



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112103940 A

(43) 申请公布日 2020.12.18

(21) 申请号 202010630304.1 H02J 3/38 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.03 H02J 3/46 (2006.01)

(71) 申请人 国网江西省电力有限公司电力科学研究院 H02J 3/32 (2006.01)

地址 330000 江西省南昌市青山湖区民营科技园内民强路88号检测试验中心科研楼(第1-11层)

申请人 国家电网有限公司

(72) 发明人 汪硕承 舒展 陈波 程思萌 陶翔 李佳

(74) 专利代理机构 南昌贤达专利代理事务所 (普通合伙) 36136

代理人 金一娴

(51) Int.Cl. H02J 3/00 (2006.01)

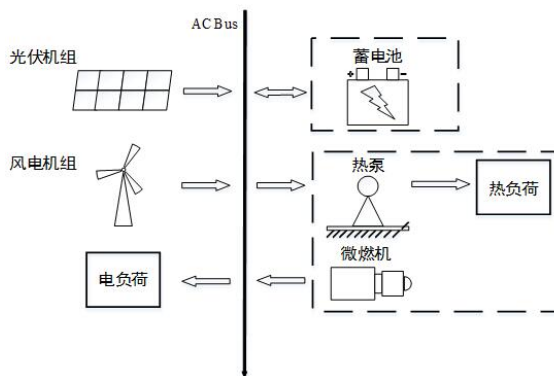
权利要求书3页 说明书9页 附图7页

(54) 发明名称

一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法

(57) 摘要

本发明涉及一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,包括以下步骤:S1、建立温控设备模型;S2、建立含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型;S3、设置微电网中元件参数,预测新能源发电功率,电负荷功率曲线和外界环境温度,设定热负荷的温控范围;S4、将上列参数代入含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型中,并采用粒子群算法求解调度周期内模型中的最优经济运行费用及各微源、温控设备和储能的出力。本发明在以风电、光伏、微燃机和电储能(蓄电池)等构成的微电网中加入温控设备和温控热负荷,考虑温控热负荷的热惯性效应,建立一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型。



1. 一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、建立温控设备模型;

S2、建立含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型;

S3、设置微电网中元件参数,预测新能源发电功率,电负荷功率曲线和外界环境温度,设定热负荷的温控范围;

S4、将上列参数代入含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型中,并采用粒子群算法求解调度周期内模型中的最优经济运行费用及各微源、温控设备和储能的出力。

2. 根据权利要求1所述的一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,其特征在于:步骤S1中,选取热泵作为温控设备,温控模型可以用式(13)-(15)表示:

$$Q_{HP}(t) = P_{HP}(t) COP \quad (13)$$

式中, $Q_{HP}(t)$ 为t时刻热泵输出的等值热功率; $P_{HP}(t)$ 为t时刻热泵消耗的电功率; COP 为制热性能系数;

当热泵停止工作时,热负荷温度随外界温度自然变化:

$$T_{load}(t+1) = T_o(t+1) - (T_o(t+1) - T_{load}(t)) e^{-\Delta t/RC} \quad (14)$$

当热泵开启时:

$$T_{load}(t+1) = T_o(t+1) + Q_{HP}(t)R - (T_o(t+1) + Q_{HP}(t)R - T_{load}(t)) e^{-\Delta t/RC} \quad (15)$$

式中, $T_{load}(t+1)$ 和 $T_{load}(t)$ 分别为热负荷后一时刻和当前时刻的温度; $Q_{HP}(t)$ 为温控设备等值热功率; $T_o(t)$ 为外环境温度; R 为等值热电阻; C 为等值热电容; Δt 为仿真步长。

3. 根据权利要求1所述的一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,其特征在于:步骤S2中,含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型为:

目标函数

计及温控设备的多能源微电网最优经济运行模型以调度周期内总运行费用最小为目标函数,包含设备运行费用 C_{OM} ,设备启停费用 C_{SS} ,储能损耗费用 C_{Ebat} ,失负荷惩罚费用 C_{load} 和弃风、弃光惩罚费用 C_{rer} ,如式(16)所示,

$$\min C_{op} = \min(C_{OM} + C_{SS} + C_{Ebat} + C_{rer} + C_{load}) \quad (16)$$

上述费用计算方法如式(17)-(21)所示,

$$C_{OM} = \left(\sum_{i=1}^N a_i P_i(t) \right) \quad (17)$$

式中, $P_i(t)$ 为第*i*种类型设备在*t*时段的出力; a_i 为第*i*种类型设备的单位运行成本; N 为调度周期总时段数;

$$C_{SS} = \sum_{i=1}^N \left(\max \{0, x_1(t) - x_1(t-1)\} \left(\beta_1 + \gamma_1 (1 - e^{-(t/\sigma_1)}) \right) \right) \quad (18)$$

式中, $x_1(t)$ 为微燃机组状态变量, $x_1(t) = 1$ 表示微燃机开机, $x_1(t) = 0$ 表示微燃机停机; β_1 、 γ_1 、 σ_1 为微燃机的开机费用系数;

$$C_{Ebat} = \sum_{k=0}^{N_c} \frac{C_{inv}}{N_k} \quad (19)$$

式中, N_C 表示调度周期内储能系统充放电次数; N_k 表示蓄电池第 k 次充放电时对应的最大充放电循环次数; C_{inv} 表示微电网中蓄电池的投资费用;

$$C_{rer} = a_{rer} \left(\sum_{t=1}^N (P_{rer}(t) - P_r(t)) \Delta t \right) \quad (20)$$

$$C_{load} = a_{load} \left(\sum_{t=1}^N \Delta P_{load}(t) \Delta t \right) \quad (21)$$

式中, $P_{rer}(t)$ 为新能源发电总功率; $P_r(t)$ 为新能源实际消纳功率; a_{rer} 为单位弃风、弃光惩罚成本; $\Delta P_{load}(t)$ 为 t 时段平均失负荷功率; a_{load} 为单位失负荷惩罚成本;

约束条件

1) 电功率平衡约束

$$P_{rer}(t) + P_{MGT}(t) - N_{HP} P_{HP}(t) + P_{discharge}(t) - P_{charge}(t) = P_{load}(t) \quad (22)$$

式中, $P_{rer}(t)$ 为新能源发电总功率; $P_{MGT}(t)$ 为微燃机发电功率; N_{HP} 为热泵数量, $P_{HP}(t)$ 为热泵耗电功率; $P_{charge}(t)$ 、 $P_{discharge}(t)$ 为电储能充、放电功率; $P_{load}(t)$ 为电负荷功率;

2) 微燃机组约束

$$P_{g,min} \leq P_{MGT}(t) \leq P_{g,max} \quad (23)$$

$$-R_{g,down} \leq P_{MGT}(t) - P_{MGT}(t-1) \leq R_{g,up} \quad (24)$$

式中, 微燃机组出力 $P_{MGT}(t)$ 受其最大出力 $P_{g,max}$ 和最小出力 $P_{g,min}$ 限制, 同时, 微燃机出力增加的速率要小于最大向上爬坡率 $R_{g,up}$; 反之, 出力降低的速率要小于最大向下爬坡率 $R_{g,down}$;

3) 热泵约束

$$0 \leq P_{HP}(t) \leq P_{HP,rate} \quad (25)$$

式中, 热泵工作功率 $P_{HP}(t)$ 受其最大允许工作功率 $P_{HP,rate}$ 限制;

4) 电储能系统约束

$$0 \leq P_{charge}(t) \leq U_{ES}(t) P_{charge,rate} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{discharge}(t) \leq (1 - U_{ES}(t)) P_{discharge,rate} \quad (27)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (28)$$

$$SOC(0) = SOC(T) \quad (29)$$

式中, 电储能充放电功率不能超过其额定充放电功率 $P_{charge,rate}$ 、 $P_{discharge,rate}$, 同时, 为避免储能过充和过放对其寿命造成的伤害, 应严格控制荷电状态 $SOC(t)$ 的范围, $U_{ES}(t)$ 为0-1变量, 电储能充电时 $U_{ES}(t)$ 为1, 放电时 $U_{ES}(t)$ 为0;

5) 热负荷温度约束

$$T_{\text{load,min}} \leq T_{\text{load}}(t) \leq T_{\text{load,max}} \quad (30)$$

式中,热负荷温度 $T_{\text{load}}(t)$ 需控制在上限 $T_{\text{load,max}}$ 和下限 $T_{\text{load,min}}$ 范围内。

4. 根据权利要求1所述的一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,其特征在于:微电网中元件组成包括风电机组、光伏机组,微燃机、蓄电池和热泵,其中风电、光伏机组为可再生能源发电单元,微燃机是系统中的可控出力单元,蓄电池作为电储能单元能够平滑系统中的功率波动,热泵作为能量转换装置实现了电-热系统能量的耦合连接,通过电转热模式实现对热负荷的供给控制,负荷类型包含电负荷、热负荷两种负荷类型。

5. 根据权利要求1所述的一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,其特征在于:所述粒子群算法的计算步骤如下:

S4-1、设置粒子群算法参数,产生初始种群,粒子数取50,最大迭代次数取500;

S4-2、根据新能源发电功率和负荷功率曲线,调整微燃机、热泵和电储能出力,使其满足电负荷和热负荷的供应,并计算该方式下的适应度值,即该方式下的总运行费用;

S4-3、更新粒子的速度和位置,以最优经济运行费用作为适应度值,更新个体极值和全局极值;

S4-4、判断是否达到迭代次数,如果满足,则输出最优运行费用及微燃机、热泵和电储能的最优运行出力;若不满足,则返回S4-2步骤进行迭代。

一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电力系统优化运行方法,具体涉及一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法。

背景技术

[0002] 多能源微电网中包含的风电和光伏等可再生能源发电形式,其出力的波动性和不可控性会对微电网运行产生一定影响。同时,多能源微电网中负荷形式也具有多样性,如何在满足各种负荷需求的同时,提高微电网中新能源的消纳率,实现多能源微电网经济运行是当前电力系统中的一大热点问题。

[0003] 多能源微电网可以实现多种能源形式的生产、调度、传输、分配和消费,以热电联供型微电网为例,其负荷形式包含电负荷和热负荷两类。在多能源微电网中,针对某一类能源形式的负荷需求,可以由多种形式的能源来协同满足,这种能源间的交叉、互补利用形式使得多能源微电网的最优运行方式变得复杂化。

[0004] 目前,在多能源微电网最优运行问题的研究中,主要根据系统的能源组成形式和实际所需优化的目标,构建多能源微电网最优经济运行模型。模型多以系统总运行成本最优为目标函数,也可以采用系统总能耗最优、碳排放量最低或是运行可靠性最优为目标函数,可根据实际需求选取合适的目标函数。由于多种能源形式的存在,不同能源形式在时间和空间尺度上存在差异性,模型的约束条件需考虑更多的因素,模型求解难度提升。

[0005] 目前,构建多能源微电网最优运行模型多是通过构建不同形式的目标函数,研究了不同类型多能源系统最优经济运行问题。在多能源微电网中,各种负荷类型拥有不同的特性,如热负荷的温控特性具有区间性和一定的惯性响应。目前,鲜有文献综合考虑多能源系统内部真实物理结构模型,分析热负荷温控特性对多能源系统优化运行的影响,针对这一问题还需进一步开展研究工作。

发明内容

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明提供一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法。

[0007] 在分析多能源系统的最优运行问题时,需综合考虑能源自身的利用效率,能源间的转换效率以及不同能源形式在空间和时间尺度上的差异性等问题。孤立型微电网需实现电能和热能从生产到消费的自给自足,其中,热负荷通常通过电热转换或者直接供应热能的方式供给。在多能源微电网中,用户对热负荷的需求通常体现在温度指标上,不像电负荷供需能够实时匹配,此类热负荷需通过温控设备调节,使得热负荷的温度达到用户满意的一个温度区间范围,可以利用热负荷的热惯性和温度区间性质改善微电网中微源的运行状态。因此,微电网中考虑热负荷温控特性,合理安排各种微源的经济调度,这一问题是值得深入研究的。

[0008] 一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,包括以下步骤:

S1、建立温控设备模型；

S2、建立含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型；

S3、设置微电网中元件参数，预测新能源发电功率，电负荷功率曲线和外界环境温度，设定热负荷的温控范围；

S4、将上列参数代入含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型中，并采用粒子群算法求解调度周期内模型中的最优经济运行费用及各微源、温控设备和储能的出力。

[0009] 与现有技术相比，本发明的有益效果为：本发明在以风电、光伏、微燃机和电储能（蓄电池）等构成的微电网中加入温控设备和温控热负荷，考虑温控热负荷的热惯性效应，建立一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型。模型计及设备运行成本，启停成本，储能运行损耗成本，失负荷惩罚成本和弃风、弃光惩罚成本等，以调度周期内总运行成本最小为目标函数，采用粒子群算法求解得到多能源微电网最优运行方式。

附图说明

[0010] 图1是本发明多能源微电网能量传递方式示意图。

[0011] 图2是本发明热负荷温控行为过程的示意图。

[0012] 图3为本发明居民供暖通风系统的等效电路图。

[0013] 图4 为本发明粒子群算法求解步骤图。

[0014] 图5为本发明新能源发电预测总功率和电负荷预测功率图。

[0015] 图6为本发明冬季典型日环境温度数据图。

[0016] 图7为本发明Case 1中元件出力水平示意图。

[0017] 图8 本发明Case 2中元件出力水平示意图。

[0018] 图9为本发明不考虑温控特性微电网元件出力水平的示意图。

[0019] 图10 为不同场景下蓄电池SOC曲线图。

具体实施方式

[0020] 为了加深对本发明的理解，下面结合具体实施方式进行详细描述，本说明书中描述的实施例仅用于解释本发明，并非用来限定本发明。

[0021] 本发明所涉及的多能源微电网中能源类型包含风、光、电、热等多种能源形式，这种组合形式可以实现能源间的互补，提高可再生能源利用率、系统的灵活性和负荷供给的可靠性。在运行阶段，多能源微电网运行状态可分为并网型和孤立型两类，并网型微电网通过联络线与大电网连接，实现能量的交互传递，而孤立型微电网仅依靠自身系统内部的电源和储能装置实现能量和功率的平衡。

[0022] 本发明重点研究孤立型多能源微电网的运行问题，多能源微电网的结构组成和能量流动形式如附图1所示，微电网中元件组成包括：风电机组、光伏机组，微燃机、蓄电池和热泵等温控设备，其中风电机组、光伏机组为可再生能源发电单元，微燃机是系统中的可控出力单元，蓄电池作为电储能单元能够平滑系统中的功率波动，提高系统稳定性，热泵作为能量转换装置实现了电-热系统能量的耦合连接，通过电转热模式实现对热负荷的供给控制，负荷类型包含电负荷、热负荷两种负荷类型。

[0023] 从附图1可以看出电负荷通过光伏、风电和微燃机等电源提供能量，电储能则平抑

电源侧和电负荷侧之间的不平衡量,热负荷则通过能源转换设备将电能转换成热能满足相应的需求,本发明采用热泵作为温控设备,从能量转换形式上看,电储能通过充电方式存储剩余的可再生能源发电量,而电热泵通过电热转换方式将剩余的新能源发电功率转换为热能,二者都能在一定程度上实现新能源消纳的作用。综上,电储能和温控设备(热泵)在多能源微电网中起到耦合各个能源网络的作用,同时能够增强多能源微电网对可再生能源发电的适应性,提高系统的灵活性。在考虑多能源微电网中的优化运行调度时,高效、合理的利用不同能源的性质是很重要的。

[0024] 针对现有微电网经济运行模型中鲜有考虑温控设备和热负荷热惯性的情况,本发明在以风电、光伏、微燃机和电储能(蓄电池)等构成的微电网中加入温控设备和温控热负荷,考虑温控热负荷的热惯性效应,建立一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型。模型计及设备运行成本,启停成本,储能运行损耗成本,失负荷惩罚成本和弃风、弃光惩罚成本等,以调度周期内总运行成本最小为目标函数,采用粒子群算法求解得到多能源微电网最优运行方式。

[0025] 本发明的一种含温控设备的多能源微电网最优经济运行方法,包括如下步骤:

S1、建立温控设备模型;

S2、考虑热负荷热惯性,建立含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型;

S3、设置微电网中元件参数,预测新能源发电功率,电负荷功率曲线和外界环境温度,设定热负荷的温控范围;

S4、将上列参数代入含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型中,并采用粒子群算法求解调度周期内模型中的最优经济运行费用及各微源、温控设备和储能的出力。

[0026] 建立温控设备模型的同时,需要建立多能源微电网微燃机模型、多能源微电网电储能充放电模型,多能源微电网微燃机模型、多能源微电网电储能充放电模型和温控设备模型,共同构成多能源微电网最优经济运行模型。

[0027] 上述微燃机模型包括:

微型燃气轮机通常是指以甲烷、天然气为燃料的小型燃气轮机,工作原理是通过甲烷、天然气等燃料燃烧产生的化学热能驱动旋转叶片转动做功,进而将机械能转换为电能。由于天然气,甲烷等燃料燃烧效率高,污染排放物较其他传统能源更少,因此,微燃机得以在微电网中广泛应用。微燃机的输出功率与天然气燃料消耗呈线性指数关系:

微燃机的输出功率与天然气燃料消耗呈线性指数关系:

$$P_{\text{MGT}}(t) = G_{\text{MGT}}(t)\eta_{\text{gas}}q \quad (1)$$

$$C_{\text{MGT}}(t) = G_{\text{MGT}}(t)C_{\text{gas}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{MGT}}(t)$ 表示 t 时刻微燃机出力; $G_{\text{MGT}}(t)$ 表示 t 时刻消耗天然气量; η_{gas} 表示热电转换效率; q 表示天然气热值; $C_{\text{MGT}}(t)$ 表示 t 时段微燃机燃料成本; C_{gas} 表示单位容量天然气单价。

[0028] 上述多能源微电网电储能充放电模型包括:

电储能运行阶段采用荷电状态描述储能的状态,荷电状态是一个连续时序过程,与前一个时段运行荷电状态、充放电功率以及充放电效率有关,如式(3)-(4)所示:

电储能充电过程:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\delta) + \eta_c \frac{P_{\text{charge}}(t)\Delta t}{E_{\text{ESS}}} \quad (3)$$

电储能放电过程:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\delta) - \frac{P_{\text{discharge}}(t)\Delta t}{E_{\text{ESS}}\eta_d} \quad (4)$$

式中, $SOC(t)$ 和 $SOC(t-1)$ 分别表示当前时刻储能系统的荷电状态和上一时刻的荷电状态; $P_{\text{charge}}(t)$ 和 $P_{\text{discharge}}(t)$ 分别为电储能系统的充电功率和放电功率; η_c 和 η_d 分别表示储能系统的充电效率和放电效率; δ 表示电储能自放电率; E_{ESS} 为储能系统的额定容量; Δt 为表示电储能单个充、放电循环周期。

[0029] 电储能在运行阶段中, 重复大量的充放电循环后, 其寿命也会逐渐降低。储能的寿命受充放电次数、每一次充放电深度等因素影响。现有相关研究中, 雨流法是一种被广泛用于计算疲劳损伤的计数方法, 通过雨流计数法可以计算得到整个运行阶段过程中电储能的充放电次数和充放电深度, 其中, 根据某铅酸蓄电池在设计寿命周期内循环次数和充放电深度之间的关系, 拟合得到式 (5), 而蓄电池寿命损耗与充放电深度和蓄电池等效循环次数的关系如式 (6) - (7) 所示:

$$N_{\text{cff}} = -6785DOD^4 + 5547DOD^3 + 10853DOD^2 - 14348DOD + 5202 \quad (5)$$

$$LoL = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_{\text{cff}}(DOD)} \quad (6)$$

$$Life = \frac{N_{\text{year}}}{LoL} \quad (7)$$

式中, N_{cff} 为储能等效循环次数、 DOD 为放电深度、 LoL 为储能寿命损耗、 N_{year} 为储能测试运行年、 $Life$ 表示储能的运行寿命。

[0030] 上述温控设备模型包括:

热负荷的供应形式多以温度指标为表征形式, 通过温控设备 (热泵、供暖通风、空气调节系统和热水器) 可进行电热转换, 控制热负荷温度指标达到用户满意范围。与此同时, 在微电网中配置温控设备不仅可以实现对用户热负荷的供给, 也在一定程度上起着消纳新能源的作用, 并且温控设备的投资成本低, 拥有较高的能量转换效率, 配置使用起来较为经济。

[0031] 热负荷温控行为过程如附图2所示, $Upper\ limit$ 为热负荷温度调节上限, $Lower\ limit$ 为热负荷温度调节下限。可以看出在热负荷的温控热行为过程中, 负荷温度变化不是瞬时完成的, 具有一定的惯性响应, 温控设备只需控制用户热负荷在温度调节上、下限范围内, 即可达到用户的满意需求, 借助这种热惯性作用, 温控设备可以参与系统电力平衡调节。

[0032] 考虑热力学第一定律, 以典型的居民供暖通风系统为例, 简化建立得到该温控设备的等值热力学模型的等效电路, 如附图3所示:

图3中, Q 为供暖通风系统吸收的热功率; C_a 为空气的比热容; C_m 为物质比热容; T_i 为

室内热负荷温度; T_o 为外界环境温度; T_m 为室内物质温度; UA 为备用热损失系数, 等效阻抗 R_1 、 R_2 分别为 $1/UA$ 、 $1/UA_{mass}$ 。

[0033] 该系统等值热力学模型的状态空间模型如式 (8) 所示。

$$[0034] \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{T}_i \\ \dot{T}_m \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} T_i \\ T_m \end{bmatrix} \quad u = 1 \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_2 C_a} + \frac{1}{R_2 C_m}\right) & \frac{1}{R_2 C_a} \\ \frac{1}{R_2 C_m} & -\frac{1}{R_2 C_m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{T_o}{R_1 C_a} + \frac{Q}{C_a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

如图4所示, 步骤S1中, 本发明选取热泵作为温控设备, 通过简化等值热力学模型, 将热负荷温度 T_i 转化为一阶微分方程形式, 用以模拟热负荷温控行为过程, 通过 $T_{load}(t)$ 表征热负荷温度, 该模型较好的保留了热力学变化的主要特征, 热泵作为一种电热转换装置, 能够高效的输出热能, 从而供给微电网中的热负荷, 热泵装置性能一般用制热性能系数 (Coefficient of Performance, COP) 来评价, 其温控模型可以用式 (13) - (15) 表示:

$$Q_{HP}(t) = P_{HP}(t)COP \quad (13)$$

式中, $Q_{HP}(t)$ 为 t 时刻热泵输出的等值热功率; $P_{HP}(t)$ 为 t 时刻热泵消耗的电功率; COP 为制热性能系数。

[0035] 当热泵停止工作时, 热负荷温度随外界温度自然变化:

$$T_{load}(t+1) = T_o(t+1) - (T_o(t+1) - T_{load}(t)) e^{-\Delta t/RC} \quad (14)$$

当热泵开启时:

$$T_{load}(t+1) = T_o(t+1) + Q_{HP}(t)R - (T_o(t+1) + Q_{HP}(t)R - T_{load}(t)) e^{-\Delta t/RC} \quad (15)$$

式中, $T_{load}(t+1)$ 和 $T_{load}(t)$ 分别为热负荷后一时刻和当前时刻的温度; $Q_{HP}(t)$ 为温控设备等值热功率; $T_o(t)$ 为外环境温度; R 为等值热电阻; C 为等值热电容; Δt 为仿真步长。

[0036] 步骤S3中, 设置微燃机组、热泵和电储能等设备参数, 预测新能源发电功率, 电负荷功率曲线和外界环境温度, 设定热负荷的温控范围。

[0037] 步骤S4中, 将上列参数代入含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型中, 并

采用粒子群算法求解调度周期内模型中的最优经济运行费用及各微源、温控设备和储能的出力。

[0038] 粒子群算法的计算步骤如下：

S4-1、设置粒子群算法参数，产生初始种群，粒子数取50，最大迭代次数取500。

[0039] S4-2、根据新能源发电功率和负荷功率曲线，调整微燃机、热泵和电储能出力，使其满足电负荷和热负荷的供应，并计算该方式下的适应度值，即该方式下的总运行费用。

[0040] S4-3、更新粒子的速度和位置，以最优经济运行费用作为适应度值，更新个体极值和全局极值。

[0041] S4-4、判断是否达到迭代次数，如果满足，则输出最优运行费用及微燃机、热泵和电储能的最优运行出力；若不满足，则返回S4-2步骤进行迭代。

[0042] 在粒子群算法模型中，含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型为：

①目标函数

含温控设备的多能源微电网最优经济运行模型以调度周期内总运行费用最小为目标函数，包含设备运行费用 C_{OM} ，设备启停费用 C_{SS} ，储能损耗费用 C_{Ebat} ，失负荷惩罚费用 C_{load} 和弃风、弃光惩罚费用 C_{rer} ，如式(16)所示。

$$[0043] \quad \min C_{op} = \min(C_{OM} + C_{SS} + C_{Ebat} + C_{rer} + C_{load}) \quad (16)$$

上述费用计算方法如式(42) - (46)所示。

$$[0044] \quad C_{OM} = \left(\sum_{t=1}^N a_i P_i(t) \right) \quad (17)$$

式中， $P_i(t)$ 为第*i*种类型设备在*t*时段的出力； a_i 为第*i*种类型设备的单位运行成本；*N*为调度周期总时段数。

$$[0045] \quad C_{SS} = \sum_{t=1}^N \left(\max \{0, x_1(t) - x_1(t-1)\} \left(\beta_1 + \gamma_1 (1 - e^{(-t/\sigma_1)}) \right) \right) \quad (18)$$

式中， $x_1(t)$ 为微燃机组状态变量， $x_1(t) = 1$ 表示微燃机开机， $x_1(t) = 0$ 表示微燃机停机； β_1 、 γ_1 、 σ_1 为微燃机的开机费用系数。

$$[0046] \quad C_{Ebat} = \sum_{k=0}^{N_c} \frac{C_{inv}}{N_k} \quad (19)$$

式中， N_c 表示调度周期内储能系统充放电次数； N_k 表示蓄电池第*k*次充放电时对应的最大充放电循环次数； C_{inv} 表示微电网中蓄电池的投资费用。

$$[0047] \quad C_{rer} = a_{rer} \left(\sum_{t=1}^N (P_{rer}(t) - P_r(t)) \Delta t \right) \quad (20)$$

$$C_{load} = a_{load} \left(\sum_{t=1}^N \Delta P_{load}(t) \Delta t \right) \quad (21)$$

式中， $P_{rer}(t)$ 为新能源发电总功率； $P_r(t)$ 为新能源实际消纳功率； a_{rer} 为单位弃风、弃

光惩罚成本; $\Delta P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时段平均失负荷功率; a_{load} 为单位失负荷惩罚成本。

[0048] ② 约束条件

1) 电功率平衡约束

$$P_{\text{rer}}(t) + P_{\text{MGT}}(t) - N_{\text{HP}} P_{\text{HP}}(t) + P_{\text{discharge}}(t) - P_{\text{charge}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (22)$$

式中, $P_{\text{rer}}(t)$ 为新能源发电总功率; $P_{\text{MGT}}(t)$ 为微燃机发电功率; N_{HP} 为热泵数量, $P_{\text{HP}}(t)$ 为热泵耗电功率; $P_{\text{charge}}(t)$ 、 $P_{\text{discharge}}(t)$ 为电储能充、放电功率; $P_{\text{load}}(t)$ 为电负荷功率。

[0049] 2) 微燃机组约束

$$P_{\text{g,min}} \leq P_{\text{MGT}}(t) \leq P_{\text{g,max}} \quad (23)$$

$$-R_{\text{g,down}} \leq P_{\text{MGT}}(t) - P_{\text{MGT}}(t-1) \leq R_{\text{g,up}} \quad (24)$$

式中, 微燃机组出力 $P_{\text{MGT}}(t)$ 受其最大出力 $P_{\text{g,max}}$ 和最小出力 $P_{\text{g,min}}$ 限制, 同时, 微燃机出力增加的速率要小于最大向上爬坡率 $R_{\text{g,up}}$; 反之, 出力降低的速率要小于最大向下爬坡率 $R_{\text{g,down}}$ 。

[0050] 3) 热泵约束

$$0 \leq P_{\text{HP}}(t) \leq P_{\text{HP,rate}} \quad (25)$$

式中, 热泵工作功率 $P_{\text{HP}}(t)$ 受其最大允许工作功率 $P_{\text{HP,rate}}$ 限制。

[0051] 4) 电储能系统约束

$$0 \leq P_{\text{charge}}(t) \leq U_{\text{ES}}(t) P_{\text{charge,rate}} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{\text{discharge}}(t) \leq (1 - U_{\text{ES}}(t)) P_{\text{discharge,rate}} \quad (27)$$

$$SOC_{\text{min}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{max}} \quad (28)$$

$$SOC(0) = SOC(T) \quad (29)$$

式中, 电储能充放电功率不能超过其额定充放电功率 $P_{\text{charge,rate}}$ 、 $P_{\text{discharge,rate}}$, 同时, 为避免储能过充和过放对其寿命造成的伤害, 应严格控制荷电状态 $SOC(t)$ 的范围, $U_{\text{ES}}(t)$ 为 0-1 变量, 电储能充电时 $U_{\text{ES}}(t)$ 为 1, 放电时 $U_{\text{ES}}(t)$ 为 0。

[0052] 5) 热负荷温度约束

$$T_{\text{load,min}} \leq T_{\text{load}}(t) \leq T_{\text{load,max}} \quad (30)$$

式中, 热负荷温度 $T_{\text{load}}(t)$ 需控制在上限 $T_{\text{load,max}}$ 和下限 $T_{\text{load,min}}$ 范围内。

[0053] 以一个包含风电机组、光伏机组、微燃机、热泵和电储能等装置的多能源微电网为例, 说明本发明带来的效益。

[0054] 采集冬季典型日内的新能源发电预测总功率和电负荷预测功率如图 5 所示, 采样间隔为 1h, 外界环境温度如图 6 所示。微燃机组、热泵和电储能等设备参数可参见表 1-表 3,

蓄电池调度周期初始荷电状态设为0.5。微电网中热负荷数量有100个(单个热泵供应单个热负荷),热负荷温度设定值为24℃,温度允许调节范围在℃,热负荷采样时间为1min,温控设备的等值热电阻为0.1208℃/W,等值热电容为3599.3J/℃。系统单位弃风、弃光惩罚费用为2\$/kWh,单位失负荷惩罚费用为5\$/kWh。粒子群算法设置如下:粒子数取50,最大迭代次数取500。

[0055] 表1 微燃机参数

微源类型	额定功率(kW)	最大向上爬坡kW/h)	最大向下爬坡(kW/h)
微燃机	360	220	220

表2 热泵装置参数

微源类型	最大功率(kW)	额定功率(kW)	制热性能系数	数量
热泵	6	3	0.9	100

表3 蓄电池参数

类型	最大充电功率(kW)	最大放电功率(kW)	最小荷电状态	最大荷电状态	充电效率	充电效率	最大容量(kWh)	数量
蓄电池	50	50	0.1	1	0.95	0.95	200	2

列举如下两个场景进行分析:

Case 1: 冬季典型日微电网中含热泵

Case 2: 冬季典型日微电网中不含热泵

冬季典型日微电网中,含热泵场景下各元件调度结果如图7所示,不含热泵场景下各元件调度结果如图8所示,比较两种场景各元件出力,不难看出Case 1中:

1、在新能源出力不足以供给电负荷时,微燃机和蓄电池共同平抑系统中剩余的电负荷。

[0056] 2、在新能源出力较高时段,蓄电池充电,热泵开启调节温度。

[0057] 3、在某些特定时段(如1h,20h),热负荷温度处在允许调节温度下限周围,此时需开启温控设备调节热负荷温度,而此时新能源发电不足,需通过蓄电池放电供给不足的电功率。

[0058] 而Case 2中,新能源出力较高时段只能由蓄电池参与平抑调节,由于蓄电池价格较高,微电网中配置的蓄电池容量有限,不能完全吸收剩余的新能源发电功率,系统新能源利用率较低。

[0059] 表4展示了温控设备热泵对微电网最优经济运行的影响,可以看到,在加入温控设备热泵后,热泵可以消耗多余新能源功率来调节热负荷温度,系统弃风、弃光惩罚成本降低19.3%,系统总运行成本降低259.1\$。

表4 热泵对系统运行成本的影响

场景	失负荷惩罚成本(\$)	弃风、弃光惩罚成本(\$)	总运行成本(\$)
Case 1	33.7	3913.3	6163.2
Case 2	47.0	4848.5	6422.3

[0060] 根据上一节分析,温控设备热泵的加入会对微电网最优运行产生影响,而热负荷温控特性势必也会对微电网产生一定的影响。本节分析热负荷温控范围对最优运行的影响,当不考虑热负荷温控特性时,微电网中各元件最优调度计划如图9所示,可以看出:不考虑热负荷温控特性时,热负荷不具有区间性质,设置热负荷温度恒定为24℃,此时热泵出力水平保持在22kW左右,对新能源消纳的灵活性较低,此时系统弃风、弃光惩罚成本达到4362\$,系统运行总成本达6780\$。

[0061] 图10展示了不同热负荷温控范围场景下,蓄电池的SOC曲线变化,可以看到,计及热负荷温控特性后,蓄电池充放电循环次数减少,且充放电深度也明显减少,蓄电池损耗费用下降了11.5%,随着热负荷温控范围的增大,温控设备的灵活性提高,蓄电池充放电深度逐级减少,蓄电池损耗费用逐级减少。

[0062] 不考虑热负荷温控特性时,微电网弃风、弃光惩罚费用和运行总成本均为最高,随着热负荷温控范围的增大,系统弃风、弃光惩罚费用和总运行成本逐级递减,这是因为随着温控范围的增加,温控设备出力的灵活性提高,在热负荷温度高于其下限阈值前,都可以关闭热泵调节系统功率;在热负荷温度低于其上限阈值前,都可以打开热泵消纳系统中剩余的新能源发电功率。但是,用户热负荷温控范围不能无限扩大,需在一定范围内调节,因此,考虑用户对热负荷温控范围的要求,合理设置热负荷温控范围,达到用户满意度的同时,可以优化系统的运行经济性。

[0063] 综上,算例结果表明:

1、多能源微电网中加入温控设备能提高风电和光伏的消纳率,提高综合能源利用率,一定程度上能减少系统失负荷量,提高系统运行可靠性,优化系统运行成本。

[0064] 2、合理利用热负荷温控特性,设置合适的热负荷温控范围能够减缓储能的寿命损耗,提高风电和光伏消纳率,优化系统运行的经济性。

[0065] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

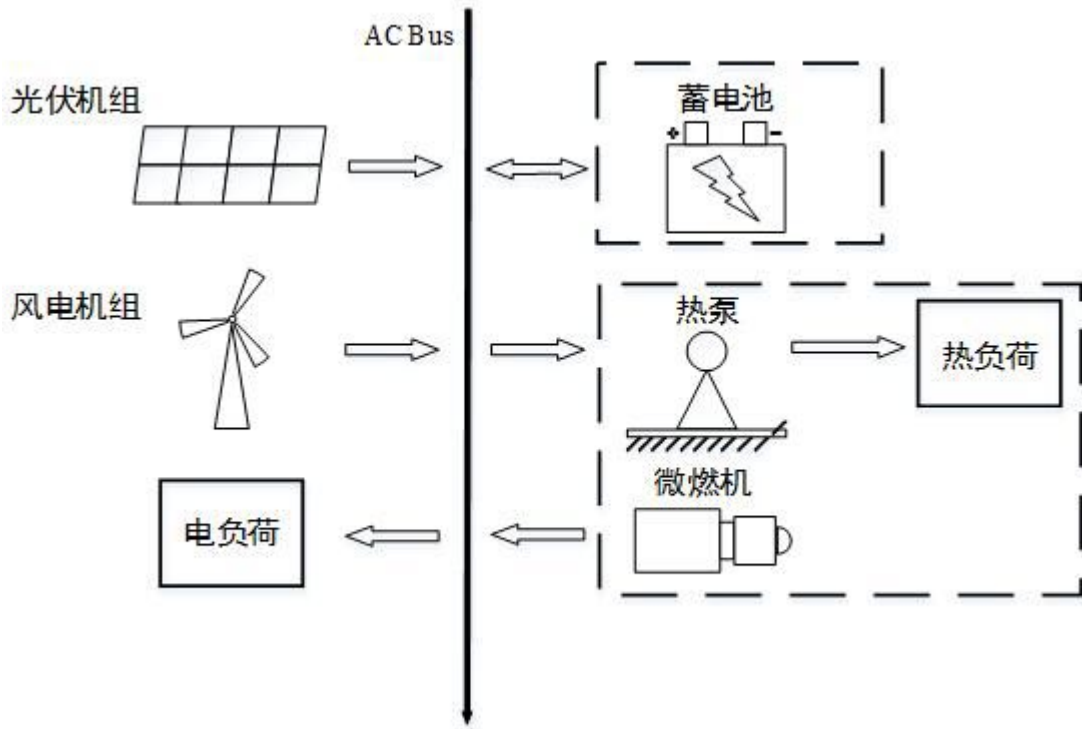


图1

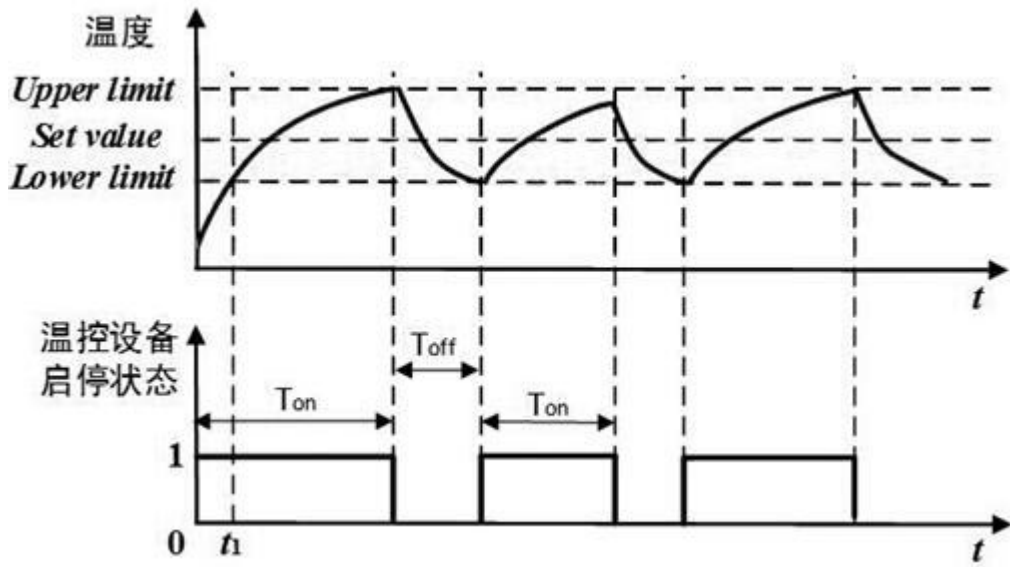


图2

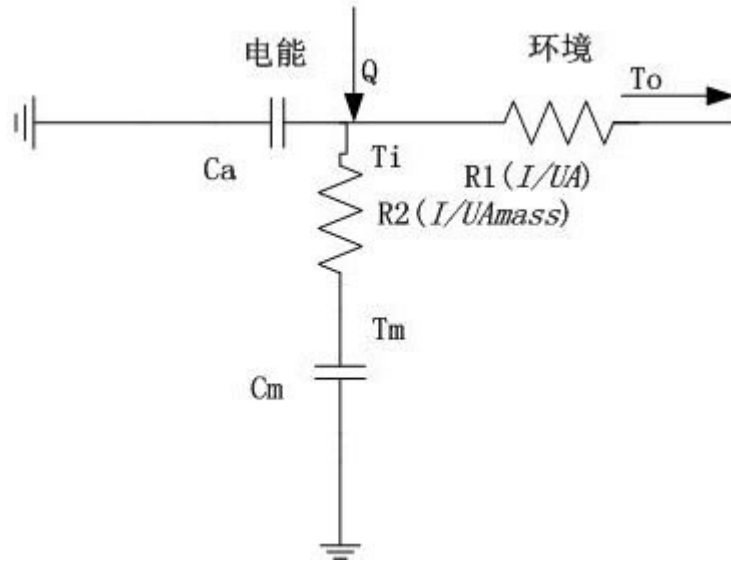


图3

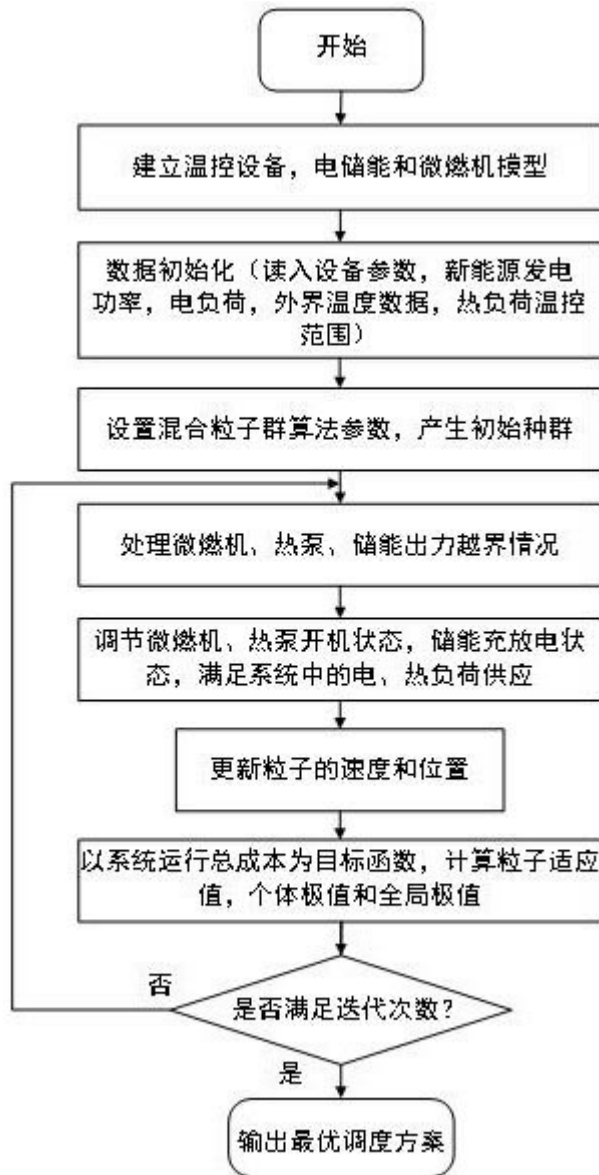


图4

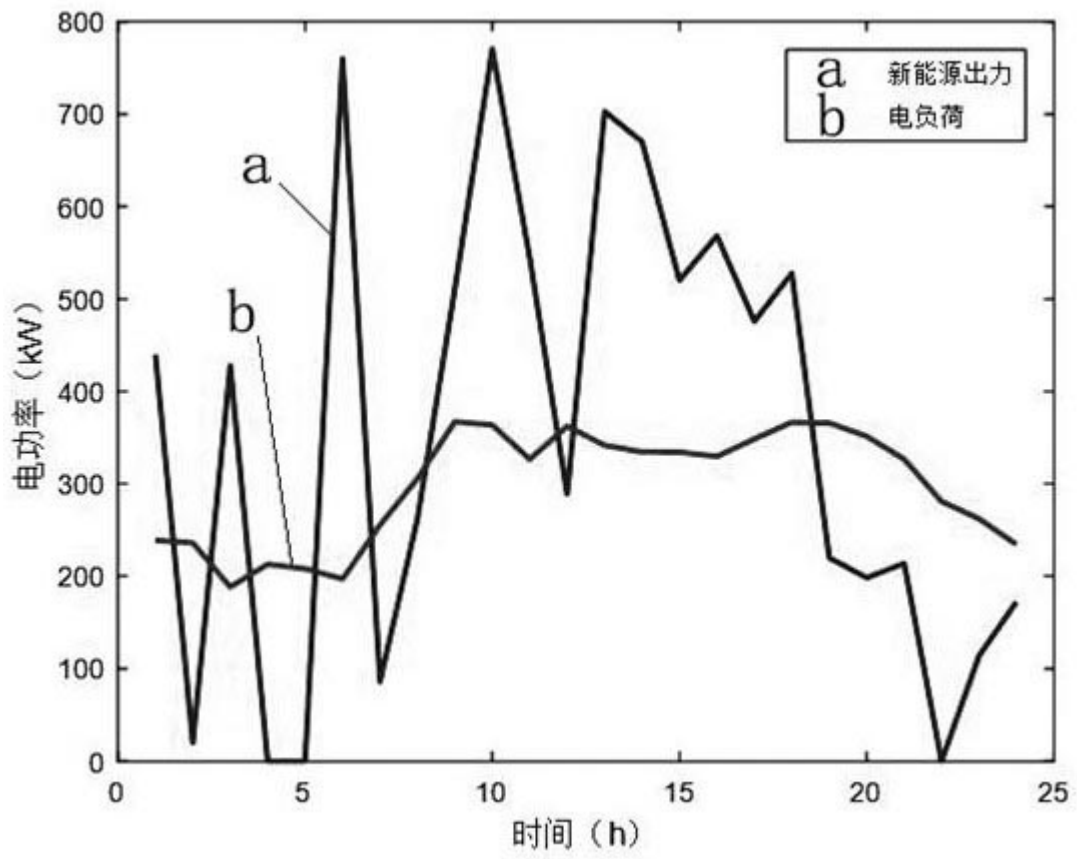


图5

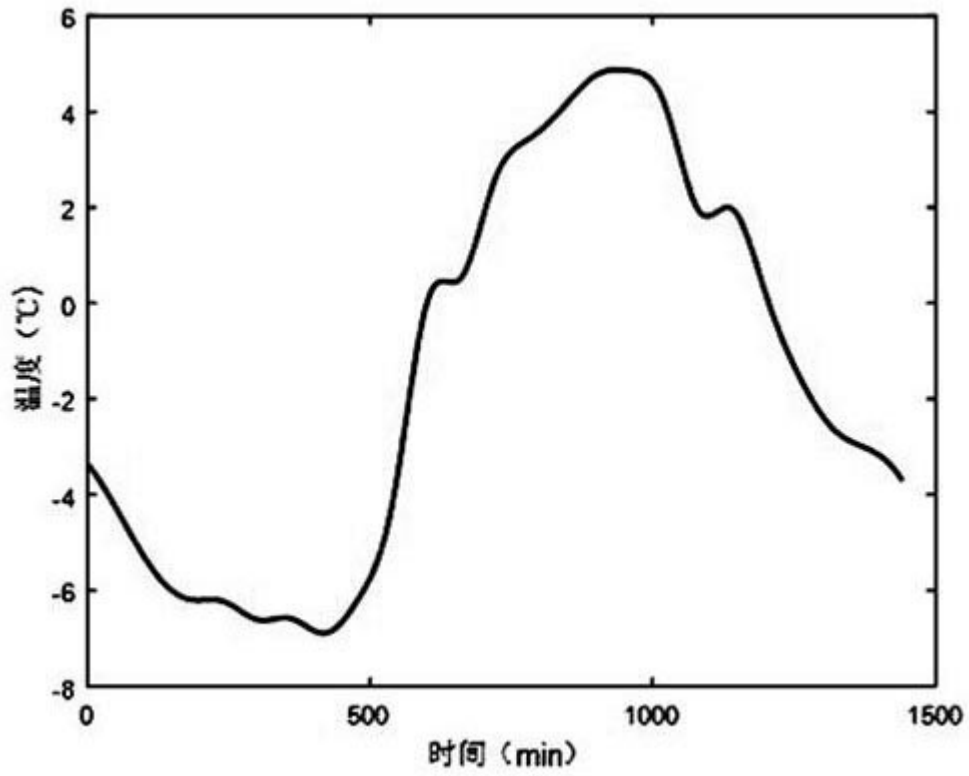


图6

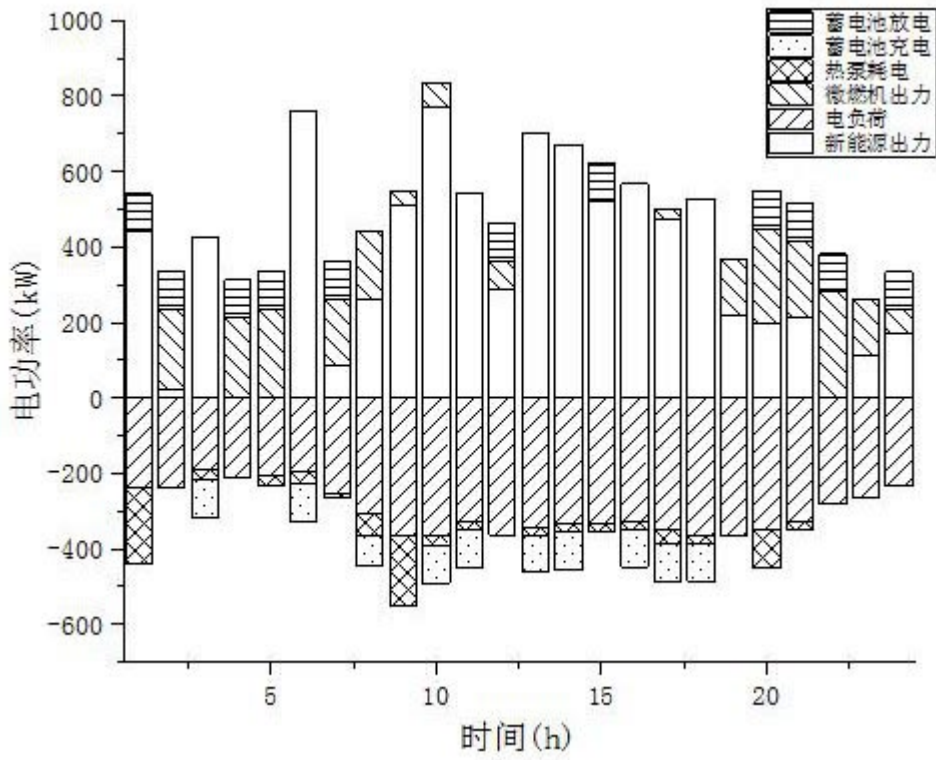


图7

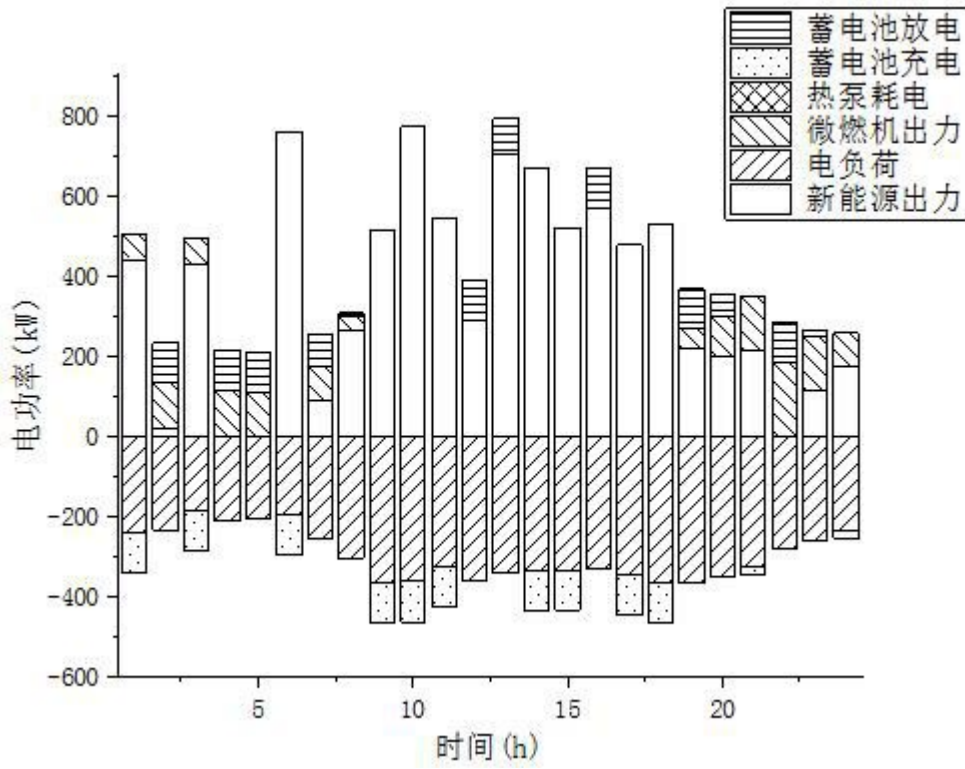


图8

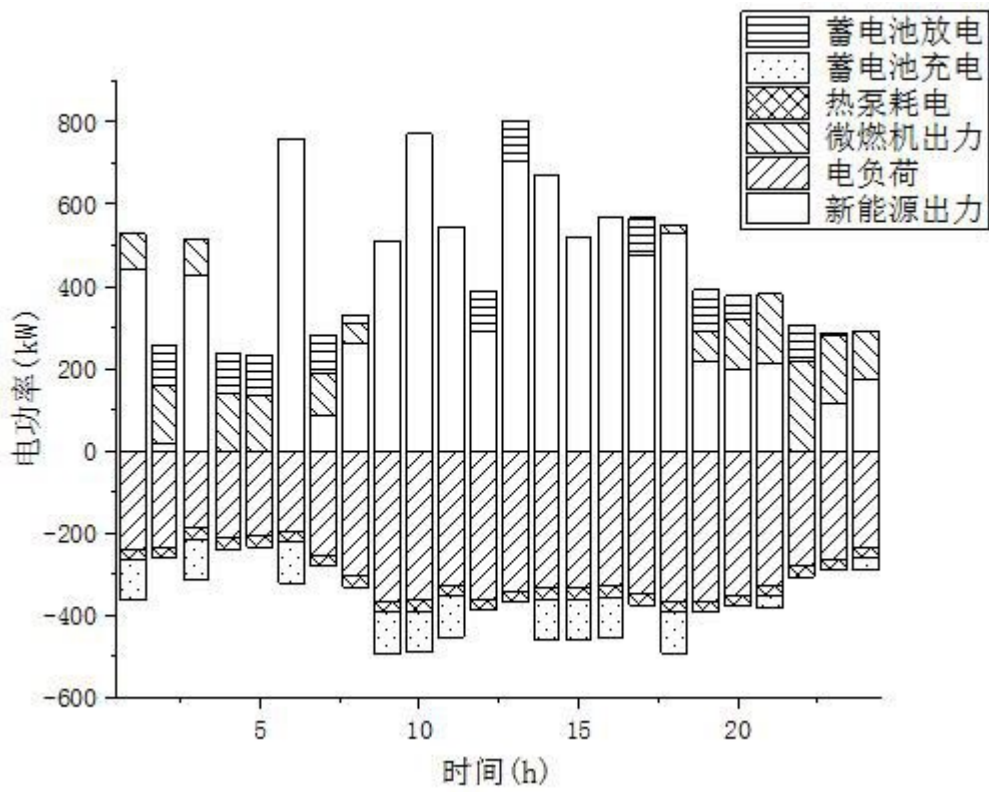


图9

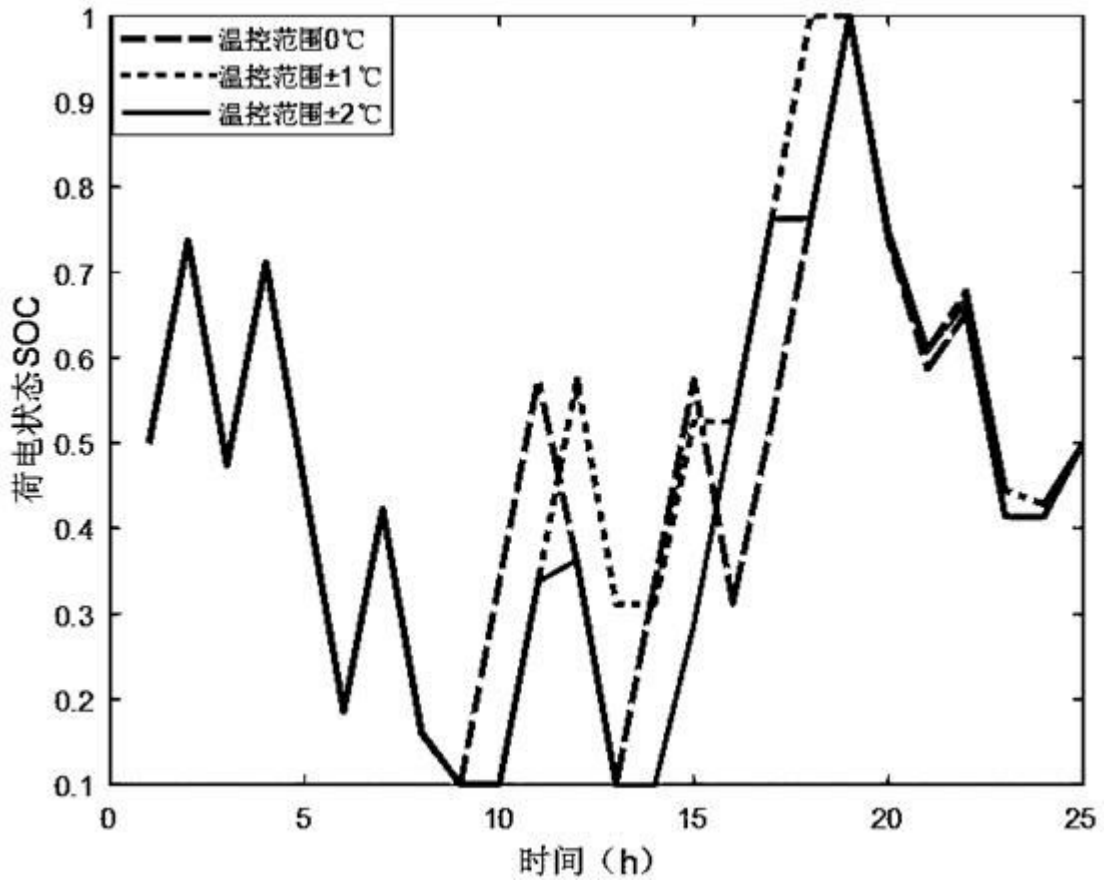


图10