(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 112085263 A
(43)申请公布日 2020.12.15

(21)申请号 202010884046.X

(22)申请日 2020.08.28

(71)申请人 国网山东省电力公司临沂供电公司
地址 276000 山东省临沂市兰山区金雀山路97号
申请人 国网山东省电力公司经济技术研究院
国家电网有限公司

(72)发明人 吴奎华 蒋德玉 冯亮 李沛东 卢志鹏 魏飞 张恒 王士勇 王龙凯 杨国军

(74)专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221
代理人 董雪

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

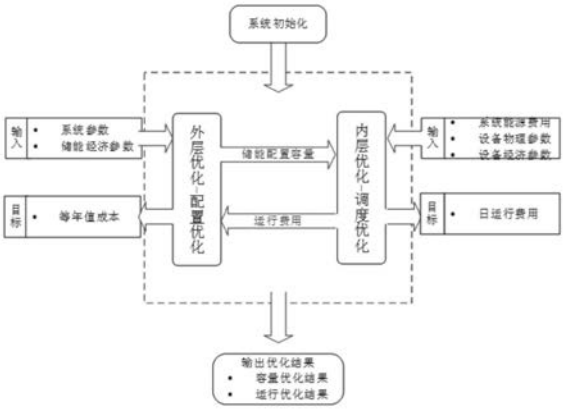
权利要求书2页 说明书17页 附图7页

(54)发明名称

一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法和系统

(57)摘要

本公开公开的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法和系统，包括：采集用户侧分布式能源系统的能源费用，及系统内各单元设备的物理参数和经济参数；对构建好的双层优化配置模型求解，获得系统运行方式和容量配置的最佳调度方案；双层优化配置模型，包含内层调度优化模型和外层规划模型，内层调度优化模型以系统日经济运行成本最小为目标，输出系统运行方式的优化调度和日经济运行成本，外层规划模型以系统全寿命周期内等年值成本最小为目标，输出系统容量配置方案和等年值成本。实现对系统运行方式和容量配置的同时优化调度，且该调度方案满足系统的最优经济运行要求。



CN 112085263 A

1.一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,包括:

采集用户侧分布式能源系统的能源费用,及系统内各单元设备的物理参数和经济参数;

对构建好的双层优化配置模型求解,获得系统运行方式和容量配置的最佳调度方案;

双层优化配置模型,包含内层调度优化模型和外层规划模型,内层调度优化模型以系统日经济运行成本最小为目标,以系统能源费用、系统内各单元设备的物理参数和经济参数,及外层规划模型输出的系统容量配置为输入,输出系统运行方式的优化调度和日经济运行成本,外层规划模型以系统全寿命周期内等年值成本最小为目标,以系统内各单元设备的物理参数和经济参数,及内层调度优化模型的输出为输入,输出系统容量配置方案和等年值成本。

2.如权利要求1所述的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,用户侧分布式能源系统,包括能源生产单元、能源转换单元及混合储能单元,并基于通用母线模型对用户侧分布式能源系统进行整体描述。

3.如权利要求1所述的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,日经济运行成本,包括,日燃料成本、日运行维护成本和日购电成本。

4.如权利要求2所述的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,内层调度优化模型的约束条件,包括等式约束条件和不等式约束条件。

5.如权利要求4所述的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,等式约束条件,包括,母线功率平衡和混合储能单元的储能状态在调度周期始末不变。

6.如权利要求4所述的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,不等式约束条件,包括,

能源生产单元出力在出力的上下限范围内;

能源转换单元的输入功率不超过允许输入功率上限;

混合储能单元的存储能量处于允许的最大最小存储能量之间,充放电功率或充放热功率不超过允许的充放电功率或充放热功率最大值;

联络线功率处于联络线允许通过的最大最小值之间。

7.如权利要求2所述的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,外层规划模型的约束条件,包括:

混合储能单元的安装容量不超过允许的最大安装容量,

系统的日经济运行成本最小。

8.如权利要求1所述的一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法,其特征在于,采用遗传算法求解外层规划模型,具体过程为:

步骤一:数据初始化:包括系统组成与结构参数、设备模型参数、遗传算法参数的输入;

步骤二:种群初始化:随机地产生一个初始种群,其中每个个体对应调度周期内的一个调度计划;

步骤三:根据各种群个体计算种群个体的适应度,其中每个个体的适应度对应一个调度周期的经济成本;

步骤四:将种群个体适应度传递给优化模块,通过锦标赛选择、单点交叉、均匀变异操作,得到子代种群;

步骤五:返回步骤三,直至满足最大遗传代数的要求,输出最终的调度优化方案和最优经济成本。

9.一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置系统,其特征在于,包括:

采集模块,用于采集系统能源费用、设备物理参数、设备经济参数、系统参数和储能经济参数;

模型建立模块,用于建立包含内层调度优化模型和外层规划模型的双层优化配置模型,内层调度优化模型以系统日经济运行成本最小为目标,输出系统运行方式的优化调度和日经济运行成本,外层规划模型以系统全寿命周期内等年值成本最小为目标,输出系统容量配置方案和等年值成本;

求解模块,对建立的双层优化配置模型求解,获得系统运行方式和容量配置的最佳调度方案,及系统的最优经济运行成本。

10.一种计算机可读存储介质,其特征在于,用于存储计算机指令,所述计算机指令被处理器执行时,完成权利要求1-8任一项所述方法的步骤。

一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法和系统

技术领域

[0001] 本公开涉及一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法和系统。

背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本公开相关的背景技术信息，不必然构成在先技术。

[0003] 用户侧分布式能源系统在不同地理分布位置接入城市配电网，可协同调度各类分布式能源，实现能源的互补利用，对提高可再生能源的就地消纳能力，提升能源综合利用效率具有重要意义，相关研究受到了广泛关注。然而，可再生能源出力具有极强的随机特性，加之与负荷的不匹配性加重了系统运行的复杂程度，对系统运行的稳定性、安全性、可靠性提出了挑战。储能系统可打破能量的时间和空间限制，有效平抑可再生能源出力的随机性和波动性，是解决上述问题的有效手段。

[0004] 目前针对用户侧储能系统的优化配置的研究，提出了电池和超级电容器的混合储能系统，由超级电容器辅助电池储能系统进行工作，按照频率特性对系统功率波动进行分段补偿；有研究利用蓄热装置来打破热电联供机组的“以热定电”的约束，使热电联供机组能够运行在热电解耦的工作状态，有效扩大联供机组的功率调节范围，减少了系统弃风量，增大了系统对可再生能源的消纳水平。然而，目前未有对储电/储热混合储能系统协同优化配置的有效方法，由此限制了系统可再生能源利用水平，系统经济性受到了严重影响。

发明内容

[0005] 本公开为了解决上述问题，提出了一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法和系统，通过构建以系统经济性为目标的双层优化配置模型，实现对用户侧分布式能源系统运行方式和容量配置的同时优化调度，且该调度方案满足系统的最优经济运行要求。

[0006] 为实现上述目的，本公开采用如下技术方案：

[0007] 一个或多个实施例提供了一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法，包括：

[0008] 采集用户侧分布式能源系统的能源费用，及系统内各单元设备的物理参数和经济参数；

[0009] 对构建好的双层优化配置模型求解，获得系统运行方式和容量配置的最佳调度方案；

[0010] 双层优化配置模型，包含内层调度优化模型和外层规划模型，内层调度优化模型以系统日经济运行成本最小为目标，以系统能源费用、系统内各单元设备的物理参数和经济参数，及外层规划模型输出的系统容量配置为输入，输出系统运行方式的优化调度和日经济运行成本，外层规划模型以系统全寿命周期内等年值成本最小为目标，以系统内各单元设备的物理参数和经济参数，及内层调度优化模型的输出为输入，输出系统容量配置方

案和等年值成本。

[0011] 一个或多个实施例提供了一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置系统，包括：

[0012] 采集模块，用于采集系统能源费用、设备物理参数、设备经济参数、系统参数和储能经济参数；

[0013] 求解模块，对建立的双层优化配置模型求解，获得系统运行方式和容量配置的最佳调度方案；

[0014] 双层优化配置模型，包含内层调度优化模型和外层规划模型，内层调度优化模型以系统日经济运行成本最小为目标，以系统能源费用、系统内各设备的物理参数和经济参数，及外层规划模型输出的系统容量配置为输入，输出系统运行方式的优化调度和日经济运行成本，外层规划模型以系统全寿命周期内等年值成本最小为目标，以系统内各设备的物理参数和经济参数，及内层调度优化模型的输出为输入，输出系统容量配置方案和等年值成本。

[0015] 一种计算机可读存储介质，用于存储计算机指令，所述计算机指令被处理器执行时，完成上述方法所述的步骤。

[0016] 与现有技术相比，本公开的有益效果为：

[0017] 本公开建立了以系统日经济运行成本最小为目标的内层调度优化模型，和系统全寿命周期内等年值成本最小为目标的外层规划模型，通过对建立的双层规划配置模型求解，实现了对系统运行方式和容量配置的同时优化调度，且在该优化调度方案下，系统具备最优的经济性指标。

附图说明

[0018] 构成本申请的一部分的说明书附图用来提供对本申请的进一步理解，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请，并不构成对本申请的不当限定。

[0019] 图1为典型的用户侧分布式能源系统通用母线式结构图；

[0020] 图2为本公开双层优化配置模型架构图；

[0021] 图3为本公开遗传算法的具体流程；

[0022] 图4为本公开用户侧分布式能源系统混合储能规划案例系统；

[0023] 图5为本公开实施案例母线式结构图；

[0024] 图6是本公开案例夏季各种负荷情况以及光伏出力情况；

[0025] 图7是本公开案例冬季各种负荷情况以及光伏出力情况；；

[0026] 图8是本公开案例春/秋季各种负荷情况以及光伏出力情况；；

[0027] 图9(a)-(d)是本公开案例冬季工作日储能前后功率平衡图；

[0028] 图10(a)-(d)是本公开案例夏季工作日储能前后功率平衡图。

具体实施方式：

[0029] 下面结合附图与实施例对本公开作进一步说明。

[0030] 应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常

理解的相同含义。

[0031] 实施例1

[0032] 在该实施例中，首先建立了用户侧分布式能源系统，包括，能源生产单元模型、能源转换单元模型、混合储能单元模型，并基于通用母线模型对用户侧分布式能源系统进行整体描述。

[0033] 建立的能源生产单元模型包括：燃气锅炉模型、冷热电联供机组模型和光伏发电装置模型，具体为：

[0034] 1)燃气锅炉(GB)

[0035] 燃气锅炉以天然气为燃料，以液体为介质传输热能，是分布式能源系统中的常用的供热设备，燃气锅炉的模型可以用公式(1)表示：

[0036] $H_t^{GB}\Delta t=F_t^{GB}\eta_{GB}$ (1)

[0037] 其中，H_t^{GB}表示t时刻燃气锅炉的向负荷提供的热功率；F_t^{GB}表示燃气锅炉燃烧天然气所消耗的燃料热能；η_{GB}是燃气锅炉的工作效率。同时，燃气锅炉输出功率水平限制可表示为公式(2)，其中H_R^{GB}是燃气锅炉的额定功率：

[0038] $$0\le H_t^{GB}\le H_R^{GB} \quad (2)$$

[0039] 2)冷热电联供机组(CCHP)

[0040] CCHP机组主要由发电机、溴冷机两部分组成。首先天然气在微型燃气轮机中燃烧做功，释放的高品位能量用于电能的生产，同时在溴冷机中对排出的高温烟气进行余热回收利用，供给用户侧的冷、热负荷需求。冷热电联供机组的冷/热电耦合关系，可以表示为机组供电量和供热/冷量关于燃料消耗量的数学函数关系。为了简化问题，本公开采用经过简化后的线性模型，假设热电联供机组每生产一定量的电能时，制冷制热量是一定的，用α_{CCHP1}表示溴冷机制热系数，用α_{CCHP2}表示溴冷机制热系数，另外用η_{CCHP}表示气电转换比：

[0041] $$\begin{aligned} H_t^{CCHP}&=\alpha_{CCHP1}P_t^{CCHP}\\ C_t^{CCHP}&=\alpha_{CCHP2}P_t^{CCHP}\\ P_t^{CCHP}&=F_t^{CCHP}\eta_{CCHP}\end{aligned} \quad (3)$$

[0042] 同时，机组在运行时输出功率水平限制可以表示为公式(4)：

[0043] $$P_{\min}^{CCHP}\le P_t^{CCHP}\le P_{\max}^{CCHP} \quad (4)$$

[0044] 其中，P_{min}^{CCHP}表示联供机组的输出功率下限；P_{max}^{CCHP}表示联供机组的输出功率的上限。

[0045] 3)光伏发电装置(PV)

[0046] 光伏的出力主要是由照射到光伏表面的光照强度、系统的运行工况和光伏物理参数等综合决定的。通常情况下，光伏的输出特性可由一条P-G曲线加以描述，其中P表示光伏的输出功率，G表示光照强度。

[0047] $$P_{PV}=f_{PV}P_{PV,R}\left(\frac{G_T}{G_{T,STC}}\right)[1+\alpha_p(T_{cell}-T_{cell,STC})] \quad (5)$$

[0048] 式中，f_{PV}为光伏的功率降额因数，用以表征光伏表面尘垢和老化等因素引起输出功率下降，一般取0.9；$P_{PV,R}$为光伏峰值容量(kWp)，G_T为实际光照度(kW/m^2)，$G_{T,STC}$为标准测

试条件下的光照度，一般取1kW/m^2；α_p为功率温度系数(%/℃)，T_{cell}为当前光伏的表面温度(℃)，$T_{cell,STC}$为标准测试条件下的光伏温度，一般取25℃。

[0049] 由式(5)可以看出，光伏表面温度对于光伏出力有一定的影响，通常情况下，光伏的运行效率会随光伏表面温度增高而降低。光伏表面温度T_{cell}与环境温度有关，可由下式计算：

[0050]
$$T_{cell}=\frac{T_a+(T_{cell,\mathrm{NOCT}}-T_{\alpha,\mathrm{NOCT}})\left(\frac{G_T}{G_{T,\mathrm{NOCT}}}\right)\left[1-\frac{\eta_{\mathrm{MPP,STC}}\left(1-\alpha_p T_{cell,\mathrm{STC}}\right)}{\tau\alpha_S}\right]}{1+(T_{cell,\mathrm{NOCT}}-T_{a,\mathrm{NOCT}})\left(\frac{G_T}{G_{T,\mathrm{NOCT}}}\right)\left(\frac{\alpha_p\eta_{\mathrm{MPP,STC}}}{\tau\alpha_S}\right)} \tag{6}$$

[0051] 式中，T_a是环境温度(℃)，$T_{cell,NOCT}$是指在标准运行条件下的光伏表面温度，取值范围一般是45℃-48℃，其中，标准运行条件指标准光照度$G_{T,NOCT}$(一般取为0.8kW/m^2)、标准环境温度$T_{\alpha,NOCT}$为20℃、风速为1m/s；$\eta_{MPP,STC}$是标准测试条件下的光伏效率，τ指光伏遮盖物的太阳能透过率，α_S是光伏的太阳能吸收率，即光伏表面能够吸收太阳能的比例，$\tau\alpha_S$的默认值为0.9。

[0052] 建立的能源转换单元模型，包括：热泵模型、电制冷机模型和吸收式制冷机模型，具体为：

[0053] 1)热泵(HP)

[0054] 地源热泵与土壤进行热交换，因而交换效率高于空调等气交换设备。通过少量电能就可以驱动热泵工作，其利用浅层的地热热能，将热能从低温源传递到高温源，具有很高的能源利用效率。其输入输出关系可表示为：

[0055]
$$H_t^{\mathrm{HP}}=\eta_{\mathrm{HP}}P_t^{\mathrm{HP}} \tag{7}$$

[0056] 其中，P_t^{HP}是t时刻向地源热泵输入的电功率；H_t^{HP}是地源热泵向负荷提供的热功率；η_{HP}为地源热泵的制热系数。同时，地源热泵输入电功率的限制可表示为公式(8)：

[0057]
$$0\le P_t^{\mathrm{HP}}\le P_{\max}^{\mathrm{HP}} \tag{8}$$

[0058] 2)电制冷机(EC)

[0059] 电制冷机利用电能制冷，为系统的用户提供冷负荷，其能量交换介质为空气，因而其效率低于地源热泵。其输入输出关系可表示为：

[0060]
$$C_t^{\mathrm{EC}}=\eta_{\mathrm{EC}}P_t^{\mathrm{EC}} \tag{9}$$

[0061] 其中，C_t^{EC}为电制冷机向负荷提供的冷能；η_{EC}为制冷系数；P_t^{EC}分别电制冷机输入电能。同时，电制冷机输入电功率的限制可表示为公式(10)：

[0062]
$$0\le P_t^{\mathrm{EC}}\le P_{max}^{\mathrm{EC}} \tag{10}$$

[0063] 其中，P_{max}^{EC}为电制冷机的额定输入电功率。

[0064] 3)吸收式制冷机(EC)

[0065] 吸收式制冷机通过消耗热能来提供冷能，其输入输出的能量关系式为：

[0066]
$$C_t^{AC,out}=\eta_{\mathrm{AC}}H_t^{AC,in} \tag{11}$$

[0067] $$0 \le H_t^{AC,in} \le H_R^{AC,in} \tag{12}$$

[0068] 其中，$C_t^{AC,out}$表示吸收式制冷机的向负荷提供的冷功率；$H_t^{AC,in}$为输入的热功率；$H_R^{AC,in}$表示吸收式制冷机输入热功率的上限；η_{AC}表示吸收式制冷机的制冷效率。

[0069] 建立的混合储能单元模型包括：蓄电池储能单元模型和蓄热单元模型，具体为：

[0070] 1)蓄电池储能单元模型

[0071] 在本实施例中，采用铅酸电池，蓄电池的功能就类似于一个可以存储能量的容器，电池的充电即容器内注入电能的过程，电池的放电即容器内的电能输出的过程，这个过程是可逆的。电池内部并不是理想化的，存在欧姆内阻和极化内阻，且在电池充放电过程中，伴随着电池化学反应的进程，在电极附近有副反应发生，这些原因导致电池在充放能过程中会产生能量损失，并不是输入多少能量就可以输出多少能量，在该实施例中，采用η_{ech}、η_{edis}分别表示电池的充放电效率来表述这个过程。

[0072] 蓄电池在未投入使用静置时也会产生能量的损耗，是因为电池内部存在少量的电子的迁移，电气迁移运行的结果是构成了局部短路，这种现象即为电池的自放电现象，由于电池负极材料的活性物质比较活泼，所以电池的自放电现象主要发生在电池的负极，铅酸电池的正极的$PbSO_4$是强氧化剂，因而正极的自放电现象很少。如果蓄电池负极电极表面存在金属杂质，当这些金属杂质的电势比氢的电势低，就会在电池负极处形成腐蚀性的微电池，长时间就会引起负极材料溶解，长久会造成铅酸电池的容量衰减，为了表征电池这一特点，在该实施例中用自放电率μ_{ES}表示这个过程。

[0073] 在该实施例中，使用线性模型对蓄电池储能单元模型进行处理，模型中考虑了储能设备的能量损失，使用过程中的充放能损失的情况，得到其模型表示如公式(13)：

[0074] $$E_t^{ES} = (1-\mu_{ES})E_{t-1}^{ES} + (P_t^{ES,ch}\eta_{ech} - \frac{P_t^{ES,dis}}{\eta_{edis}})\Delta t \tag{13}$$

[0075] 其中，E_t^{ES}表示t时刻存储的电能；$P_t^{ES,ch}$表示t时刻蓄电装置的充电功率；$P_t^{ES,dis}$表示t时刻蓄电装置的放电功率；η_{ech}表示蓄电装置的充电效率；η_{edis}表示蓄电装置的放电效率；μ_{ES}表示蓄电装置的电能耗散率，即电池的自放电率；Δt表示充放电的时长。蓄电池充放电功率的上下限可以表示为公式(14)：

[0076] $$\begin{aligned} 0 \le P_t^{ES,ch} \le P_{\max}^{ES,ch} \\ 0 \le P_t^{ES,dis} \le P_{\max}^{ES,dis} \end{aligned} \tag{14}$$

[0077] 其中，$P_{max}^{ES,ch}$表示储能设备充电功率的最大值；$P_{max}^{ES,dis}$表示储能设备放电功率的最大值，不同的是，储能设备除了出力受到约束外，其蓄能的状态，即荷电状态也受到相应的约束。荷电状态σ_t^{ES}的定义如下，Q^{ES}表示蓄电池的额定容量，即安装容量：

[0078] $$\sigma_t^{ES} = \frac{E_t^{ES}}{Q^{ES}} \tag{15}$$

[0079] 存在荷电状态约束：

[0080] $$\sigma_{\min}^{ES} \le \sigma_t^{ES} \le \sigma_{\max}^{ES} \tag{16}$$

[0081] 其中，σ^{ES}_{min}、σ^{ES}_{max}为蓄电池最小、最大荷电状态。为了方便描述，定义最大充/放电

功率同额定储能容量的比值为蓄电池的充放电率(h-1)。$\xi^{ES,ch}{}_{max}$表示蓄电池最大充放电率(h-1),$\xi^{ES,dis}{}_{max}$表示蓄电池最小充放电率(h-1),即:

[0082] $$\begin{aligned} P_{\max}^{\mathrm{ES},ch} &= \zeta_{\max}^{\mathrm{ES,ch}} Q^{\mathrm{ES}} \\ P_{\max}^{\mathrm{ES,dis}} &= \zeta_{\max}^{\mathrm{ES,dis}} Q^{\mathrm{ES}} \end{aligned} \tag{17}$$

[0083] 电池循环使用的过程中会出现容量衰减的现象,频繁的充放电造成的容量衰减尤为明显。为了避免这种情况出现,需对蓄电池的充放电次数进行限制,不允许蓄电池在使用周期内频繁充放电:

[0084] $$\begin{aligned} &\chi_t^{\mathrm{ES},dis} + \chi_t^{\mathrm{ES},ch} = 1 \\ &Y_t^{\mathrm{ES},dis} - Y_t^{\mathrm{ES,ch}} = \chi_{t+1}^{\mathrm{ES},dis} - \chi_t^{\mathrm{ES},dis} \\ &Y_t^{\mathrm{ES},dis} + Y_t^{\mathrm{ES,ch}} \le 1 \\ &\sum_t (Y_t^{\mathrm{ES},dis} + Y_t^{\mathrm{ES,ch}}) \le N \end{aligned} \tag{18}$$

[0085] 综上,蓄电池模型的约束如下:

[0086] $$\begin{aligned} &\sigma_{\min}^{\mathrm{ES}} Q^{\mathrm{ES}} \le E_t^{\mathrm{ES}} \le \sigma_{\max}^{\mathrm{ES}} Q^{\mathrm{ES}} \\ &0 \le P_t^{\mathrm{ES},ch} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{ES},ch} Q^{\mathrm{ES}} \\ &0 \le P_t^{\mathrm{ES},dis} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{ES,dis}} Q^{\mathrm{ES}} \\ &\chi_t^{\mathrm{ES},dis} + \chi_t^{\mathrm{ES},ch} = 1 \\ &Y_t^{\mathrm{ES},dis} + Y_t^{\mathrm{ES},ch} \le 1 \\ &\sum_t (Y_t^{\mathrm{ES},dis} + Y_t^{\mathrm{ES},ch}) \le N \end{aligned} \tag{19}$$

[0087] 由于储能设备的充放能状态不能同时出现,因而用参数$x^{ES,dis}$和$x^{ES,ch}$表示电池的运行状态。$x^{ES,dis}$为1代表蓄电池处于放电状态,$x^{ES,ch}$为1代表蓄电池处于充电状态,二者不能同时为1。参数$Y^{ES,dis}$和$Y^{ES,ch}$表示电池放电转换状态变量和充电转换状态变量。为1表示电池状态发生转换,二者不能同时为1。N为在规划时段内充放互转总数。

[0088] 2)蓄热系统(HS)

[0089] 显热储能是典型的冷/热储能方式,显热储能成本低廉,运行维护简单,本实施例选择储热罐作为热储能设备,选择市场上销售的一种带圆头的立式圆柱形储罐,水箱采用20厘米柔性聚氨基甲酸乙酯泡沫塑料绝缘,导热系数为0.04W/m K。储热罐工作的外特性和蓄电池相似,同样需要考虑储能设备的能量耗散和使用过程中的充放能过程。模型可表示为:

[0090] $$S_t^{\mathrm{HS}} = (1-\mu_{\mathrm{HS}}) S_{t-1}^{\mathrm{HS}} + (H_t^{\mathrm{HS},ch}\eta_{hch} - \frac{H_t^{\mathrm{HS,dis}}}{\eta_{hdis}})\Delta \mathrm{t} \tag{20}$$

[0091] 储热罐模型约束如下:

[0092] $$\sigma_{\min}^{\mathrm{HS}} Q^{\mathrm{HS}} \le S_t^{\mathrm{HS}} \le \sigma_{\max}^{\mathrm{HS}} Q^{\mathrm{HS}} \tag{21}$$

[0093] $$0 \le H_t^{\mathrm{HS},ch} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{HS,ch}} Q^{\mathrm{HS}} \tag{22}$$

[0094] $$0 \le H_t^{\mathrm{HS},dis} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{HS,dis}} Q^{\mathrm{HS}} \tag{23}$$

[0095] 其中，S_t^{HS}表示t时刻存储的热能；$H_t^{HS,ch}$表示t时刻蓄热设备的充热功率；$H_t^{HS,dis}$表示t时刻蓄热设备的放热功率；η_{hch}表示蓄热设备的充热效率；η_{hdis}表示蓄热设备的放热效率；μ_{HS}表示热能的耗散率，即自放热率；Δt表示充放热的时长；σ^{HS}_{min}、σ^{HS}_{max}表示储热罐最小、最大储能状态；$\xi^{HS,ch}_{max}$表示储热罐最大充放热率(h^{-1})；$\xi^{HS,dis}_{max}$表示储热罐最小充放热率(h^{-1})。

[0096] 建立的通用母线模型，包括：电母线功率平衡模型、热母线功率平衡模型、冷母线功率平衡模型和烟气母线功率平衡模型，具体为：

[0097] 使用通用母线式结构对分布式能源系统进行描述，母线按照能量传递介质，可分为：电、烟气、蒸汽、热水、空气等类型；设备依据其在系统能量转换过程中，所发挥的作用可分为4种类型：源、转换装置、储能和负荷。图1是一个典型的用户侧分布式能源系统母线式结构图，从图中可以看出，通用母线式结构的应用清楚明了体现了各设备的连接方式，直观反映出整个系统中的能量流动方向，以及各类能量的耦合关系，有效保证了系统建模的通用性和灵活性，有助于分析系统的能量平衡约束。系统内能量流动平衡关系表达如下：

[0098] 1)电母线功率平衡方程：

[0099] $$P_t^{grid}+P_t^{CHP}+P_t^{PV}+P_t^{ES,dis}=P_t^{EL}+P_t^{ES,ch}+P_t^{EC} \quad (24)$$

[0100] 其中，等式中各项从左至右依次为电网功率、联供机组出力、光伏功率、电池放电功率、电负荷、电池充电功率、电制冷机耗电功率。

[0101] 2)热母线功率平衡方程：

[0102] $$H_t^{GB}+H_t^{HS,dis}+H_t^{HR,out}=H_t^{HL}+H_t^{HS,ch} \quad (25)$$

[0103] 其中，等式中各项从左至右依次为锅炉产热功率、储热罐放热功率、余热锅炉放热功率、热负荷功率、储热罐吸收热功率。

[0104] 3)冷母线功率平衡方程：

[0105] $$C_t^{EC}+C_t^{AC,out}=C_t^{CL} \quad (26)$$

[0106] 其中，等式中各项从左至右依次为电制冷机制冷功率、蓄冰装置放冷功率、冷负荷功率。

[0107] 4)烟气母线功率平衡方程式：

[0108] $$\alpha_{CHP}P_t^{CHP}=H_t^{AC,in}+H_t^{HR,in} \quad (27)$$

[0109] 其中，等式中各项从左至右依次为CHP机组的烟气功率、吸收式制冷机、余热回收器烟气功率。

[0110] 为了实现对用户侧分布式能源系统运行方式和容量配置的同时优化调度，提出了一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法，具体包括：

[0111] 采集用户侧分布式能源系统的能源费用，及系统内各单元设备的物理参数和经济参数；

[0112] 对构建好的双层优化配置模型求解，获得系统运行方式和容量配置的最佳调度方案；

[0113] 双层优化配置模型，包含内层调度优化模型和外层规划模型，内层调度优化模型以系统日经济运行成本最小为目标，以系统能源费用、系统内各单元设备的物理参数和经济参数，及外层规划模型输出的系统容量配置为输入，输出系统运行方式的优化调度和日

经济运行成本，外层规划模型以系统全寿命周期内等年值成本最小为目标，以系统内各单元设备的物理参数和经济参数，及内层调度优化模型的输出为输入，输出系统容量配置方案和等年值成本。

[0114] 包含内层调度优化模型和外层规划模型的双层优化配置模型，具体为：

[0115] 以系统的经济性指标为目的，综合考虑系统各项约束的条件下，确定系统的混合储能最优配置。在进行优化的过程中，由于调度策略将对优化结果产生重要影响，因而需要将设备的全生命周期的经济性纳入考虑范围，获得数学表达如下：

[0116]
$$\begin{aligned} &\min F(X,Y) \\ &s.t \quad X,Y \in \Omega \\ &\qquad A(X,Z)=0 \\ &\qquad B(X,Z)\le 0 \end{aligned} \tag{28}$$

[0117] 其中，F为双层模型的目标函数，X为调度优化向量，Y为规划优化向量，A为等式约束集，B为不等式约束集，分布式能源系统考虑的主要约束如下：

[0118] 1)母线功率平衡约束：公式(24)-(27)；

[0119] 2)设备模型约束：公式(1)-(23)；

[0120] 将规划运行双层优化问题分解为两个优化问题的组合，将运行优化问题视为规划优化问题的子问题，得到包含内层调度优化模型和外层规划模型的双层优化配置模型，模型数学表达如下：

[0121]
$$\begin{aligned} &\min F_1(Z) \\ &s.t \\ &\quad \begin{cases} \min F_2(X) \\ s.t \quad X \in \Omega_2 \\ \qquad G_2(X,Z)=0 \\ \qquad H_2(X,Z)\le 0 \end{cases} \\ &\quad Z \in \Omega_1 \\ &\quad G_1(X,Z)=0 \\ &\quad H_1(X,Z)\le 0 \end{aligned} \tag{29}$$

[0122] 内层调度优化模型的目标函数是系统日经济运行成本最小，其数学形式表达为：

[0123]
$$\begin{aligned} &\min F(X) \\ &s.t \quad X \in \Omega \\ &\qquad A(X)=0 \\ &\qquad B(X)\le 0 \end{aligned} \tag{30}$$

[0124] 其中，X表示调度决策向量，F表示目标函数，Ω表示调度决策向量的取值范围，A为等式约束集，B为不等式约束集，包含系统设备和系统的各类约束。以下公式中t∈{1,2,3,…,24}。

[0125] 1)目标函数

[0126] 调度优化模型以日经济运行成本最低作为模型的目标函数：

[0127] $\min F(x) = c_{fuel} + c_{om} + c_{grid}$ (31)

[0128] 其中，c_{fuel}表示日燃料成本；c_{om}表示日运行维护成本；c_{grid}表示日购电成本。单位均为元。

[0129] 日燃料成本指CHP联供机组、燃气锅炉的日消耗天然气成本，其中C_f为天然气的价格：

[0130] $$c_{fuel} = C_f \sum_t \left(\frac{H_t^{GB} \Delta t}{\eta_{GB}} + \frac{P_t^{CHP} \Delta t}{\eta_{CHP}} \right) \quad (32)$$

[0131] 日运行维护成本涉及系统内全部设备，不仅包括新安装的储能设备，也包括系统中已有的设备运行维护成本，其中$\Omega_{i,t}^{om}$为第i个设备t时刻的出力；ω_i^{om}第i个设备的单位输出运维成本：

[0132] $$c_{om} = \sum_{t,i} (\Omega_{t,i}^{out} \omega_i^{om}) \quad (33)$$

[0133] 当系统本地能源不足以满足系统负荷的用能需求时，需要向配电网买市电，当此时购电成本为正；当系统分布式能源充足且有余量时可以通过市电网的联络线将电能售出以获得收益，此时的购电成本为负，该项成本表示为：

[0134] $$c_{grid} = \sum_t (P_t^{grid} \omega_t^{grid}) \quad (34)$$

[0135] 其中P_t^{grid}、ω_t^{grid}分别为t时刻向电网的购电量和电价。

[0136] 2)等式约束条件

[0137] 基于通用母线模型的分布式能源系统内层调度优化模型的等式约束条件包括公式(24)-(27)的母线的功率平衡约束，以及设备模型中的等式约束。此外，保证混合储能装置储能量的周期性和时段耦合特性，加入等式约束(35)表示储能设备储能状态在调度周期始末不变：

[0138] $$\begin{cases} E_{t_0}^{ES} = E_{t_N}^{ES} \\ S_{t_0}^{HS} = S_{t_N}^{HS} \end{cases} \quad (35)$$

[0139] 其中，E、S、t_0、t_N分别表示电储能量、热储能量、调度周期的初始时刻、调度周期的结束时刻。

[0140] 3)不等式约束条件

[0141] 基于通用母线模型的分布式能源系统内层调度优化模型的不等式约束条件包括公式(1)-(23)中的设备模型的不等式约束，具体为：能源生产单元出力在出力的上下限范围内；能源转换单元的输入功率不超过允许输入功率上限；混合储能单元的存储能量处于允许的最大最小存储能量之间，充放电功率或充放热功率不超过允许的充放电功率或充放热功率最大值等。此外需要考虑系统与配电网的联络线的功率约束，该约束是由线路建设等原因造成的：

[0142] $$P_{\min}^{grid} \le P_t^{grid} \le P_{\max}^{grid} \quad (36)$$

[0143] 其中，$P_{\max}^{grid}$表示联络线允许通过功率的最大值；$P_{\min}^{grid}$表示联络线功率的最小值，其中最小值可以为负，其正负分别表示购电和售电。

[0144] 4)优化变量

[0145] 调度周期t的优化变量X^n为系统内各类设备的出力以及电网购售电量：

[0146]
$$X^n \subseteq \{P_t^{grid}, P_t^{\mathrm{CHP}}, H_t^{\mathrm{GB}}, P_t^{\mathrm{ES},dis}, P_t^{\mathrm{ES},ch}, H_t^{HS,\mathrm{dis}}, H_t^{\mathrm{HS},ch}, H_t^{\mathrm{HR},in}, H_t^{\mathrm{HR},out}, C_t^{\mathrm{EC}}, P_t^{\mathrm{EC}}, C_t^{\mathrm{AC}}, H_t^{\mathrm{AC}}, \chi^{\mathrm{CHP}}, \chi^{\mathrm{ES}}, \chi^{\mathrm{HS}}\} \tag{37}$$

[0147] 利用等式约束集中存在独立的等式约束对上述变量进行降维简化。考虑到设备模型，能量转换设备的输入输出变量可以消去其中任意一个，则可得最终调度时刻t的优化变量为：

[0148]
$$X^n \subseteq \{P_t^{grid}, P_t^{\mathrm{CHP}}, H_t^{\mathrm{GB}}, P_t^{\mathrm{ES},\mathrm{dis}}, P_t^{\mathrm{ES},ch}, H_t^{HS,\mathrm{dis}}, H_t^{\mathrm{HS},ch}, H_t^{\mathrm{HR},in}, P_t^{\mathrm{EC}}, H_t^{\mathrm{AC}}, \chi^{\mathrm{CHP}}, \chi^{\mathrm{ES}}, \chi^{\mathrm{HS}}\} \tag{38}$$

[0149] 综上可得到内层调度优化模型，单目标分布式能源系统调度优化的具体表达如下：

[0150]
$$\min F(\mathrm{x}) = c_{fuel} + c_{om} + c_{grid} + c_{es}$$

$$s.t.\begin{cases} P_t^{grid} + P_t^{\mathrm{CHP}} + P_t^{\mathrm{PV}} + P_t^{\mathrm{ES},dis} = P_t^{\mathrm{L}} + P_t^{\mathrm{ES},ch} + P_t^{EC} \\ H_t^{\mathrm{GB}} + \alpha_{\mathrm{HR}} H_t^{\mathrm{HR},in} + H_t^{\mathrm{HS},dis} = H_t^{\mathrm{L}} + H_t^{\mathrm{HS},ch} \\ \eta_{\mathrm{EC}} P_t^{\mathrm{EC}} + \eta_{AC} P_t^{AC,in} = C_t^{\mathrm{L}} \\ \alpha_{\mathrm{CHP}} P_t^{\mathrm{CHP}} = H_t^{AC,in} + H_t^{HR,in} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 \le H_t^{\mathrm{GB}} \le H_R^{\mathrm{GB}} \\ \chi^{\mathrm{CHP}} P_{\min}^{\mathrm{CHP}} \le P_t^{\mathrm{CHP}} \le \chi^{\mathrm{CHP}} P_{\max}^{\mathrm{CHP}} \\ 0 \le P_t^{\mathrm{EC}} \le P_{\max}^{\mathrm{EC}} \\ 0 \le H_t^{AC} \le H_{\max}^{AC} \\ 0 \le H_t^{HR,in} \le H_{\max}^{HR,in} \\ 0 \le P_t^{\mathrm{ES},dis} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{ES},dis} Q^{\mathrm{ES}} \\ 0 \le P_t^{\mathrm{ES},ch} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{ES},ch} Q^{\mathrm{ES}} \\ \sigma_{\min}^{\mathrm{ES}} Q^{\mathrm{ES}} \le (1-\mu_{\mathrm{ES}}) E_{t-1}^{\mathrm{ES}} + (P_t^{\mathrm{ES},ch}\eta_{ech} - \dfrac{P_t^{\mathrm{ES},dis}}{\eta_{edis}})\Delta t \le \sigma_{\max}^{\mathrm{ES}} Q^{\mathrm{ES}} \\ 0 \le H_t^{\mathrm{HS},ch} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{HS},ch} Q^{\mathrm{HS}} \\ 0 \le H_t^{\mathrm{HS},dis} \le \zeta_{\max}^{\mathrm{HS},dis} Q^{\mathrm{HS}} \\ \sigma_{\min}^{\mathrm{HS}} Q^{\mathrm{HS}} \le (1-\mu_{\mathrm{HS}}) S_{t-1}^{\mathrm{HS}} + (H_t^{\mathrm{HS},ch}\eta_{hch} - \dfrac{H_t^{\mathrm{HS},\mathrm{dis}}}{\eta_{hdis}})\Delta t \le \sigma_{\max}^{\mathrm{HS}} Q^{\mathrm{HS}} \\ P_{\min}^{grid} \le P_t^{grid} \le P_{\max}^{grid} \end{cases} \tag{39}$$

[0151] 将上述问题表述为0-1混合整数线性规划模型的一般形式：

$$\begin{aligned}&\min F(\mathrm{X})=U^{T}X\\&s.t.\ \ AX=b\\&\quad CX\le d\\&\quad X_i^{\min}\le X_i\le X_i^{\max}\ \ i\in I\\&\quad X(j)\in\{0,1\}\qquad j\in J\end{aligned}\tag{40}$$

[0152]

[0153] 在优化向量X^n中，增加了t时段的储能量$[E_t^{ES},S_t^{HS}]$以方便模型程序化，可得最终优化变量为：

$$\begin{aligned}X^n\subseteq\{&P_t^{grid},P_t^{\mathrm{CHP}},H_t^{\mathrm{GB}},P_t^{\mathrm{ES,dis}},P_t^{ES,ch},H_t^{HS,\mathrm{dis}},H_t^{\mathrm{HS},ch},H_t^{\mathrm{HR},in},\\&P_t^{\mathrm{EC}},H_t^{\mathrm{AC}},E_t^{\mathrm{ES}},S_t^{\mathrm{HS}},\chi^{\mathrm{CHP}},\chi^{\mathrm{ES}},\chi^{\mathrm{HS}}\}\end{aligned}\tag{41}$$

[0154]

[0155] 外层规划模型的目标函数是系统全寿命周期内等年值成本最小构建单目标优化模型。

[0156] 系统全寿命周期内等年值成本最小的目标函数为：

[0157] $\min\ F(z)=C_{cap}+C_{fuel}+C_{om}+C_{grid}$ (42)

[0158] 其中，C_{cap}表示储能设备等年值投资成本；C_{fuel}表示年燃料成本；C_{om}表示年运行维护成本；C_{grid}表示年购电成本，单位均为元。

[0159] 等年值投资成本即在系统内购买安装蓄电池和储热罐的成本，按照其使用寿命，可以将投资费用化成等年值，这里的蓄电池投资成本包含了变流器费用。投资成本是安装容量和单位容量成本的函数，该项成本可表述为：

$$C_{cap}=\sum_i\psi_iQ_i\omega_i^{cap}=\sum_i\frac{\gamma(1+\gamma)^{l_i}}{(1+\gamma)^{l_i}}Q_i\omega_i^{cap}\tag{43}$$

[0160]

[0161] 其中，ψ_i为储能设备的资金回收率；γ为贴现率；l_i为储能设备的运行寿命期望值年；Qi为储能设备的安装容量；ω_i^{cap}为储能设备的单位容量成本。

[0162] 年燃料成本表示如下：

$$C_{fuel}=C_f\sum_dN^d\sum_t\left(\frac{H_{t,d}^{\mathrm{GB}}\Delta t}{\eta_{\mathrm{GB}}}+\frac{P_{t,d}^{\mathrm{CHP}}\Delta t}{\eta_{\mathrm{CHP}}}\right)\tag{44}$$

[0163]

[0164] 年运行维护成本如下：

$$C_{om}=\sum_dN^d\sum_{t,i}(\Omega_{t,i,d}^{out}\omega_i^{om})\tag{45}$$

[0165]

[0166] 年购电成本表示为：

$$C_{grid}=\sum_dN^d\sum_t(P_{t,d}^{grid}\omega_t^{grid})\tag{46}$$

[0167]

[0168] 外层规划模型的约束条件包括：

[0169] (1)内层调度优化模型获得的系统的日经济运行成本最小。

[0170] (2)受系统场地限制，储能投资容量存在约束，其中Q表示储能的安装容量：

$$\begin{cases}0\le Q^{\mathrm{ES}}\le Q_{\max}^{\mathrm{ES}}\\0\le Q^{\mathrm{HS}}\le Q_{\max}^{\mathrm{HS}}\end{cases}\tag{47}$$

[0171]

[0172] 内层调度优化模型和外层规划模型合并，形成双层优化配置模型，内层调度优化

模型和外层规划模型的关系如图2所示，内层调度优化模型输出的系统运行方式的优化调度和日经济运行成本作为外层规划模型的输入，外层规划模型输出的系统容量配置作为内层调度优化模型的输入。

[0173] 采用遗传算法求解外层规划模型，遗传算法是一种智能算法，具体流程如图3所示：

[0174] 步骤一：数据初始化：包括系统组成与结构参数、设备模型参数、遗传算法参数的输入。

[0175] 步骤二：种群初始化：随机地产生一个初始种群，其中每个个体对应调度周期内的一个调度计划。

[0176] 步骤三：根据各种群个体计算种群个体的适应度，其中每个个体的适应度对应一个调度周期的经济成本。

[0177] 步骤四：将种群个体适应度传递给优化模块，通过锦标赛选择、单点交叉、均匀变异操作，得到子代种群。

[0178] 步骤五：返回步骤三，直至满足最大遗传代数的要求。输出最终的调度优化方案和最优经济成本。

[0179] 在该实施例中，建立了用户侧分布式能源系统模型，包括能源生产单元、转换单元、混合储能单元模型；提出一种面向可再生能源消纳的用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法，在全寿命周期内对电/热混合储能系统进行优化配置，面向高比例可再生能源接入情况下，用户侧分布式能源系统电/热混合储能的优化配置，利用双层优化配置方法对混合储能容量和系统运行方式进行同时优化，实现了电/热混合储能的协同优化配置，对系统经济性和可再生能源消纳水平提升有重要应用价值。

[0180] 将一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置方法应用于如图4所示的用户侧分布式能源系统混合储能的规划中，负荷数据取自一个中等规模的用户分布式能源系统，系统采用夏季供冷，冬季供暖的运行模式，负荷种类包括冷、热、纯电三种负荷。其中，纯电负荷包括实验室用电、消防用电、办公楼照明等负荷组成；热负荷为冬季供暖负荷；冷负荷主要包括夏季系统建筑制冷。该系统的母线式结构图如图5所示。CCHP联供机组夏季供冷、供电；冬季供热、供电。其中，光伏、CCHP、热泵、电制冷机是系统已有设备，其容量是已知的，储热罐和蓄电池是需要新安装配置的设备，容量未知。储热罐可冬季蓄热，夏季蓄冷。

[0181] 为便于系统分析，选定项目年限为10年，选取0.06为年利率。光伏最大出力可到500kW，系统具有较高可再生能源渗透率。遗传算法的种群规模设定为40个体，最大迭代次数设定为20代，设定遗传算子交叉、变异概率分别设定为0.9和0.4。算例将一年分为三个季度：夏季、冬季、春/秋季。每个季度分为工作日和休息日，每个典型日以一小时为数据采样长度，共24*6组数据代表全年各项数据情况，图6到图8为三个季度下的各种负荷情况以及光伏出力情况。系统内设备的经济参数和物理参数分别为表1和表2。

[0182] 表1设备参数经济参数

[0183]

设备类型	初始投资元/（kW·h）	运行维护元/kW
蓄电池	1000	0.026
储热罐	30	0.013
燃气锅炉	-	0.049
电制冷机	-	0.04
光伏	-	0.039
CCHP	-	0.1
地源热泵	-	0.1

[0184] 表2设备物理参数

[0185]

设备类型	参数	数值	寿命/年
蓄电池	自放电率	0.04	10
	最大充电率	0.4	
	最大放电率	0.4	
	充电效率	0.95	
	放电效率	0.95	
	SOC 上限	0.8	
	SOC 下限	0.2	
储热罐	自放热率	0.06	20
	最大蓄热率	0.3	
	最大放热率	0.3	
	蓄热效率	0.9	
	放热效率	0.9	
	储能水平上限	1	
	储能水平下限	0.1	

[0186]

燃气锅炉	制热效率	0.8	20
电制冷机	能效比	3.1	10
CCHP	制冷系数	1.36	20
	制热系数	1.2	
	最低负载率	0.3	
地源热泵	制热能效比	3.8	20
光伏	-	-	20

[0187] 表3分时电价

[0188]

时段	电价（元/kWh）
峰时段（10：00-15：00和18：00-21：00）	1.35
平时段（7：00-10：00和15：00-18：00和21：00-23：00）	0.90
谷时段（0：00-07：00和23：00-24：00）	0.47

[0189] 本案例中，设定分布式能源系统与电网的联络功率不能倒送，即不允许系统向电网卖电，天然气价格为3.45元/m^3，单位热值价格为0.349(元/kWh)，电价方案采用分时电价，如表3所示。

[0190] 构建的模型，外层用于规划系统安装电/热混合储能的容量，优化变量为蓄电蓄热的容量，时间尺度为全寿命周期，目标函数为最小化分布式能源系统安装储能设备后的等年值总费用。内层模型为联合调度，用于优化系统典型场景下储能设备以及其他设备的调度值，优化变量为蓄电蓄热的出力以及其他设备的调度值，时间尺度为一个典型日，目标函数为最小化系统安装储能设备后的日调度费用。$i\in\{1,2,3,4,5,6\}$分别系统中6种装置，装置类型如图4所示；$d\in\{1,2,3\}$分别表示三个季度，$m\in\{1,2\}$分别表示工作日、休息日，$N_{d,m,}$表示一个典型季的天数：

$$\min F_1(z) = C_{cap} + C_{fuel} + C_{om} + C_{grid}$$
$$= \sum_{i=1}^{i=2} \frac{\gamma(1+\gamma)^{l_i}}{(1+\gamma)^{l_i}-1} Q_i \omega_i^{cap} + C_f \sum_{d=1}^{d=3} N_{d,m} \sum_{m=1}^{m=2} \sum_{t=1}^{t=24} \left(\frac{H_{t,m,d}^{GB} \Delta t}{\eta_{GB}} + \frac{P_{t,m,d}^{CCHP} \Delta t}{\eta_{CCHP}} \right)$$
$$+ \sum_{i=1}^{i=6} \sum_{d=1}^{d=3} N_{d,m} \sum_{m=1}^{m=2} \sum_{t=1}^{t=24} (\Omega_{t,d,i}^{out} \omega_i^{om} \Delta t) + \sum_{d=1}^{d=3} N_{d,m} \sum_{m=1}^{m=2} \sum_{t=1}^{t=24} (P_{t,d}^{grid} \omega_{t,d}^{grid} \Delta t)$$

s.t.

[0191]

$$\begin{cases} \min F_2(x) = c_{fuel} + c_{om} + c_{grid} \\ C_f \sum_{t=1}^{t=24} \left(\frac{H_t^{GB} \Delta t}{\eta_{GB}} + \frac{P_t^{CCHP} \Delta t}{\eta_{CCHP}} \right) + \sum_{i=1}^{i=6} \sum_{t=1}^{t=24} (\Omega_{t,i}^{out} \omega_i^{om} \Delta t) + \sum_{t=1}^{t=24} (P_t^{grid} \omega_t^{grid} \Delta t) \\ s.t. \\ \begin{cases} S_t^{HS} = (1-\mu_{HS}) S_{t-1}^{HS} + (H_t^{HS,ch} \eta_{hch} - \frac{H_t^{HS,dis}}{\eta_{hdis}}) \Delta t \\ E_t^{ES} = (1-\mu_{ES}) E_{t-1}^{ES} + (P_t^{ES,ch} \eta_{ech} - \frac{P_t^{ES,dis}}{\eta_{edis}}) \Delta t \\ P_t^{grid} + P_t^{CCHP} + P_t^{PV} + P_t^{ES,dis} = P_t^{L} + P_t^{ES,ch} + P_t^{EC} + P_t^{HP} \\ \alpha_{CCHP1} P_t^{CCHP} + H_t^{HS,dis} + \eta_{HP} P_t^{HP} = H_t^{L} + H_t^{HS,ch} \\ \eta_{EC} P_t^{EC} + H_t^{HS,c,dis} + \alpha_{CCHP2} P_t^{CCHP} = C_t^{L} + H_t^{HS,c,ch} \\ X_t^{ES,ch} + X_t^{ES,dis} = 1 \\ 0 \le P_t^{HP} \le P_{max}^{HP} \\ X_t^{CCHP} P_{min}^{CCHP} \le P_t^{CCHP} \le P_{max}^{CCHP} X_t^{CCHP} \\ 0 \le P_t^{EC} \le P_{max}^{EC} \\ \sigma_{min}^{ES} Q^{ES} \le E_t^{ES} \le \sigma_{max}^{ES} Q^{ES} \\ 0 \le P_t^{ES,ch} \le (\zeta_{max}^{ES,ch} Q^{ES}) X_t^{ES,ch} \\ 0 \le P_t^{ESS,dis} \le (\zeta_{max}^{ES,dis} Q^{ES}) X_t^{ES,dis} \\ Y_t^{ES,ch} + Y_t^{ES,dis} \le 1 \\ \sum_{t=1}^{t=24} (Y_t^{ES,ch} + Y_t^{ES,dis}) \le N \\ \sigma_{min}^{HS} Q^{HS} \le S_t^{HS} \le \sigma_{max}^{HS} Q^{HS} \\ 0 \le H_t^{HS,ch} \le (\zeta_{max}^{HS,ch} Q^{HS}) X_t^{HS,ch} \\ 0 \le H_t^{HS,dis} \le (\zeta_{max}^{HS,dis} Q^{HS}) X_t^{HS,dis} \\ X_t^{HS,ch} + X_t^{HS,dis} \le 1 \\ 0 \le P_t^{grid} \le P_{max}^{grid} \end{cases} \\ \begin{cases} 0 \le Q^{ES} \le Q_{max}^{ES} \\ 0 \le Q^{HS} \le Q_{max}^{HS} \end{cases} \end{cases} \quad (48)$$

[0192] 为研究电/热储能配置的内在联系和影响因素，进行了多种场景分析，不同场景代表系统原有配置情况不同。CCHP机组选择额定容量为250kW的内燃机。数据表格中CCHP、热泵、电制冷机的容量是系统已有数据，蓄电池、储热罐容量为储能容量优化配置结果。于配

置方案的经济性采用“成本节约”作为指标进行评价。其定义为:成本节约＝初始储能投资+投资储能后系统10年总运行费用-投资储能前系统10年总运行费用。根据表4可知,系统配置储能前夏季、春季和秋季会出现弃光现象,对于配置方案下系统的可再生能源消纳能力本发明采用“弃光率”作为指标进行评价,其定义为:弃光率＝(光伏发电量-负荷实际消纳光伏电量)/光伏发电量。不同场景下储能配置结果如表4。

[0193] 表4混合储能配置结果

[0194]

场景	CCHP/kW	热泵/kW	电制冷机/kW	蓄电/kWh	蓄热/kWh	成本节约/万元	原夏季弃光率/%	现夏季弃光率/%	原秋季弃光率/%	现秋季弃光率/%
1	250	100	200	392.66	198.19	50.05	13	0	9	0
2	250	200	200	273.22	216.22	34.57	11	0	6	0
3	250	300	200	218.36	416.99	43.32	10	0	4	0
4	250	400	200	218.22	421.45	41.78	10	0	4	0
5	250	500	100	215.87	417.98	39.11	10	0	4	0
6	250	300	100	287.89	240.68	40.12	10	0	4	0
7	250	300	300	214.45	446.78	38.67	10	0	4	0
8	250	300	400	212.67	438.74	38.21	10	0	4	0

[0195] 观察图9和图10可知:

[0196] 1.混合储能整体工作在受电价引导的模式下,即电价谷时段充能、峰时段放能,平时段的充放状态,则由前后时刻电价、和负荷状况决定,从而达到了削减电热负荷峰谷差的效果,并参与到系统的联合协同调度中。本案例系统采用蓄电蓄热协调储能策略,使得系统能够工作在热电解耦的状态下,提升了系统调度的灵活性。电/热的协同配置也促进了系统的能流互补。因而,混合储能的配置能够有效提升系统消纳可再生能源的能力。

[0197] 2.夏季多余的光伏电量由电制冷机优先利用进行蓄冷,剩余光伏电量由蓄电池根据负荷及电价情况进行存储。分布式能源系统中的能量转化设备促进了蓄电、蓄热/冷的协同配置。热泵/制冷机电制热/冷实现了能量的转换,储热罐可将热能存储。由于蓄热/冷成本低于蓄电成本,蓄热/冷会优先于蓄电对可再生能源以及低价电进行利用。但这个过程是将高品质能转化为低品质能的过程,不能无限制的进行,蓄热/冷自损耗比蓄电自损耗大,系统会尽量避免储能设备充能后的储能静置而选择即充即放的模式,因而蓄能需根据前后时刻电价、负荷状况决定等情况综合决定。蓄电池可直接存储多余的光伏发电,但由于电储能成本高,蓄电容量主要受到经济性的限制。

[0198] 3.储热罐的储能来自于购进低价电和利用光伏产电进行电制热/冷存储以及CCHP产热/冷直接存储。在夏季,光伏出力大光伏电量有剩余时,电制冷机工作优先利用光电进行电制冷,消纳可再生能源进行储能。

[0199] 4.蓄电池储能来自于购进低价电直接存储和消纳光伏出力,蓄电池在电价较低的5:00-7:00、16:00-18:00时间段充电,随后在电价较高、负荷较高的7:00-9:00、18:00-20:

00放电。在夏季和春/秋季时，蓄电池会在光伏电量由剩余的中午时间段吸收多余的光伏电量进行存储。蓄电池在夏季的出力高于其他季节的出力情况。

[0200] 实施例2

[0201] 在该实施例中，公开了一种用户侧分布式能源系统混合储能优化配置系统，包括：

[0202] 采集模块，用于采集系统能源费用、设备物理参数、设备经济参数、系统参数和储能经济参数；

[0203] 模型建立模块，用于建立包含内层调度优化模型和外层规划模型的双层优化配置模型，内层调度优化模型以系统日经济运行成本最小为目标，输出系统运行方式的优化调度和日经济运行成本，外层规划模型以系统全寿命周期内等年值成本最小为目标，输出系统容量配置方案和等年值成本；

[0204] 求解模块，对建立的双层优化配置模型求解，获得系统运行方式和容量配置的最佳调度方案，及系统的最优经济运行成本。

[0205] 实施例3

[0206] 在该实施例中，公开了一种计算机可读存储介质，用于存储计算机指令，计算机指令被处理器执行时，完成实施例1中公开的配置方法的步骤。

[0207] 以上仅为本申请的优选实施例而已，并不用于限制本申请，对于本领域的技术人员来说，本申请可以有各种更改和变化。凡在本申请的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本申请的保护范围之内。

[0208] 上述虽然结合附图对本公开的具体实施方式进行了描述，但并非对本公开保护范围的限制，所属领域技术人员应该明白，在本公开的技术方案的基础上，本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本公开的保护范围以内。

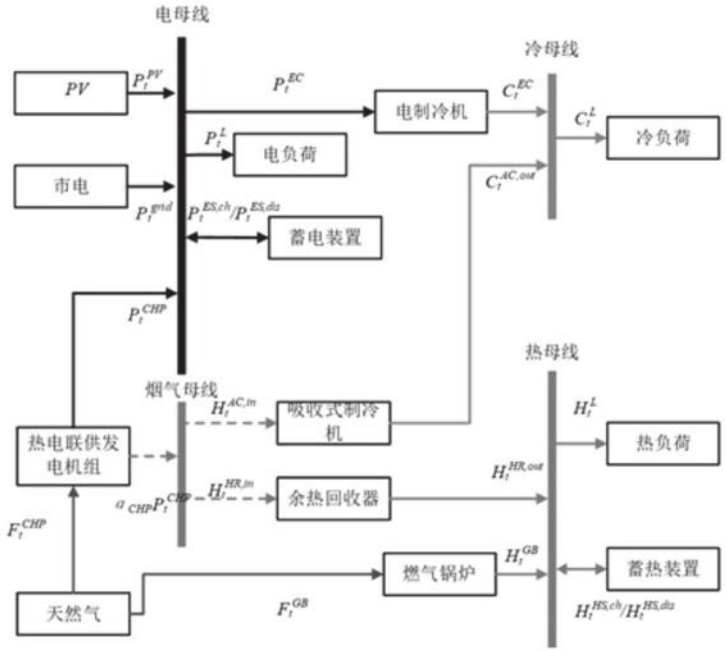

电母线
冷母线
PV
电制冷机
电负荷
冷负荷
市电
蓄电装置
烟气母线
吸收式制冷机
热母线
热负荷
热电联供发电机组
余热回收器
燃气锅炉
蓄热装置
天然气

图1

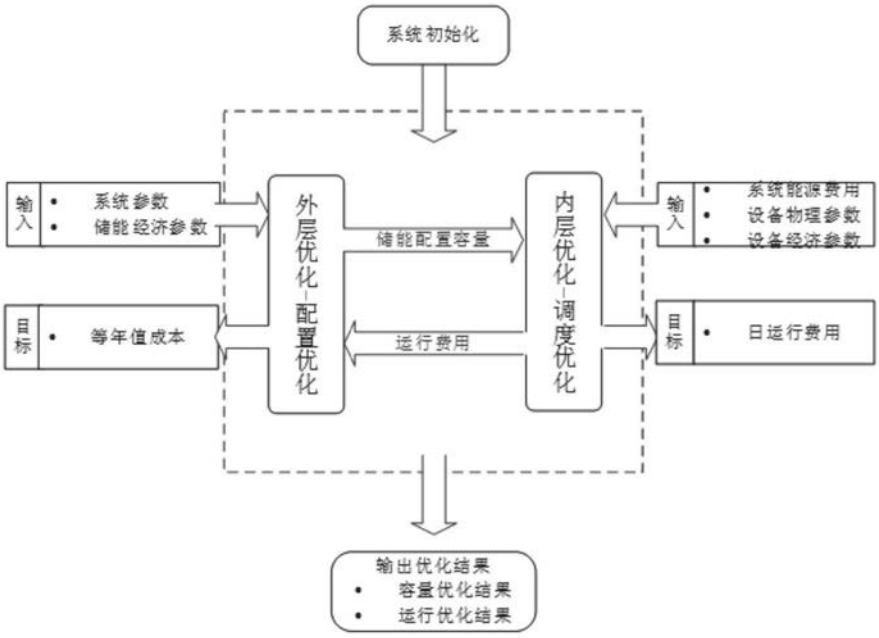

系统初始化
输入
系统参数
储能经济参数
外层优化—配置优化
储能配置容量
运行费用
内层优化—调度优化
输入
系统能源费用
设备物理参数
设备经济参数
目标
等年值成本
目标
日运行费用
输出优化结果
容量优化结果
运行优化结果

图2

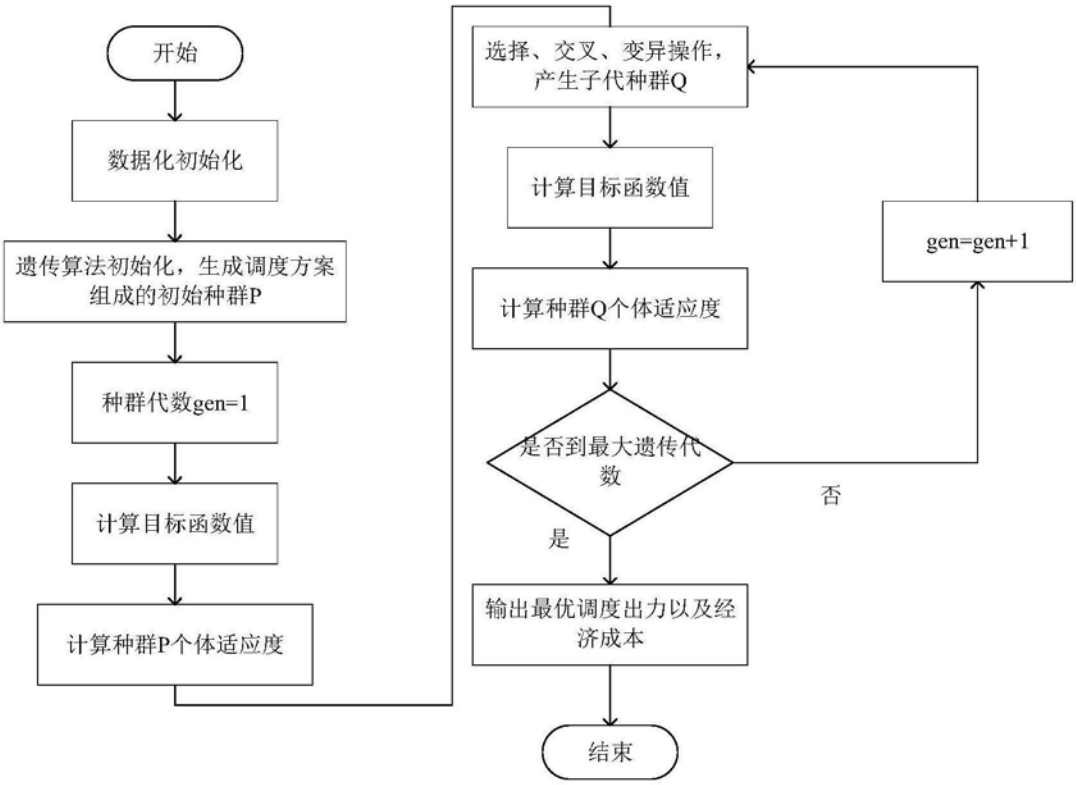

开始
数据化初始化
遗传算法初始化，生成调度方案组成的初始种群P
种群代数gen=1
计算目标函数值
计算种群P个体适应度
选择、交叉、变异操作，产生子代种群Q
计算目标函数值
计算种群Q个体适应度
是否到最大遗传代数
否
是
gen=gen+1
输出最优调度出力以及经济成本
结束

图3

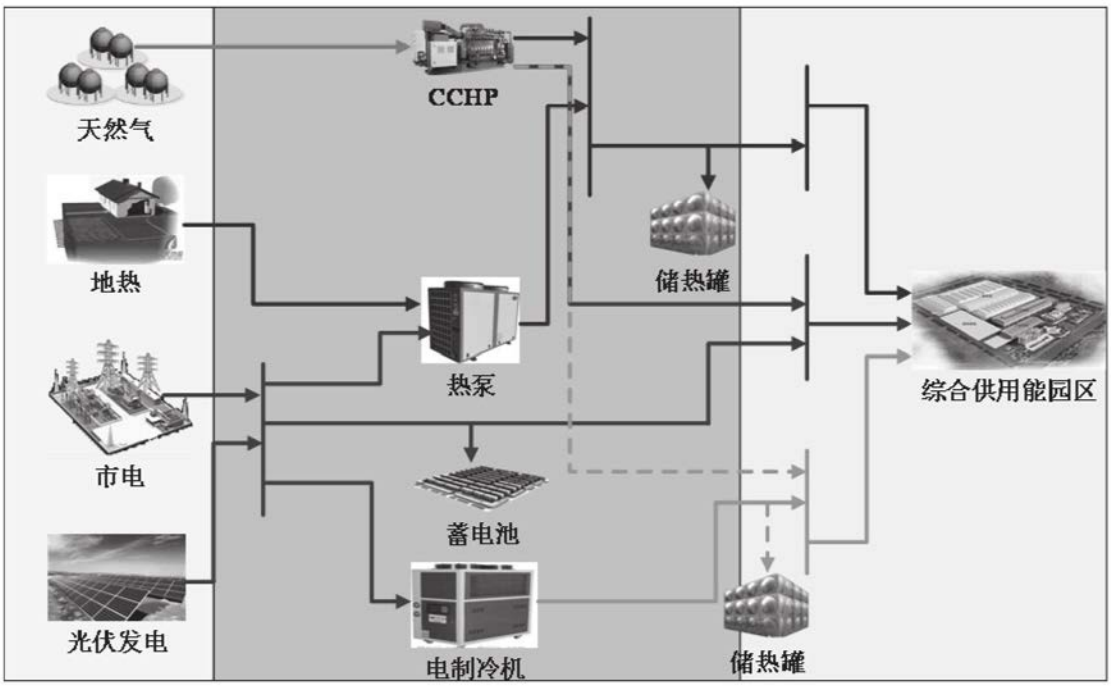

天然气
地热
市电
光伏发电
CCHP
储热罐
热泵
蓄电池
电制冷机
储热罐
综合供用能园区

图4

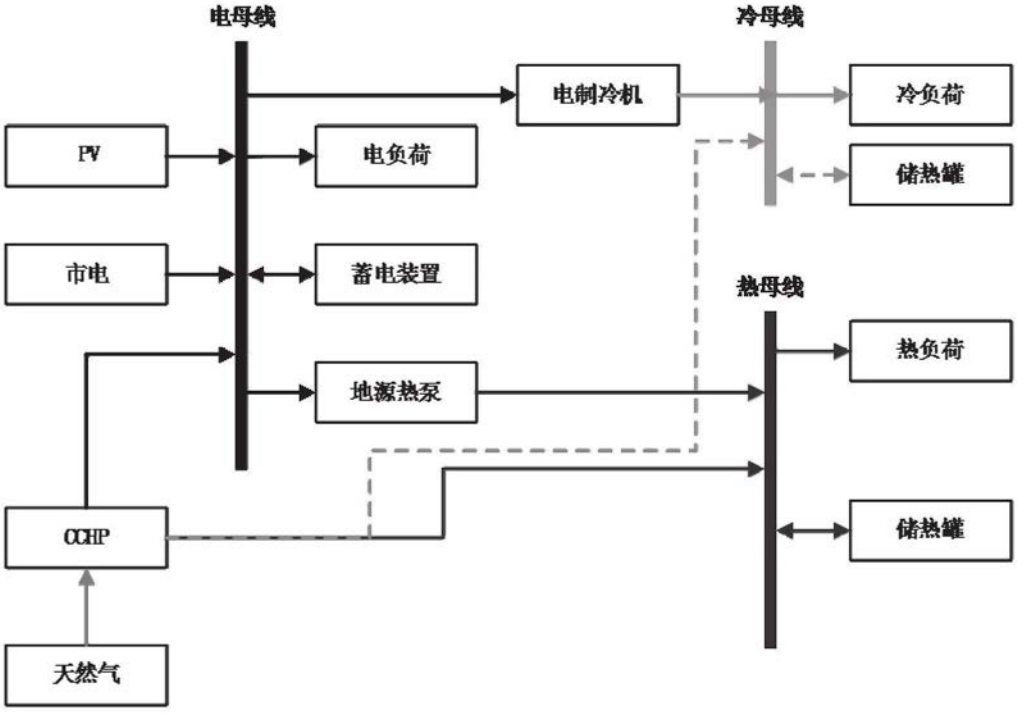

电母线
冷母线
电制冷机
冷负荷
PV
电负荷
储热罐
市电
蓄电装置
热母线
热负荷
地源热泵
CCHP
储热罐
天然气

图5

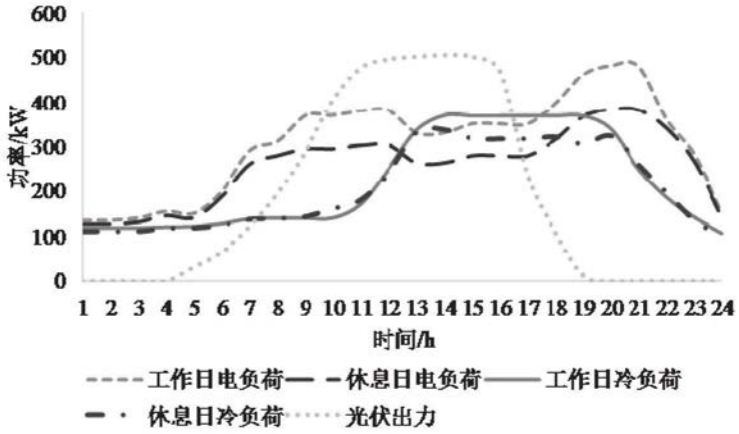

600
500
400
300
200
100
0
功率/kW
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
时间/h
工作日电负荷
休息日电负荷
工作日冷负荷
休息日冷负荷
光伏出力

图6

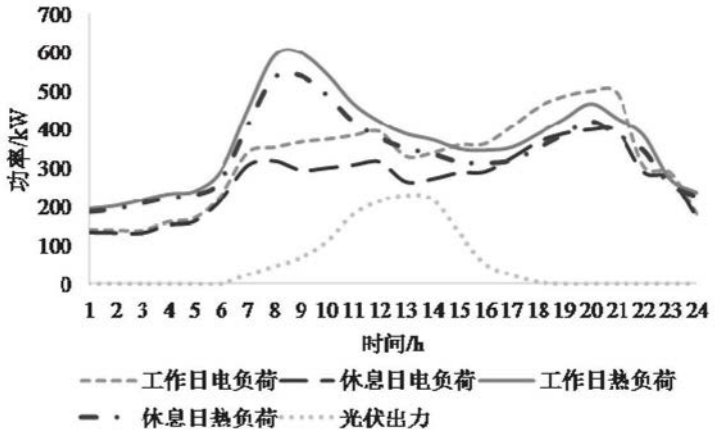

功率/kW
时间/h
工作日电负荷
休息日电负荷
工作日热负荷
休息日热负荷
光伏出力

图7

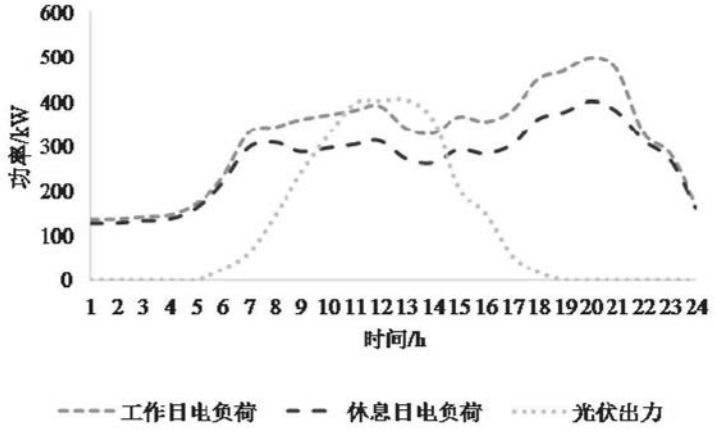

功率/kW
时间/h
工作日电负荷
休息日电负荷
光伏出力

图8

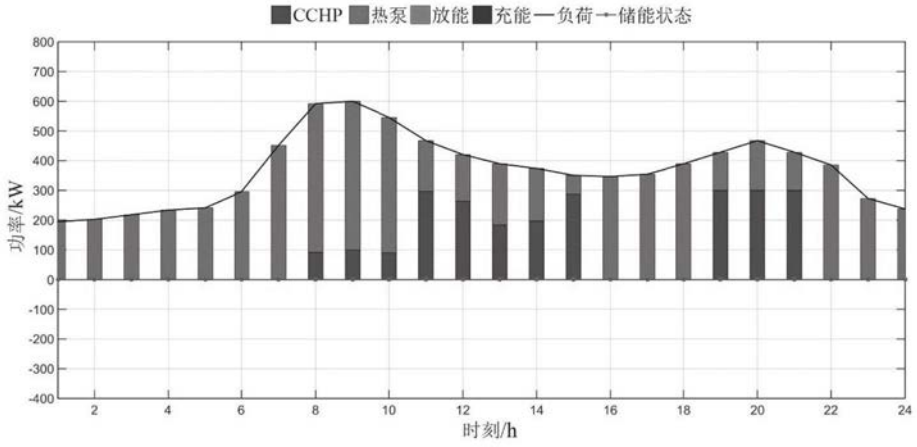

CCHP
热泵
放能
充能
负荷
储能状态
功率/kW
时刻/h

图9(a)

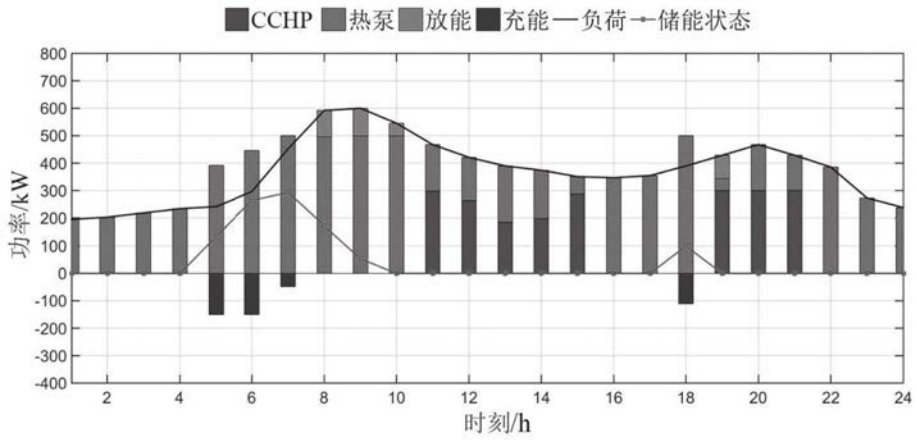

CCHP
热泵
放能
充能
负荷
储能状态
功率/kW
时刻/h

图9(b)

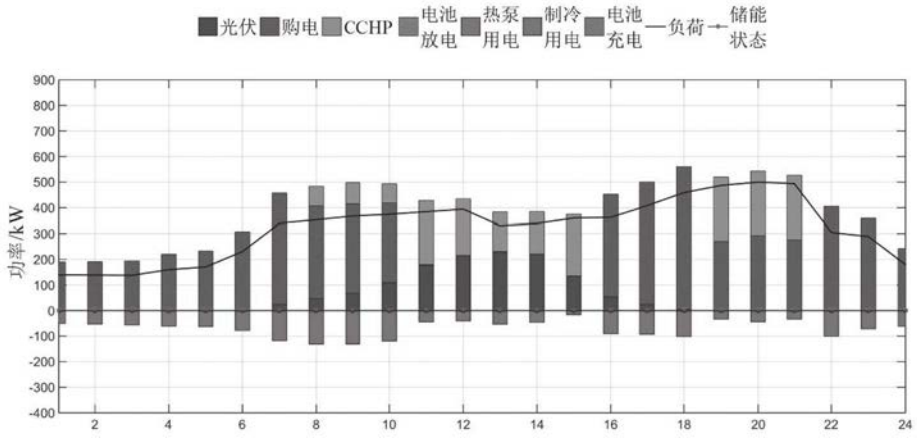

光伏
购电
CCHP
电池放电
热泵用电
制冷用电
电池充电
负荷
储能状态
功率/kW

图9(c)

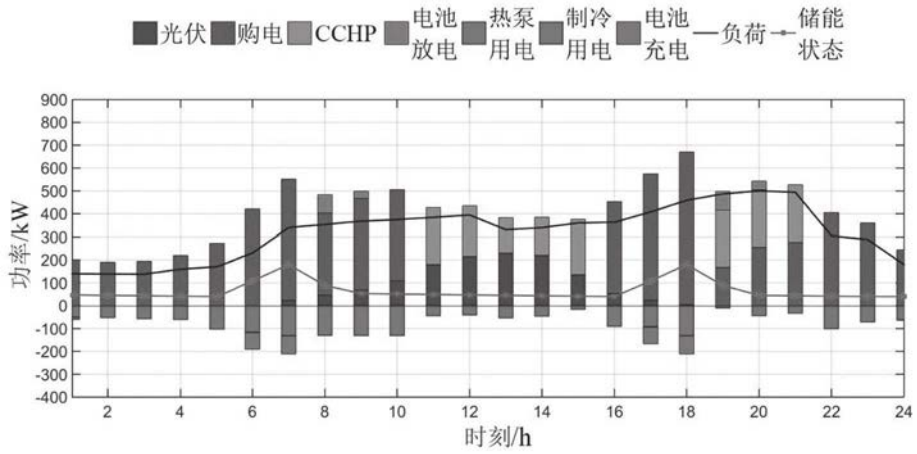

光伏
购电
CCHP
电池放电
热泵用电
制冷用电
电池充电
负荷
储能状态
功率/kW
时刻/h

图9(d)

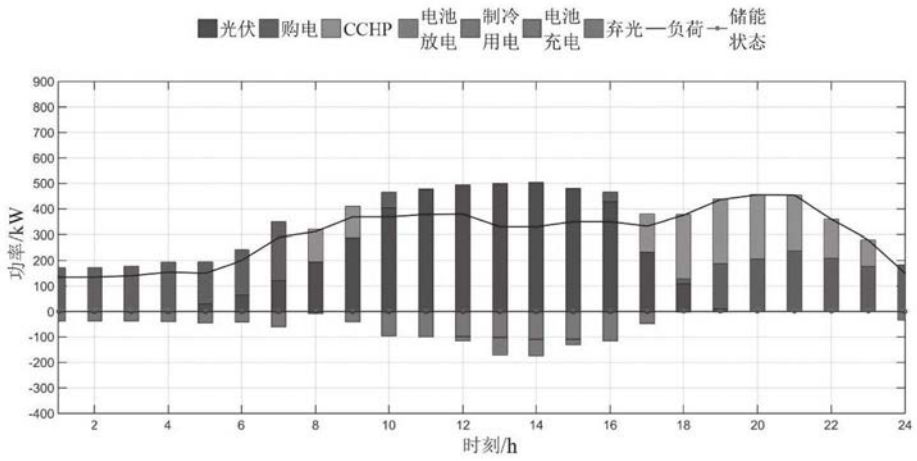


图10 (a)

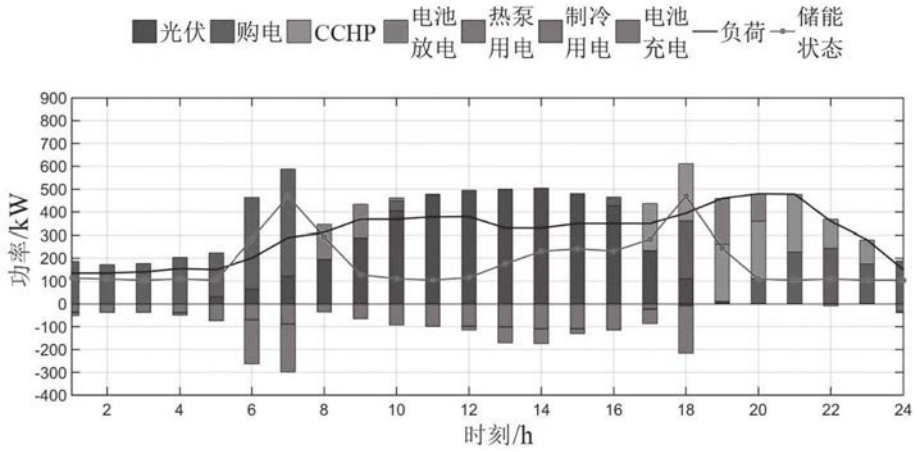


图10 (b)

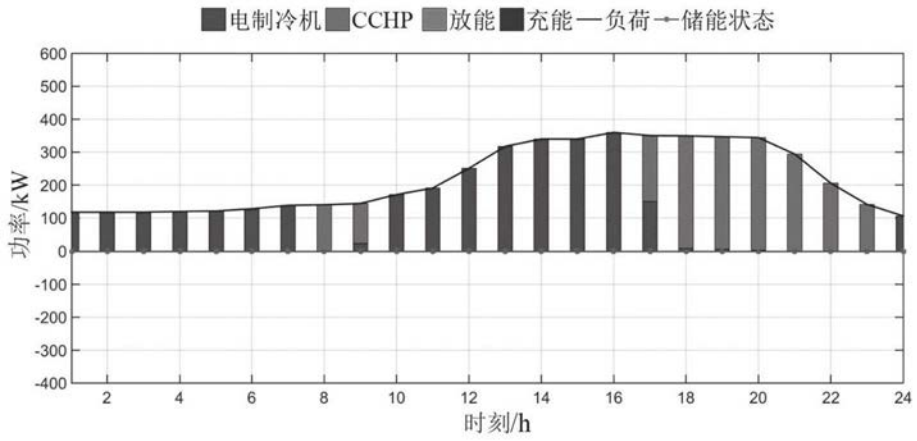


图10 (c)

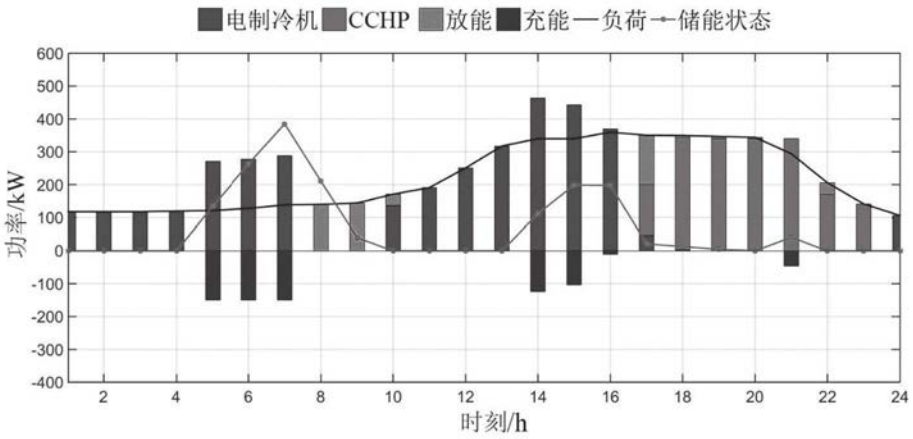

电制冷机
CCHP
放能
充能
负荷
储能状态
功率/kW
时刻/h
600
500
400
300
200
100
0
-100
-200
-300
-400
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24

图10(d)