(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 117081130 A
(43)申请公布日 2023.11.17

(21)申请号 202311321980.0

(22)申请日 2023.10.13

(71)申请人 国网电动汽车服务(天津)有限公司
地址 300457 天津市滨海新区天津滨海-中关村科技园荣晟广场4号楼806-56
申请人 国网天津市电力公司
国家电网有限公司

(72)发明人 吴俊峰 张明凯 朱洪东 卢欣 赵迎春 高帅 多葭宁 王宗莲 姚远 朱江 董得龙 王麟 刘宏喆 任博强 葛淑娴

(74)专利代理机构 天津盛理知识产权代理有限公司 12209
专利代理师 李晶

(51)Int.Cl.
H02J 3/32(2006.01)
B60L 55/00(2019.01)
G06Q 10/04(2023.01)
G06Q 10/0631(2023.01)
G06Q 50/06(2012.01)

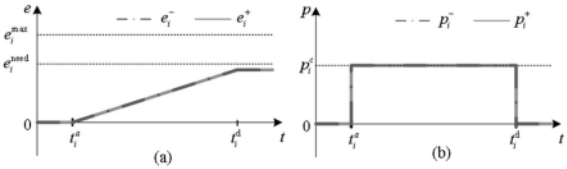
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法

(57)摘要

本发明涉及基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法,建立了V2G插电式电动汽车集群的聚合模型,利用聚合参数表示整个V2G集群的电池容量和功率约束,从而降低了预测的难度。基于所提出的聚合模型,建立了大规模电动汽车V2G可用容量的评估方法。最终在保证PEV实时运行充电需求的条件下,实现对V2G可用容量的预测,为目标微网系统能量优化调控策略的制定提供有效依据。



CN 117081130 A

1.基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤1、构建V2G插电式电动汽车集群的聚合模型,通过聚合参数表示V2G集群的电池容量和功率约束;

步骤2、根据步骤1中V2G插电式电动汽车集群的聚合模型,构建电动汽车V2G可用容量的评估模型;

步骤3、根据步骤2中构建的评估模型对V2G可用容量进行评估。

2.根据权利要求1所述的基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法,其特征在于:所述步骤1中构建V2G插电式电动汽车集群的聚合模型的具体实现方法为:

通过利用所有单个PEV的能量和功率边界的总和表示V2G集群的总能量和功率边界,其中V2G集群的不可控充电总功率为:

$$P^{u}(\tau)=\sum_{i}p_{i}^{u}(\tau),\forall\tau$$;

V2G集群的可控能量和功率总量边界为:

$$E^{+/(-)}(\tau)=\sum_{i}e_{i}^{+/(-)}(\tau),\forall\tau$$

$$P^{+/(-)}(\tau)=\sum_{i}p_{i}^{+/(-)}(\tau),\forall\tau$$;

其中,$p_{i}^{u}(\tau)$表示不可控电池的充电功率,$e_{i}^{+}(\tau)$表示电池充电能量上边界,$e_{i}^{-}(\tau)$表示电池充电能量下边界,$p_{i}^{+}(\tau)$表示电池功率上边界,$p_{i}^{-}(\tau)$表示电池功率下边界,集合$\{P^{u},E^{+/(-)},P^{+/(-)}\}$包含V2G集群的聚合充电需求和V2G电池容量信息。

3.根据权利要求2所述的基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法,其特征在于:所述步骤2的具体实现方法为:将V2G插电式电动汽车集群的聚合模型分为两部分,第一部分为新到达的PEV计算的总能量和功率边界,第一部分边界未被实时充放电操作改变,第二部分为已连接到电网的PEV计算的总能量和功率边界;

设置t表示时间间隔,t_0表示当前时间间隔,$[t_1,t_2](t_1\geq t_0)$表示评估范围,更新连接到电网的PEV的第二部分总能量和功率边界$\boldsymbol{D}_{t_0}$,并预测在$[t_0,t_2]$之间到达的PEV的第一部分总能量和功率边界$\boldsymbol{D}_{[t_0,t_2]}^{F}$,得到能量和功率边界$\{P^{u},E^{+/(-)}(t),P^{+/(-)}(t)\,|\,t=t_0,\ldots,t_{\max}^{d}\}$;

给定V2G集群电池侧可控PEV的总功率调度$P^{s}(t),t=t_0,\ldots,t_{\max}^{d}$,计算V2G集群在评估范围内的最大可控充电功率$P^{\max}(t)$和放电功率$P^{\min}(t)$作为V2G容量,其中最大可控充电功率$P^{\max}(t)$为:

$$P^{\max}(t)=\min(P^{+}(t),E^{+}(t)/\Delta t-\sum_{\tau=t_0}^{t-1}P^{s}(\tau))$$;

最大可控充电功率$P^{\max}(t)$的约束条件为:

$$P^{s}(t)\leq P^{\max}(t)\leq P^{+}(t),\forall t=t_1,\ldots,t_2$$;

$$(\sum_{\tau=t_0}^{t-1} P^s(\tau)+P^{\max}(t))\Delta t \le E^+(t), \forall t=t_1,\ldots,t_2 ;$$

其中，$P^s(t)$表示V2G集群电源侧可控调度功率，$P^+(t)$表示电池功率上限，$E^+(t)$表示V2G集群电源获得的能量上限；

最大可控放电功率$P^{\min}(t)$为：

$$P^{\min}(t)=\max(P^-(t), E^-(t)/\Delta t-\sum_{\tau=t_0}^{t-1} P^s(\tau)) ;$$

最大可控放电功率$P^{\min}(t)$约束条件为：

$$(\sum_{\tau=t_0}^{t-1} P^s(\tau)+P^{\min}(t))\Delta t \ge E^-(t), \forall t=t_1,\ldots,t_2 ;$$

$$P^-(t) \le P^{\min}(t) \le P^s(t), \forall t=t_1,\ldots,t_2 ;$$

t期间向电网注入或从电网吸收的V2G功率为：

$$P_{gr}^{\max}(t)=P^u(t)/\eta^c+P^{\max}(t)/\eta^c$$

$$P_{gr}^{\min}(t)=P^u(t)/\eta^c+P^{\min}(t)/\eta^d ;$$

其中，η^c表示充电效率，η^d表示放电效率。

基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法

技术领域

[0001] 本发明属于车电互联技术领域,尤其是基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法。

背景技术

[0002] 研究和实践表明,如何在保障电能质量的前提下进一步提高可再生能源发电渗透率是实现微网(特别是孤岛微网)经济运行的基本策略,而提供足够容量的储能元件参与微网的能量动态平衡是关键。通常,微网必须配置匹配容量的专用储能装置(包括飞轮、超级电容、蓄电池组等),其购置价格昂贵且维护成本很高。近年来,插电式电动汽车(Plug-in electric vehicles,PEV)和车辆到电网(Vehicle-to-grid,V2G)技术得到快速发展。由于电动车(EV)动力电池单体容量较大,当目标区域内EV数量相对多时,其对应动力电池集群总储能容量相对于总发电容量通常规模较小的微网系统相当可观。综合交通、环保、供电和经济等多方面需求,基于V2G技术将EV电池集群作为储能元件参与微网运行,接受微网能量管理中心的充、放电控制的方案不仅大大降低微网的投资和维护成本,还可充分发挥其能量的快速双向可控特性,利用系统调峰、调频和经济运行。基于V2G技术的大规模PEV在聚合器的控制下共同充当储能系统,例如在能源市场中为电网提供辅助服务。提前定量评估PEV集群的V2G容量,即充电和放电功率范围,对于V2G的调度实施至关重要。然而,由于PEV驾驶行为的随机特性,充电需求难以预测,这给V2G容量评估带来了技术上的困难。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,提出基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法,在保证PEV实时运行充电需求的条件下,实现对V2G可用容量的预测,为目标微网系统能量优化调控策略的制定提供有效依据。

[0004] 本发明解决其技术问题是采取以下技术方案实现的:

基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法,包括以下步骤:

步骤1、构建V2G插电式电动汽车集群的聚合模型,通过聚合参数表示V2G集群的电池容量和功率约束;

步骤2、根据步骤1中V2G插电式电动汽车集群的聚合模型,构建电动汽车V2G可用容量的评估模型;

[0005] 步骤3、根据步骤2中构建的评估模型对V2G可用容量进行评估。

[0006] 而且,所述步骤1中构建V2G插电式电动汽车集群的聚合模型的具体实现方法为:

通过利用所有单个PEV的能量和功率边界的总和表示V2G集群的总能量和功率边界,其中V2G集群的不可控充电总功率为:

[0007] $$P^{u}(\tau)=\sum_{i}p_{i}^{u}(\tau),\forall\tau$$;

V2G集群的可控能量和功率总量边界为:

[0008] $$E^{+/(-)}(\tau)=\sum_i e_i^{+/(-)}(\tau),\forall\tau$$
$$P^{+/(-)}(\tau)=\sum_i p_i^{+/(-)}(\tau),\forall\tau$$ ；

[0009] 其中，$p_i^u(\tau)$表示不可控电池的充电功率，$e_i^+(\tau)$表示电池充电能量上边界，$e_i^-(\tau)$表示电池充电能量下边界，$p_i^+(\tau)$表示电池功率上边界，$p_i^-(\tau)$表示电池功率下边界，集合$\{P^u,E^{+/(-)},P^{+/(-)}\}$包含V2G集群的聚合充电需求和V2G电池容量信息。

[0010] 而且，所述步骤2的具体实现方法为：将V2G插电式电动汽车集群的聚合模型分为两部分，第一部分为新到达的PEV计算的总能量和功率边界，第一部分边界未被实时充放电操作改变，第二部分为已连接到电网的PEV计算的总能量和功率边界；

[0011] 设置t表示时间间隔，t_0表示当前时间间隔，$[t_1,t_2](t_1\geq t_0)$表示评估范围，更新连接到电网的PEV的第二部分总能量和功率边界$\boldsymbol{D}_{t_0}$，并预测在$[t_0,t_2]$之间到达的PEV的第一部分总能量和功率边界$\boldsymbol{D}^F_{[t_0,t_2]}$，得到能量和功率边界$\{P^u,E^{+/(-)}(t),P^{+/(-)}(t)\,|\,t=t_0,\ldots,t^d_{\max}\}$；

[0012] 给定V2G集群电池侧可控PEV的总功率调度$P^s(t)$，$t=t_0,\ldots,t^d_{\max}$，计算V2G集群在评估范围内的最大可控充电功率$P^{\max}(t)$和放电功率$P^{\min}(t)$作为V2G容量，其中最大可控充电功率$P^{\max}(t)$为：

[0013] $$P^{\max}(t)=\min(P^+(t),E^+(t)/\Delta t-\sum_{\tau=t_0}^{t-1}P^s(\tau))$$ ；

[0014] 最大可控充电功率$P^{\max}(t)$的约束条件为：

[0015] $$P^s(t)\leq P^{\max}(t)\leq P^+(t),\forall t=t_1,\ldots,t_2$$ ；

[0016] $$(\sum_{\tau=t_0}^{t-1}P^s(\tau)+P^{\max}(t))\Delta t\leq E^+(t),\forall t=t_1,\ldots,t_2$$ ；

[0017] 其中，$P^s(t)$表示V2G集群电源侧可控调度功率，$P^+(t)$表示电池功率上限，$E^+(t)$表示V2G集群电源获得的能量上限；

[0018] 最大可控放电功率$P^{\min}(t)$为：

[0019] $$P^{\min}(t)=\max(P^-(t),E^-(t)/\Delta t-\sum_{\tau=t_0}^{t-1}P^s(\tau))$$ ；

[0020] 最大可控放电功率$P^{\min}(t)$约束条件为：

[0021] $$(\sum_{\tau=t_0}^{t-1}P^s(\tau)+P^{\min}(t))\Delta t\geq E^-(t),\forall t=t_1,\ldots,t_2$$ ；

[0022] $$P^-(t)\leq P^{\min}(t)\leq P^s(t),\forall t=t_1,\ldots,t_2$$ ；

t期间向电网注入或从电网吸收的V2G功率为：

[0023] $$P_{gr}^{\max}(t)=P^{u}(t)/\eta^{c}+P^{\max}(t)/\eta^{c}$$ ；
$$P_{gr}^{\min}(t)=P^{u}(t)/\eta^{c}+P^{\min}(t)/\eta^{d}$$

[0024] 其中，η^{c}表示充电效率，η^{d}表示放电效率。

[0025] 本发明的优点和积极效果是：

[0026] 本发明建立了V2G插电式电动汽车集群的聚合模型，利用聚合参数表示整个V2G集群的电池容量和功率约束，从而降低了预测的难度。基于所提出的聚合模型，建立了大规模电动汽车V2G可用容量的评估方法。最终在保证PEV实时运行充电需求的条件下，实现对V2G可用容量的预测，为目标微网系统能量优化调控策略的制定提供有效依据。

附图说明

[0027] 图1为本发明不可控PEV的能量和功率边界示意图；

[0028] 图2为本发明$e_i^{\min}\leq 0$时可控PEV的能量和功率边界示意图；

[0029] 图3为本发明$e_i^{\min}>0$时可控PEV的能量和功率边界示意图；

图4为本发明聚合V2G集群的可控能量和功率边界示意图；

图5为本发明V2G容量评估框架结构图；

图6为本发明PEV组的分类示意图；

图7为本发明利用最佳充放电调度策略的平均储备概况图；

[0030] 图8为本发明使用不同策略的平均实时功率曲线图。

具体实施方式

[0031] 以下结合附图对本发明做进一步详述。

[0032] 基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法，包括以下步骤：

[0033] 步骤1、构建V2G插电式电动汽车集群的聚合模型，通过聚合参数表示V2G集群的电池容量和功率约束。

[0034] 本发明构建的V2G插电式电动汽车集群的聚合模型同时考虑不可控PEV集群和可控PEV集群两种情况，并考虑电源充放电效率。

[0035] 针对单个PEV模型

[0036] 给定第i(i=1,2,…,n)个PEV的充电和放电灵活性通过其能量和功率边界进行建模，即$\{e_i^{+/(-)},p_i^{+/(-)}\}$，它指定所有可能的充电轨迹的可行集合。上能量边界$e_i^{+}$对应于消耗能量最快的路径，而下能量边界$e_i^{-}$对应于消耗能量最慢的路径。$p_i^{+}$对应于最大充电功率，$p_i^{-}$对应于最大放电功率。

[0037] 其中电池获取的最大能量$e_i^{\max}$、PEV出发时电池所需能量e_i^{need}和电池放电前获取的最小能量$e_i^{\min}$，分别表示为：

[0038] $$e_i^{\max}=(\mathrm{SoC}_i^{\max}-\mathrm{SoC}_i^{a})B_i \quad (1)$$

[0039] $$e_i^{need}=(\mathrm{SoC}_i^{d}-\mathrm{SoC}_i^{a})B_i \quad (2)$$

[0040] $e_i^{\min}=(\mathrm{SoC}_i^{\min}-\mathrm{SoC}_i^{a})B_i$ (3)

[0041] 其中，$\mathrm{SoC}_i^{\max}$和$\mathrm{SoC}_i^{\min}$分别表示第i个PEV充电SoC最大值和放电SoC最小值，SoC_i^{a}和SoC_i^{d}分别表示第i个PEV抵达目的地是的SoC的值和出发前SoC的值。$\mathrm{SoC}_i^{\max}$通常等于100%，SoC_i^{d}取决于用户未来的出行计划，为了满足用户的常规驾驶需求并保持电池寿命，PEV应在连接到电网后立即充电，直到其SoC达到安全最小阈值$\mathrm{SoC}_i^{\min}$，B_i表示第i 辆PEV的电池容量。

[0042] 针对不可控PEV充电需求：

如果PEV的预期停车时间不够长，无法充分充电，则必须在整个停车时间内继续充电。其能量和功率边界不可变，如图1所示。对于第i个PEV的不可控充电需求，使用不可控充电功率来代替其能量和功率边界：

[0043] $$p_i^{u}(\tau)=\begin{cases}0, & \tau>t_i^{d}\ \text{or}\ \tau\le t_i^{a}\\ p_i^{c}\eta^{c}, & t_i^{a}<\tau\le t_i^{d}\end{cases}\quad(4)$$

[0044] 其中，$p_i^{u}(\tau)$表示不可控电池侧充电功率，p_i^{c}表示电网侧额定充电功率，η^{c}表示充电效率，t_i^{a}表示抵达时刻，t_i^{d}表示预计出发时刻，τ表示连续时间变量(时刻)。

[0045] 针对充电需求可控：

[0046] 预期停车时间长于所需充电时间的PEV具有灵活的充放电能力；它在聚合器的控制下从电网充电(或放电)。

[0047] 当第i个PEV的$e_i^{\min}\le 0$时，表示在整个停车期间充电或放电，其能量和功率边界如图2所示。其能量边界用式(5)~(6)计算，相应的功率边界用式(7)~(8)计算：

[0048] $$e_i^{+}(\tau)=\begin{cases}e_i^{+}(t_i^{d}), & \tau>t_i^{d}\\ \min(e_i^{+}(\tau-1)+p_i^{c}\eta^{c}\Delta t,e_i^{\max}), & t_i^{a}<\tau\le t_i^{d}\\ 0 & \tau\le t_i^{a}\end{cases}\quad(5)$$

[0049] $$e_i^{-}(\tau)=\begin{cases}e_i^{\text{need}}, & \tau>t_i^{d}\\ \max(e_i^{-}(\tau-1)+p_i^{d}\Delta t/\eta^{d},e_i^{\min},e_i^{\text{need}}-p_i^{c}\eta^{c}(t_i^{d}-\tau)\Delta t), & t_i^{a}<\tau\le t_i^{d}\\ 0 & \tau\le t_i^{a}\end{cases}\quad(6)$$

[0050] 其中，$e_i^{+}(\tau)$表示电池充电能量上边界，Δt表示时间间隔(15分钟)，$e_i^{-}(\tau)$表示电池充电能量下边界。

[0051] 当第i个PEV的$e_i^{\min}>0$时，必须在其SoC达到$\mathrm{SoC}_i^{\min}$(t_i^{c}时刻)之前重新充电。此后，它在剩余的停车时间内充电或放电。其能量和功率边界如图3所示。其在t_i^{c}之前的不可控充电功率用式(4)计算。t_i^{c}之后的能量和功率边界使用(5)~(8)计算。

[0052] $$p_i^{+}(\tau)=\begin{cases}0, & \tau>t_i^{d}\ \text{or}\ \tau\le t_i^{a}\\ p_i^{c}\eta^{c}, & t_i^{a}<\tau\le t_i^{d}\end{cases}\quad(7)$$

[0053] $$p_i^-(\tau)=\begin{cases}0, & \tau>t_i^d \text{ or } \tau\le t_i^a\\ p_i^d\eta^d, & t_i^a<\tau\le t_i^d\end{cases} \quad (8)$$

[0054] 其中，p_i^d表示电网侧放电额定功率，η^d放电效率。

[0055] V2G集群聚合模型使用所有单个PEV的能量和功率边界的总和来表示V2G集群的总能量和功率边界。V2G集群的不可控充电总功率为：

[0056] $$P^u(\tau)=\sum_i p_i^u(\tau),\forall\tau \quad (9)$$

V2G集群的可控能量和功率总量边界为：

[0057] $$E^{+/(-)}(\tau)=\sum_i e_i^{+/(-)}(\tau),\forall\tau \quad (10)$$

[0058] $$P^{+/(-)}(\tau)=\sum_i p_i^{+/(-)}(\tau),\forall\tau \quad (11)$$

[0059] 如图4所示为总体可控能量和功率边界（即总能量和功率边界），集合$\{P^u,E^{+/(-)},P^{+/(-)}\}$包含V2G集群的聚合充电需求和V2G电池容量信息，其规模与PEV集群规模无关。

[0060] 本发明聚合模型中的能量和功率边界位于V2G集群的电池侧，因此，充电和放电引起的能量损失对模型没有影响。使用聚合模型来区分V2G集群的充电和放电功率。因此，在电网侧考虑功率效率，并评估由于放电而导致的电池退化。

[0061] 步骤2、根据步骤1中V2G插电式电动汽车集群的聚合模型，构建电动汽车V2G可用容量的评估模型。

[0062] 如图4所示，通过聚合模型，将大规模、离散、随机分布的个体充电需求转变为单一、平滑且相对稳定的聚合模型。无需预测负载曲线或单独的充电需求，本发明能够记录和预测V2G集群每15分钟的总能量和功率边界。将总能量和功率边界分为两部分：

[0063] 第一部分：为新到达的PEV计算的总能量和功率边界，该边界尚未被实时充放电操作改变。

[0064] 第二部分：为已连接到电网的PEV计算的总能量和功率边界。

[0065] 第一部分每15分钟间隔记录一次总能量和功率边界，以供未来预测。尽管实时运行会改变PEV负载曲线，但第一部分的总能量和功率边界仅受到轻微影响，因为它们仅与PEV用户的行为相关。第二部分总能量和功率边界每15分钟更新一次，以跟踪已连接到电网的PEV的状态变化。

[0066] 充放电调度系统中实现的V2G容量评估的框架如图5所示。在V2G容量评估之前，预测第一部分能量和功率边界并更新第二部分边界。然后根据第一部分和第二部分总能量和功率边界的总和评估V2G容量并预测功率。

[0067] 对于第一部分总能量和功率边界的预测，通过时间序列、最小二乘和概率预测等实现。并且由于总能量和功率边界（尤其是大规模场景）更加简单、平滑和稳定，因此它们的预测保证比单独充电需求预测更高的准确性。

[0068] V2G容量评估分析模型为：

[0069] 令t表示时间间隔，t_0表示当前时间间隔，$[t_1,t_2](t_1\ge t_0)$表示评估范围。更新连接到

电网的PEV的第二部分总能量和功率边界（$\boldsymbol{D}_{t_0}$），并预测在$[t_0,t_2]$之间到达的PEV的第一部分总能量和功率边界（$\boldsymbol{D}^F_{[t_0,t_2]}$）。$\boldsymbol{D}_{t_0}$和$\boldsymbol{D}^F_{[t_0,t_2]}$的总和是评估范围结束之前所有连接到电网的PEV的能量和功率边界的集合，不失一般性，用$\{P^u, E^{+/(-)}(t), P^{+/(-)}(t) \mid t = t_0,\ldots,t^d_{\max}\}$来表示这组能量和功率边界，K为上下限之间的参量。

[0070] 由于不可控充电功率P^u是固定的，因此必须评估仅可控充电需求下的V2G容量。给定V2G集群电池侧可控PEV的总功率调度（$P^s(t)$，$t = t_0,\ldots,t^d_{\max}$），评估V2G集群在评估范围内的最大可控充电功率$P^{\max}(t)$和放电功率$P^{\min}(t)$作为其V2G容量。评估的最大充电和放电功率应持续$\Delta t$（至少）的时间。

[0071] 对于$P^{\max}(t)$，约束条件包括：

[0072] $$P^s(t) \le P^{\max}(t) \le P^+(t), \forall t = t_1,\ldots,t_2 \quad (12)$$

[0073] $$(\sum_{\tau=t_0}^{t-1} P^s(\tau) + P^{\max}(t))\Delta t \le E^+(t), \forall t = t_1,\ldots,t_2 \quad (13)$$

[0074] 其中，$P^s(t)$表示V2G集群电源侧可控调度功率，$P^+(t)$表示电池功率上限，$E^+(t)$表示V2G集群电源获得的能量上限。式(12)确保Pmax(t)不会违反功率边界，式(13)保证消耗的能量不会因为充电功率的增加而超过V2G集群的能量上限。

[0075] 因此，时间间隔t内V2G集群的最大可控充电功率可计算为：

[0076] $$P^{\max}(t) = \min(P^+(t), E^+(t)/\Delta t - \sum_{\tau=t_0}^{t-1} P^s(\tau)) \quad (14)$$

[0077] 对于$P^{\min}(t)$，约束包括：

[0078] $$P^-(t) \le P^{\min}(t) \le P^s(t), \forall t = t_1,\ldots,t_2 \quad (15)$$

[0079] $$(\sum_{\tau=t_0}^{t-1} P^s(\tau) + P^{\min}(t))\Delta t \ge E^-(t), \forall t = t_1,\ldots,t_2 \quad (16)$$

[0080] 其中，式(15)确保$P^{\min}(t)$不会违反功率边界，式(16)保证消耗的能量不会因为放电功率的增加而超过V2G集群的较低能量边界。

[0081] 因此，时间间隔t内V2G集群的最大可控放电功率可计算为：

[0082] $$P^{\min}(t) = \max(P^-(t), E^-(t)/\Delta t - \sum_{\tau=t_0}^{t-1} P^s(\tau)) \quad (17)$$

[0083] 充放电调度对V2G容量评估的影响如式(13)和(16)所示。

[0084] 考虑到充放电效率，t期间向电网注入或从电网吸收的V2G功率可计算为：

[0085] $$P^{\max}_{gr}(t) = P^u(t)/\eta^c + P^{\max}(t)/\eta^c \quad (18)$$

[0086] $$P^{\min}_{gr}(t) = P^u(t)/\eta^c + P^{\min}(t)/\eta^d \quad (19)$$

为了使预先评估的V2G容量能够在实时运行期间实现，本发明提出了一种基于Laxity-SoC的启发式智能充电策略。影响插电式电动汽车V2G容量的因素有两个：

[0087] 1、充电需求的松弛度:PEV的充电需求松弛度L_i定义如下:

[0088] $$L_i = t_i^d - t - \frac{(SoC_i^d - SoC_i)}{\eta^c p_i^c \Delta t} \quad (20)$$

[0089] 式(20)表示剩余停车时间与第i辆PE所需充电时间之间的差值。L_i值越大,PEV的灵活性越大,反之亦然。对于L值较大的纯电动汽车,充电需求并不迫切;因此,它们放电,而L值较小的PEV则倾向于再充电。对于不可控PEV,$L_i \leq L_{\min}$。

[0090] 2、SoC的定价:除了L之外,PEV的SoC还限制其潜在的最大充电和放电功率。具有高SoC的PEV可能具有有限的充电能力,而具有低SoC的PEV可能具有有限的放电能力。此外,SoC<SoCmin的PEV在并网后必须立即充电,直到SoC达到SoCmin。

[0091] 本发明在L-SoC平面上将PEV集群分为M组(见图6,其中实线为分界线)。充电需求的松弛度较低组中的PEV向电网放电,而充电需求的松弛度较高组中的PEV倾向于从电网充电。M组表示本组中的PEV不受控制,必须在下一个时间间隔内重新充电。聚合器更新连接到电网的PEV的充电需求和状态,如图6所示将它们分组,并定期(即每15分钟)向它们传递充电/放电指令。

[0092] 实时运行时,不受控的充电功率$P^u(t)$被调度给M组中的PEV,以满足其紧急充电需求。M组中的所有PEV均以其额定充电功率进行充电。

[0093] 如果可控功率计划$P^s(t)>0$,则除M组中的PEV之外的所有PEV都应按组索引序列分配给它们的总功率$P^s(t)$进行充电。首先,聚合器计算指数最高的第m(初始时刻m=M-1)组,第m组中PEV的最大充电功率$P_m^{\max}$。如果$P_m^{\max} \leq P^s(t)$,则以额定充电功率对m组中的所有PEV进行充电。然后将备用功率($P^s(t)=P^s(t)-P_m^{\max}$)分配给具有下一个最高索引的组中的PEV,即m-1。当下一组(m0组)的最大充电功率高于备用功率计划时$P_{m_0}^{\max} > P^s(t)$,以上过程终止。然后,选择m0组中的$\frac{P^s(t)}{P_{m_0}^{\max}} \times 100\%$PEV进行额定充电功率充电。

[0094] 如果$P^s(t)<0$,则除M组之外的所有PEV都应以$P^s(t)$的总功率放电。过程与上述类似,但方向相反,即放电功率按照1组到M-1组的顺序分配给PEV。

[0095] 步骤3、根据步骤2中构建的评估模型对V2G可用容量进行评估。

[0096] 本发明所提出的评估方法可用于各种V2G应用场景,例如向电网提供频率调节或储备,包括日前调度策略和提前一小时最优调度策略。

[0097] 1、日前最优调度策略:日前充放电调度被制定为混合整数非线性规划模型如下:

[0098] $$\max f = \sum_{t=t_1}^{t_{\max}^d} (-C_{DA}^e(t) P_{DA}^s(t) \Delta t - C^b PD^s(t) \Delta t + C^R(t) R_{DA}(t) \Delta t - \lambda P_{DA}^s(t)^2) \quad (21)$$

[0099] $$D^s(t) P^-(t) \leq PD^s(t) \leq 0, \forall t = t_1, \ldots, t_{\max}^d \quad (22)$$

[0100] $$0 \leq PC^s(t) \leq (1 - D^s(t)) P^+(t), \forall t = t_1, \ldots, t_{\max}^d \quad (23)$$

[0101] $$D^s(t) \in \{0,1\}, \forall t = t_1, \ldots, t_{\max}^d \quad (24)$$

[0102] $$P^s(t)=PD^s(t)+PC^s(t),\forall t=t_1,\ldots,t^d_{\max} \quad (25)$$

[0103] $$E^-(t)\le\sum_{\tau=t_0}^{t}P^s(\tau)\Delta t\le E^+(t),\forall t=t_1,\ldots,t^d_{\max} \quad (26)$$

[0104] $$P^s_{DA}(t)=P^s_{gr}(t)=P^u(t)/\eta^c+PC^s(t)/\eta^c+PD^s(t)\eta^d,\forall t=t_1,\ldots,t^d_{\max} \quad (27)$$

[0105] $$R_{DA}(t)\le P^s_{gr}(t)-P^{\min}_{gr}(t),\forall t=t_1,\ldots,t^d_{\max} \quad (28)$$

[0106] $$R_{DA}(t)\le P^{\max}_{gr}(t)-P^s_{gr}(t),\forall t=t_1,\ldots,t^d_{\max} \quad (29)$$

[0107] 其中，C^e_{DA}表示预测日前电价，C^R表示预测底价，C^b表示放电导致的电池退化成本，R_{DA}表示日前评估V2G集群储备容量，P^s_{DA}表示电池侧的日前总V2G功率调度，$P^{\min}_{gr}$表示电网侧最小V2G总功率，P^s_{gr}表示电网侧V2G总功率调度，PC^s表示V2G集群电池侧可控充电功率调度，$P^{\max}_{gr}$表示电网侧最大V2G总功率，PD^s表示V2G集群电池侧可控放电功率调度，D^s为放电状态，C^s为充电状态。

[0108] 式(21)中的第一项是能源购买成本，第二项是动力电池因放电而退化的成本，假设与总放电能量计划成正比。电池退化可能受到多种因素的影响，本发明假设电动汽车电池的寿命与充电周期数成正比。第三项提供储备的利润。为了平滑功率曲线，添加了最后一项来惩罚负载变化。

[0109] 式(22)~(23)定义了V2G集群的最大充电和放电功率约束。式(22)~(24)确保在可控PEV聚合中充电和放电不会同时发生。式(25)~(26)定义了V2G集群的能量约束。电网侧的V2G功率调度由式(27)计算。给定V2G功率调度$P^s_{gr}(t)$，V2G集群可提供的最终评估容量受式(28)~(29)约束。

[0110] 在模型(21)-(29)中，t1之前的功率计划已提前一天确定并被视为常数，即，$P^s_{DA}(t),t=t_0,\ldots,t_1-1$。虽然只有$\{P^s_{DA}(t),R_{DA}(t)\,|\,t=t_1,\ldots,t_2\}$会参与市场交易，但该策略被制定为滚动优化过程，并且V2G功率在时间范围$[t_1,t^d_{\max}]$内得到优化，从而考虑所有涉及的PEV充电需求的约束。

[0111] 2、提前一小时最优调度策略。提前一小时最优调度模型如下：

[0112] $$\max f=\sum_{t=t_1}^{t^d_{\max}}(-C^e_{RT}(t)(P^s_{HA}(t)\Delta t-P^s_{DA}(t))\Delta t-C^bPD^s_{HA}(t)\Delta t+C^RR_{HA}\Delta t-\lambda P^s_{HA}(t)^2) \quad (30)$$

[0113] 假设所有PEV的最大停车时长小于24小时，Δt为15分钟，对于日前和日前一小时的充放电调度问题，将有小于96+96=192个整数变量($D^s(t)$)和(96+96)×2=384个连续变量($PD^s(t)$和$PC^s(t)$)。由于所提出的策略仅调度集群的V2G总功率，因此问题规模很小并且有效解决。

[0114] 本发明的性能指标：

为了验证所提出的V2G评估方法的性能，本发明定义了优化指数指标。提出优化指数来评估V2G集群提前一小时V2G容量评估受到惩罚的风险，定义为时间间隔t的实时储备

短缺与提前一小时评估结果的比率：

[0115] $$\mathrm{Index}_{op}(t)=\frac{\max(0,R_{HA}(t)-R_{RT}(t))}{R_{HA}(t)}\times 100\% \quad (31)$$

PEV的最大V2G功率受到其额定功率、SoC和充电需求的限制。时间间隔t内，第i辆PEV电池侧的最大充电功率可计算如下：

[0116] $$p_i^{\max}(t)=\min(p_i^c\eta^c,(SoC_i^{\max}-SoC_i)B_i/\Delta t) \quad (32)$$

时间间隔t内第i辆PEV电池侧的最大放电功率可计算如下：

[0117] $$p_i^{\min}(t)=\max(p_i^d\cdot\frac{1}{\eta^d},-(SoC_i-SoC_i^{\min})\cdot\frac{B_i}{\Delta t},(SoC_i^d-SoC_i)\cdot\frac{B_i}{\Delta t}-\sum_{t=t+1}^{t_i^d}(p_i^c\eta^c)) \quad (33)$$

[0118] 式中的第三项确保未来能够满足第i辆PEV的充电需求。对于充电需求紧急的PEV，$p_i^{\min}(t)$可能大于0。

[0119] 第i辆PEV的最大和最小V2G功率，即$p_{gr,i}^{\max}$和$p_{gr,i}^{\min}$如下：

[0120] $$p_{gr,i}^{\max}(t)=p_i^{\max}(t)/\eta^c \quad (34)$$

[0121] $$p_{gr,i}^{\min}(t)=\begin{cases}p_i^{\min}(t)/\eta^c, & p_i^{\min}(t)>0\\ p_i^{\min}(t)\eta^d, & p_i^{\min}(t)\le 0\end{cases} \quad (35)$$

V2G集群在时间间隔t内实际提供的储备计算如下：

[0122] $$R_{RT}(t)=\min(\sum_i p_{gr,i}^{\max}(t)-P_{gr}^s(t),P_{gr}^s(t)-\sum_i p_{gr,i}^{\min}(t)) \quad (36)$$

[0123] P_{HA}^s表示V2G集群电池侧提前一小时的总V2G功率计划，R_{HA}表示V2G 集群提前一小时评估储备容量，R_{RA}表示V2G集群可提供的实时储备容量。

[0124] 根据上述基于插电式电动汽车聚合模型的V2G可用容量评估方法，使用5000个私人PEV的聚合来验证所提出方法的有效性。日前/小时评估储备、电力调度以及利用所提最佳充放电调度策略的实时提供储备和调度电力的平均曲线如图7。图7中，日前储量评估值通常略高于一小时储量评估值，而实时储量则大致遵循一小时评估值。图8显示理想情况下V2G功率变化远高于使用所提策略时的变化，因为当每个PEV单独调度其充电和放电过程时，理想情况下忽略了目标函数中负载波动的惩罚，这往往会导致V2功率的变化并增加总收入。因此，所提方法为V2G应用提供了一个优化选择，保证V2G容量利用率高，应用难度低。

[0125] 需要强调的是，本发明所述的实施例是说明性的，而不是限定性的，因此本发明包括并不限于具体实施方式中所述的实施例，凡是由本领域技术人员根据本发明的技术方案得出的其他实施方式，同样属于本发明保护的范围。

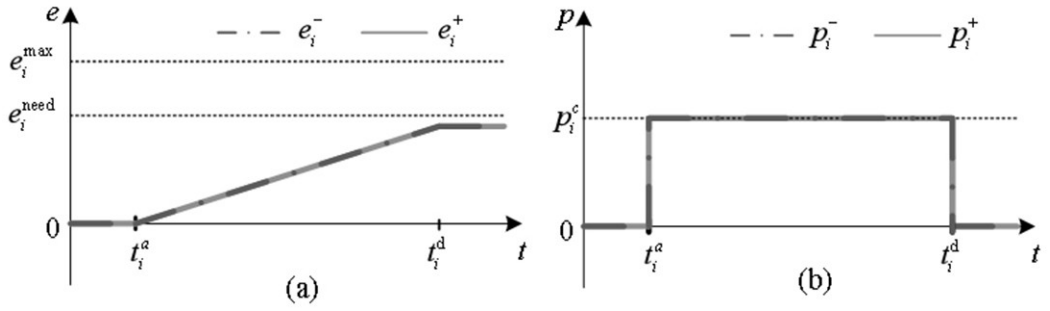

e
e_i^-
e_i^+
e_i^{max}
e_i^{need}
0
t_i^a
t_i^d
t
(a)
p
p_i^-
p_i^+
p_i^c
0
t_i^a
t_i^d
t
(b)

图 1

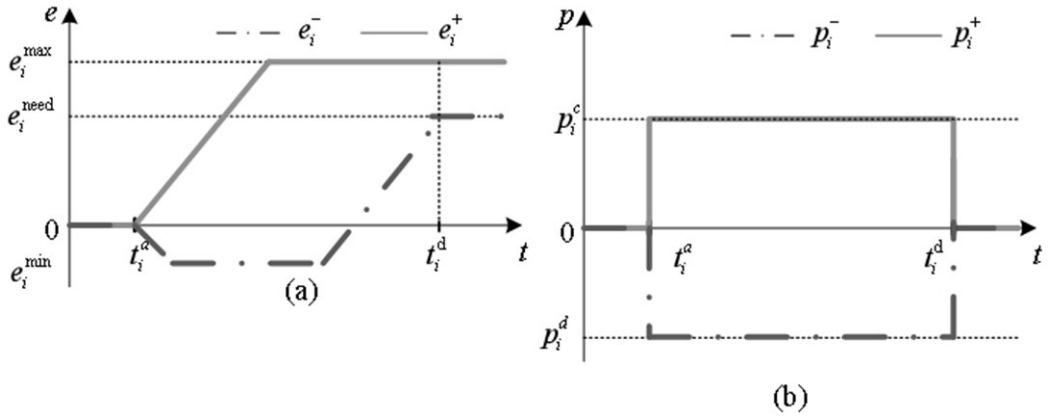

e
e_i^-
e_i^+
e_i^{max}
e_i^{need}
0
e_i^{min}
t_i^a
t_i^d
t
(a)
p
p_i^-
p_i^+
p_i^c
0
t_i^a
t_i^d
t
p_i^d
(b)

图 2

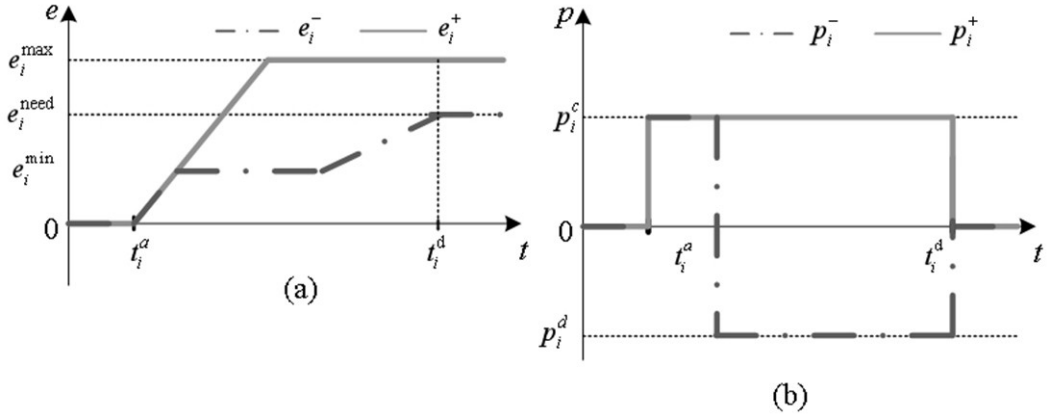

e
e_i^-
e_i^+
e_i^{max}
e_i^{need}
e_i^{min}
0
t_i^a
t_i^d
t
(a)
p
p_i^-
p_i^+
p_i^c
0
t_i^a
t_i^d
t
p_i^d
(b)

图 3

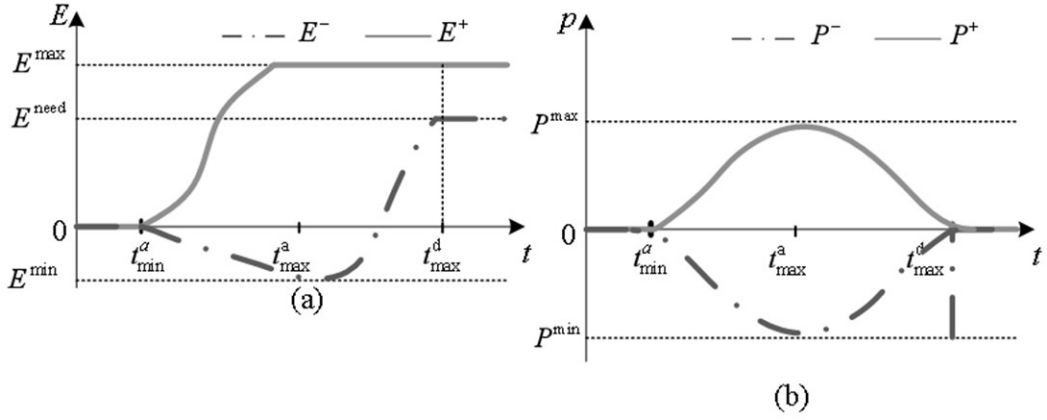

E
E⁻
E⁺
E^max
E^need
0
E^min
t^a_min
t^a_max
t^d_max
t
(a)
p
P⁻
P⁺
P^max
0
P^min
t^a_min
t^a_max
t^d_max
t
(b)

图 4

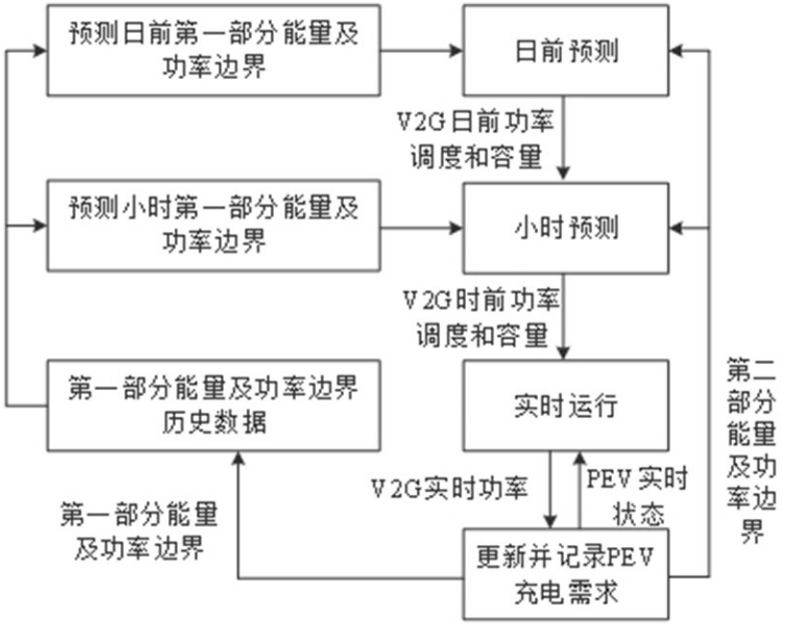

预测日前第一部分能量及功率边界
日前预测
V2G日前功率调度和容量
预测小时第一部分能量及功率边界
小时预测
V2G时前功率调度和容量
第一部分能量及功率边界历史数据
实时运行
V2G实时功率
PEV实时状态
第一部分能量及功率边界
更新并记录PEV充电需求
第二部分能量及功率边界

图 5

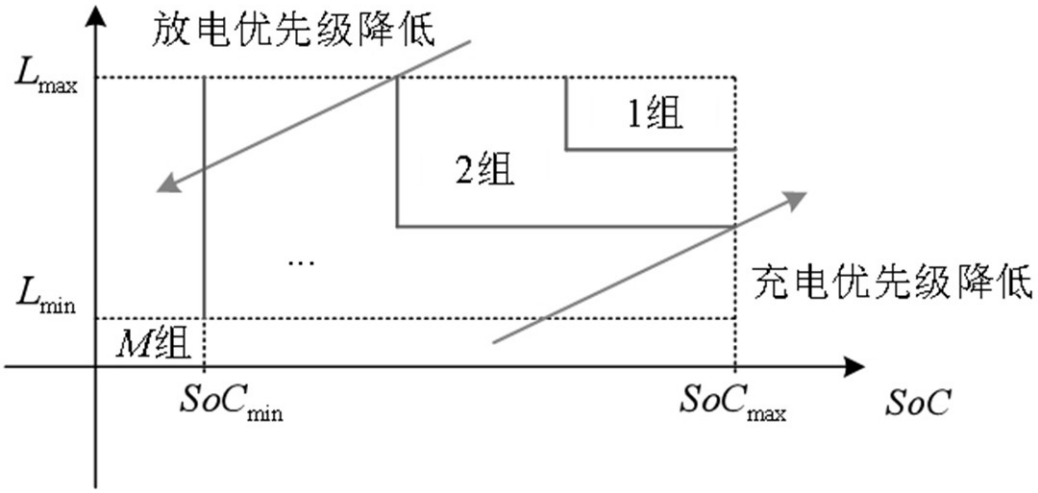

放电优先级降低
L_{max}
1组
2组
…
L_{min}
充电优先级降低
M组
SoC_{min}
SoC_{max}
SoC

图 6

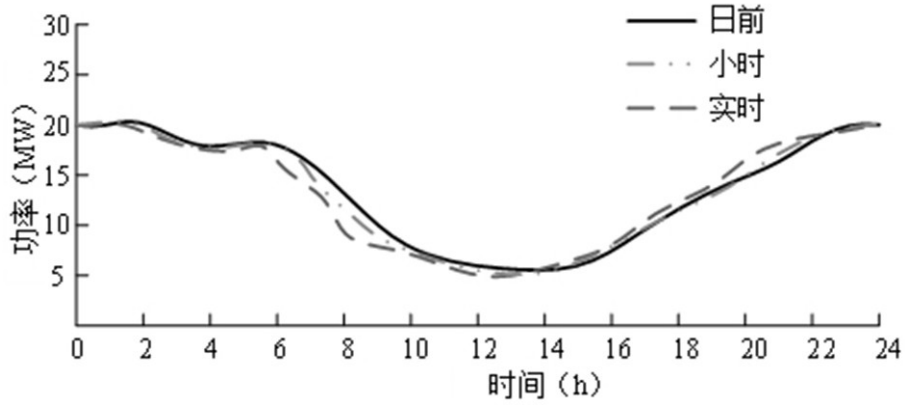

日前
小时
实时
功率（MW）
30
25
20
15
10
5
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
时间（h）

图 7

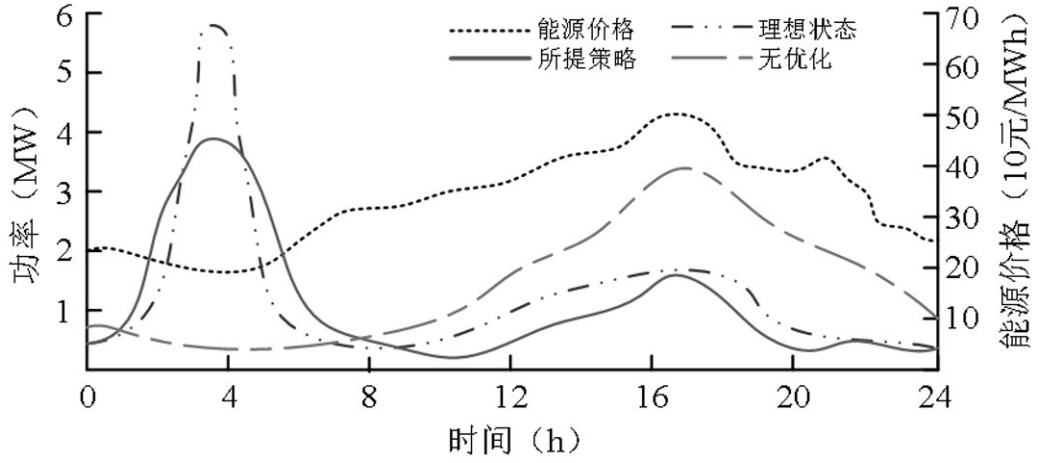

能源价格
理想状态
所提策略
无优化
功率（MW）
能源价格（10元/MWh）
6
5
4
3
2
1
70
60
50
40
30
20
10
0
4
8
12
16
20
24
时间（h）

图 8