \Gamma \qquad (5)$$

[0076] 式中，$P_v^{\max}$、$P_v^{\min}$分别为火电机组v发电功率的最大值、最小值；$P_{\mathrm{R},k}^{\max}$、$P_{\mathrm{R},k}^{\min}$为热电联产机组k发电功率的最大值、最小值；$Q_{\mathrm{R},k}^{\max}$、$Q_{\mathrm{R},k}^{\min}$为热电联产机组k产热功率的最大值、最小值；$P_{\mathrm{W},o,t}^{\max}$为第t个调度时段内风电场o发电功率的最大值；

[0077] 机组爬坡约束采用下式表示：

[0078] $$\begin{cases} -P_v^{\mathrm{down}} \Delta t \le P_{v,t} - P_{v,t-1} \le P_v^{\mathrm{up}} \Delta t \\ -P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{down}} \Delta t \le P_{\mathrm{R},k,t} - P_{\mathrm{R},k,t-1} \le P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{up}} \Delta t \end{cases} \quad \forall v \in \Omega_{\mathrm{H}},\ \forall k \in \Omega_{\mathrm{R}},\ \forall t \in \Gamma \qquad (6)$$

[0079] 式中，P_v^{up}、P_v^{down}分别为火电机组v发电功率向上、向下爬坡速率；$P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{up}}$、$P_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{down}}$分别为热电联产机组k发电功率向上、向下爬坡速率；Δt为调度时段间隔；

[0080] 旋转备用约束采用下式表示：

[0081] $$\begin{cases} 0 \le r_{v,t}^{\mathrm{up}} \le P_v^{\mathrm{up}} \Delta t \\ r_{v,t}^{\mathrm{up}} \le P_v^{\max} - P_{v,t} \\ 0 \le r_{v,t}^{\mathrm{down}} \le P_v^{\mathrm{down}} \Delta t \\ r_{v,t}^{\mathrm{down}} \le P_{v,t} - P_v^{\min} \\ \sum_{v \in \Omega_{\mathrm{H}}} r_{v,t}^{\mathrm{up}} \ge E_{\mathrm{up}} \\ \sum_{v \in \Omega_{\mathrm{H}}} r_{v,t}^{\mathrm{down}} \ge E_{\mathrm{down}} \end{cases} \quad \forall v \in \Omega_{\mathrm{H}},\ \forall t \in \Gamma \qquad (7)$$

[0082] 式中，$r_{v,t}^{\mathrm{down}}$、$r_{v,t}^{\mathrm{uf}}$分别为第t个调度时段内火电机组v可提供的向下、向上旋转备用容量；E_{down}、E_{up}分别为系统向下、向上旋转备用需求；

[0083] 电网潮流约束采用下式表示：

[0084] $$\left| \sum_{m \in \Omega_{\mathrm{B}}} SF_{l,m} \left(\sum_{v \in \Omega_{\mathrm{H}}} P_{v,t} + \sum_{k \in \Omega_{\mathrm{R}}} P_{\mathrm{R},k,t} + \sum_{o \in \Omega_{\mathrm{W}}} P_{\mathrm{W},o,t} - D_{m,t} \right) \right| \le F_l,\ \forall l \in \Omega_{\mathrm{L}},\ \forall t \in \Gamma \qquad (8)$$

[0085] 式中，$SF_{l,m}$为电网线路l对节点m输入电功率的偏移因子；F_l为电网线路l的输电容量；l为电网线路索引；Ω_{L}为电网线路集合；

[0086] 热网特性约束包括热电联产机组电热特性约束、温度混合约束、流量连续性约束、管道热延迟约束和温降约束。其中，热电联产机组电热特性约束采用下式表示：

[0087] $$\begin{cases} C_{\mathrm{A},k} Q_{\mathrm{R},k,t} + E_k \le P_{\mathrm{R},k,t} \le P_{\mathrm{R},k}^{\max} - C_{\mathrm{B},k} Q_{\mathrm{R},k,t} \\ Q_{\mathrm{R},k,t} = C_{\mathrm{p}} m_{k,t} (T_{\mathrm{yg},k,t} - T_{\mathrm{yh},k,t}) \\ T_{\mathrm{yg}}^{\min} \le T_{\mathrm{yg},k,t} \le T_{\mathrm{yg}}^{\max} \\ T_{\mathrm{yh}}^{\min} \le T_{\mathrm{yh},k,t} \le T_{\mathrm{yh}}^{\max} \end{cases} \quad \forall k \in \Omega_{\mathrm{R}},\ \forall t \in \Gamma \qquad (9)$$

[0088] 式中，$C_{\mathrm{A},k}$、$C_{\mathrm{B},k}$分别为背压、进气工况下热电联产机组k的热电比；$m_{k,t}$为第t个调度

时段内热电联产机组k所在供热管道的热水流量；$T_{yg,k,t}$、$T_{yh,k,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中热电联产机组k所在供热管道的热水温度；T_{yg}^{max}、T_{yg}^{min}分别为供水网络中热电联产机组所在供热管道的热水温度最大值、最小值；T_{yh}^{max}、T_{yh}^{min}分别为回水网络中热电联产机组所在供热管道的热水温度最大值、最小值；C_p为热水的比热容；E_k为常数；

[0089] 温度混合约束采用公式(10)和(11)表示：

[0090]
$$\begin{cases} \sum_{i\in\Omega_{s,j}} (T_{wh,i,t}^{out} m_{wh,i,t}) = T_{jh,j,t} \sum_{i\in\Omega_{s,j}} m_{wh,i,t} \\ T_{wg,i,t}^{in} = T_{jg,j,t} \end{cases} \quad \forall i\in\Omega_{s,j},\ \forall j\in\Omega_n,\ \forall t\in\Gamma \qquad (10)$$

[0091]
$$\begin{cases} \sum_{i\in\Omega_{e,j}} (T_{wg,i,t}^{out} m_{wg,i,t}) = T_{jg,j,t} \sum_{i\in\Omega_{e,j}} m_{wg,i,t} \\ T_{wh,i,t}^{in} = T_{jh,j,t} \end{cases} \quad \forall i\in\Omega_{e,j},\ \forall j\in\Omega_n,\ \forall t\in\Gamma \qquad (11)$$

[0092] 式中，$T_{wg,i,t}^{in}$、$T_{wh,i,t}^{in}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的首端温度；$T_{wg,i,t}^{out}$、$T_{wh,i,t}^{out}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的末端温度；$T_{jg,j,t}$、$T_{jh,j,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中热网节点j的热水温度；$m_{wg,i,t}$、$m_{wh,i,t}$分别为第t个调度时段内供水、回水网络中供热管道i的热水流量；i为供热管道索引；j为热网节点索引；$\Omega_{s,j}$、$\Omega_{e,j}$分别为以热网节点j为首端、末端的管道集合；Ω_{node}为热网节点集合；

[0093] 流量连续性约束采用公式(12)和(13)表示：

[0094]
$$\begin{cases} \sum_{i\in\Omega_{s,j}} m_{wg,i,t} = \sum_{i\in\Omega_{e,j}} m_{wg,i,t} \\ \sum_{i\in\Omega_{s,j}} m_{wh,i,t} = \sum_{i\in\Omega_{e,j}} m_{wh,i,t} \end{cases} \quad \forall j\in\Omega_n,\ \forall t\in\Gamma \qquad (12)$$

[0095]
$$\begin{cases} 0 \le m_{wg,i,t} \le m_{wg,i}^{max} \\ 0 \le m_{wh,i,t} \le m_{wh,i}^{max} \end{cases} \quad \forall i\in\Omega_d,\ \forall t\in\Gamma \qquad (13)$$

[0096] 式中，$m_{wg,i}^{max}$、$m_{wh,i}^{max}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热水流量最大值；Ω_d为供热管道集合；

[0097] 管道热延迟约束采用下式表示：

[0098]
$$\begin{cases} \tau_{wg,i,t} = \text{round}\left[\dfrac{L_i \Delta t}{v_{wg,i,t}}\right] \\ \tau_{wh,i,t} = \text{round}\left[\dfrac{L_i \Delta t}{v_{wh,i,t}}\right] \end{cases} \quad \forall i\in\Omega_d,\ \forall t\in\Gamma \qquad (14)$$

[0099] 式中，$\tau_{wg,i,t}$、$\tau_{wh,i,t}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热延迟时间；L_i为供热管道i的长度；$v_{wg,i,t}$、$v_{wh,i,t}$分别为供水、回水网络中供热管道i的热水流速；

[0100] 管道温降约束采用公式(15)和(16)表示：

[0101]
$$\begin{cases} T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{wg},i,t+\tau_{\mathrm{wg},i,t}}^{\mathrm{out}} = (1-e^{-\frac{\lambda L_i}{C_p m_{\mathrm{wg},i,t}}})(T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{wo},i,t}) \\ T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{wh},i,t+\tau_{\mathrm{wh},i,t}}^{\mathrm{out}} = (1-e^{-\frac{\lambda L_i}{C_p m_{\mathrm{wh},i,t}}})(T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{wo},i,t}) \end{cases} \quad \forall i \in \Omega_{\mathrm{d}}, \quad \forall t \in \Gamma \qquad (15)$$

[0102]
$$\begin{cases} T_{\mathrm{wg}}^{\min} \le T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{in}} \le T_{\mathrm{wg}}^{\max} \\ T_{\mathrm{wh}}^{\min} \le T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{in}} \le T_{\mathrm{wh}}^{\max} \\ T_{\mathrm{wg}}^{\min} \le T_{\mathrm{wg},i,t}^{\mathrm{out}} \le T_{\mathrm{wg}}^{\max} \\ T_{\mathrm{wh}}^{\min} \le T_{\mathrm{wh},i,t}^{\mathrm{out}} \le T_{\mathrm{wh}}^{\max} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega_{\mathrm{d}}, \quad \forall t \in \Gamma \qquad (16)$$

[0103] 式中，$T_{\mathrm{wg},i,t+\tau_{\mathrm{wg},i,t}}^{\mathrm{out}}$、$T_{\mathrm{wh},i,t+\tau_{\mathrm{wh},i,t}}^{\mathrm{out}}$分别为第t个调度时段内考虑热延迟的供水、回水网络中供热管道i的末端温度；$T_{\mathrm{wo},i,t}$为第t个调度时段内供热管道i的土壤环境温度；$T_{\mathrm{wg}}^{\max}$、$T_{\mathrm{wg}}^{\min}$分别为供水网络中供热管道温度最大值、最小值；$T_{\mathrm{wh}}^{\max}$、$T_{\mathrm{wh}}^{\min}$分别为回水网络中供热管道温度最大值、最小值；λ为供热管道单位长度上的热效率。

[0104] S3：采用非线性规划求解器对电热联合系统优化调度模型进行求解，确定考虑热网特性的电热联合系统优化调度策略。

[0105] 通过本发明提出考虑热网特性的电热联合系统优化调度方法，采用以上技术方案与现有技术相比，具有以下技术效果：(1)可充分发掘热网储热能力，优化系统运行工况。(2)增加热电联产机组灵活调度空间，促进风电消纳，提高系统运行的经济性。

[0106] 以上所述的具体实施方案，对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步的详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施方案而已，并非用以限定本发明的范围，任何本领域的技术人员，在不脱离本发明的构思和原则的前提下所做出的等同变化与修改，均应属于本发明保护的范围。

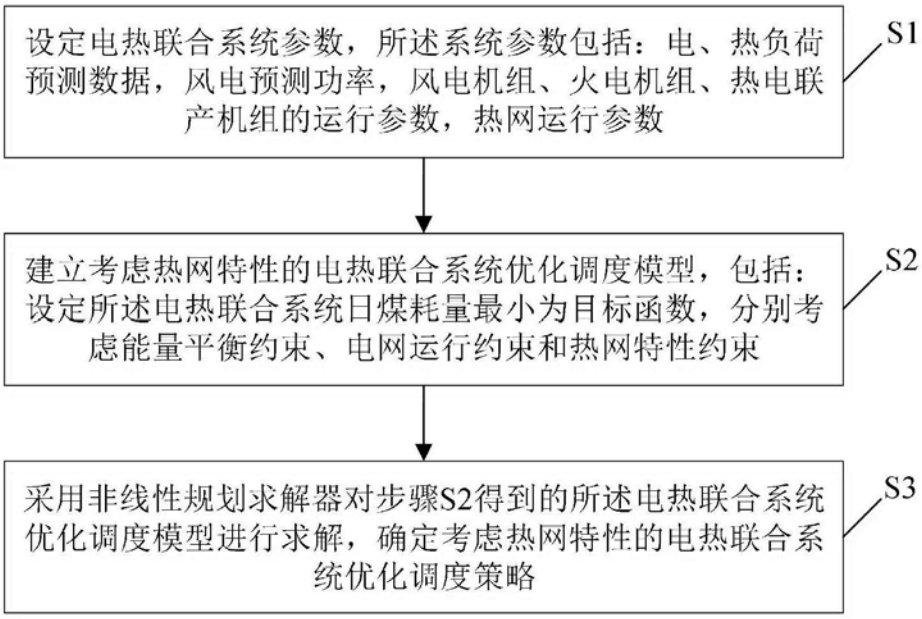

设定电热联合系统参数，所述系统参数包括：电、热负荷预测数据，风电预测功率，风电机组、火电机组、热电联产机组的运行参数，热网运行参数
S1
建立考虑热网特性的电热联合系统优化调度模型，包括：设定所述电热联合系统日煤耗量最小为目标函数，分别考虑能量平衡约束、电网运行约束和热网特性约束
S2
采用非线性规划求解器对步骤S2得到的所述电热联合系统优化调度模型进行求解，确定考虑热网特性的电热联合系统优化调度策略
S3

图1