



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 119543259 B

(45) 授权公告日 2025.08.01

(21) 申请号 202510106699.8

(22) 申请日 2025.01.23

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 119543259 A

(43) 申请公布日 2025.02.28

(73) 专利权人 华南理工大学

地址 510641 广东省广州市天河区五山路  
381号

专利权人 人工智能与数字经济广东省实验  
室(广州)

(72) 发明人 林镇宏 张哲 黄炽坤 张学伟  
张晋 东淏博

(74) 专利代理机构 广州三环专利商标代理有限  
公司 44202

专利代理人 赖志民

(51) Int.Cl.

H02J 3/32 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)

G06F 30/27 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 117175591 A, 2023.12.05

CN 119341130 A, 2025.01.21

审查员 张少绵

权利要求书7页 说明书18页 附图2页

(54) 发明名称

一种风光储充放一体化系统的能量调度方  
法及相关设备

(57) 摘要

本申请公开了一种风光储充放一体化系统的能量调度方法及相关设备，方法包括：构建风光储充放一体化系统的仿真模型；其中，仿真模型包括：光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型；依据仿真模型，基于强化学习算法，构建风光储充放一体化系统的第一能量调度模型；结合车辆离开停车场时刻，以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标，构建车辆的第二能量调度模型；对第一能量调度模型和第二能量调度模型进行联合训练，以根据训练好的第一能量调度模型和第二能量调度模型对风光储充放一体化系统进行能量调度。采用本申请实施例能够既简化建模过程，又节省求解算法需要的算力。

构建风光储充放一体化系统的仿真模型；其中，所述仿真模型包括：光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型；

S1

依据所述仿真模型，基于强化学习算法，构建所述风光储充放  
一体化系统的第一能量调度模型；

S2

结合车辆离开停车场时刻，以预设目标SOC与车辆调度后的  
SOC之间的差值最小为目标，构建车辆的第二能量调度模型；

S3

对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训  
练，以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调  
度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度

S4

1. 一种风光储充放一体化系统的能量调度方法,其特征在于,包括:

构建风光储充放一体化系统的仿真模型;其中,所述仿真模型包括:光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型;

依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型;

结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型;

对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练,以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度;

其中,所述储能空调模型具体表示为:

$$\frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{Q_{vir}(t)}{C_b} + \frac{(T_o(t) - T_i(t))}{R_b * C_b}$$

其中, $T_i(t)$ 表示 $t$ 时刻建筑的室内温度; $T_o(t)$ 表示 $t$ 时刻建筑的室外温度; $Q_{vir}(t)$ 表示储能空调在 $t$ 时刻的制冷/制热量,若 $Q_{vir}(t)$ 为正值, $Q_{vir}(t)$ 表示储能空调在 $t$ 时刻的制冷量,若 $Q_{vir}(t)$ 为负值, $Q_{vir}(t)$ 表示储能空调在 $t$ 时刻的制热量; $R_b$ 表示建筑物的等效热阻; $C_b$ 表示建筑物的等效热容, $d$ 表示微分,其中,储能空调的制冷/制热量 $Q_{vir}$ 与储能空调消耗功率 $P_{vir}$ 和储能空调热电转换系数 $\eta$ 有关,即:

$$P_{vir} = \frac{Q_{vir}}{\eta}$$

(1) 当设定温度 $T_s$ 等于室内温度 $T_i$ 时,储能空调消耗功率 $P_{vir}$ 为:

$$P_{vir} = |T_o - T_i| / (\eta * R_b)$$

(2) 当室外温度 $T_o$ 小于设定温度 $T_s$ 时,制冷时间 $t'$ 为:

$$t' = \ln(|T_o - T_i| / |T_o - T_s|) * R_b * C_b$$

$k$ 时刻后,室内温度 $T_i$ 和储能空调消耗功率 $P_{vir}$ 为:

$$T_i = \begin{cases} T_s, & t' \leq k \\ T_o - (T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, & t' > k \end{cases}$$

$$P_{vir} = \begin{cases} 0, & t' > k \\ |T_o - T_s| / (\eta * R_b) * (k - t'), & t' \leq k \end{cases}$$

(3) 当室外温度 $T_o$ 大于设定温度 $T_s$ 时,制冷时间 $t'$ 为:

$$t' = \ln(|-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i| / |-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_s|) * R_b * C_b$$

$k$ 时刻后,室内温度 $T_i$ 和储能空调消耗功率 $P_{vir}$ 为:

$$T_i = \begin{cases} T_s, t' \leq k \\ -P_{max} * \eta * R_b + T_o - (-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, t' > k \end{cases}$$

$$P_{vir} = \begin{cases} 0, t' > k \\ P_{max} * t' + |T_o - T_i| / (\eta * R_b) * (k - t'), t' \leq k \end{cases}$$

其中,  $P_{max}$  表示储能空调最大功率,  $e$  表示自然常数,  $\ln$  表示自然对数;

所述第二能量调度模型具体表示为:

$$\min \sum_{i=0}^N \max [S_i * (SOC_{ob} - (T_{out} - T_{now} - 1) * (E_i * \alpha_c / V_i) - SOC_{i\_next}), 0]$$

式中,  $S_i$  是标识符, 表示车辆是否到达停车场, 当第  $i$  辆车到达停车场时,  $S_i = 1$ , 当第  $i$  辆车没有到达停车场时,  $S_i = 0$ ;  $SOC_{ob}$  表示预设目标SOC;  $T_{out}$  表示车辆离开停车场时刻,  $T_{now}$  表示当前时刻;  $E_i$  表示第  $i$  辆车辆的最大充电电量,  $\alpha_c$  表示车辆的充电效率,  $V_i$  表示第  $i$  辆车辆的最大电量;  $SOC_{i\_next}$  表示第  $i$  辆车辆调度后的SOC,

$SOC_{i\_next} = SOC_{i\_cur} + (P_{i\_c} * \alpha_c - P_{i\_d} / \beta_c) / C_i$ ;  $SOC_{i\_cur}$  表示第  $i$  辆车辆当前的SOC;  $P_{i\_c}$  表示第  $i$  辆车辆的充电电量,  $P_{i\_d}$  表示第  $i$  辆车辆的放电电量;  $\beta_c$  表示车辆的放电效率, 其中充电电量和放电电量需要满足如下约束:

$$P_{i\_c} * P_{i\_d} = 0$$

$$\sum_{i=0}^N P_{i\_c} = E_r + \sum_{i=0}^N P_{i\_d}$$

式中,  $E_r$  是智能体分配给停车场的总充放电配额。

2. 如权利要求1所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法, 所述光伏发电模型具体表示为:

$$p_{pv} = R_{P-PV} * (S_r / S_{r-ref}) * [1 + \beta(C_T - R_T)]$$

其中,  $p_{pv}$  表示光伏发电板的发电功率,  $S_r$  表示太阳光辐射,  $S_{r-ref}$  表示参考辐射,  $R_{P-PV}$  表示太阳能电池阵列的额定功率,  $\beta$  表示温度系数,  $R_T$  表示参考温度,  $C_T$  表示太阳能电池阵列的温度,  $C_T = A_T + (((C_N - T_{air}) / S_N) * S_r)$ ,  $A_T$  表示光伏发电板的环境温度,  $C_N$  表示太阳能电池阵列的额定工作温度,  $T_{air}$  表示太阳能电池阵列额定工作时的空气温度,  $S_N$  表示额定工作时太阳能电池阵列表面的光照辐射度;

所述风力发电模型具体表示为:

$$P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq SW_{bi} \leq V_{ci} \\ P_r(A + B * SW_{bi} + C * SW_{bi}^2), & V_{ci} \leq SW_{bi} \leq V_r \\ P_r, & V_r \leq SW_{bi} \leq V_{co} \\ 0, & V_{co} \leq SW_{bi} \end{cases}$$

其中,  $P_w$  表示风力发电机组的输出功率,  $P_r$  表示风力发电机组的额定功率;  $SW_{bi}$  表示风速;  $V_{ci}$  表示切入风速,  $V_r$  表示额定风速,  $V_{co}$  表示切出风速; 其中  $A, B, C$  分别为:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{V_{ci}(V_{ci}+V_r)-4V_rV_{ci}\left[\frac{V_{ci}+V_r}{V_r}\right]^3\} \\ B &= \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{4(V_{ci}+V_r)\left[\frac{V_{ci}+V_r}{V_r}\right]^3-(3V_{ci}+V_r)\} \\ C &= \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{2-4\left[\frac{V_{ci}+V_r}{V_r}\right]^3\} \end{aligned}$$

所述储能电池模型具体表示为:

$$S_{ESS,t} = S_{ESS,t-1} + E_{CESS,t-1} * \alpha_b - E_{DESS,t-1} / \beta_b, \quad \forall t > 0$$

其中,  $S_{ESS,t}$  表示储能电池在  $t$  时刻储存的电量,  $S_{ESS,t-1}$  表示储能电池在  $t-1$  时刻储存的电量,  $E_{CESS,t-1}$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段的充电电量,  $\alpha_b$  表示储能电池的充电效率,  $E_{DESS,t-1}$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段的放电电量,  $\beta_b$  表示储能电池的放电效率; 所述储能电池模型满足以下约束条件:

$$z_{c,t} + z_{d,t} \leq 1, \quad \forall t > 0$$

$$0 \leq E_{CESS,t} \leq CH_{SE} * z_{c,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$0 \leq E_{DESS,t} \leq DCH_{SE} * z_{d,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$0.1 * C_{SE} \leq S_{ESS,t} \leq C_{SE}$$

其中,  $z_{c,t}$  和  $z_{d,t}$  是二进制变量, 当  $z_{c,t} = 1$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段进行充电,  $z_{d,t} = 1$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段进行放电,  $E_{CESS,t}$  表示储能电池在  $(t, t+1)$  时段的充电电量,  $CH_{SE}$  表示储能电池的最大充电速率,  $E_{DESS,t}$  表示储能电池在  $(t, t+1)$  时段的放电电量,  $DCH_{SE}$  表示储能电池的最大放电速率,  $C_{SE}$  表示储能电池的最大电池容量;

所述车辆模型具体表示为:

$$SOC_{cur} = SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} * T_S / CAP^{EV}$$

其中,  $SOC_{cur}$  表示车辆当前的SOC,  $SOC_{ini}$  表示车辆的初始SOC,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时隙  $h$

处的充电/放电功率,若 $E_h^{EV}$ 为正值, $E_h^{EV}$ 表示车辆在时隙 $h$ 处的充电功率,若 $E_h^{EV}$ 为负值, $E_h^{EV}$ 表示车辆在时隙 $h$ 处的放电功率, $T_S$ 表示时隙的长度, $CAP^{EV}$ 表示车辆电池容量, $R$ 表示可用充电时隙集合;其中,所述车辆模型满足以下约束:

$$-E^{max} \leq E_h^{EV} \leq E^{max}$$

$$0.2 \leq SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} / CAP^{EV} \leq 1, \forall h = 1, 2 \dots N \in R$$

其中, $E^{max}$ 表示车辆的最大可充电功率, $-E^{max}$ 表示车辆的最大可放电功率。

3. 如权利要求1所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法,其特征在于,所述依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型,包括:

将所述仿真模型的能量调度问题转换为马尔可夫决策问题,构建所述第一能量调度模型的观测空间、动作空间、奖励函数、策略网络和动作价值网络。

4. 如权利要求3所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法,其特征在于,所述奖励函数为:

$$R(s_t, a_t) = ps_t * E_{s,t} - pp_t * E_{p,t} - \sum_{i=1} C_{i,t}$$

其中, $ps_t$ 表示 $t$ 时刻的卖电价格, $E_{s,t}$ 表示 $t$ 时刻风光储充放一体化系统的卖电电量, $pp_t$ 表示 $t$ 时刻的买电价格; $E_{p,t}$ 表示 $t$ 时刻风光储充放一体化系统的买电电量; $C_{i,t}$ 表示 $t$ 时刻第*i*辆车离开停车场时的SOC未满足出行需求的惩罚。

5. 如权利要求4所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法,其特征在于,所述动作价值网络的损失函数为:

$$\begin{aligned} J_Q(\omega) &= E_{(s_t, a_t) \sim M} \left[ \frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - \hat{Q}(s_t, a_t))^2 \right] \\ &= E_{(s_t, a_t) \sim M} \left[ \frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - (r(s_t, a_t) + \gamma E_{s_{t+1} \sim p} [V_\omega(s_{t+1})]))^2 \right] \end{aligned}$$

其中, $J_Q(\omega)$ 表示动作价值网络 $Q_\omega$ 的损失函数, $E[.]$ 表示计算期望, $M$ 表示先前智能体在环境探索中采样的状态分布和动作分布, $\hat{Q}(s_t, a_t)$ 表示目标动作价值网络 $Q_\omega$ 输出的价值, $r(s_t, a_t)$ 表示状态 $s_t$ 采用动作 $a_t$ 的即时奖励, $\gamma$ 表示折现率, $p$ 表示状态转移概率, $V_\omega(s_{t+1})$ 表示状态 $s_{t+1}$ 的价值函数: $s_t$ 表示 $t$ 时刻的状态; $a_t$ 表示 $t$ 时刻的动作, $s_{t+1}$ 表示 $t+1$ 时刻的状态;

$$V_\omega(s_{t+1}) = E_{a_{t+1} \sim \pi_\theta} [Q_\omega(s_{t+1}, a_{t+1}) - \alpha_H \log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})]$$

其中, $\alpha_H$ 是最大熵目标 $\log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$ 的温度参数, $\pi_\theta$ 是策略网络, $\pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$ 表示策略网络 $\pi_\theta$ 在状态 $s_{t+1}$ 下输出动作 $a_{t+1}$ 的概率; $s_{t+1}$ 表示 $t+1$

时刻的状态,  $a_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的动作;

所述策略网络的损失函数为:

$$J_\pi(\theta) = E_{s_t \sim M, \varepsilon_t \sim N'} [\alpha_H \log (\pi_\theta(f_\theta(\varepsilon_t; s_t) | s_t)) - Q_\omega(s_t, f_\theta(\varepsilon_t; s_t))]$$

其中,  $J_\pi(\theta)$  表示策略网络  $\pi_\theta$  的损失函数,  $E[.]$  表示计算期望,  $\varepsilon_t$  表示输入的噪声,  $N'$  表示输入的噪声  $\varepsilon_t$  服从正态分布,  $f_\theta(\varepsilon_t; s_t)$  表示对动作  $a_t$  的重采样;

所述温度参数  $\alpha_H$  的损失函数为:

$$J(\alpha_H) = E_{s_t \sim M, a_t \sim \pi_\theta} [-\alpha_H \log \pi_\theta(a_t | s_t) - \alpha_H H_0]$$

其中,  $H_0$  表示预设最小期望熵。

6. 一种风光储充放一体化系统的能量调度装置, 其特征在于, 包括:

第一构建模块, 用于构建风光储充放一体化系统的仿真模型; 其中, 所述仿真模型包括: 光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型;

第二构建模块, 用于依据所述仿真模型, 基于强化学习算法, 构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型;

第三构建模块, 用于结合车辆离开停车场时刻, 以预设目标 SOC 与车辆调度后的 SOC 之间的差值最小为目标, 构建车辆的第二能量调度模型;

能量调度模块, 用于对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练, 以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度;

其中, 所述储能空调模型具体表示为:

$$\frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{Q_{vir}(t)}{C_b} + \frac{(T_o(t) - T_i(t))}{R_b * C_b}$$

其中,  $T_i(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室内温度;  $T_o(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室外温度;  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷/制热量, 若  $Q_{vir}(t)$  为正值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷量, 若  $Q_{vir}(t)$  为负值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制热量;  $R_b$  表示建筑物的等效热阻;  $C_b$  表示建筑物的等效热容,  $d$  表示微分, 其中, 储能空调的制冷/制热量  $Q_{vir}$  与储能空调消耗功率  $P_{vir}$  和储能空调热电转换系数  $\eta$  有关, 即:

$$P_{vir} = \frac{Q_{vir}}{\eta}$$

(1) 当设定温度  $T_s$  等于室内温度  $T_i$  时, 储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$P_{vir} = |T_o - T_i| / (\eta * R_b)$$

(2) 当室外温度  $T_o$  小于设定温度  $T_s$  时, 制冷时间  $t'$  为:

$$t' = \ln (|T_o - T_i| / |T_o - T_s|) * R_b * C_b$$

$k$  时刻后, 室内温度  $T_i$  和储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$T_i = \begin{cases} T_s, t' \leq k \\ T_o - (T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, t' > k \end{cases}$$

$$P_{vir} = \begin{cases} 0, t' > k \\ |T_o - T_s| / (\eta * R_b) * (k - t'), t' \leq k \end{cases}$$

(3) 当室外温度 $T_o$ 大于设定温度 $T_s$ 时,制冷时间 $t'$ 为:

$$t' = \ln \left( \frac{|-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i|}{|-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_s|} \right) * R_b * C_b$$

$k$ 时刻后,室内温度 $T_i$ 和储能空调消耗功率 $P_{vir}$ 为:

$$T_i = \begin{cases} T_s, t' \leq k \\ -P_{max} * \eta * R_b + T_o - (-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, t' > k \end{cases}$$

$$P_{vir} = \begin{cases} 0, t' > k \\ P_{max} * t' + |T_o - T_i| / (\eta * R_b) * (k - t'), t' \leq k \end{cases}$$

其中, $P_{max}$ 表示储能空调最大功率, $e$ 表示自然常数, $\ln$ 表示自然对数;

所述第二能量调度模型具体表示为:

$$\min \sum_{i=0}^N \max [S_i * (SOC_{ob} - (T_{out} - T_{now} - 1) * (E_i * \alpha_c / V_i) - SOC_{i\_next}), 0]$$

式中, $S_i$ 是标识符,表示车辆是否到达停车场,当第 $i$ 辆车到达停车场时, $S_i=1$ ,当第 $i$ 辆车没有到达停车场时, $S_i=0$ ; $SOC_{ob}$ 表示预设目标SOC; $T_{out}$ 表示车辆离开停车场时刻, $T_{now}$ 表示当前时刻; $E_i$ 表示第 $i$ 辆车的最大充电量, $\alpha_c$ 表示车辆的充电效率, $V_i$ 表示第 $i$ 辆车的最大电量; $SOC_{i\_next}$ 表示第 $i$ 辆车调度后的SOC,

$SOC_{i\_next} = SOC_{i\_cur} + (P_{i\_c} * \alpha_c - P_{i\_d} / \beta_c) / C_i$ ; $SOC_{i\_cur}$ 表示第 $i$ 辆车当前的SOC; $P_{i\_c}$ 表示第 $i$ 辆车的充电电量, $P_{i\_d}$ 表示第 $i$ 辆车的放电电量; $\beta_c$ 表示车辆的放电效率,其中充电电量和放电电量需要满足如下约束:

$$P_{i\_c} * P_{i\_d} = 0$$

$$\sum_{i=0}^N P_{i\_c} = E_r + \sum_{i=0}^N P_{i\_d}$$

式中, $E_r$ 是智能体分配给停车场的总充放电配额。

7. 一种风光储充放一体化系统的能量调度设备,其特征在于,包括处理器、存储器以及存储在所述存储器中且被配置为由所述处理器执行的计算机程序,所述处理器在执行所述计算机程序时实现如权利要求1~5任一项所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

8. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质包括存储的计算机程序;其中,所述计算机程序在运行时控制所述计算机可读存储介质所在的设备执行如

权利要求1~5任一项所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

9.一种计算机程序产品,其特征在于,包括计算机程序/指令,该计算机程序/指令被处理器执行时实现如权利要求1~5任一项所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

## 一种风光储充放一体化系统的能量调度方法及相关设备

### 技术领域

[0001] 本申请涉及供电系统技术领域,尤其涉及一种风光储充放一体化系统的能量调度及相关设备。

### 背景技术

[0002] 风光储充放一体化系统是一种综合利用可再生能源的供电系统,通过风力发电机和太阳能光伏板来发电,将产生的电能储存到多种储能装置,例如储能电池、电动汽车等。

[0003] 目前,风光储充放一体化系统的能量(即电能)调度方案有两种:(1)采用传统优化方案进行能量调度,然而该方案需要对风光储充放一体化系统进行重复且复杂的建模;(2)采用人工智能方案进行能量调度,然而该方案会消耗大量的算力。

### 发明内容

[0004] 本申请提供一种风光储充放一体化系统的能量调度及相关设备,以解决现有技术中需要对风光储充放一体化系统进行重复且复杂的建模,和消耗大量的算力的问题。

[0005] 为实现上述目的,本申请实施例提供了一种风光储充放一体化系统的能量调度方法,包括:

[0006] 构建风光储充放一体化系统的仿真模型;其中,所述仿真模型包括:光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型;

[0007] 依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型;

[0008] 结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型;

[0009] 对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练,以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度。

[0010] 作为上述方案的改进,所述光伏发电模型具体表示为:

$$p_{pv} = R_{P-PV} * (S_r/S_{r-ref}) * [1 + \beta(C_T - R_T)]$$

[0012] 其中, $p_{pv}$ 表示光伏发电板的发电功率, $S_r$ 表示太阳光辐射, $S_{r-ref}$ 表示参考辐射, $R_{P-PV}$ 表示太阳能电池阵列的额定功率, $\beta$ 表示温度系数, $R_T$ 表示参考温度, $C_T$ 表示太阳能电池阵列的温度, $C_T = A_T + (((C_N - T_{air})/S_N) * S_r)$ , $A_T$ 表示光伏发电板的环境温度, $C_N$ 表示太阳能电池阵列的额定工作温度, $T_{air}$ 表示太阳能电池阵列额定工作时的空气温度, $S_N$ 表示额定工作时太阳能电池阵列表面的光照辐射度;

[0013] 所述风力发电模型具体表示为:

$$[0014] \quad P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq SW_{bi} \leq V_{ci} \\ P_r(A + B * SW_{bi} + C * SW_{bi}^2), & V_{ci} \leq SW_{bi} \leq V_r \\ P_r, & V_r \leq SW_{bi} \leq V_{co} \\ 0, & V_{co} \leq SW_{bi} \end{cases}$$

[0015] 其中,  $P_w$  表示风力发电机组的输出功率,  $P_r$  表示风力发电机组的额定功率;  $SW_{bi}$  表示风速;  $V_{ci}$  表示切入风速,  $V_r$  表示额定风速,  $V_{co}$  表示切出风速; 其中  $A, B, C$  分别为:

$$[0016] \quad A = \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{V_{ci}(V_{ci}+V_r) - 4V_r V_{ci} \left[ \frac{V_{ci}+V_r}{V_r} \right]^3\}$$

$$[0017] \quad B = \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{4(V_{ci}+V_r) \left[ \frac{V_{ci}+V_r}{V_r} \right]^3 - (3V_{ci}+V_r)\}$$

$$[0018] \quad C = \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{2 - 4 \left[ \frac{V_{ci}+V_r}{V_r} \right]^3\}$$

[0019] 所述储能电池模型具体表示为:

$$[0020] \quad S_{ESS,t} = S_{ESS,t-1} + E_{CESS,t-1} * \alpha_b - E_{DESS,t-1} / \beta_b, \quad \forall t > 0$$

[0021] 其中,  $S_{ESS,t}$  表示储能电池在  $t$  时刻储存的电量,  $S_{ESS,t-1}$  表示储能电池在  $t-1$  时刻储存的电量,  $E_{CESS,t-1}$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段的充电电量,  $\alpha_b$  表示储能电池的充电效率,  $E_{DESS,t-1}$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段的放电电量,  $\beta_b$  表示储能电池的放电效率; 所述储能电池模型满足以下约束条件:

$$[0022] \quad z_{c,t} + z_{d,t} \leq 1, \quad \forall t > 0$$

$$[0023] \quad 0 \leq E_{CESS,t} \leq CH_{SE} * z_{c,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$[0024] \quad 0 \leq E_{DESS,t} \leq DCH_{SE} * z_{d,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$[0025] \quad 0.1 * C_{SE} \leq S_{ESS,t} \leq C_{SE}$$

[0026] 其中,  $z_{c,t}$  和  $z_{d,t}$  是二进制变量, 当  $z_{c,t} = 1$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段进行充电,  $z_{d,t} = 1$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段进行放电,  $E_{CESS,t}$  表示储能电池在  $(t, t+1)$  时段的充电电量,  $CH_{SE}$  表示储能电池的最大充电速率,  $E_{DESS,t}$  表示储能电池在  $(t, t+1)$  时段的放电电量,  $DCH_{SE}$  表示储能电池的最大放电速率,  $C_{SE}$  表示储能电池的最大电池容量;

[0027] 所述车辆模型具体表示为:

$$[0028] \quad SOC_{cur} = SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} * T_s / CAP^{EV}$$

[0029] 其中,  $SOC_{cur}$  表示车辆当前的SOC,  $SOC_{ini}$  表示车辆的初始SOC,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时

隙  $h$  处的充电/放电功率, 若  $E_h^{EV}$  为正值,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时隙  $h$  处的充电功率, 若  $E_h^{EV}$  为负值,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时隙  $h$  处的放电功率,  $T_s$  表示时隙的长度,  $CAP^{EV}$  表示车辆电池容量,  $R$  表示可用充电时隙集合; 其中, 所述车辆模型满足以下约束:

$$[0030] \quad -E^{max} \leq E_h^{EV} \leq E^{max}$$

$$[0031] \quad 0.2 \leq SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} / CAP^{EV} \leq 1, \forall h = 1, 2 \dots N \in R$$

[0032] 其中,  $E^{max}$  表示车辆的最大可充电功率,  $-E^{max}$  表示车辆的最大可放电功率;

[0033] 所述储能空调模型具体表示为:

$$[0034] \quad \frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{Q_{vir}(t)}{C_b} + \frac{(T_o(t) - T_i(t))}{R_b * C_b}$$

[0035] 其中,  $T_i(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室内温度;  $T_o(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室外温度;  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷/制热量, 若  $Q_{vir}(t)$  为正值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷量, 若  $Q_{vir}(t)$  为负值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制热量;  $R_b$  表示建筑物的等效热阻;  $C_b$  表示建筑物的等效热容,  $d$  表示微分, 其中, 储能空调的制冷/制热量  $Q_{vir}$  与储能空调消耗功率  $P_{vir}$  和储能空调热电转换系数  $\eta$  有关, 即:

$$[0036] \quad P_{vir} = \frac{Q_{vir}}{\eta}$$

[0037] (1) 当设定温度  $T_s$  等于室内温度  $T_i$  时, 储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$[0038] \quad P_{vir} = |T_o - T_i| / (\eta * R_b)$$

[0039] (2) 当室外温度  $T_o$  小于设定温度  $T_s$  时, 制冷时间  $t$  为:

$$[0040] \quad t = \ln(|T_o - T_i| / |T_o - T_s|) * R_b * C_b$$

[0041]  $k$  时刻后, 室内温度  $T_i$  和储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$[0042] \quad T_i = \begin{cases} T_s, & t \leq k \\ T_o - (T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, & t > k \end{cases}$$

$$[0043] \quad P_{vir} = \begin{cases} 0, & t > k \\ |T_o - T_s| / (\eta * R_b) * (k - t), & t \leq k \end{cases}$$

[0044] (3) 当室外温度  $T_o$  大于设定温度  $T_s$  时, 制冷时间  $t$  为:

$$[0045] \quad t = \ln(|-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i| / |-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_s|) * R_b * C_b$$

[0046]  $k$  时刻后, 室内温度  $T_i$  和储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$[0047] \quad T_i = \begin{cases} T_s, & t \leq k \\ -P_{max} * \eta * R_b + T_o - (-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, & t > k \end{cases}$$

$$[0048] P_{vir} = \begin{cases} P_{max} * t + |T_o - T_i| / (\eta * R_b) * (k - t), & t \leq k \\ 0, & t > k \end{cases}$$

[0049] 其中,  $P_{max}$  表示储能空调最大功率,  $\eta$  表示自然常数,  $ln$  表示自然对数。

[0050] 作为上述方案的改进, 所述依据所述仿真模型, 基于强化学习算法, 构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型, 包括:

[0051] 将所述仿真模型的能量调度问题转换为马尔可夫决策问题, 构建所述第一能量调度模型的观测空间、动作空间、奖励函数、策略网络和动作价值网络。

[0052] 作为上述方案的改进, 所述奖励函数为:

$$[0053] R(s_t, a_t) = ps_t * E_{s,t} - pp_t * E_{p,t} - \sum_{i=1} C_{i\_t}$$

[0054] 其中,  $ps_t$  表示  $t$  时刻的卖电价格,  $E_{s,t}$  表示  $t$  时刻风光储充放一体化系统的卖电电量,  $pp_t$  表示  $t$  时刻的买电价格;  $E_{p,t}$  表示  $t$  时刻风光储充放一体化系统的买电电量;  $C_{i\_t}$  表示  $t$  时刻第  $i$  辆车辆离开停车场时的 SOC 未满足出行需求的惩罚。

[0055] 作为上述方案的改进, 所述动作价值网络的损失函数为:

$$[0056] J_Q(\omega) = E_{(s_t, a_t) \sim M} [\frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - \hat{Q}(s_t, a_t))^2]$$

$$[0057] = E_{(s_t, a_t) \sim M} [\frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - (r(s_t, a_t) + \gamma E_{s_{t+1} \sim p} [V_{\omega^-}(s_{t+1})]))^2]$$

[0058] 其中,  $J_Q(\omega)$  表示动作价值网络  $Q_\omega$  的损失函数,  $E[\cdot]$  表示计算期望,  $M$  表示先前智能体在环境探索中采样的状态分布和动作分布,  $\hat{Q}(s_t, a_t)$  表示目标动作价值网络  $Q_\omega^-$  输出的价值,  $r(s_t, a_t)$  表示状态  $s_t$  采用动作  $a_t$  的即时奖励,  $\gamma$  表示折现率,  $p$  表示状态转移概率,  $V_{\omega^-}(s_{t+1})$  表示状态  $s_{t+1}$  的价值函数:  $s_t$  表示  $t$  时刻的状态;  $a_t$  表示  $t$  时刻的动作,  $s_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的状态;

$$[0059] V_{\omega^-}(s_{t+1}) = E_{a_{t+1} \sim \pi_\theta} [Q_{\omega^-}(s_{t+1}, a_{t+1}) - \alpha_H \log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})]$$

[0060] 其中,  $\alpha_H$  是最大熵目标  $\log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$  的温度参数,  $\pi_\theta$  是策略网络,  $\pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$  表示策略网络  $\pi_\theta$  在状态  $s_{t+1}$  下输出动作  $a_{t+1}$  的概率;  $s_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的状态,  $a_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的动作;

[0061] 所述策略网络的损失函数为:

$$[0062] J_\pi(\theta) = E_{s_t \sim M, \varepsilon_t \sim N} [\alpha_H \log (\pi_\theta(f_\theta(\varepsilon_t; s_t) | s_t)) - Q_\omega(s_t, f_\theta(\varepsilon_t; s_t))]$$

[0063] 其中,  $J_\pi(\theta)$  表示策略网络  $\pi_\theta$  的损失函数,  $E[\cdot]$  表示计算期望,  $\varepsilon_t$  表示输入的噪声,  $N$  表示输入的噪声  $\varepsilon_t$  服从正态分布,  $f_\theta(\varepsilon_t; s_t)$  表示对动作  $a_t$  的重采样;

[0064] 所述温度参数  $\alpha_H$  的损失函数为:

[0065]  $J(\alpha_H) = E_{s_t \sim M, a_t \sim \pi_\theta}[-\alpha_H \log \pi_\theta(a_t | s_t) - \alpha_H H_0]$

[0066] 其中,  $H_0$ 是预设最小期望熵。

[0067] 作为上述方案的改进,所述第二能量调度模型具体表示为:

$$[0068] \min \sum_{i=0}^N \max [S_i * (SOC_{ob} - (T_{out} - T_{now} - 1) * (E_i * \alpha_c / V_i) - SOC_{i\_next}), 0]$$

[0069] 式中,  $S_i$ 是标识符,表示车辆是否到达停车场,当第*i*辆车到达停车场时,  $S_i=1$ ,当第*i*辆车没有到达停车场时,  $S_i=0$ ;  $SOC_{ob}$ 表示预设目标SOC;  $T_{out}$ 表示车辆离开停车场时刻,  $T_{now}$ 表示当前时刻;  $E_i$ 表示第*i*辆车辆的最大充电电量,  $\alpha_c$ 表示车辆的充电效率,  $V_i$ 表示第*i*辆车辆的最大电量;  $SOC_{i\_next}$ 表示第*i*辆车辆调度后的SOC,

$SOC_{i\_next} = SOC_{i\_cur} + (P_{i\_c} * \alpha_c - P_{i\_d} / \beta_c) / C_i$ ;  $SOC_{i\_cur}$ 表示第*i*辆车辆当前的SOC;  $P_{i\_c}$ 表示第*i*辆车辆的充电电量,  $P_{i\_d}$ 表示第*i*辆车辆的放电电量;  $\beta_c$ 表示车辆的放电效率,其中充电电量和放电电量需要满足如下约束:

$$[0070] P_{i\_c} * P_{i\_d} = 0$$

$$[0071] \sum_{i=0}^N P_{i\_c} = E_r + \sum_{i=0}^N P_{i\_d}$$

[0072] 式中,  $E_r$ 是智能体分配给停车场的总充放电配额。

[0073] 为实现上述目的,本申请实施例还提供了一种风光储充放一体化系统的能量调度装置,包括:

[0074] 第一构建模块,用于构建风光储充放一体化系统的仿真模型;其中,所述仿真模型包括:光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型;

[0075] 第二构建模块,用于依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型;

[0076] 第三构建模块,用于结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型;

[0077] 能量调度模块,用于对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练,以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度。

[0078] 为实现上述目的,本申请实施例还提供了一种风光储充放一体化系统的能量调度设备,包括处理器、存储器以及存储在所述存储器中且被配置为由所述处理器执行的计算机程序,所述处理器在执行所述计算机程序时实现如上述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

[0079] 为实现上述目的,本申请实施例还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质包括存储的计算机程序;其中,所述计算机程序在运行时控制所述计算机可读存储介质所在的设备执行如上述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

[0080] 为实现上述目的,本申请实施例还提供了一种计算机程序产品,包括计算机程序/指令,该计算机程序/指令被处理器执行时实现如上述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

[0081] 与现有技术相比,本申请实施例提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度方法及相关设备,通过考虑光伏发电、风力发电、储能电池、车辆和储能空调,构建风光储充放一体化系统的仿真模型,依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型,同时结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型;最后对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练,以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度。由此可见,本申请实施例通过强化学习算法,无需对风光储充放一体化系统进行重复且复杂的建模,同时结合传统优化方案构建的第二能量调度模型,能够解决电动汽车的电量分配问题,避免了电动汽车数量多导致动作空间过大的问题,大大减少了训练所需的算力,而且使得能量调度更加全面、准确。本发明实施例通过结合传统优化方案和人工智能方案,提出的新型能量调度方法,既简化了建模过程,又节省了求解算法需要的算力,也使得能量调度更全面更准确。

## 附图说明

[0082] 图1是本申请实施例提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度方法的流程图;

[0083] 图2是本申请实施例提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度装置的结构框图;

[0084] 图3是本申请实施例提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度设备的结构框图。

## 具体实施方式

[0085] 下面将结合本申请实施例中的附图,对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本申请一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本申请保护的范围。

[0086] 参见图1,图1是本申请实施例提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度方法的流程图,所述风光储充放一体化系统的能量调度方法包括:

[0087] S1、构建风光储充放一体化系统的仿真模型;其中,所述仿真模型包括:光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型;

[0088] S2、依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型;

[0089] S3、结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型;

[0090] S4、对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练,以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进

行能量调度。

[0091] 在本申请实施例中,首先,根据风光储充放一体化系统的光伏、风电、储能电池(Energy Storage System,ESS)、车辆(即电动汽车)和储能空调进行建模,特别是基于预设温度对储能空调进行建模,从而构建风光储充放一体化系统的仿真模型。针对风光储充放一体化系统的全局能量调度,基于强化学习算法,构建风光储充放一体化系统的第一能量调度模型。针对车辆的局部能量调度,结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型,以实现电动汽车的充放电能量分配。

[0092] 接着,对第一能量调度模型和第二能量调度模型进行联合训练,具体地:将所述第二能量调度模型融入所述第一能量调度模型的环境进行训练。最后,利用训练好的第一能量调度模型和第二能量调度模型对风光储充放一体化系统进行能量调度。也就是说,将传统优化算法融入强化学习的环境进行训练,形成改进的强化学习算法,以使用改进强化学习算法优化风光储充放一体化系统的全局能量调度;其中的传统优化算法用于优化车辆的充放电调度,最终获得风光储充放一体化系统的最优能量调度方案,以实现对风光储充放一体化系统的能量调度。

[0093] 其中,SOC是指电池的电荷状态,即剩余电量,其取值范围为0~1,当SOC=0时表示电池放电完全,当SOC=1时表示电池完全充满。

[0094] 具体的,所述光伏发电模型具体表示为:

$$[0095] p_{pv} = R_{P-PV} * (S_r/S_{r-ref}) * [1 + \beta(C_T - R_T)]$$

[0096] 其中, $p_{pv}$ 表示光伏发电板的发电功率, $S_r$ 表示太阳光辐射, $S_{r-ref}$ 表示参考辐射, $R_{P-PV}$ 表示太阳能电池阵列的额定功率, $\beta$ 表示温度系数, $R_T$ 表示参考温度, $C_T$ 表示太阳能电池阵列的温度, $C_T = A_T + (((C_N - T_{air})/S_N) * S_r)$ , $A_T$ 表示光伏发电板的环境温度, $C_N$ 表示太阳能电池阵列的额定工作温度, $T_{air}$ 表示太阳能电池阵列额定工作时的空气温度, $S_N$ 表示额定工作时太阳能电池阵列表面的光照辐射度;

[0097] 可以理解的是,光伏发电板的发电功率取决于环境温度和太阳光辐射,本申请实施例通过环境温度和太阳光辐射,构建光伏发电模型。

[0098] 具体的,所述风力发电模型具体表示为:

$$[0099] P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq SW_{bi} \leq V_{ci} \\ P_r(A + B * SW_{bi} + C * SW_{bi}^2), & V_{ci} \leq SW_{bi} \leq V_r \\ P_r, & V_r \leq SW_{bi} \leq V_{co} \\ 0, & V_{co} \leq SW_{bi} \end{cases}$$

[0100] 其中, $P_w$ 表示风力发电机组的输出功率, $P_r$ 表示风力发电机组的额定功率; $SW_{bi}$ 表示风速; $V_{ci}$ 表示切入风速, $V_r$ 表示额定风速, $V_{co}$ 表示切出风速;其中 $A,B,C$ 分别为:

$$[0101] A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \{V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4V_r V_{ci} \left[ \frac{V_{ci} + V_r}{V_r} \right]^3\}$$

$$[0102] \quad B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \{ 4(V_{ci} + V_r) \left[ \frac{V_{ci} + V_r}{V_r} \right]^3 - (3V_{ci} + V_r) \}$$

$$[0103] \quad C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \{ 2 - 4 \left[ \frac{V_{ci} + V_r}{V_r} \right]^3 \}$$

[0104] 可以理解的是,风力发电机组的输出功率可以由其功率曲线确定,本申请实施例通过功率曲线,构建风力发电模型。

[0105] 具体的,所述储能电池模型具体表示为:

$$[0106] \quad S_{ESS,t} = S_{ESS,t-1} + E_{CESS,t-1} * \alpha_b - E_{DESS,t-1} / \beta_b, \quad \forall t > 0$$

[0107] 其中, $S_{ESS,t}$ 表示储能电池在 $t$ 时刻储存的电量, $S_{ESS,t-1}$ 表示储能电池在 $t-1$ 时刻储存的电量, $E_{CESS,t-1}$ 表示储能电池在 $(t-1, t)$ 时段的充电电量, $\alpha_b$ 表示储能电池的充电效率, $E_{DESS,t-1}$ 表示储能电池在 $(t-1, t)$ 时段的放电电量, $\beta_b$ 表示储能电池的放电效率;所述储能电池模型满足以下约束条件:

$$[0108] \quad z_{c,t} + z_{d,t} \leq 1, \quad \forall t > 0$$

$$[0109] \quad 0 \leq E_{CESS,t} \leq CH_{SE} * z_{c,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$[0110] \quad 0 \leq E_{DESS,t} \leq DCH_{SE} * z_{d,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$[0111] \quad 0.1 * C_{SE} \leq S_{ESS,t} \leq C_{SE}$$

[0112] 其中, $z_{c,t}$ 和 $z_{d,t}$ 是二进制变量,当 $z_{c,t} = 1$ 表示储能电池在 $(t-1, t)$ 时段进行充电, $z_{d,t} = 1$ 表示储能电池在 $(t-1, t)$ 时段进行放电, $E_{CESS,t}$ 表示储能电池在 $(t, t+1)$ 时段的充电电量, $CH_{SE}$ 表示储能电池的最大充电速率, $E_{DESS,t}$ 表示储能电池在 $(t, t+1)$ 时段的放电电量, $DCH_{SE}$ 表示储能电池的最大放电速率, $C_{SE}$ 表示储能电池的最大电池容量;

[0113] 可以理解的是, $z_{c,t} + z_{d,t} \leq 1, \quad \forall t > 0$ 表示储能电池不在一个时间段内同时进行充电和放电; $0 \leq E_{CESS,t} \leq CH_{SE} * z_{c,t}, \quad \forall t \geq 0$ 表示储能电池每一个时间间隔可充电的电量受其最大充电效率的影响; $0 \leq E_{DESS,t} \leq DCH_{SE} * z_{d,t}, \quad \forall t \geq 0$ 表示储能电池每一个时间间隔可放电的电量受其最大放电效率的影响; $0.1 * C_{SE} \leq S_{ESS,t} \leq C_{SE}$ 表示储能电池储存的电量不应该大于储能电池的最大电池容量,同时考虑到储能电池的寿命,储能电池不应该过度放电。

[0114] 所述车辆模型具体表示为:

$$[0115] \quad SOC_{cur} = SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} * T_s / CAP^{EV}$$

[0116] 其中, $SOC_{cur}$ 表示车辆当前的SOC, $SOC_{ini}$ 表示车辆的初始SOC, $E_h^{EV}$ 表示车辆在时隙 $h$ 处的充电/放电功率,若 $E_h^{EV}$ 为正值, $E_h^{EV}$ 表示车辆在时隙 $h$ 处的充电功率,若 $E_h^{EV}$ 为负

值,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时隙  $h$  处的放电功率,  $T_s$  表示时隙的长度,  $CAP^{EV}$  表示车辆电池容量,  $R$  表示可用充电时隙集合; 其中, 所述车辆模型满足以下约束:

$$[0117] \quad -E^{max} \leq E_h^{EV} \leq E^{max}$$

$$[0118] \quad 0.2 \leq SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} / CAP^{EV} \leq 1, \forall h = 1, 2 \dots N \in R$$

[0119] 其中,  $E^{max}$  表示车辆的最大可充电功率,  $-E^{max}$  表示车辆的最大可放电功率;

[0120] 可以理解的是,  $-E^{max} \leq E_h^{EV} \leq E^{max}$  表示车辆的充放电功率不大于其最大可充电/放电功率; 此外, 为了保护车辆电池的寿命, 车辆电池不应该过度放电, 即  $0.2 \leq SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} / CAP^{EV} \leq 1, \forall h = 1, 2 \dots N \in R$ 。

[0121] 具体的, 所述储能空调模型具体表示为:

$$[0122] \quad \frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{Q_{vir}(t)}{C_b} + \frac{(T_o(t) - T_i(t))}{R_b * C_b}$$

[0123] 其中,  $T_i(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室内温度;  $T_o(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室外温度;  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷/制热量, 若  $Q_{vir}(t)$  为正值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷量, 若  $Q_{vir}(t)$  为负值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制热量;  $R_b$  表示建筑物的等效热阻;  $C_b$  表示建筑物的等效热容,  $d$  表示微分, 其中, 储能空调的制冷/制热量  $Q_{vir}$  与储能空调消耗功率  $P_{vir}$  和储能空调热电转换系数  $\eta$  有关, 即:

$$[0124] \quad P_{vir} = \frac{Q_{vir}}{\eta}$$

[0125] (1) 当设定温度  $T_s$  等于室内温度  $T_i$  时, 储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$[0126] \quad P_{vir} = |T_o - T_i| / (\eta * R_b)$$

[0127] (2) 当室外温度  $T_o$  小于设定温度  $T_s$  时, 制冷时间  $t$  为:

$$[0128] \quad t = \ln(|T_o - T_i| / |T_o - T_s|) * R_b * C_b$$

[0129]  $k$  时刻后, 室内温度  $T_i$  和储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$[0130] \quad T_i = \begin{cases} T_s, & t \leq k \\ T_o - (T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, & t > k \end{cases}$$

$$[0131] \quad P_{vir} = \begin{cases} 0, & t > k \\ |T_o - T_s| / (\eta * R_b) * (k - t), & t \leq k \end{cases}$$

[0132] (3) 当室外温度  $T_o$  大于设定温度  $T_s$  时, 制冷时间  $t$  为:

$$[0133] \quad t = \ln(|-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i| / |-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_s|) * R_b * C_b$$

[0134]  $k$  时刻后, 室内温度  $T_i$  和储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

$$[0135] \quad T_i = \begin{cases} T_s, & t \leq k \\ -P_{max} * \eta * R_b + T_o - (-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, & t > k \end{cases}$$

$$[0136] \quad P_{vir} = \begin{cases} 0, & t > k \\ P_{max} * t + |T_o - T_i| / (\eta * R_b) * (k - t), & t \leq k \end{cases}$$

[0137] 其中,  $P_{max}$  表示储能空调最大功率,  $e$  表示自然常数,  $\ln$  表示自然对数。

[0138] 本申请实施例采用等效热参数模型进行描述储能空调的热力学过程, 以构建储能空调模型。

[0139] 在一种可选的实施例中, 所述依据所述仿真模型, 基于强化学习算法, 构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型, 包括:

[0140] 将所述仿真模型的能量调度问题转换为马尔可夫决策问题, 构建所述第一能量调度模型的观测空间、动作空间、奖励函数、策略网络和动作价值网络。

[0141] 具体的, 所述观测空间包括: 时间(例如, 月份、日、小时、分钟、秒)、室外温度、室内温度、储能空调功率、园区用电量、风力发电量、光伏发电量、车辆电池容量、车辆数量、车辆未满足数量(即小于  $SOC_{ob}$  的车辆数量)、车辆未满足容量(即小于  $SOC_{ob}$  的车辆电池容量的总和)、车辆溢出数量(即大于  $SOC_{ob}$  的车辆数量)、车辆溢出容量(即大于  $SOC_{ob}$  的车辆电池容量的总和)、电价。

[0142] 所述动作空间包括: 储能电池充放电、车辆充放电量即停车场的总充放电配额、储能空调设定温度。

[0143] 本申请实施例的目标是风光储充放一体化系统(园区)的用电成本最低, 实现利益最大化, 因此只关注风光储充放一体化的用电成本, 卖电收益以及停车场的补偿。具体的, 所述奖励函数为:

$$[0144] \quad R(s_t, a_t) = ps_t * E_{s,t} - pp_t * E_{p,t} - \sum_{i=1}^n C_{i,t}$$

[0145] 其中,  $ps_t$  表示  $t$  时刻的卖电价格,  $E_{s,t}$  表示  $t$  时刻风光储充放一体化系统的卖电电量,  $pp_t$  表示  $t$  时刻的买电价格;  $E_{p,t}$  表示  $t$  时刻风光储充放一体化系统的买电电量;  $C_{i,t}$  表示  $t$  时刻第  $i$  辆车辆离开停车场时的 SOC 未满足出行需求的惩罚。

[0146] 为了满足用户的需求, 需要满足每一辆车辆(电动汽车)离开停车场时的 SOC 要大于预设目标 SOC 即  $SOC_{ob}$ ,  $SOC_{ob}$  优选为 0.8。通过预设目标 SOC 和车辆离开停车场时的 SOC 的差值, 计算  $t$  时刻第  $i$  辆车辆的里程补偿  $D_{i,t}$ , 公式如下:

$$[0147] \quad D_{i,t} = \begin{cases} (SOC_{ob} - SOC_l) * CAP^{EV} * \psi, & SOC_l < SOC_{ob}, t = t_{i,l} \\ 0, & SOC_l \geq SOC_{ob}, t = t_{i,l} \\ 0, & t \neq t_{i,l} \end{cases}$$

[0148] 其中,  $SOC_l$  表示车辆离开停车场时的 SOC,  $SOC_{ob}$  表示预设目标 SOC,  $\psi$  是车辆每度电可以行驶的公里数;  $CAP^{EV}$  是车辆电池容量。 $t_{i,l}$  是第  $i$  辆车辆的离开时间。

[0149] 根据里程补偿 $D_{i,t}$ 结合某城市的打车费计费方法,计算用户电量不足的补偿金额作为惩罚。打车的计费方法是采用分段计费的方式,同时结合行驶时间和行驶里程进行计算。为了方便计算,本申请将行驶时间结合某城市平均行驶速度换算成距离统一计算,计费公式如下:

$$[0150] C_{i,t} = \begin{cases} 0, & D_{i,t} = 0 \\ P_i, & 0 < D_{i,t} \leq D_i \\ P_i + P_d(D_{i,t}-D_i), & D_i < D_{i,t} \leq D_t \\ P_i + P_d(D_{i,t}-D_i) + P_t(D_{i,t}-D_t)/\chi, & D_t < D_{i,t} \leq D_1 \\ P_i + P_d(D_{i,t}-D_i) + P_t(D_{i,t}-D_t)/\chi + P_1(D_{i,t}-D_1), & D_1 < D_{i,t} \leq D_2 \\ P_i + P_d(D_{i,t}-D_i) + P_t(D_{i,t}-D_t)/\chi + P_1(D_{i,t}-D_1) + P_2(D_{i,t}-D_2), & D_2 < D_{i,t} \leq D_3 \\ P_i + P_d(D_{i,t}-D_i) + P_t(D_{i,t}-D_t)/\chi + P_1(D_{i,t}-D_1) + P_2(D_{i,t}-D_2) + P_3(D_{i,t}-D_3), & D_3 < D_{i,t} \end{cases}$$

[0151] 其中, $C_{i,t}$ 为 $t$ 时刻第*i*辆车离开停车场时的SOC未满足出行需求的惩罚, $D_{i,t}$ 为 $t$ 时刻第*i*辆车的里程补偿, $P_i$ 为起步价, $P_d$ 为里程价, $P_t$ 为时间价, $P_1$ 为第一长途费, $P_2$ 为第二长途费, $P_3$ 为第三长途费; $D_i$ 为里程起步距离, $D_t$ 为时间起步距离, $D_1$ 为第一长途距离, $D_2$ 为第二长途距离, $D_3$ 为第三长途距离; $\chi$ 表示时间与距离的换算因子,可以是预设的,也可以根据某城市的车辆行驶的平均速度计算得到。

[0152] 根据该公式可以计算出车辆离开停车场时的SOC未满足出行需求的惩罚。

[0153] 本申请实施例通过训练一个策略网络(其参数为 $\theta$ )和两个动作价值网络(其参数分别为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ ,统一用 $\omega$ 表示),完成能量调度模型的训练。

[0154] 具体的,所述动作价值网络的损失函数为:

$$[0155] J_Q(\omega) = E_{(s_t, a_t) \sim M} [\frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - \hat{Q}(s_t, a_t))^2]$$

$$[0156] = E_{(s_t, a_t) \sim M} [\frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - (r(s_t, a_t) + \gamma E_{s_{t+1} \sim p} [V_{\omega^-}(s_{t+1})]))^2]$$

[0157] 其中, $J_Q(\omega)$ 表示动作价值网络 $Q_\omega$ 的损失函数, $E[.]$ 表示计算期望, $M$ 表示先前智能体在环境探索中采样的状态分布和动作分布, $\hat{Q}(s_t, a_t)$ 表示目标动作价值网络 $Q_\omega$ -输出的价值, $r(s_t, a_t)$ 表示状态 $s_t$ 采用动作 $a_t$ 的即时奖励, $\gamma$ 表示折现率, $p$ 表示状态转移概率, $V_{\omega^-}(s_{t+1})$ 表示状态 $s_{t+1}$ 的价值函数: $s_t$ 表示 $t$ 时刻的状态; $a_t$ 表示 $t$ 时刻的动作, $s_{t+1}$ 表示 $t+1$ 时刻的状态。

[0158] 该价值函数可通过目标动作价值网络 $Q_\omega$ -来进行估计的,每一个 $Q_\omega$ 网络对应一个 $Q_{\omega^-}$ 网络,具体的,

$V_{\omega^-}(s_{t+1}) = E_{a_{t+1} \sim \pi_\theta} [Q_{\omega^-}(s_{t+1}, a_{t+1}) - \alpha_H \log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})]$ ;其中, $\alpha_H$ 是最大熵目标 $\log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$ 的温度参数, $\pi_\theta$ 是策略网络, $\pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$ 表示策略网络 $\pi_\theta$ 在状态 $s_{t+1}$ 下输出动作 $a_{t+1}$ 的概率; $s_{t+1}$ 表示 $t+1$ 时刻的状态, $a_{t+1}$ 表示

$t + 1$ 时刻的动作。最后,通过最小化期望KL散度来学习策略网络。

[0159] 具体的,所述策略网络的损失函数为:

$$[0160] J_{\pi}(\theta) = E_{s_t \sim M, \varepsilon_t \sim N} [\alpha_H \log (\pi_{\theta}(f_{\theta}(\varepsilon_t; s_t) | s_t)) - Q_{\omega}(s_t, f_{\theta}(\varepsilon_t; s_t))]$$

[0161] 其中, $J_{\pi}(\theta)$ 表示策略网络 $\pi_{\theta}$ 的损失函数, $E[.]$ 表示计算期望, $\varepsilon_t$ 表示输入的噪声, $N$ 表示输入的噪声 $\varepsilon_t$ 服从正态分布, $f_{\theta}(\varepsilon_t; s_t)$ 表示对动作 $a_t$ 的重采样。

[0162] 具体的,所述温度参数 $\alpha_H$ 的损失函数为:

$$[0163] J(\alpha_H) = E_{s_t \sim M, a_t \sim \pi_{\theta}} [-\alpha_H \log \pi_{\theta}(a_t | s_t) - \alpha_H H_0]$$

[0164] 其中, $H_0$ 表示预设最小期望熵。

[0165] 在一种可选的实施例中,所述第二能量调度模型具体表示为:

$$[0166] \min \sum_{i=0}^N \max [S_i * (SOC_{ob} - (T_{out} - T_{now} - 1) * (E_i * \alpha_c / V_i) - SOC_{i\_next}), 0]$$

[0167] 式中, $S_i$ 是标识符,表示车辆是否到达停车场,当第*i*辆车到达停车场时, $S_i=1$ ,当第*i*辆车没有到达停车场时, $S_i=0$ ; $SOC_{ob}$ 表示预设目标SOC; $T_{out}$ 表示车辆离开停车场时刻, $T_{now}$ 表示当前时刻; $E_i$ 表示第*i*辆车的最大充电电量, $\alpha_c$ 表示车辆的充电效率, $V_i$ 表示第*i*辆车的最大电量; $SOC_{i\_next}$ 表示第*i*辆车调度后的SOC,

$SOC_{i\_next} = SOC_{i\_cur} + (P_{i\_c} * \alpha_c - P_{i\_d} / \beta_c) / C_i$ ; $SOC_{i\_cur}$ 表示第*i*辆车当前的SOC; $P_{i\_c}$ 表示第*i*辆车的充电电量, $P_{i\_d}$ 表示第*i*辆车的放电电量; $\beta_c$ 表示车辆的放电效率,其中充电电量和放电电量需要满足如下约束:

$$[0168] P_{i\_c} * P_{i\_d} = 0$$

$$[0169] \sum_{i=0}^N P_{i\_c} = E_r + \sum_{i=0}^N P_{i\_d}$$

[0170] 式中, $E_r$ 是智能体分配给停车场的总充放电配额。

[0171] 在本申请实施例中,通过强化学习训练的智能体决策出停车场的总充放电配额,并且智能调度多种储能(储能电池、车辆、储能空调)来储存光伏和风电产生的能量,然后根据车辆的第二能量调度模型,将总充放电配额细分到每辆车身上,使得所有车辆在离开停车场时的SOC都满足了 $SOC_{ob}$ ,进一步实现车辆的能量调度优化。

[0172] 本申请实施例通过强化学习算法,无需对风光储充放一体化系统进行重复且复杂的建模,同时结合传统优化方案构建的第二能量调度模型,能够解决电动汽车的电量分配问题,避免了电动汽车数量多导致动作空间过大的问题,大大减少了训练所需的算力,而且使得能量调度更加全面、准确。本发明实施例通过结合传统优化方案和人工智能方案,提出的新型能量调度方法,既简化了建模过程,又节省了求解算法需要的算力,也使得能量调度更全面更准确。

[0173] 参见图2,图2是本申请实施例提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度装置10的结构框图,所述风光储充放一体化系统的能量调度装置10包括:

[0174] 第一构建模块11,用于构建风光储充放一体化系统的仿真模型;其中,所述仿真模型包括:光伏发电模型、风力发电模型、储能电池模型、车辆模型和储能空调模型;

[0175] 第二构建模块12,用于依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型;

[0176] 第三构建模块13,用于结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型;

[0177] 能量调度模块,用于对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练,以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度。

[0178] 可选的,所述光伏发电模型具体表示为:

$$[0179] p_{pv} = R_{P-PV} * (S_r/S_{r-ref}) * [1 + \beta(C_T - R_T)]$$

[0180] 其中, $p_{pv}$ 表示光伏发电板的发电功率, $S_r$ 表示太阳光辐射, $S_{r-ref}$ 表示参考辐射, $R_{P-PV}$ 表示太阳能电池阵列的额定功率, $\beta$ 表示温度系数, $R_T$ 表示参考温度, $C_T$ 表示太阳能电池阵列的温度, $C_T = A_T + (((C_N - T_{air})/S_N) * S_r)$ , $A_T$ 表示光伏发电板的环境温度, $C_N$ 表示太阳能电池阵列的额定工作温度, $T_{air}$ 表示太阳能电池阵列额定工作时的空气温,度, $S_N$ 表示额定工作时太阳能电池阵列表面的光照辐射度;

[0181] 所述风力发电模型具体表示为:

$$[0182] P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq SW_{bi} \leq V_{ci} \\ P_r(A + B * SW_{bi} + C * SW_{bi}^2), & V_{ci} \leq SW_{bi} \leq V_r \\ P_r, & V_r \leq SW_{bi} \leq V_{co} \\ 0, & V_{co} \leq SW_{bi} \end{cases}$$

[0183] 其中, $P_w$ 表示风力发电机组的输出功率, $P_r$ 表示风力发电机组的额定功率; $SW_{bi}$ 表示风速; $V_{ci}$ 表示切入风速, $V_r$ 表示额定风速, $V_{co}$ 表示切出风速;其中 $A$ , $B$ , $C$ 分别为:

$$[0184] A = \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{V_{ci}(V_{ci}+V_r)-4V_rV_{ci}\left[\frac{V_{ci}+V_r}{V_r}\right]^3\}$$

$$[0185] B = \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{4(V_{ci}+V_r)\left[\frac{V_{ci}+V_r}{V_r}\right]^3-(3V_{ci}+V_r)\}$$

$$[0186] C = \frac{1}{(V_{ci}-V_r)^2} \{2-4\left[\frac{V_{ci}+V_r}{V_r}\right]^3\}$$

[0187] 所述储能电池模型具体表示为:

$$[0188] S_{ESS,t} = S_{ESS,t-1} + E_{CESS,t-1} * \alpha_b - E_{DESS,t-1} / \beta_b, \quad \forall t > 0$$

[0189] 其中, $S_{ESS,t}$ 表示储能电池在 $t$ 时刻储存的电量, $S_{ESS,t-1}$ 表示储能电池在 $t-1$ 时刻

储存的电量,  $E_{CESS,t-1}$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段的充电电量,  $\alpha_b$  表示储能电池的充电效率,  $E_{DESS,t-1}$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段的放电电量,  $\beta_b$  表示储能电池的放电效率; 所述储能电池模型满足以下约束条件:

$$[0190] \quad z_{c,t} + z_{d,t} \leq 1, \quad \forall t > 0$$

$$[0191] \quad 0 \leq E_{CESS,t} \leq CH_{SE} * z_{c,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$[0192] \quad 0 \leq E_{DESS,t} \leq DCH_{SE} * z_{d,t}, \quad \forall t \geq 0$$

$$[0193] \quad 0.1 * C_{SE} \leq S_{ESS,t} \leq C_{SE}$$

[0194] 其中,  $z_{c,t}$  和  $z_{d,t}$  是二进制变量, 当  $z_{c,t} = 1$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段进行充电,  $z_{d,t} = 1$  表示储能电池在  $(t-1, t)$  时段进行放电,  $E_{CESS,t}$  表示储能电池在  $(t, t+1)$  时段的充电电量,  $CH_{SE}$  表示储能电池的最大充电速率,  $E_{DESS,t}$  表示储能电池在  $(t, t+1)$  时段的放电电量,  $DCH_{SE}$  表示储能电池的最大放电速率,  $C_{SE}$  表示储能电池的最大电池容量;

[0195] 所述车辆模型具体表示为:

$$[0196] \quad SOC_{cur} = SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} * T_s / CAP^{EV}$$

[0197] 其中,  $SOC_{cur}$  表示车辆当前的SOC,  $SOC_{ini}$  表示车辆的初始SOC,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时隙  $h$  处的充电/放电功率, 若  $E_h^{EV}$  为正值,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时隙  $h$  处的充电功率, 若  $E_h^{EV}$  为负值,  $E_h^{EV}$  表示车辆在时隙  $h$  处的放电功率,  $T_s$  表示时隙的长度,  $CAP^{EV}$  表示车辆电池容量,  $R$  表示可用充电时隙集合; 其中, 所述车辆模型满足以下约束:

$$[0198] \quad -E^{max} \leq E_h^{EV} \leq E^{max}$$

$$[0199] \quad 0.2 \leq SOC_{ini} + \sum_{h \in R} E_h^{EV} / CAP^{EV} \leq 1, \quad \forall h = 1, 2 \dots N \in R$$

[0200] 其中,  $E^{max}$  表示车辆的最大可充电功率,  $-E^{max}$  表示车辆的最大可放电功率;

[0201] 所述储能空调模型具体表示为:

$$[0202] \quad \frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{Q_{vir}(t)}{C_b} + \frac{(T_o(t) - T_i(t))}{R_b * C_b}$$

[0203] 其中,  $T_i(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室内温度;  $T_o(t)$  表示  $t$  时刻建筑的室外温度;  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷/制热量, 若  $Q_{vir}(t)$  为正值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制冷量, 若  $Q_{vir}(t)$  为负值,  $Q_{vir}(t)$  表示储能空调在  $t$  时刻的制热量;  $R_b$  表示建筑物的等效热阻;  $C_b$  表示建筑物的等效热容,  $d$  表示微分, 其中, 储能空调的制冷/制热量  $Q_{vir}$  与储能空调消耗功率  $P_{vir}$  和储能空调热电转换系数  $\eta$  有关, 即:

[0204]  $P_{vir} = \frac{Q_{vir}}{\eta}$

[0205] (1) 当设定温度  $T_s$  等于室内温度  $T_i$  时, 储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

[0206]  $P_{vir} = |T_o - T_i| / (\eta * R_b)$

[0207] (2) 当室外温度  $T_o$  小于设定温度  $T_s$  时, 制冷时间  $t$  为:

[0208]  $t = \ln(|T_o - T_i| / |T_o - T_s|) * R_b * C_b$

[0209]  $k$  时刻后, 室内温度  $T_i$  和储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

[0210]  $T_i = \begin{cases} T_s, & t \leq k \\ T_o - (T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, & t > k \end{cases}$

[0211]  $P_{vir} = \begin{cases} 0, & t > k \\ |T_o - T_s| / (\eta * R_b) * (k - t), & t \leq k \end{cases}$

[0212] (3) 当室外温度  $T_o$  大于设定温度  $T_s$  时, 制冷时间  $t$  为:

[0213]  $t = \ln(|-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i| / |-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_s|) * R_b * C_b$

[0214]  $k$  时刻后, 室内温度  $T_i$  和储能空调消耗功率  $P_{vir}$  为:

[0215]  $T_i = \begin{cases} T_s, & t \leq k \\ -P_{max} * \eta * R_b + T_o - (-P_{max} * \eta * R_b + T_o - T_i) * e^{-k/R_b * C_b}, & t > k \end{cases}$

[0216]  $P_{vir} = \begin{cases} 0, & t > k \\ P_{max} * t + |T_o - T_i| / (\eta * R_b) * (k - t), & t \leq k \end{cases}$

[0217] 其中,  $P_{max}$  表示储能空调最大功率,  $e$  表示自然常数,  $\ln$  表示自然对数。

[0218] 可选的, 所述依据所述仿真模型, 基于强化学习算法, 构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型, 包括:

[0219] 将所述仿真模型的能量调度问题转换为马尔可夫决策问题, 构建所述第一能量调度模型的观测空间、动作空间、奖励函数、策略网络和动作价值网络。

[0220] 可选的, 所述奖励函数为:

[0221]  $R(s_t, a_t) = ps_t * E_{s,t} - pp_t * E_{p,t} - \sum_{i=1}^n C_{i,t}$

[0222] 其中,  $ps_t$  表示  $t$  时刻的卖电价格,  $E_{s,t}$  表示  $t$  时刻风光储充放一体化系统的卖电电量,  $pp_t$  表示  $t$  时刻的买电价格;  $E_{p,t}$  表示  $t$  时刻风光储充放一体化系统的买电电量;  $C_{i,t}$  表示  $t$  时刻第  $i$  辆车辆离开停车场时的SOC未满足出行需求的惩罚。

[0223] 可选的, 所述动作价值网络的损失函数为:

[0224]  $J_Q(\omega) = E_{(s_t, a_t) \sim M} [\frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - \hat{Q}(s_t, a_t))^2]$

[0225]  $= E_{(s_t, a_t) \sim M} [\frac{1}{2} (Q_\omega(s_t, a_t) - (r(s_t, a_t) + \gamma E_{s_{t+1} \sim p}[V_{\omega^-}(s_{t+1})]))^2]$

[0226] 其中,  $J_Q(\omega)$  表示动作价值网络  $Q_\omega$  的损失函数,  $E[.]$  表示计算期望,  $M$  表示先前智能体在环境探索中采样的状态分布和动作分布,  $\hat{Q}(s_t, a_t)$  表示目标动作价值网络  $Q_\omega$ -输出的价值,  $r(s_t, a_t)$  表示状态  $s_t$  采用动作  $a_t$  的即时奖励,  $\gamma$  表示折现率,  $p$  表示状态转移概率,  $V_{\omega^-}(s_{t+1})$  表示状态  $s_{t+1}$  的价值函数:  $s_t$  表示  $t$  时刻的状态;  $a_t$  表示  $t$  时刻的动作,  $s_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的状态;

[0227]  $V_{\omega^-}(s_{t+1}) = E_{a_{t+1} \sim \pi_\theta}[Q_{\omega^-}(s_{t+1}, a_{t+1}) - \alpha_H \log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})]$

[0228] 其中,  $\alpha_H$  是最大熵目标  $\log \pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$  的温度参数,  $\pi_\theta$  是策略网络,  $\pi_\theta(a_{t+1} | s_{t+1})$  表示策略网络  $\pi_\theta$  在状态  $s_{t+1}$  下输出动作  $a_{t+1}$  的概率;  $s_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的状态,  $a_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的动作;

[0229] 所述策略网络的损失函数为:

[0230]  $J_\pi(\theta) = E_{s_t \sim M, \varepsilon_t \sim N}[\alpha_H \log (\pi_\theta(f_\theta(\varepsilon_t; s_t) | s_t)) - Q_\omega(s_t, f_\theta(\varepsilon_t; s_t))]$

[0231] 其中,  $J_\pi(\theta)$  表示策略网络  $\pi_\theta$  的损失函数,  $E[.]$  表示计算期望,  $\varepsilon_t$  表示输入的噪声,  $N$  表示输入的噪声  $\varepsilon_t$  服从正态分布,  $f_\theta(\varepsilon_t; s_t)$  表示对动作  $a_t$  的重采样;

[0232] 所述温度参数  $\alpha_H$  的损失函数为:

[0233]  $J(\alpha_H) = E_{s_t \sim M, a_t \sim \pi_\theta}[-\alpha_H \log \pi_\theta(a_t | s_t) - \alpha_H H_0]$

[0234] 其中,  $H_0$  表示预设最小期望熵。

[0235] 可选的, 所述第二能量调度模型具体表示为:

[0236]  $\min \sum_{i=0}^N \max [S_i * (SOC_{ob} - (T_{out} - T_{now} - 1) * (E_i * \alpha_c / V_i) - SOC_{i\_next}), 0]$

[0237] 式中,  $S_i$  是标识符, 表示车辆是否到达停车场, 当第  $i$  辆车到达停车场时,  $S_i = 1$ , 当第  $i$  辆车没有到达停车场时,  $S_i = 0$ ;  $SOC_{ob}$  表示预设目标 SOC;  $T_{out}$  表示车辆离开停车场时刻,  $T_{now}$  表示当前时刻;  $E_i$  表示第  $i$  辆车辆的最大充电电量,  $\alpha_c$  表示车辆的充电效率,  $V_i$  表示第  $i$  辆车辆的最大电量;  $SOC_{i\_next}$  表示第  $i$  辆车辆调度后的 SOC,

$SOC_{i\_next} = SOC_{i\_cur} + (P_{i\_c} * \alpha_c - P_{i\_d} / \beta_c) / C_i$ ;  $SOC_{i\_cur}$  表示第  $i$  辆车辆当前的 SOC;  $P_{i\_c}$  表示第  $i$  辆车辆的充电电量,  $P_{i\_d}$  表示第  $i$  辆车辆的放电电量;  $\beta_c$  表示车辆的放电效率, 其中充电电量和放电电量需要满足如下约束:

[0238]  $P_{i\_c} * P_{i\_d} = 0$

$$[0239] \quad \sum_{i=0}^N P_{i\_c} = E_r + \sum_{i=0}^N P_{i\_d}$$

[0240] 式中,  $E_r$  是智能体分配给停车场的总充放电配额。

[0241] 值得说明的是,本申请实施例所述的风光储充放一体化系统的能量调度装置10中各个模块的工作过程可参考上述实施例所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法的工作过程,在此不再赘述。

[0242] 本申请实施例所提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度装置10,通过考虑光伏发电、风力发电、储能电池、车辆和储能空调,构建风光储充放一体化系统的仿真模型,依据所述仿真模型,基于强化学习算法,构建所述风光储充放一体化系统的第一能量调度模型,同时结合车辆离开停车场时刻,以预设目标SOC与车辆调度后的SOC之间的差值最小为目标,构建车辆的第二能量调度模型;最后对所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型进行联合训练,以根据训练好的所述第一能量调度模型和所述第二能量调度模型对所述风光储充放一体化系统进行能量调度。由此可见,本申请实施例通过强化学习算法,无需对风光储充放一体化系统进行重复且复杂的建模,同时结合传统优化方案构建的第二能量调度模型,能够解决电动汽车的电量分配问题,避免了电动汽车数量多导致动作空间过大的问题,大大减少了训练所需的算力,而且使得能量调度更加全面、准确。本发明实施例通过结合传统优化方案和人工智能方案,提出的新型能量调度方法,既简化了建模过程,又节省了求解算法需要的算力,也使得能量调度更全面更准确。

[0243] 此外本申请实施例还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质包括存储的计算机程序;其中,所述计算机程序在运行时控制所述计算机可读存储介质所在的设备执行如上述任一实施例所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

[0244] 此外本申请实施例还提供了一种计算机程序产品,包括计算机程序/指令,该计算机程序/指令被处理器执行时实现如上述任一实施例所述的风光储充放一体化系统的能量调度方法。

[0245] 参见图3,图3是本申请实施例提供的一种风光储充放一体化系统的能量调度设备20的结构框图,所述风光储充放一体化系统的能量调度设备20包括:处理器21、存储器22以及存储在所述存储器22中并可在所述处理器21上运行的计算机程序。所述处理器21执行所述计算机程序时实现上述风光储充放一体化系统的能量调度方法实施例中的步骤。或者,所述处理器21执行所述计算机程序时实现上述各装置实施例中各模块/单元的功能。

[0246] 示例性的,所述计算机程序可以被分割成一个或多个模块/单元,所述一个或者多个模块/单元被存储在所述存储器22中,并由所述处理器21执行,以完成本申请。所述一个或多个模块/单元可以是能够完成特定功能的一系列计算机程序指令段,该指令段用于描述所述计算机程序在所述风光储充放一体化系统的能量调度设备20中的执行过程。

[0247] 所述风光储充放一体化系统的能量调度设备20可包括,但不仅限于,处理器21、存储器22。本领域技术人员可以理解,所述示意图仅仅是风光储充放一体化系统的能量调度设备20的示例,并不构成对风光储充放一体化系统的能量调度设备20的限定,可以包括比图示更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者不同的部件,例如所述风光储充放一体化系统的能量调度设备20还可以包括输入输出设备、网络接入设备、总线等。

[0248] 所述处理器21可以是中央处理单元(Central Processing Unit,CPU),还可以是其他通用处理器、数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)、专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA)或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等,所述处理器21是所述风光储充放一体化系统的能量调度设备20的控制中心,利用各种接口和线路连接整个风光储充放一体化系统的能量调度设备20的各个部分。

[0249] 所述存储器22可用于存储所述计算机程序和/或模块,所述处理器21通过运行或执行存储在所述存储器22内的计算机程序和/或模块,以及调用存储在存储器22内的数据,实现所述风光储充放一体化系统的能量调度设备20的各种功能。所述存储器22可主要包括存储程序区和存储数据区,其中,存储程序区可存储操作系统、至少一个功能所需的应用程序(比如声音播放功能、图像播放功能等)等;存储数据区可存储根据手机的使用所创建的数据(比如音频数据、电话本等)等。此外,存储器22可以包括高速随机存取存储器,还可以包括非易失性存储器,例如硬盘、内存、插接式硬盘,智能存储卡(Smart Media Card,SMC),安全数字(Secure Digital, SD)卡,闪存卡(Flash Card)、至少一个磁盘存储器件、闪存器件、或其他易失性固态存储器件。

[0250] 其中,所述风光储充放一体化系统的能量调度设备20集成的模块/单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用时,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本申请实现上述实施例方法中的全部或部分流程,也可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,所述的计算机程序可存储于一计算机可读存储介质中,该计算机程序在被处理器21执行时,可实现上述各个方法实施例的步骤。其中,所述计算机程序包括计算机程序代码,所述计算机程序代码可以为源代码形式、对象代码形式、可执行文件或某些中间形式等。所述计算机可读介质可以包括:能够携带所述计算机程序代码的任何实体或装置、记录介质、U盘、移动硬盘、磁碟、光盘、计算机存储器、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、电载波信号、电信信号以及软件分发介质等。

[0251] 需说明的是,以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。另外,本申请提供的装置实施例附图中,模块之间的连接关系表示它们之间具有通信连接,具体可以实现为一条或多条通信总线或信号线。本领域普通技术人员在不付出创造性劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0252] 以上所述是本申请的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也视为本申请的保护范围。

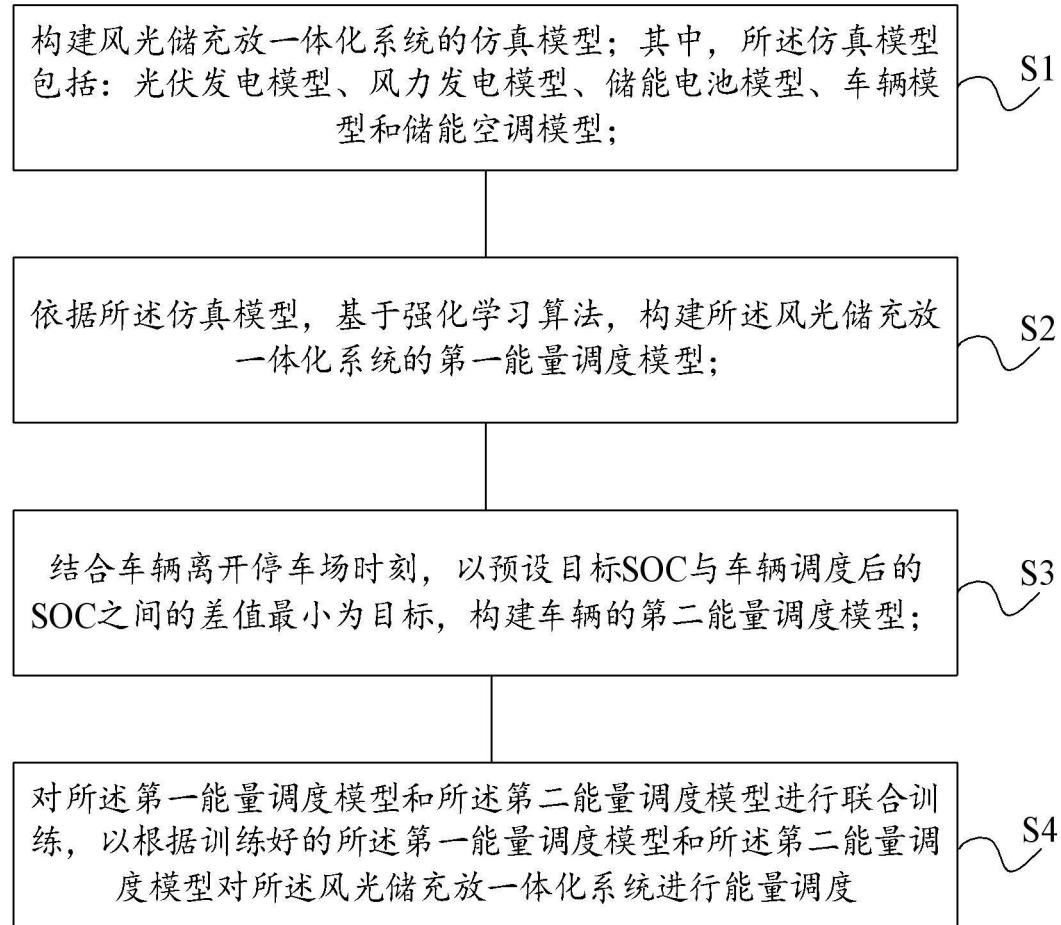


图1

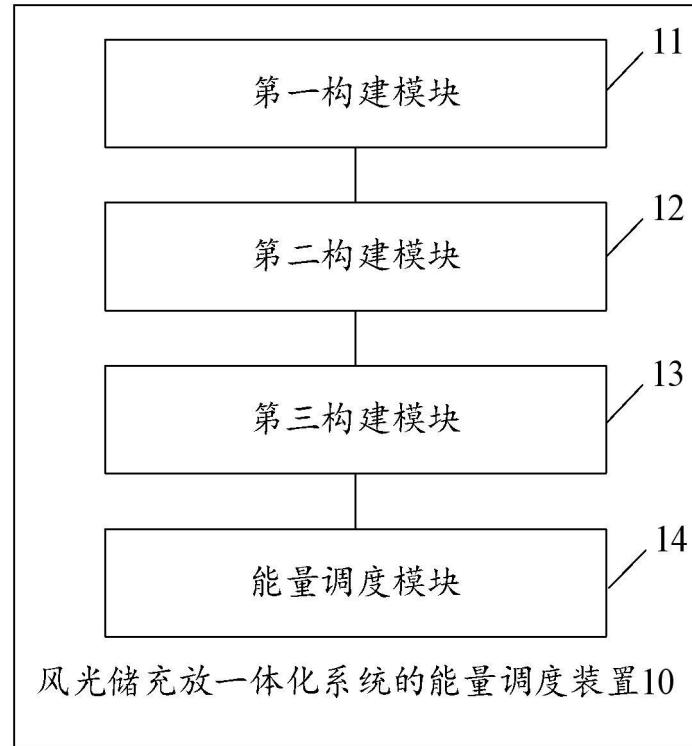


图2

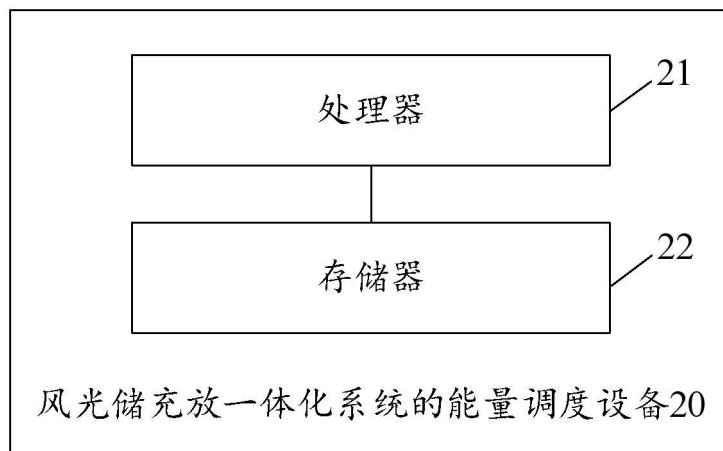


图3