



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109256800 A

(43)申请公布日 2019.01.22

(21)申请号 201811089161.7

(22)申请日 2018.09.18

(71)申请人 三峡大学

地址 443002 湖北省宜昌市西陵区大学路8号

(72)发明人 程杉 倪凯旋 徐康仪 赵孟雨 闫海

(74)专利代理机构 宜昌市三峡专利事务所 42103

代理人 吴思高

(51)Int.Cl.

H02J 3/38(2006.01)

H02J 3/32(2006.01)

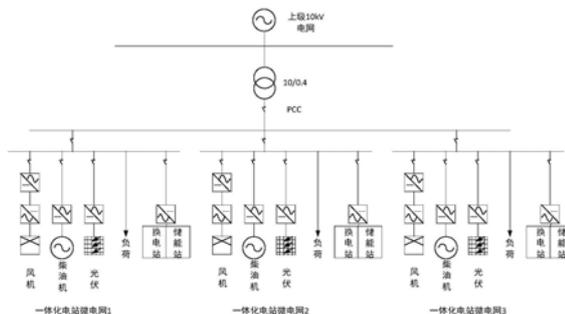
权利要求书5页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法

(57)摘要

一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,包括以下步骤:考虑电动汽车换电需求和光伏、风力发电的随机特性,建立充换电站的充放电模型、以及光伏、风力发电功率的模型;建立一体化电站的寿命损耗成本模型及其运行损耗模型;构建区域一体化电站微电网群协调优化调度的数学模型;利用对偶理论及其分散式将优化调度计划的分解安排到一体化电站中的充换电站动力电池和储能电站电池;利用滚动窗口优化方法,对一体化电站内充换电站和储能电站的协调调度及电池充放电进行优化。本发明方法为电动汽车充换电基础设施建设提供理论依据和技术支撑,并有利于提高电网、微电网及其内充换电站运行的经济效益。



1. 一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,其特征在于包括以下步骤:

步骤(1):考虑电动汽车换电需求和光伏、风力发电的随机特性,建立充换电站的充放电模型、以及光伏、风力发电功率的模型;

步骤(2):建立一体化电站的损耗模型;

步骤(3):构建区域一体化电站微电网群协调优化调度的数学模型;

步骤(4):利用对偶理论及其分散式,将优化调度计划的分解安排到一体化电站中的充换电站动力电池和储能电站电池;

步骤(5):利用滚动窗口优化方法,对一体化电站内充换电站和储能电站的协调调度及电池充放电进行优化。

2. 根据权利要求1所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,其特征在于:所述步骤1中,充换电站的充放电模型为:

$$P_{BCSSi,s,ch} = n_{PBi,s,ch} \cdot P_{PBi,s,ch} / \eta_{ch}$$

$$P_{BCSSi,s,dis} = n_{PBi,s,dis} \cdot P_{PBi,s,dis} \cdot \eta_{dis}$$

式中: $n_{PB,ch}$ 、 $n_{PB,dis}$ 分别为正在充、放电的动力电池数; $P_{PB,ch}$ 、 $P_{PB,dis}$ 分别为动力电池的充、放电功率。

3. 根据权利要求1所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,其特征在于:所述步骤1中,风电出力模型如下:

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & , v < v_c \text{ or } v > v_r \\ \frac{v - v_c}{v_r - v_c} P_r, & v_c \leq v \leq v_r \\ P_r & , v_r \leq v \leq v_f \end{cases}$$

式中: $P_{WT}(v)$ 是预测的风力发电功率, $v$ 为预测风速, $v_c$ 为切入风速, $v_f$ 为切出风速, $v_r$ 为额定风速, $P_r$ 为风机额定功率;

风速 $v$ 是随机性较强的因素,利用韦伯分布来确定 $v$ 的概率分布:

$$f_v(V) = \left(\frac{\pi}{\varphi}\right) \left(\frac{V}{\varphi}\right)^{\pi-1} \exp\left(-\frac{V}{\varphi}\right)$$

式中: $\varphi$ 为尺度参数; $\pi$ 为形状参数; $V$ 为 $v$ 概率密度函数的具体表现形式;

得出风机出力的概率密度函数为:

$$f_{WT}(P_{WT}) = \begin{cases} \beta[1 - \exp(-V_c/\varphi)^\pi + \exp(-V_f/\varphi)^\pi], & P_{WT} = 0 \\ \beta \left(\frac{k}{\varphi}\right) \left(\frac{\gamma}{\varphi}\right)^{\pi-1} \exp(-\gamma/\varphi)^\pi & , 0 < P_{WT} < P_r \\ \beta[\exp(-V_c/\varphi)^\pi + \exp(-V_f/\varphi)^\pi] & , P_{WT} = P_r \end{cases}$$

$$\beta = \frac{V_r - V_c}{P_r}$$

$$\alpha = V_c + \beta P_{WT}$$

因此求得风机出力的累积分布函数为:

$$F_{WT}(P_{WT}) = 1 - \exp(-(V_c + \beta P_{WT} / \varphi)^\pi)$$

光伏发电出力模型:

$$P_{PV} = LM^\theta$$

式中:  $P_{PV}$  为光伏发电出力功率;  $L$  为太阳辐照度;  $M$  为受光面积;  $\theta$  为发电效率;

光伏发电出力  $P_{PV}$  的概率密度为:

$$f_{PV}(P_{PV}) = \frac{1}{P_{PV}^{\max}} \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left( \frac{P_{PV}}{P_{PV}^{\max}} \right)^{a-1} \left( 1 - \frac{P_{PV}}{P_{PV}^{\max}} \right)^{b-1}$$

式中:  $P_{PV}^{\max}$  为为光伏发电出力最大值;

则光伏发电出力的累积分布函数为:

$$F_{PV}(P_{PV}) = \int_0^{P_{PV}} f_{PV}(x) dx$$

电动汽车日车辆日行驶里程近似为对数正态分布, 其概率密度函数为:

$$f_D(x) = \frac{1}{x\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\mu_D^2}\right)$$

式中,  $\sigma_D = 3.20$ ,  $\mu_D = 0.88$ ;  $x$  为行驶距离; 由上式可计算电动汽车日行驶距离的期望为:

$$E(x) = \int_0^\infty x f_D(x) dx$$

则电动汽车的换电概率分布为:

$$f_{EX}(x) = \alpha E(x) N_{EV}$$

其中:  $\alpha$  为电动汽车每公里耗电量;  $N_{EV}$  电动汽车数量;

电动汽车和风电、光伏所有场景的集合用  $S$  表示,  $\tau_s$  为系统在场景  $s$  下的概率:

$$\tau_s = \alpha E(x) \cdot N_{EV} \cdot F_{PV}(P_{PV}) \cdot F_{WT}(P_{WT})$$

最后使用快速正演算法削减场景。

4. 根据权利要求1所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法, 其特征在于: 所述步骤2中, 一体化电站的寿命损耗成本模型及其运行损耗模型为:

设蓄电池充放电深度为  $x$ ,  $x \in [0, 1]$ , 对应的最大循环次数为  $N(x)$ , 表示为:

$$N(x) = -3278x^4 - 5x^3 + 12823x^2 - 14122x + 5112;$$

充换储一体化电站寿命损耗成本模型:

$$\begin{cases} C_{ch} = \frac{C_{init}}{N(x)} \cdot \frac{k_{ch}}{P_{ch} \cdot SOC_{start}} \cdot \frac{SOC_{max}}{SOC_{end}} \\ C_{dis} = \frac{C_{init}}{N(x)} \cdot \frac{k_{dis}}{P_{dis} \cdot SOC_{end}} \cdot \frac{SOC_{start}}{SOC_{max}} \end{cases}$$

$$x = |SOC_{start} - SOC_{end}|$$

其中:  $C_{init}$  为充换储一体化电站内蓄电池投资成本;  $C_{ch}$ ,  $C_{dis}$  分别为充、放电损耗成本;  $SOC_{max}$ ,  $SOC_{min}$ ,  $SOC_{start}$ ,  $SOC_{end}$  分别为最大、最小荷电状态、充放电始末荷电状态;  $P_{ch}$ ,  $P_{dis}$  分别为充放电功率;  $k_{ch}$ ,  $k_{dis}$  分别为充放电影响因子。

5. 根据权利要求1所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法, 其特

征在于:所述步骤3中,区域一体化电站微电网群协调优化调度的数学模型为:

$$\min C_{MG} = \min \sum_{s=1}^S \tau_s \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (C_{DG} + C_{Exch} + C_{CSSIS})$$

$$C_{DG} = aP_{DG,i}^t{}^2 + bP_{DG,i}^t + c + \rho P_{DG,i}^t$$

$$C_{Exch} = \sum_{t=1}^T \lambda_{MG}^t P_{grid}^t$$

$$C_{CSSIS} = C_{ch} + C_{dis} - \alpha \sum_{t=1}^T (N_{EVt} + \lambda CN_{EVt})$$

其中: $C_{DG}$ 为柴油发电机成本; $C_{Exch}$ 与电网交互成本; $C_{CSSIS}$ 充换储一体化电站成本; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $\rho$ 分别为柴油发电机成本系数、污染惩罚因子; $P_{tDG,i}$ 为时刻 $t$ 柴油发电机出力; $\lambda_{MG}^t$ 为微网与电网交易电价; $P_{grid}^t$ 为微电网与电网的交互功率; $N_{EVt}$ 为时段 $t$ 的换电站BSS服务区内电动汽车用户更换电池的需求量; $\lambda$ 为换电站BSS向电动汽车用户提供的换电零售价; $C$ 为电池的标准容量。

6. 根据权利要求5所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,其特征在于:相应的约束条件为:

功率平衡约束:

$$P_{WTi,s}^t + P_{PVi,s}^t + P_{DGi,s}^t + P_{Exchi,s}^t + P_{PBi,s,dis}^t = P_{Li,s}^t + P_{PBi,s,ch}^t$$

柴油发电机出力和爬坡约束:

$$P_{DGi,s}^{\min} \leq P_{DGi,s}^t \leq P_{DGi,s}^{\max}$$

$$-R_{i,down} \Delta t \leq P_{DGi,s}^t - P_{DGi,s}^{t-1} \leq R_{i,up} \Delta t$$

充放电功率约束:

$$P_{PBi,s,ch}^{\min} \leq P_{PBi,s,ch}^t \leq P_{PBi,s,ch}^{\max}$$

$$P_{PBi,s,dis}^{\min} \leq P_{PBi,s,dis}^t \leq P_{PBi,s,dis}^{\max}$$

PCC口交换功率约束:

$$P_{Exchi,s}^{\min} \leq P_{Exchi,s}^t \leq P_{Exchi,s}^{\max}$$

节点电压约束:

$$U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max}$$

潮流方程约束:

$$\begin{cases} P_{iGen}^t - P_{iBCSS}^t - P_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \\ Q_{iGen}^t - P_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t + B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \end{cases}$$

7. 根据权利要求5所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,其特征在于:电网电价更新策略表示如下:

下一时刻电价:

$$\lambda_k^{n+1} = \frac{\partial C_k(P_{kL}^n)}{\partial P_{kL}^n}$$

下一时刻负荷:

$$P_{kL}^{n+1} = P_k(p^{n+1})$$

$$C_k(P_{kL}^n) = c_1(P_{kL}^n)^2 + c_2(P_{kL}^n) + c_3$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 取值为根据实际运行情况设定的常数值;  $\lambda_k^{n+1}$ 为下一时刻电价;  $P_{kL}^{n+1}$ 为下一时刻负荷。

8. 根据权利要求1所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法, 其特征在于: 所述步骤4中,

动力电池分组:

$$N_{PBi,s}^t = \frac{(SOC_{PB}^{\max} - SOC_{PB}^{\min}) C}{P_{PB} \cdot \Delta t}$$

式中:  $SOC_{PB}^{\max}$ 、 $SOC_{PB}^{\min}$ 分别为动力电池的最大、最小荷电状态;  $P_{PB}$ 为动力电池的额定电量; 由上式可以将动力电池按照如下规则分类:

$$\begin{cases} SOC_{PB,1} = SOC_{PB,\min} \\ SOC_{PB,N_{PB+1}} = SOC_{PB,\max} \\ SOC_{PB,i+1} = SOC_{PB,i} + \Delta SOC_{PB} \\ \Delta SOC_{PB} = \Delta t \cdot P_{PB} / C \end{cases}$$

式中:  $\Delta SOC_{PB}$ 为单位时间 $\Delta t$ 内动力电池荷电状态变化量; 可知, 时段 $t$ 内第 $i$ 组的动力电池有2种状态: 充电进入 $i+1$ 组或满充状态; 放电进入 $i-1$ 组或待充状态;

动力电池应满足如下约束:

总电池数量平衡约束:

$$N_{EVt} + J_t + K_t + M_t + W_t = Z$$

其中:  $J_t$ 和 $K_t$ 分别为时段 $t$ 满电量和空电量的电池数量;  $M_t$ 和 $W_t$ 分别为时段 $t$ 处于充电状态和放电状态的电池数量;  $Z$ 为一体化电站内部电池总数量;

处于充电状态的电池数量平衡约束:

$$\begin{cases} M_t^{(1)} + M_t^{(2)} + L + M_t^{(T_c)} = M_t \\ M_t^{(1)} = M_{t+1}^{(2)}, M_t^{(2)} = M_{t+1}^{(3)}, L, M_t^{(T_c-1)} = M_{t+1}^{(T_c)} \end{cases}$$

其中:  $T_c$ 为电池充满电所需的时间段数, 即每组电池有 $T_c$ 个充电过程, 需要经历 $T_c$ 个充程才能充满电;  $M_t^{(1)}$ 、 $M_t^{(2)}$ 、 $M_t^{(T_c)}$ 分别为时段 $t$ 处于第1、2、 $T_c$ 个充程的电池数量  $M_{t+1}^{(2)}$ 、 $M_{t+1}^{(3)}$ 、 $M_{t+1}^{(T_c)}$ 分别为时段 $t+1$ 处于第2、3、 $T_c$ 个充程的电池数量;

处于放电状态的电池数量平衡约束:

$$\begin{cases} W_t^{(1)} + W_t^{(2)} + L + W_t^{(T_d)} = W_t \\ W_t^{(1)} = W_{t+1}^{(2)}, W_t^{(2)} = W_{t+1}^{(3)}, L, W_t^{(T_d-1)} = W_{t+1}^{(T_d)} \end{cases}$$

其中:  $T_d$ 为电池充满电所需的时间段数, 即每组电池有 $T_d$ 个充电过程, 需要经历 $T_d$ 个充程才能充满电;  $W_t^{(1)}$ 、 $W_t^{(2)}$ 、 $W_t^{(T_d)}$ 分别为时段 $t$ 处于第1、2、 $T_d$ 个充程的电池数量  $W_{t+1}^{(2)}$ 、 $W_{t+1}^{(3)}$ 、 $W_{t+1}^{(T_d)}$

分别为时段 $t+1$ 处于第2、3、 $T_d$ 个充程的电池数量；

满电量电池数量平衡约束：

$$M_t^{(T_d)} + J_t \geq N_{EV(t+1)} + W_{t+1}^{(1)} + J_{t+1}$$

其中： $N_{EV(t+1)}$ 为时段 $t+1$ 电动汽车用户换电需求量； $J_{t+1}$ 为时段 $t+1$ 满电量的电池数量； $W_{t+1}^{(1)}$ 为时段 $t+1$ 处于第1个放程的电池数量；

空电池数量平衡约束：

$$N_{EVt} + W_t^{(T_d)} + K_t = M_{t+1}^{(1)} + K_{t+1}$$

其中： $K_{t+1}$ 和 $M_{t+1}^{(1)}$ 分别为时段 $t+1$ 保持空电量的电池数量和处于第1个充程的电池数量；充放电电池数量约束：

$$M_t \leq M_{\max}$$

$$W_t \leq M_{\max}$$

其中： $M_{\max}$ 为一体化电站内部充放电格位数量。

9. 根据权利要求1所述一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法，其特征在于：所述步骤5中，

采用滑动窗口法优化充换电站BCSS运行；优化策略描述如下：、

- 1)、取时间窗口 $H = N_{PB} \cdot \Delta t$ 即PB持续充放电的时间尺度， $N_{PB}$ 为在线PB分组数；
- 2)、进入时段 $t$ ，计算此时段为满足 $t+H$ 时段换电需求而需要开启充电的PB个数，
- 3)、在满足换电需求的前提下，计算滑动窗口 $H$ 内的平均电价( $p_{avg,w}$ )以决策BCSS充、放电：①若 $p_{avg,w}$ 低于优先充电电价，则BCSS优先充电；②若 $p_{avg,w}$ 等于高电价，说明整个时间窗口处于高电价时段，BCSS满足换电需求后优先放电；③若 $p_{avg,w}$ 高于优先充电电价且不高于平电价，则扩大滑动窗口为 $1.5H$ ，并计算 $1.5H$ 平均电价，若此时窗口平均电价变大，说明后续时段电价升高，则BCSS优先充电，否则只需根据安排充电；

4)、每一时段末，将待充和满充PB分别编号放入相应队列，时间窗口跟随优化调度时段后移。

## 一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及微网运行优化技术领域,具体是一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法。

### 背景技术

[0002] 将电动汽车(EV)通过充换电站接入新能源微电网,可以有效缓解大规模EV接入电网带来的负面影响,就地消纳可再生能源,实现低碳。但目前研究主要针对单个充换电站,且基于分时电价的有序充电易产生新的负荷尖峰和充电负荷骤降现象。据此提出区域充换储一体化电站微电网(ISMG)群的分层协调调度,将ISMG群级调度与一体化电站(IS)调度解耦,并分解IS充放电任务,从而合理地分散充放电分布,实现削峰填谷,减少对电网的负载影响与不必要的装机投资。拟基于对偶理论和时段电价滚动更新策略,研究ISMG群级的分散式优化协调调度;采用基于启发式规则的滑动窗口法,研究IS中充换电站和储能电站的协调调度;最终计及电池状态转换,优化动力电池和储能电池充放电。通过修正模型、算法和系统结构,完善区域ISMG群协调调度模型和计算方法,为实现V2G和B2G互动技术、支撑EV和电网的协同发展奠定基础。

### 发明内容

[0003] 本发明提供一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,可以使微电网系统运行成本最小,通过对区域内一体化电站的充放电有序控制,实现电网公司、用户和充换电站运营商的多赢。该方法为电动汽车充换电基础设施建设提供理论依据和技术支撑,并有利于提高电网、微电网及其内充换电站运行的经济效益。

[0004] 为达到上述目的,本发明采取的技术方案为:

[0005] 一种区域充换储一体化电站微电网群协调优化调度方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤(1):考虑电动汽车换电需求和光伏、风力发电的随机特性,利用快速正演算法对场景进行削减,建立充换电站的充放电模型、以及光伏、风力发电功率的模型。

[0007] 所述场景生成技术采用离散的概率分布取代随机变量的不确定性,场景的产生由不确定的电动汽车换电需求、风电、光伏出力构成。快速正演算法是一种将场景进行削减的技术方法,使用该方法可以将大大减少计算,快速获得最佳简化场景集。

[0008] 步骤(2):建立一体化电站的寿命损耗成本模型及其运行损耗模型。

[0009] 步骤(3):构建区域一体化电站微电网群协调优化调度的数学模型。

[0010] 步骤(4):利用对偶理论及其分散式将优化调度计划的分解,安排到一体化电站中的充换电站动力电池和储能电站电池。

[0011] 一体化电站微电网(ISMG)群级调度问题是基于区域整体结构而建立的,模型中一体化电站微电网群与电网间能量交互约束耦合了各一体化电站微电网间的联系,基于对偶理论,对其进行解耦分解成分散式的优化模型。计算出影子价格即对偶问题最优解;根据ISMG群与电网交互功率约束的影子价格,研究分时电价修正策略,计算最终更新的时段电

价;基于更新的时段电价,对ISMG群调度问题进行解耦,建立ISMG群调度的分散式优化模型,研究各ISMG优化调度子问题,求解各ISMG与电网的交互功率。

[0012] 对偶理论,研究线性规划中原始问题与对偶问题之间关系的理论。每一个线性规划问题,称为原始问题;有一个与它对应的对偶线性规划问题,称为对偶问题。

[0013] 步骤(5):利用滚动窗口优化方法,对一体化电站内充换电站和储能电站的协调调度及电池充放电进行优化。

[0014] 充换储一体化电站微电网(ISMG)充电集中时间段为低电价时段(也是负荷曲线的谷时段)。但考虑区域集群行为,在谷时段的集中充电又造成了新的负荷尖峰。这是因为基于分时电价法有序充电优化控制策略,提供了一个理想的充电时间范围,每个ISMG只考虑了自身负荷以及自身决策,并未考虑区域内其它ISMG的能量控制与决策。考虑集群行为对电网运行安全及其利益的影响,对于区域ISMG群级的协调调度,避免出现“峰上加峰”和新的负荷尖峰时段,优化控制方法能将产生的尖峰负荷分配到相邻负荷谷时段或平时段上,最终达到“削峰填谷”的目的;对于单个ISMG的调度策略,能够满足电动汽车换电需求、提高ISMG的运行效益、实现充换电站与储能电站协同增效。

[0015] 本发明的有益效果在于:将电动汽车通过充换电站接入微网,提高了可再生能源的利用率,可降低大规模可再生能源并网对电网带来的冲击,促进了可再生能源的消纳;将充换电站和储能站协调配合,为动力电池提供较为稳定的充放电环境,且动力电池梯次利用提高了动力电池利用效率,同时动力电池为储能站提供可调节容量支撑,在配电网故障时通过PCC交互口可以扩大供电范围进而实现配电网的黑启动,为电网提供支撑,实现多方共赢。

## 附图说明

[0016] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步说明:

[0017] 图1为区域充换储一体化电站微电网群结构图。

[0018] 图2为四层式协调优化调度框图。

[0019] 图3为三步骤式求解计算方法示意图。

[0020] 图4为整体技术路线及求解计算流程图。

[0021] 图5为一体化电站充放电负荷削峰填谷效果示意图;

[0022] 其中:M1表示填谷无尖峰无骤降,M2表示反哺消峰。

## 具体实施方式

[0023] 下面结合实施例及附图,对本发明做进一步地详细说明,但本发明的实施方式不限于此。

[0024] 图1为区域充换储一体化电站微电网群结构图。区域充换储一体化电站微电网群由3个充换储一体化电站微电网组成,其中每个充换储一体化电站微电网由光伏发电、风力发电、柴油机、充换储一体化电站以及负荷组成。柴油机、光伏发电通过逆变器和断路器并入微电网;一体化电站通过整流器和断路器并入微电网。

[0025] 本发明通过将电动汽车充换电站和蓄电池储能站组合在一起构成充放储一体化电站,并入微网。将一体化电站作为整体参与区域微网经济优化调度,并根据充换站和储能

站的不同特性需求,协调区域一体化电站充放电功率在储能站和充换站之间的分配。

[0026] 首先建立四层式优化调度架构,如图2所示。同时,基于对偶理论、分时电价滚动更新机制和基于启发式的滑动窗口法,提出三步式求解计算方法,如图3所示,构建区域内 ISMG协调调度模型和一体化电站电池充放电优化调度模型,将调度计划分解安排到一体化电站中的充换电站动力电池和储能电站电池。具体实施方案如下图4所示:

[0027] 1. 光伏、风力发电功率的建模:

[0028] 1) 风机出力的累积分布函数为:

$$[0029] \quad F_{WT}(P_{WT}) = 1 - \exp(-(V_c + \beta P_{WT} / \varphi)^\sigma)$$

[0030] 式中, $F_{WT}(P_{WT})$  是风机出力的积累概率分布函数; $\beta$ 为韦伯分布函数参数; $V_c$ 为切入风速; $P_{WT}$ 为风电出力; $\varphi$ 为尺度参数。

[0031] 2) 光伏发电出力的累积分布函数为:

$$[0032] \quad F_{PV}(P_{PV}) = \int_0^{P_{PV}} f_{PV}(x) dx$$

[0033] 其中, $f_{PV}(x)$  为光伏发电出力概率分布; $P_{PV}$ 为光伏发电出力。

[0034] 2. 电动汽车的换电概率分布为:

$$[0035] \quad f_{EX}(x) = \alpha E(x) N_{EV}$$

[0036] 其中: $\alpha$ 为电动汽车每公里耗电量; $N_{EV}$ 电动汽车数量。

[0037] 3. 电动汽车和风电、光伏在场景s下的概率:

$$[0038] \quad \tau_s = \alpha E(x) \cdot N_{EV} \cdot F_{PV}(P_{PV}) \cdot F_{WT}(P_{WT})$$

[0039] 其中: $\alpha$ 为电动汽车每公里耗电量; $N_{EV}$ 电动汽车数量; $F_{WT}(P_{WT})$  是风机出力的积累概率分布函数; $F_{PV}(P_{PV})$  是风机出力的积累概率分布函数;

[0040] 4. 充换电站的充放电模型为:

$$[0041] \quad P_{BCSSi,s,ch} = \eta_{PBi,s,ch} \cdot P_{PBi,s,ch} / \eta_{ch}$$

$$[0042] \quad P_{BCSSi,s,dis} = \eta_{PBi,s,dis} \cdot P_{PBi,s,dis} \cdot \eta_{dis}$$

[0043] 式中, $P_{PBi,s,ch}^{min}$ 、 $P_{PBi,s,ch}^{max}$  分别为动力电池的最小、最大充电功率; $P_{PBi,s,dis}^{min}$ 、 $P_{PBi,s,dis}^{max}$  分别为动力电池的最小、最大放电功率。

[0044] 5. 充换储一体化电站寿命损耗成本模型:

$$[0045] \quad \begin{cases} C_{ch} = \frac{C_{init}}{N(x)} \cdot \frac{k_{ch}}{P_{ch} \cdot SOC_{start}} \cdot \frac{SOC_{max}}{SOC_{end}} \\ C_{dis} = \frac{C_{init}}{N(x)} \cdot \frac{k_{dis}}{P_{dis} \cdot SOC_{end}} \cdot \frac{SOC_{start}}{SOC_{max}} \end{cases}$$

$$[0046] \quad x = |SOC_{start} - SOC_{end}|$$

[0047] 其中: $C_{init}$ 为充换储一体化电站内蓄电池投资成本; $C_{ch}$ 、 $C_{dis}$ 分别为充、放电损耗

[0048] 成本; $SOC_{max}$ 、 $SOC_{min}$ 、 $SOC_{start}$ 、 $SOC_{end}$ 分别为最大、最小荷电状态、充放电始末荷

[0049] 电状态; $P_{ch}$ 、 $P_{dis}$ 分别为充放电功率; $k_{ch}$ 、 $k_{dis}$ 分别为充放电影响因子。

[0050] 运行损耗主要指的是动力电池的充放电带来的损耗,实际上已经包含在了寿命损耗成本里面。

[0051] 6. 区域一体化电站微电网群协调优化调度的数学模型为:

$$[0052] \quad \min C_{MG} = \min \sum_{s=1}^S \tau_s \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (C_{DG} + C_{Exch} + C_{CSSIS})$$

$$[0053] \quad C_{DG} = aP_{DG,i}^t{}^2 + bP_{DG,i}^t + c + \rho P_{DG,i}^t$$

$$[0054] \quad C_{Exch} = \sum_{t=1}^T \lambda_{MG}^t P_{grid}^t$$

$$[0055] \quad C_{CSSIS} = C_{ch} + C_{dis} - \alpha \sum_{t=1}^T (N_{EVt} + \lambda CN_{EVt})$$

[0056] 其中,  $C_{DG}$ 为柴油发电机成本;  $C_{Exch}$ 与电网交互成本;  $C_{CSSIS}$ 充换储一体化电站成本;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $\rho$ 分别为柴油发电机成本系数、污染惩罚因子;  $P_{tDG,i}$ 为时刻 $t$ 柴油发电机出力;  $\lambda_{MG}^t$ 为微网与电网交易电价;  $P_{grid}^t$ 为微电网与电网的交互功率;  $N_{EVt}$ 为时段 $t$ 的换电站BSS服务区内电动汽车用户更换电池的需求量;  $\lambda$ 为换电站BSS向电动汽车用户提供的换电零售价;  $C$ 为电池的标准容量。

[0057] 7. 相应的约束条件为:

[0058] 功率平衡约束:

$$[0059] \quad P_{WTi,s}^t + P_{PVi,s}^t + P_{DGi,s}^t + P_{Exchi,s}^t + P_{PBi,s,dis}^t = P_{Li,s}^t + P_{PBi,s,ch}^t$$

[0060] 式中,  $P_{WTi,s}^t$ 、 $P_{PVi,s}^t$ 、 $P_{DGi,s}^t$ 、 $P_{Exchi,s}^t$ 、 $P_{PBi,s,dis}^t$ 分别为风力发电功率、光伏发电功率、柴油机发电功率、与电网交互功率、动力电池放电功率;  $P_{Li,s}^t$ 、 $P_{PBi,s,ch}^t$ 分别为负荷、动力电池充电功率。

[0061] 柴油发电机出力和爬坡约束:

$$P_{DGi,s}^{\min} \leq P_{DGi,s}^t \leq P_{DGi,s}^{\max}$$

[0062]

$$-R_{i,down} \Delta t \leq P_{DGi,s}^t - P_{DGi,s}^{t-1} \leq R_{i,up} \Delta t$$

[0063] 式中:  $P_{DG}^{\min}$ 、 $P_{DG}^{\max}$ 分别为柴油机的出力上下限;  $R_{down}$ 、 $R_{up}$ 为柴油机的爬坡速率。

[0064] 充放电功率约束:

$$[0065] \quad P_{PBi,s,ch}^{\min} \leq P_{PBi,s,ch}^t \leq P_{PBi,s,ch}^{\max}$$

$$[0066] \quad P_{PBi,s,dis}^{\min} \leq P_{PBi,s,dis}^t \leq P_{PBi,s,dis}^{\max}$$

[0067] 式中,  $P_{PBi,s,ch}^{\min}$ 、 $P_{PBi,s,ch}^{\max}$ 分别为动力电池的最小、最大充电功率;  $P_{PBi,s,dis}^{\min}$ 、 $P_{PBi,s,dis}^{\max}$ 分别为动力电池的最小、最大放电功率。

[0068] PCC交换功率约束:

$$[0069] \quad P_{Exchi,s}^{\min} \leq P_{Exchi,s}^t \leq P_{Exchi,s}^{\max}$$

[0070] 式中:  $P_{Exch}^{\max}$ 、 $P_{Exch}^{\min}$ 分别为PCC处交互功率上限和下限。

[0071] 节点电压约束:

$$[0072] \quad U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max}$$

[0073] 式中:  $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为节点 $i$ 的电压上限和下限。

[0074] 潮流方程约束:

$$[0075] \quad \begin{cases} P_{iGen}^t - P_{iBCSS}^t - P_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \\ Q_{iGen}^t - P_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t + B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \end{cases}$$

[0076] 式中： $P_{iGen}^t$ 、 $Q_{iGen}^t$ 分别为节点i处的电源(大电网或DG)在时段t注入的有功功率和无功功率,若电源为大电网,说明节点i是平衡节点(与大电网相连),则 $P_{iGen}^t$ 、 $Q_{iGen}^t$ 等于微电网从大电网购入的功率,若电源为DG,则 $P_{iGen}^t$ 、 $Q_{iGen}^t$ 等于DG的发电功率,若节点i既不与大电网相连,也未安装DG,则 $P_{iGen}^t$ 、 $Q_{iGen}^t$ 等于0; $P_{iCSSIS}^t$ 为节点i处CSSIS在时段t的充电功率,该值由CSSIS运行商根据自身优化模型计算得到,不受微电网控制; $P_{iL}^t$ 、 $Q_{iL}^t$ 分别为节点i处传统负荷在时段t消耗的有功功率和无功功率; $j \in i$ 表示所有与节点i直接相连的节点,包括 $j=i$ ; $U_i^t$ 、 $U_j^t$ 分别为节点i和节点j在时段t的电压幅值; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中相应元素的实部和虚部; $\theta_{ij}^t$ 为节点i和j在时段t的电压相角差。

[0077] 8. 电网电价更新策略表示如下:

[0078] 下一时刻电价:

$$[0079] \quad \lambda_k^{n+1} = \frac{\partial C_k(P_{kL}^n)}{\partial P_{kL}^n}$$

[0080] 式中： $\lambda_k^n$ 为上一时刻电价; $P_{kL}^n$ 为上一时刻负荷。

[0081] 下一时刻负荷:

$$[0082] \quad P_{kL}^{n+1} = P_k(P^{n+1})$$

$$[0083] \quad C_k(P_{kL}^n) = c_1(P_{kL}^n)^2 + c_2(P_{kL}^n) + c_3$$

[0084] 式中, $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 取值为根据实际运行情况设定的常数值; $\lambda_k^{n+1}$ 为下一时刻电价; $P_{kL}^{n+1}$ 为下一时刻负荷。

[0085] 9. 基于滚动窗口优化方法对一体化电站内充换电站和储能电站的协调调度及电池充放电优化表示如下:

[0086] 1) 动力电池分组:

$$[0087] \quad N_{PBi,s}^t = \frac{(SOC_{PB}^{\max} - SOC_{PB}^{\min}) C}{P_{PB} \cdot \Delta t}$$

[0088] 式中, $SOC_{PB}^{\max}$ 、 $SOC_{PB}^{\min}$ 分别为动力电池的最大、最小荷电状态; $P_{PB}$ 为动力电池的额定电量。由上式可以将动力电池按照如下规则分类:

$$[0089] \quad \begin{cases} SOC_{PB,1} = SOC_{PB,\min} \\ SOC_{PB,N_{PB}+1} = SOC_{PB,\max} \\ SOC_{PB,i+1} = SOC_{PB,i} + \Delta SOC_{PB} \\ \Delta SOC_{PB} = \Delta t \cdot P_{PB} / C \end{cases}$$

[0090] 式中, $\Delta SOC_{PB}$ 为单位时间 $\Delta t$ 内动力电池荷电状态变化量。可知,时段t内第i组的动力电池有2种状态:充电进入i+1组或满充状态;放电进入i-1组或待充状态。

[0091] 2) 动力电池应满足如下约束:

[0092] a. 总电池数量平衡约束:

$$[0093] \quad N_{EVt} + J_t + K_t + M_t + W_t = Z$$

[0094] 其中,  $J_t$  和  $K_t$  分别为时段  $t$  满电量和空电量的电池数量;  $M_t$  和  $W_t$  分别为时段  $t$  处于充电状态和放电状态的电池数量;  $Z$  为一体化电站内部电池总数量。

[0095] b. 处于充电状态的电池数量平衡约束:

$$[0096] \quad \begin{cases} M_t^{(1)} + M_t^{(2)} + L + M_t^{(T_c)} = M_t \\ M_t^{(1)} = M_{t+1}^{(2)}, M_t^{(2)} = M_{t+1}^{(3)}, L, M_t^{(T_c-1)} = M_{t+1}^{(T_c)} \end{cases}$$

[0097] 其中,  $T_c$  为电池充满电所需的时间段数, 即每组电池有  $T_c$  个充电过程, 需要经历  $T_c$  个充程才能充满电;  $M_t^{(1)}$ 、 $M_t^{(2)}$ 、 $M_t^{(T_c)}$  分别为时段  $t$  处于第 1、2、 $T_c$  个充程的电池数量  $M_{t+1}^{(2)}$ 、 $M_{t+1}^{(3)}$ 、 $M_{t+1}^{(T_c)}$  分别为时段  $t+1$  处于第 2、3、 $T_c$  个充程的电池数量。

[0098] c. 处于放电状态的电池数量平衡约束:

$$[0099] \quad \begin{cases} W_t^{(1)} + W_t^{(2)} + L + W_t^{(T_d)} = W_t \\ W_t^{(1)} = W_{t+1}^{(2)}, W_t^{(2)} = W_{t+1}^{(3)}, L, W_t^{(T_d-1)} = W_{t+1}^{(T_d)} \end{cases}$$

[0100] 其中,  $T_d$  为电池充满电所需的时间段数, 即每组电池有  $T_d$  个放电过程, 需要经历  $T_d$  个放程才能充满电;  $W_t^{(1)}$ 、 $W_t^{(2)}$ 、 $W_t^{(T_d)}$  分别为时段  $t$  处于第 1、2、 $T_d$  个放程的电池数量  $W_{t+1}^{(2)}$ 、 $W_{t+1}^{(3)}$ 、 $W_{t+1}^{(T_d)}$  分别为时段  $t+1$  处于第 2、3、 $T_d$  个放程的电池数量。

[0101] d. 满电量电池数量平衡约束:

$$[0102] \quad M_t^{(T_c)} + J_t \geq N_{EV(t+1)} + W_{t+1}^{(1)} + J_{t+1}$$

[0103] 其中,  $N_{EV(t+1)}$  为时段  $t+1$  电动汽车用户换电需求量;  $J_{t+1}$  为时段  $t+1$  满电量的电池数量;  $W_{t+1}^{(1)}$  为时段  $t+1$  处于第 1 个放程的电池数量。

[0104] e. 空电池数量平衡约束:

$$[0105] \quad N_{EVt} + W_t^{(T_d)} + K_t = M_{t+1}^{(1)} + K_{t+1}$$

[0106] 其中,  $K_{t+1}$  和  $M_{t+1}^{(1)}$  分别为时段  $t+1$  保持空电量的电池数量和处于第 1 个充程的电池数量。

[0107] f. 充放电电池数量约束:

$$[0108] \quad M_t \leq M_{\max}$$

$$[0109] \quad W_t \leq M_{\max}$$

[0110] 其中,  $M_{\max}$  为一体化电站内部充放电格位数量。

[0111] 10. 一体化电站的优化策略:

[0112] 为满足 BCSS 内动力电池恒功率持续充放电的需求, 本文采用滑动窗口法优化充换电站 BCSS 运行。优化策略描述如下:

[0113] 1) 取时间窗口  $H = N_{PB} \cdot \Delta t$  即 PB 持续充放电的时间尺度,  $N_{PB}$  为在线 PB 分组数。

[0114] 2) 进入时段  $t$ , 计算此时段为满足  $t+H$  时段换电需求而需要开启充电的 PB 个数,

[0115] 3) 在满足换电需求的前提下, 计算滑动窗口  $H$  内的平均电价 ( $p_{avg,w}$ ) 以决策 BCSS 充、放电: ① 若  $p_{avg,w}$  低于优先充电电价 (取 0.3 元), 则 BCSS 优先充电; ② 若  $p_{avg,w}$  等于高电价, 说明整个时间窗口处于高电价时段, BCSS 满足换电需求后优先放电; ③ 若  $p_{avg,w}$  高于优先充电

电价且不高于平电价,则扩大滑动窗口为1.5H,并计算1.5H平均电价,若此时窗口平均电价变大,说明后续时段电价升高,则BCSS优先充电,否则只需根据安排充电。

[0116] 4) 每一时段末,将待充和满充PB分别编号放入相应队列,时间窗口跟随优化调度时段后移。

[0117] 附图5仿真结果表明:使用本方案后一体化电站的充电负荷有效均匀地转移到负荷的谷时段,峰时段一体化电站反哺电网放电削峰并获利,避免区域一体化电站谷时段集中充电产生新的负荷尖峰,避免充放状态频繁转换而影响电池的使用寿命。

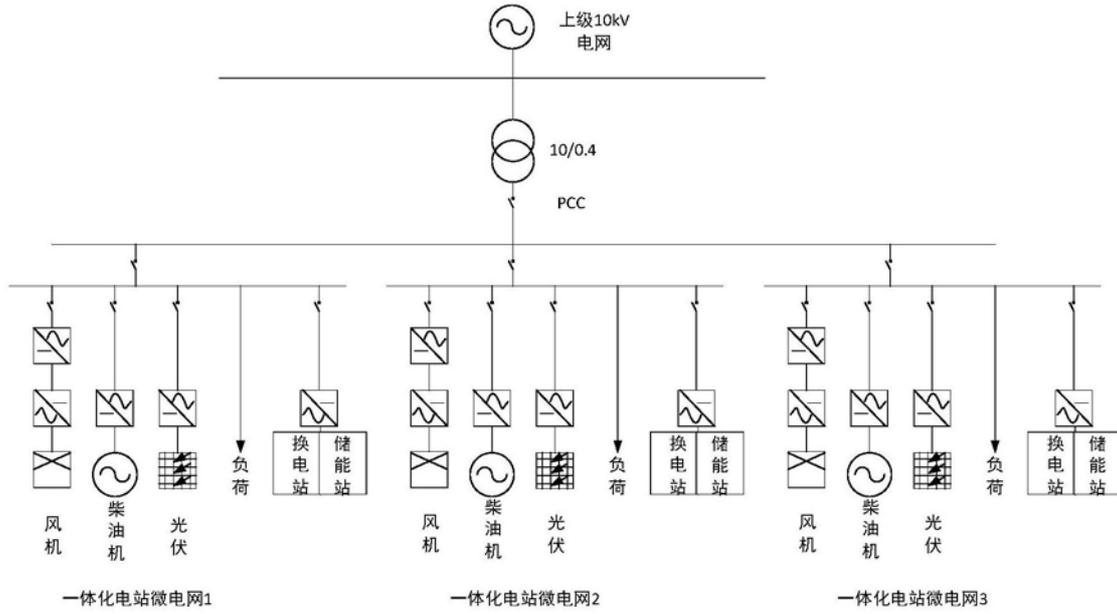


图1

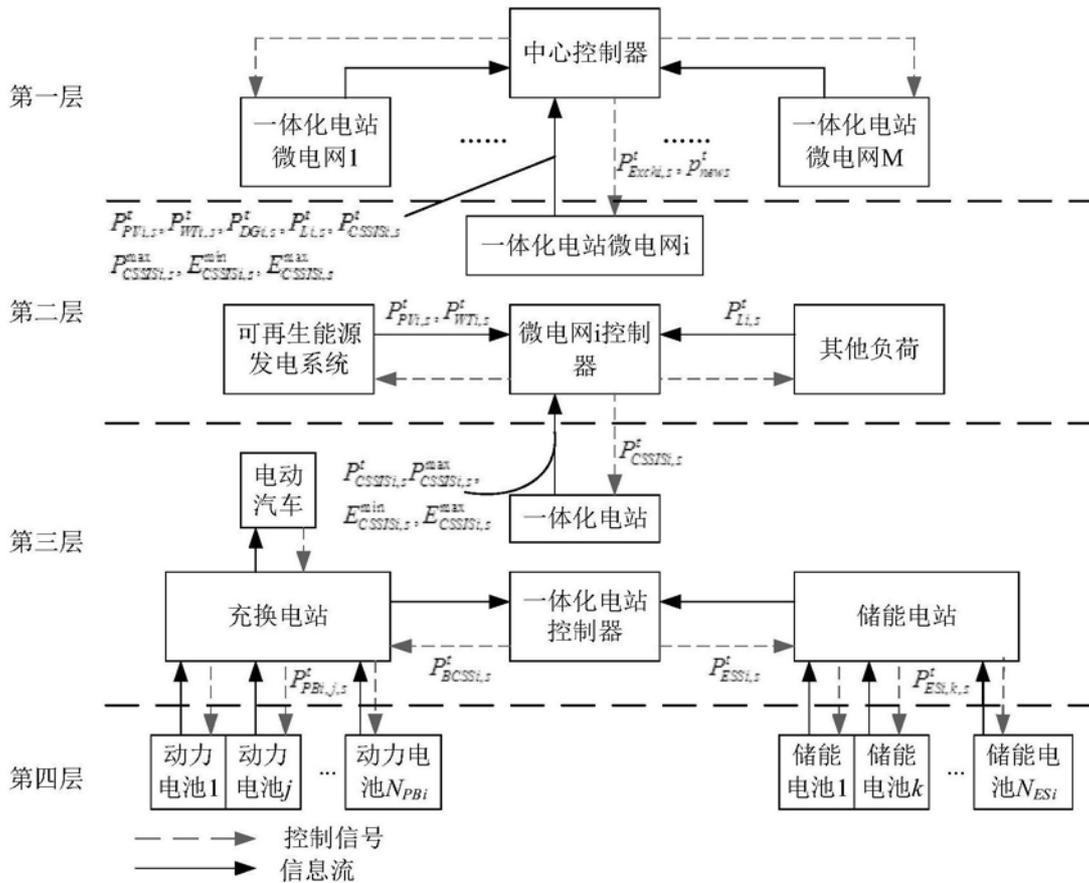


图2

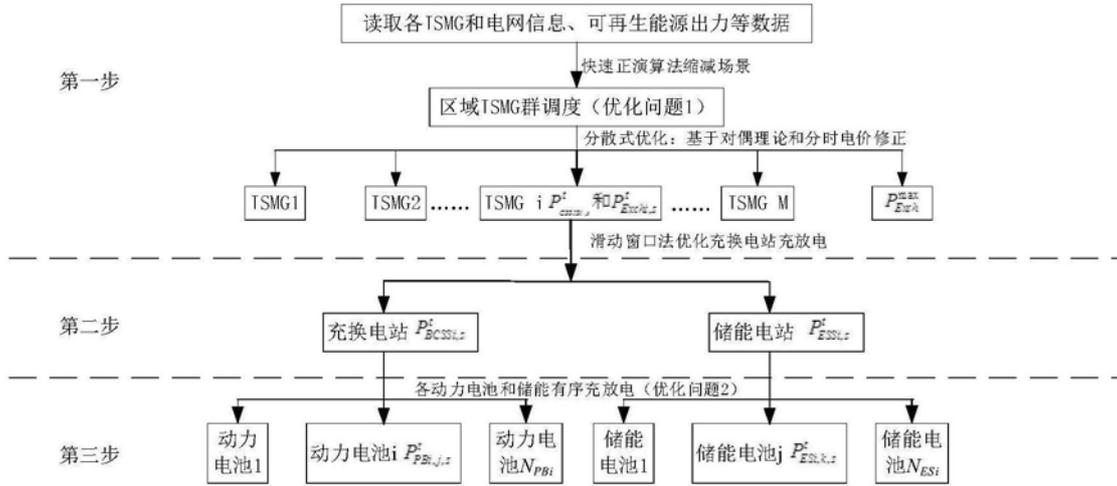


图3

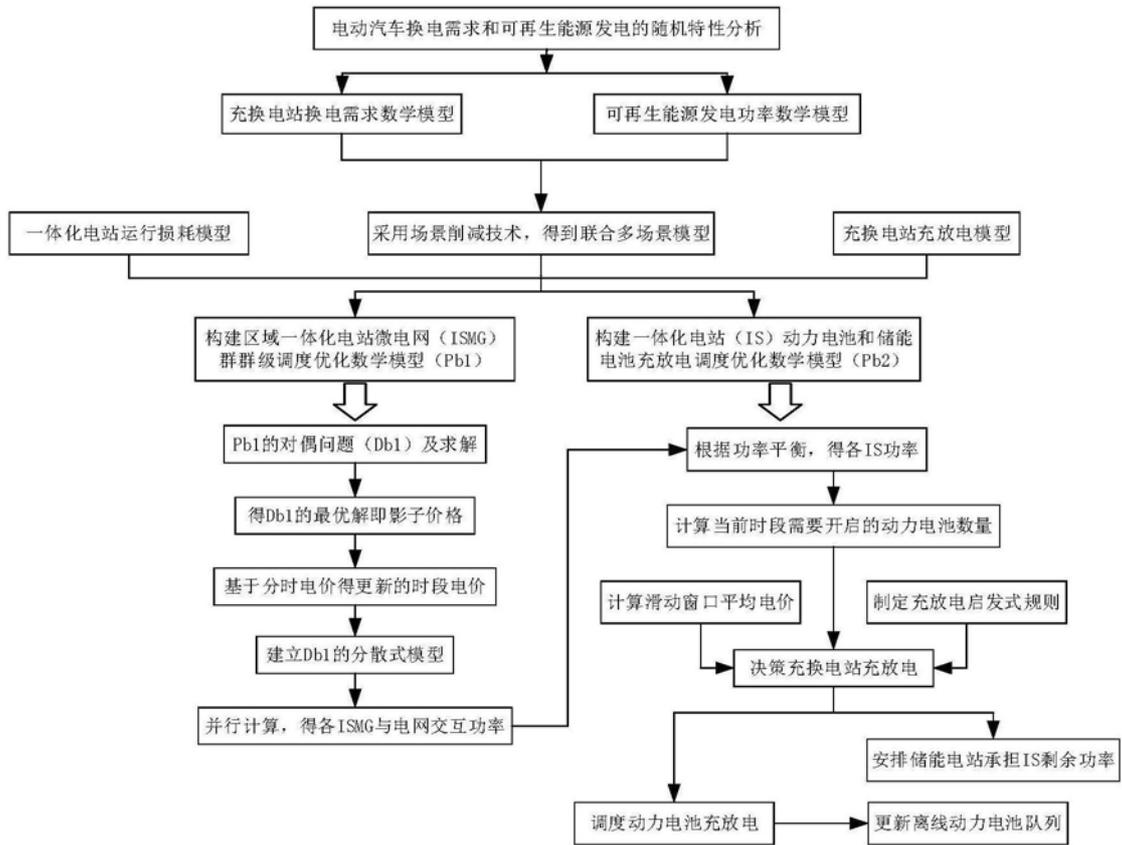


图4

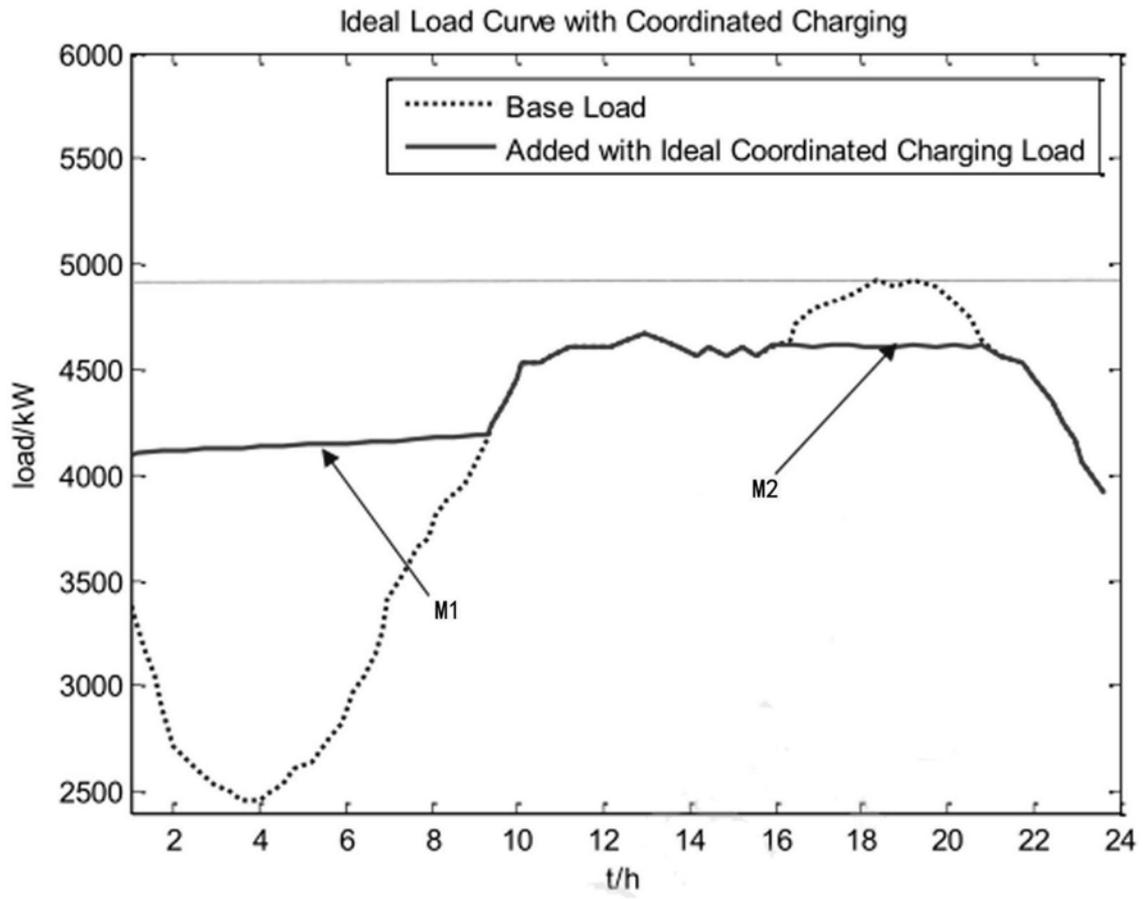


图5