

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201075

# 计及电动汽车充电负荷的风电-光伏-光热联合系统协调调度

胡福年, 徐伟成, 陈军

(江苏师范大学, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 考虑大规模电动汽车(Electric vehicle, EV)随机接入含高比例可再生能源电力系统后会进一步加大系统运行的稳定性问题, 根据风光特性将联合系统划分为“有风有光”、“有风无光”、“有光无风”、“无风无光”四种运行模式, 提出一种计及EV充电负荷的风电-光伏-光热协调调度策略。在“多能源端”通过外加电加热模块将盈余电功率转换成热功率储存在光热电站(Concentrating solar power, CSP)的蓄热系统(Thermal energy storage, TES)中, 在可再生能源出力不足时, 通过TES放热推动汽轮机组出力, 从而减少功率波动性。在“负荷侧”将EV负荷划分为无序EV、单纯有序EV和V2G(Vehicle-to-grid)三种不同的EV负荷。最后利用Matlab进行仿真分析, 仿真结果验证了所提调度策略在减少净负荷方差、增大可再生能源消纳、减小传统机组波动等方面的有效性。  
**关键词:** 可再生能源; 多源互补; 电动汽车; 源-荷协调调度; 综合能源系统

## Coordinated scheduling of wind power photovoltaic solar thermal combined system considering electric vehicle charging load

HU Funian, XU Weicheng, CHEN Jun

(Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Large-scale Electric Vehicles (EV) are randomly connected to power system containing a high proportion of renewable energy, which will further increase the stability of the system. According to the characteristics of wind and solar, the combined system is divided into four operating modes. The operating modes are "having wind and solar", "having wind without solar", "having solar without wind" and "without wind and solar". This paper proposes a wind power-photovoltaic-photothermal coordinated dispatch strategy that takes into account the EV charging load. In "multi-source" part, the surplus electric power is converted into thermal power through the external electric heating module and stored in the Thermal Storage System (TES) of the Concentrating Solar Power (CSP) station. When the output of renewable energy is insufficient, the heat storage system releases heat to promote the output of the steam turbine unit, thereby reducing power volatility. In "load side" part, the EV load is divided into three different EV loads: disorderly EV load, orderly charging EV load and Vehicle-to-grid (V2G). Finally, Matlab is used for simulation analysis. The results verify the effectiveness of the proposed scheduling strategy in reducing net load variance, increasing renewable energy consumption, and reducing fluctuations of traditional units.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61773186).

**Key words:** renewable energy; multi-source complementation; electric vehicles; source-load coordination schedule; integrated energy system

## 0 引言

可再生能源发电因其较好的经济性、环保性而广受青睐。近年来, 国内可再生能源渗透率不断攀升, 并网规模逐步加大。但可再生能源发电受不确

定气候因素(如风速和光照强度)影响, 因此可再生能源发电亦具有很强的不确定性与间歇性。随着EV渗透率不断提高, 电网调度不确定性进一步加大。受风、光等自然属性的制约, 风电及光伏发电具有波动性和间歇性的特点, 必要时需要通过弃风、弃光来保证电网的安全运行<sup>[1]</sup>。由于不确定性因素给电网调度带来了困难, 如何解决可再生能源发电侧

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61773186)

及负荷侧的不确定性影响, 进而提高可再生能源消纳量引起了广泛关注。

文献[2]提出通过先进的调控手段, 发挥各自的特点, 优势互补, 实现多源互补发电场群联合系统的优化运行, 达到平抑新能源发电随机波动和减小大规模新能源接入电网影响的效果。文献[3]集成风电、CSP 和碳捕集机组等发电单元为虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)并应用模糊参数来描述风电及负荷的不确定性, 构建了考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集 VPP 协调优化调度模型。文献[4]构建了风电-光-光热多能源协调模型, 利用通过电转热环节与 CSP 电站的 TES 相结合, 给出风电-光伏-光热联合发电系统运行框架与原理, 并引入价格型需求侧响应, 综合考虑各电站的运行成本、弃风弃光惩罚成本以及电转热环节的运行成本。文献[5]建立了热化学储能、CSP 和光伏发电综合优化调度框架, 虽然此文所提调度框架可有效降低成本, 但未考虑负荷侧的不确定性。文献[6]在热电联产综合能源系统中综合考虑 CSP、风力发电站、储能装置、电加热器等能量转换设备, 构建了典型的系统结构体系, 此文虽然考虑可再生能源、阶梯碳排放和灾后恢复效益等不确定性因素, 并建立了以综合能源系统运行成本最小为目标的系统运行优化模型, 但文中没有考虑负荷侧的不确定因素。文献[7]针对热电联产经济排放调度问题, 提出了多目标优化与综合决策相结合的两阶段调度方法。文献[8]引入价格型需求响应、激励型需求响应及光热电站参与多源系统调度, 同时引入 CVaR(Conditional Value-at-Risk)理论对系统的运行风险进行评估, 建立了考虑多种需求响应与 CSP 电站参与的多源系统优化经济调度模型。但大多数文献仅从能源侧考虑多能源协调, 即使有综合考虑能源侧与负荷侧的研究也仅是依靠电价手段。仅依靠电价经济手段而缺乏灵活有效的控制策略, 不仅无法达到削峰填谷的目的, 还可能导致谷时段负荷剧烈波动或形成新的高峰, 影响配电网安全稳定<sup>[9]</sup>。

EV 在无序充电时, 私家车车主主要按照自己的出行意愿完成充电, 该充电模式下不受相关部门的调控, 随机性强<sup>[10-11]</sup>。因此大规模无序 EV 接入不利于电网调控, 探究 EV 充电负荷特性以及引导 EV 负荷有序充电引起了研究者的重视。文献[12]在统计数据基础上, 分析了充电站的充电负荷特性并提出充电功率分布的两阶段优化模型。通过比较了有序充电与无序充电的结果, 为 EV 充电站有序充电策略提供依据。文献[13]提出了一种结合电网模型的电动汽车实时调度策略, 对大规模电动汽车进

行有序控制。文献[14]从市场交易角度对日前市场和实时市场分别建模验证了日前市场与实时市场联动的交易模型可以有效促进风电消纳, 合理安排电动汽车放电, 缓解风电预测误差给电力市场带来的影响, 从而引导交易主体规范交易行为。文中虽然计及风电波动性及 EV 充电的随机性, 但仅通过市场调控并没有给出平息风电及 EV 波动性的控制策略。文献[15]比较了分布式充电、快速充电和以电池交换方式充电三种充电方式在充电状态、电池容量、插头可用性等方面的不同, 最后提出了一个确定充电站最佳充电方式的框架体系。文献[16]考虑了分布式能源与 EV 的不确定性, 分别以最小化综合运行成本和系统节点电压差为目标函数, 建立双层优化模型并进行分时段配网动态重构。该文虽然考虑了“源-网-荷”三个元素, 但更侧重于网络结构的影响。文献[17]提出一种采用分群优化的 EV 与电网互动调度策略, 该策略将各时段的 EV 动态划分为常规车群和调控车群。常规车群进行无序充电, 调控车群包含充电车群和放电车群。通过优化调控车群的可调度负荷使研究时段内的总负荷方差最小化, 并采用功率分配算法控制充放电功率不高于可调度负荷值。

综上, 无论是多能源协调还是 EV 充电负荷研究都取得了重要进展, 但综合考虑“源-荷”协调调度仍需进一步研究。本文兼顾多能源侧与负荷侧, 打破“源端”与“荷端”壁垒。“源端”采用风电、光伏、CSP 和常规机组多能源结构协同发电。外设电加热系统, 在发电功率充足时通过电加热系统将盈余电功率转换成热能储存在 CSP 的 TES 中; 在风电-光伏出力不足时通过 CSP 的 TES 放热推动汽轮机组进行发电; 并根据风光出力情景不同将联合系统分成“有风有光”、“有风无光”、“有光无风”、“无风无光”四种运行模式; 在“荷端”将 EV 负荷分为无序 EV、单纯有序 EV、V2G 充电负荷共同参与调度; 最后利用 Matlab 对 IEEE30 节点系统进行算例仿真, 结果验证了所提策略在减小净负荷方差、增大可再生能源消纳、减小常规机组波动等方面的有效性。

## 1 联合系统调度策略

### 1.1 联合系统运行机理

联合系统能源侧主要为风电-光伏-光热以及常规机组, 负荷侧包括常规负荷、无序 EV 充电负荷、单纯有序 EV 充电负荷和 V2G。联合系统运行框架如图 1 所示。

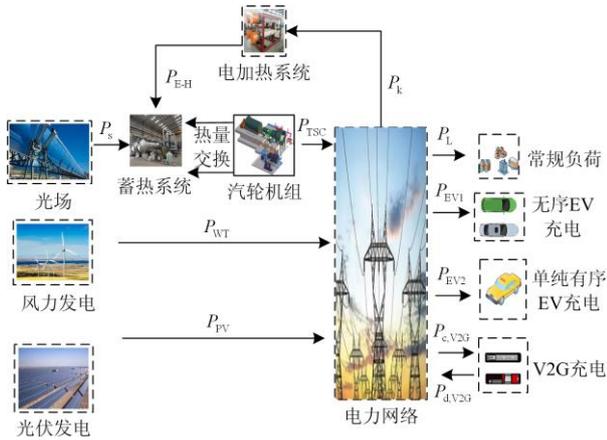


图1 联合系统运行框架

Fig. 1 Federated system operation framework

能源侧 CSP 主要由光场(Solar field, SF)、TES 及功率转换系统(Power block, PB)组成, CSP 结构如图 2 所示。

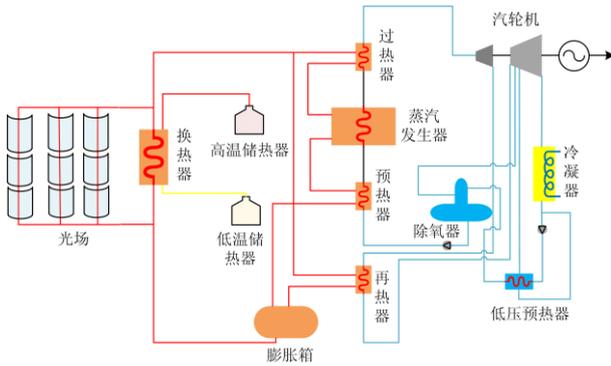


图2 CSP 结构图

Fig. 2 CSP structure diagram

SF 通过聚光器收集光能并加热集热管中的导热介质(Heat-transfer fluid, HTF)。HTF 携带的热能可以加热水蒸气推动汽轮机组产生电能,同时 HTF 也可以与 TES 进行双向的能量交换。TES 作为 CSP 热量存储系统其容量足够大。CSP 电站一般配备 TES, 可在无光照等极端情况下支持满负荷发电约 15 h<sup>[18]</sup>。通过外加电加热系统在机组总出力盈余时利用盈余电能加热 HTF 储存到 CSP 的 TES 中。在机组总出力不足时, TES 放热加热水蒸气推动汽轮机组出力。故该多电源运行方式也可有效避免在传统调度方式下为了消纳更多可再生能源, 而压低常规机组出力, 进而导致常规机组频繁启动而影响机组寿命或者弃风弃光现象的问题。

联合系统负荷侧包含常规负荷与 EV 充电负荷。本文将 EV 充电负荷按照是否可控分为无序 EV 充电负荷与有序 EV 充电负荷。其中根据有序 EV

充电负荷功率流向划分可以分为: 1) 单纯的充电控制: 只考虑电动汽车充电行为, 不考虑电动汽车向电网馈送电能的情况; 2) V2G 控制: 充电汽车与电网相连时, 电能可在电池与电网之间双向流动, 涉及电动汽车向电网馈送电能的情形<sup>[19]</sup>。所谓 V2G 是指电动汽车不仅能够从电网汲取电能, 而且能够向电网输送电能<sup>[19]</sup>。此类 EV 主要是部分私家车, 私人汽车每天 96% 的时间处于停驶状态<sup>[20]</sup>。故本文将 EV 充电负荷划分为无序 EV、单纯有序 EV 和 V2G 三类。

### 1.2 多能源系统运行模式

风电、光伏发电方式受气候影响较大, 本文根据风光有无多能源系统运行分成“有风有光”、“有风无光”、“有光无风”、“无风无光”四种模式<sup>[21]</sup>。每个模式下风电-光伏-光热工作情况如表 1 所示(其中“+”表示工作,“-”表示不工作)。

表 1 多能源系统运行模式电站工作状态

Table 1 Operation status of power station in multi

energy system operation mode			
运行模式	风电电站	光伏电站	CSP 中的 TES
有风有光	+	+	+
有风无光	+	-	+
无风有光	-	+	+
无风无光	-	-	+

1) 有风有光: 风电-光伏-光热联合运行模式, 在此模式下风电、光伏机组几乎以最大功率运行。CSP 通过 SF 收集热量加热 HTF, 通过 HTF 携带热量推动汽轮机组出力。在满足负荷需求的前提下, 将盈余电功率通过电加热系统以热量形式储存到 TES 中;

2) 有风无光: 风电以及 CSP 的 TES 联合运行模式, 在此模式下 TES 开始放热通过 HTF 传送热量加热水蒸气推动汽轮机组出力。在该模式下使风电最大化消纳, 避免使用太多 TES 储存热量导致弃风。

3) 有光无风: 光伏以及 CSP 联合运行模式, 此模式下光伏最大化出力。CSP 一方面通过 SF 收集热量, 另一方面通过 TES 进行充放热。例如早晚光照强度不大, 仅依靠光伏、CSP 收集热量出力不足, 启动 TES 放热; 中午等光照强度大的时刻 CSP 与光伏联合出力有可能均按最大运行方式出力, 在不影响负荷正常需求的前提下可将部分能量储存在 TES 中。

4) 无风无光: 光伏、风电电站均不出力。此模式下调动 TES 放热, 此时为了满足负荷需求容易产

生常规机组频繁调节的情况。

## 2 联合系统优化调度模型

### 2.1 目标函数

针对 1.2 节所提的四种模式, 针对每种模式的情况不同, 应使每种模式下目标适应当前情况的需求, 因此不同模式下目标函数也应不同。

1) 有风有光: 此时使净负荷方差最小化。净负荷方差可反映风光储联合“削峰”后净负荷的平坦程度, 净负荷方差越小, 净负荷的峰谷差越小, 净负荷曲线越平坦, 大大减少水火电的出力频繁调节的次数, 提高了水火电机组的运行效率<sup>[22]</sup>。净负荷方差表达式为

$$\min f_1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (p_j(t) - P_{j,tav})^2 \quad (1)$$

$$p_j(t) = p_L(t) + p_{c,V2G}(t) + p_{EV1}(t) + p_{EV2}(t) - p_{WT}(t) - p_{PV}(t) - p_{TSC}(t) - p_{d,V2G}(t) \quad (2)$$

$$P_{j,tav} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p_j(t) \quad (3)$$

式中:  $T$  表示一天全部调度时段本文取 96;  $f_1$  表示净负荷方差;  $P_{j,tav}$  表示净负荷的平均值;  $p_L(t)$ 、 $p_j(t)$  分别表示  $t$  时刻的常规负荷值和净负荷值;  $p_{WT}(t)$ 、 $p_{PV}(t)$  和  $p_{TSC}(t)$  分别表示  $t$  时刻的风电、光伏和光热出力;  $p_{EV1}(t)$  和  $p_{EV2}(t)$  分别表示  $t$  时刻电动汽车无序 EV 负荷与单纯有序 EV 功率;  $p_{c,V2G}(t)$  和  $p_{d,V2G}(t)$  分别表示  $t$  时刻 V2G 的充、放电功率。

2) 有风无光: 此时依靠风电、蓄热共同出力, 应尽量保证风电最大化消纳。

$$\max f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_w} P_{WT,i}(t) \quad (4)$$

式中:  $f_2$  表示风电消纳量;  $P_{WT,i}(t)$  表示第  $i$  个风电机组在  $t$  时刻出力;  $N_w$  表示总共参与调度的风电机组。

3) 有光无风: 此时依靠光伏、光热共同出力, 此时两者消纳量之和最大。

$$\max f_3 = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{N_{PV}} p_{PV,i}(t) + \sum_{j=1}^{N_{TSC}} p_{TSC,j}(t) \right] \quad (5)$$

式中:  $f_3$  表示光伏、光热消纳量之和;  $p_{PV,i}(t)$  与  $p_{TSC,j}(t)$  分别表示第  $i$  台光伏机组与第  $j$  台 CSP 出力;  $N_{PV}$  与  $N_{TSC}$  分别表示参与调度的光伏机组与 CSP 机组数量。

4) 无风无光: 此时依靠 TES 与汽轮机组联合出力; 可再生能源出力较小, 为了满足负荷需求常规机组频繁调节。此时应在满足需求前提下尽可能地减小常规机组波动, 从而有利于增加其使用寿命。

$$\min f_4 = \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^{N_G} |p_{G,i}(t) - p_{G,i}(t-1)| \quad (6)$$

式中:  $f_4$  表示常规机组波动;  $p_{G,i}(t)$  表示第  $i$  台常规机组  $t$  时刻出力;  $N_G$  表示总共参与调度的常规机组。

### 2.2 约束条件

#### 1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} p_{G,i}(t) + \sum_{i=1}^{N_w} p_{WT,i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{PV}} p_{PV,i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{TSC}} p_{TSC,i}(t) + p_{d,V2G}(t) = p_L(t) + p_{c,V2G}(t) + p_{EV1}(t) + p_{EV2}(t) + p_k(t) \quad (7)$$

式(7)表示实时的功率平衡约束, 其中  $p_k(t)$  表示  $t$  时刻盈余电功率。

#### 2) 机组运行约束

$$\begin{cases} P_{G,i,\min} \leq p_{G,i}(t) \leq P_{G,i,\max} \\ P_{WT,j,\min} \leq p_{WT,j}(t) \leq P_{WT,j,\max} \\ P_{PV,k,\min} \leq p_{PV,k}(t) \leq P_{PV,k,\max} \\ P_{TSC,n,\min} \leq p_{TSC,n}(t) \leq P_{TSC,n,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{G,i,\min}$ 、 $P_{WT,j,\min}$ 、 $P_{PV,k,\min}$  与  $P_{TSC,n,\min}$  分别表示第  $i$  台常规机组、第  $j$  台风电机组、第  $k$  台光伏机组与第  $n$  台 CSP 机组出力下限;  $P_{G,i,\max}$ 、 $P_{WT,j,\max}$ 、 $P_{PV,k,\max}$  与  $P_{TSC,n,\max}$  分别表示第  $i$  台常规机组、第  $j$  台风电机组、第  $k$  台光伏机组与第  $n$  台 CSP 机组出力上限。

#### 3) 光热电站的集热系统

$$p_s(t) = \eta_s \times A_s \times i_s(t) \quad (9)$$

式中:  $p_s(t)$  表示  $t$  时刻 SF 收集的热量;  $\eta_s$  表示光热转换效率;  $A_s$  表示光场面积;  $i_s(t)$  表  $t$  时刻的光照强度。

#### 4) 电加热系统

$$p_{E-H}(t) = \eta_{E-H} \times p_k(t) \quad (10)$$

式中:  $p_{E-H}(t)$  表示通过电加热系统转换热功率;  $\eta_{E-H}$  为电热转换效率。

#### 5) 蓄热系统

$$\begin{cases} p_{in}(t) = (p_{th,H-T}(t) + p_{E-H}(t)) \times (1 - \eta) \times K_1 \\ p_{out}(t) = p_{th,T-H}(t) \times (1 - \eta) \times K_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $p_{in}(t)$  与  $p_{out}(t)$  分别表示  $t$  时刻 CSP 的充、放

热功率； $p_{th,H-T}(t)$ 与 $p_{th,T-H}(t)$ 分别表示 SF 通过 HTF 存储热量与 CSP 释放热量； $\eta$  表示热损失系数； $K_1$ 、 $K_2$  确保蓄热系统充放热不能同时进行，并满足式(12)。

$$\begin{cases} K_1 + K_2 = 1 \\ K_1 \times K_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

6) CSP 电站热功率平衡约束

$$p_S(t) + p_{out}(t) = p_{in}(t) + p_{H-E}(t) \quad (13)$$

式(13)表示  $t$  时刻 CSP 电站中实时的热功率平衡，其中  $p_{H-E}(t)$  为 CSP 电站通过 HTF 传递到汽轮机组热量。

7) CSP 中汽轮机系统发电

$$p_{TSC}(t) = \eta_d \times p_{H-E}(t) \quad (14)$$

式中， $\eta_d$  为热电转换效率。

8) 蓄热系统容量约束

$$e_{th}(t) = (1 - \gamma^{TS}) \times e_{th}(t-1) + (p_{E-H}(t-1) + p_{th,H-T}(t-1) - p_{th,T-H}(t-1)) \times \Delta t \quad (15)$$

式中： $e_{th}(t)$  表示  $t$  时刻 CSP 储存热量，应满足式(16)所示的不等式约束； $\gamma^{TS}$  为热罐熔盐热量的耗散系数。根据工程经验，熔盐每天下降约  $1^\circ\text{C}$ ， $\gamma^{TS}$  很小可忽略<sup>[23]</sup>。 $\Delta t$  为调度周期本文取  $15 \text{ min}$ 。

$$E_{th,min} \leq e_{th}(t) \leq E_{th,max} \quad (16)$$

$$E_{th,T} = E_{th,t_j} \quad (17)$$

式中， $E_{th,min}$  与  $E_{th,max}$  分别表示蓄热系统容量上下限，取蓄热系统的额定容量的 10% 与 100%。式(17)表示调度结束容量  $E_{th,T}$  应充至初始容量  $E_{th,t_j}$ 。

9) CSP 汽轮机系统爬坡约束

$$-r_{d,TSC} \leq p_{TSC}(t) - p_{TSC}(t-1) \leq r_{u,TSC} \quad (18)$$

式中： $r_{d,TSC}$  与  $r_{u,TSC}$  分别表示机组下爬坡率与上爬坡率。

10) 电动汽车充电负荷模型

本文采用蒙特卡罗法模拟无序 EV 充电负荷  $E_{EV2}$  随机接入电网；对于单纯有序 EV 负荷，第  $j$  辆充电负荷  $t$  时刻充电功率  $p_{EV1,j}(t)$  需满足式(19)，其中  $x_{EV1,j}(t)$  表示  $t$  时刻第  $j$  辆车的状态变量； $e_{EV1,j}(t)$  为  $j$  辆单纯有序 EV 在  $t$  时刻额定充电功率。

$$p_{EV1,j}(t) = x_{EV1}(t) \times e_{EV1,j}(t) \quad (19)$$

$c$  辆单纯有序 EV 在  $t$  时刻总的充电功率  $p_{EV1}(t)$  如式(20)所示。

$$p_{EV1}(t) = \sum_{j=1}^c e_{EV1,j}(t) \quad (20)$$

对于 V2G 充电负荷在  $t$  时刻对于第  $k$  辆 EV 充电功率  $p_{c,v2G,k}(t)$  与第  $n$  辆 EV 放电功率  $p_{d,v2G,k}(t)$  表达式如式(21)所示。 $x_{c,v2G}(t)$  与  $x_{d,v2G}(t)$  分别表示  $t$  时刻 EV 的充放电的状态变量，此时充、放电不可同时进行； $E_{c,v2G,k}$  与  $E_{d,v2G,n}$  表示第  $k$  辆与第  $n$  辆 EV 额定充、放电功率。

$$\begin{cases} p_{c,v2G,k}(t) = x_{c,v2G}(t) \times E_{c,v2G,k} \\ p_{d,v2G,n}(t) = x_{d,v2G}(t) \times E_{d,v2G,n} \end{cases} \quad (21)$$

$f$  辆 V2G 于  $t$  时刻充电功率  $p_{c,v2G}(t)$  与放电功率  $p_{d,v2G}(t)$  满足式(22)。

$$\begin{cases} p_{c,v2G}(t) = \sum_{k=1}^f p_{c,v2G,k}(t) \\ p_{d,v2G}(t) = \sum_{n=1}^f p_{d,v2G,n}(t) \end{cases} \quad (22)$$

11) V 电池荷电(State of Charge, SOC)约束

式(23)表示第  $n$  辆车在  $t$  时刻的 SOC 值  $s_n(t)$  需在  $0,1$  之间；第  $n$  辆车于  $t_{n,a}$  时刻入网初始功率  $S_{n,a}$  关系如式(24)所示；式(25)表示 EV 充电在  $t_{n,b}$  时刻结束功率  $S_n(t_{n,b})$  需达到预期达到的 SOC 值  $S_{n,b}$  与  $1$  之间；其中  $S_{n,a}$  为 10% 至 30% 之间的随机数； $S_{n,b}$  为 80% 至 100% 之间的随机数。

$$0 < s_n(t) \leq 1 \quad (23)$$

$$S_{n,a} = S_n(t_{n,a}) \quad (24)$$

$$S_{n,b} \leq S_n(t_{n,b}) \leq 1 \quad (25)$$

式(26)反映了三种不同充电负荷的  $s_n(t)$  计算方法； $b_j$ 、 $b_g$  和  $b_k$  分别表示第  $j$ 、 $g$  和  $k$  辆 EV 电池容量，本文均取  $23.5 \text{ kWh}$ ； $\mu_e^c$  与  $\mu_e^d$  表示 EV 充、放电效率。

$$s_n(t) = \begin{cases} s_n(t-1) + \mu_e^c \times \frac{p_{EV1,j}(t)}{b_j} \\ s_n(t-1) + \mu_e^c \times \frac{p_{EV2,g}(t)}{b_g} \\ s_n(t-1) + \mu_e^c \times \frac{p_{c,v2G,k}(t)}{b_k} - \frac{p_{d,v2G,k}(t)}{\mu_e^d \times b_k} \end{cases} \quad (26)$$

式中： $j \in [1, 2, \dots, c]$ ； $g \in [1, 2, \dots, r]$ ； $k \in [1, 2, \dots, f]$ 。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真条件

本文利用 Matlab 对 IEEE 30 节点电力网络结构进行仿真分析，其中 IEEE 30 节点电力网络拓扑结构如图 3 所示。其中 2、5、11 节点分别用 CSP 电

站、风力电站、光伏电站替代。其中风电机组容量为 200 MW, 光伏电站的容量为 100 MW。可再生能源电站运行参数见表 2, EV 相关参数如表 3 所示。三类 EV 总数量为 2 000 辆。常规负荷、光照强度及火电机组运行参数等数据都采用西北地区实际电站数据, 详见文献[4]。

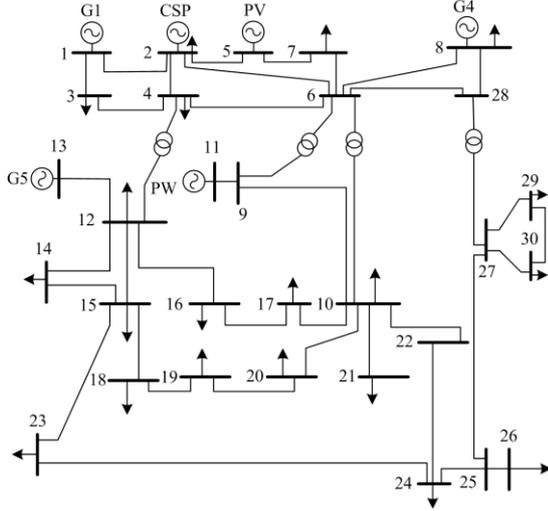


图 3 IEEE 30 节点网络拓扑

Fig. 3 IEEE 30 node network topology

表 2 可再生能源电站运行参数

Table 2 Operation parameters of new energy power stations

运行参数	数值
$P_{TSC,n,max}$	150 MW
$P_{TSC,n,min}$	10 MW
$\eta_s$	50%
$\eta$	3%
$r_{d,TSC}、r_{u,TSC}$	70 MW/h
$\eta_d$	45%
$\eta_{E-H}$	90%

表 3 电动汽车相关参数

Table 3 Related parameters of electric vehicle

运行参数	数值
$E_{EV1,j}(t)$	19 kW
$E_{EV2,i}(t)$	3.5 kW
$E_{c,V2G,k}(t)$	19 kW
$E_{d,V2G,m}(t)$	19 kW
$\mu_c^c$	92%
$\mu_c^d$	92%

### 3.2 结果分析

本文运用 Matlab 进行仿真, 设定调度区域 EV 数目为 2 000 辆, 改变三种 EV 的渗透率并将所提

调度方案与传统调度方案进行比较, 验证所提方案的优越性。

为了对比所提调度方案, 本文设定传统方案没有外加的电加热系统将盈余电能转换成热能储存在 TES 中, 也无本文所提的四种模式, 而是以新能源消纳量与净负荷波动最小进行多目标优化求解。

其中 EV 渗透率不同影响到净负荷方差, 而可再生能源消纳与常规机组波动主要由源端协调方式影响。改变三类 EV 渗透率对净负荷方差影响如表 4 所示。

表 4 三类 EV 渗透率不同实验结果

Table 4 Different experimental results of three types of EV permeability

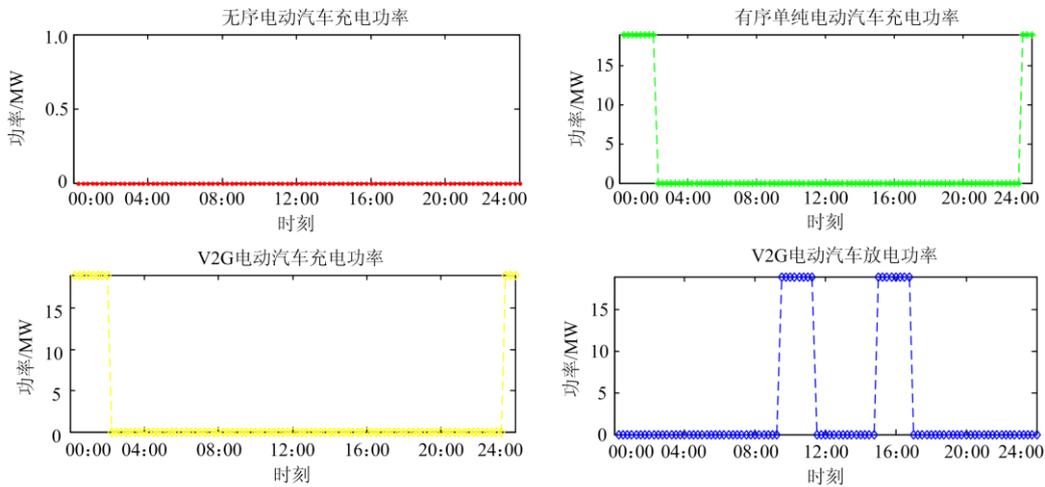
组号	无序 EV/辆	有序单纯 EV/辆	V2G/辆	净负荷方差
1	0	0	0	$5.79 \times 10^{-2}$
2	0	1 000	1 000	$1.7865 \times 10^{-4}$
3	400	800	800	$1.18 \times 10^{-2}$
4	2 000	0	0	$1.234 \times 10^{-1}$
5	400	0	1 600	$1.3 \times 10^{-3}$
6	400	400	1 200	$2.52 \times 10^{-2}$

表 4 中数据说明改变三类 EV 不同渗透率对净负荷方差产生较大影响。

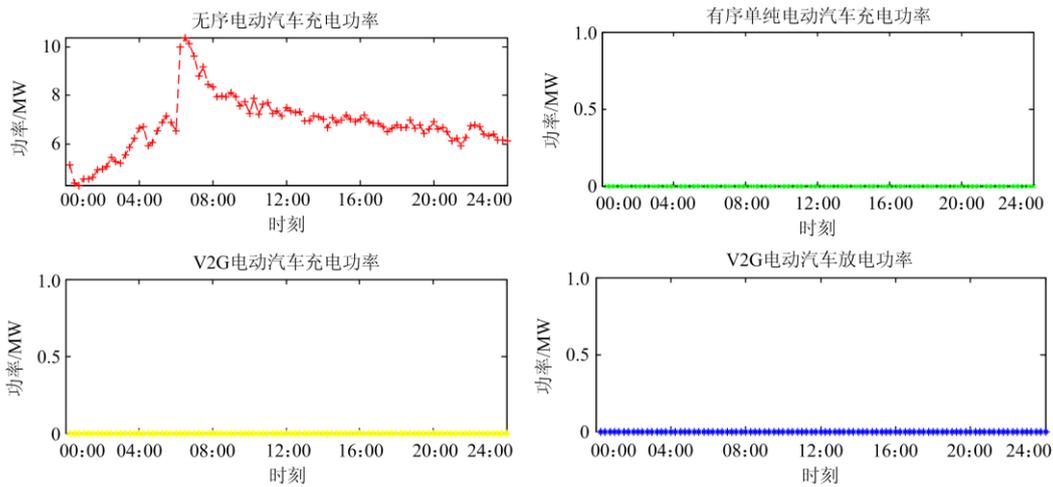
通过比较可知, 随着无序 EV 渗透率升高其净负荷方差大。其中实验组 2 为理想状态, 认为该区域没有无序 EV 负荷, 其余两类有序 EV 负荷各占 50%, 此时净负荷方差达到最小为  $1.7865 \times 10^{-4}$ 。在实验组 2 的条件下, 三类 EV 充放电功率如图 4(a)所示, 净负荷功率曲线如图 5(a)所示。随着无序 EV 渗透率升高净负荷方差也在升高, 特别是实验组 4 认为该区 EV 全部为无序 EV, 此时净负荷方差最大达 0.123 4, 甚至高于实验组 1 无 EV 参与调度情况。实验组 4 三类 EV 充放电功率如图 4(b)所示, 净负荷功率曲线如图 5(b)所示。这是由于大规模无序 EV 的充电行为可能会造成“峰上加峰”的现象<sup>[24]</sup>。实验组 3、5、6 表示改变单纯有序 EV 与 V2G 比例, 逐步提高 V2G 渗透率。通过对比分析可知, 随着 V2G 渗透率提高, 净负荷方差也逐步减小, 其中实验 5 组认为该调度区域有序 EV 均为 V2G 此时净负荷方差达到 0.001 3。

图 4 红色折线为蒙特卡洛法模拟无序 EV 充电功率, 该负荷接入电网具有很强的随机性, 绿色曲线表示单纯有序 EV 充电功率其在负荷低谷时进行充电, 左下角与右下角实线分别为 V2G 的放电与充电功率, 此类 EV 负荷在负荷高峰时进行放电负荷低谷时进行充电。





(a) 实验组2电动汽车充放电功率

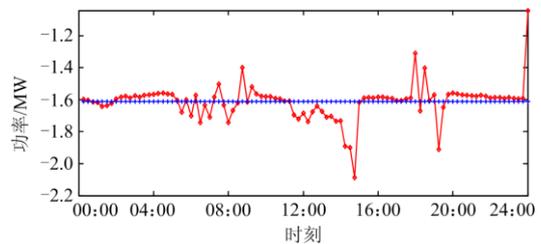


(b) 实验组4电动汽车充放电功率

图 4 实验组 2 及实验组 4 EV 充放电功率

Fig. 4 Charging and discharging power of EV in experimental group 2 and group 4

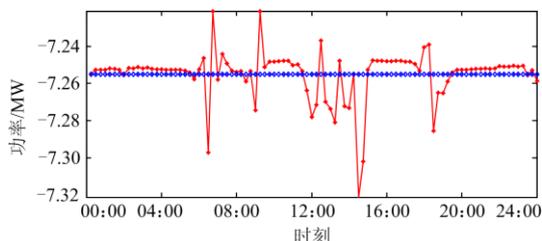
图 5 中折线表示净负荷功率大小，其求法见式(2)。其中蓝色直线表示平均净负荷功率大小，求法见式(3)。可以发现净负荷功率始终围绕平均净负荷上下波动，两个功率始终为负值，由式(2)可知，有风有光模式下可再生能源功率较大，此时负荷与可再生能源出力差值为负值，表示可再生能源功率有盈余，此模式下 CSP 储存热量。



(b) 实验组4净负荷功率

图 5 实验组 2 及实验组 4 净负荷功率

Fig. 5 Net load power of experimental group 2 and group 4



(a) 实验组2净负荷功率

图 5(a)中净负荷功率围绕平均净负荷功率上下波动幅度明显较图 5(b)中幅度有所减少。说明本文通过管理 EV 负荷，将其划分为有序 EV 与无序 EV 统一调度，较传统的采用 EV 的无序调度有利于降低净负荷方差。并通过表 4 中实验组 3、5、6 实验

数据说明在有序EV中加大V2G充电负荷比例可进一步降低净负荷方差。

表5将文中所提调度策略与传统调度策略结果进行比较, 两种方案参与调度的无序EV、单纯有序EV和V2G数量相同分别为400、800和800, 两种方案EV充放电功率如图6所示。

图7为传统调度策略实验结果, 包括净负荷、可再生能源消纳量与各个传统机组出力。传统调度采用多目标优化, 其目标函数有净负荷方差、风电

电站、光热、光伏电站消纳量与传统机组波动量。

表5 所提调度策略与传统调度策略结果比较

Table 5 Comparison of the results between the proposed scheduling strategy and the traditional scheduling strategy

类别	净负荷方差	风电场总消纳量/MW	光热光伏总消纳量/MW	传统机组波动量
传统调度策略	$3.4423 \times 10^3$	$9.5753 \times 10^3$	$6.1013 \times 10^3$	13.1138
本文所提调度策略	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.92 \times 10^4$	$1.8461 \times 10^4$	$1.0519 \times 10^{-8}$

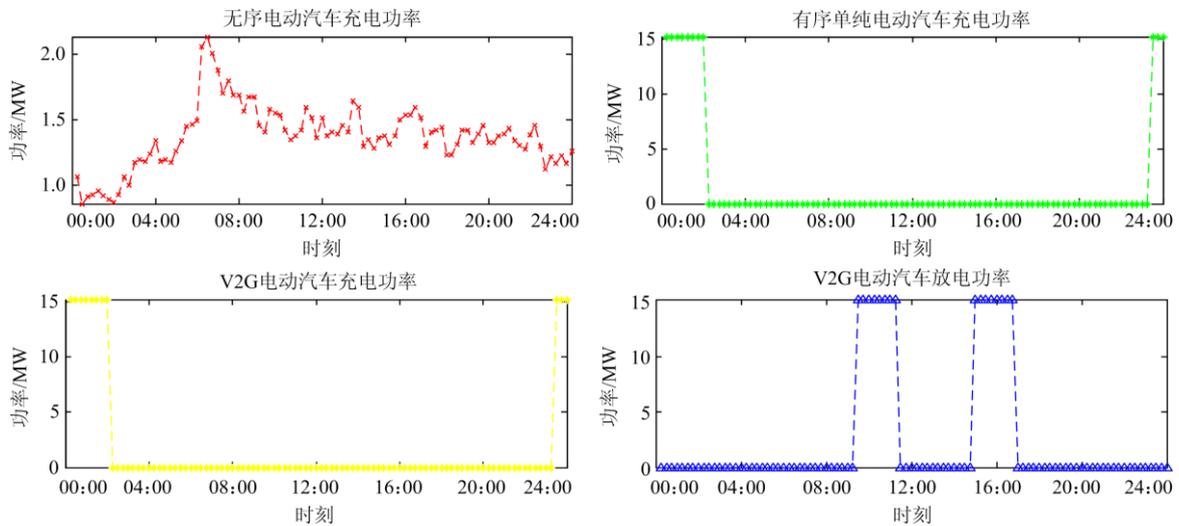
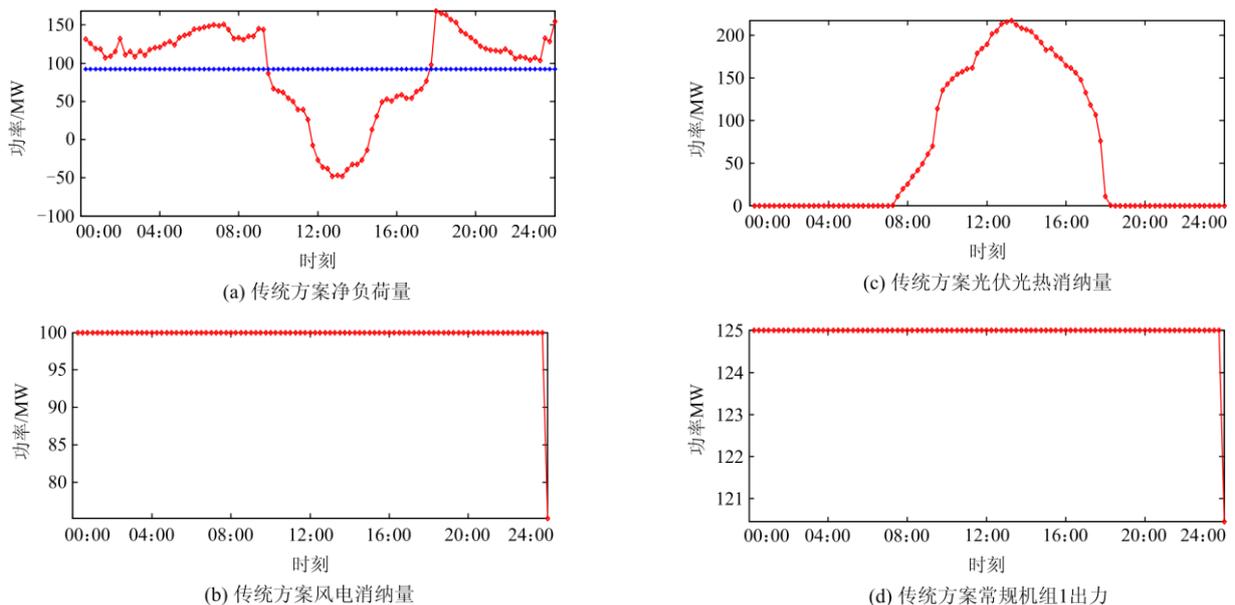
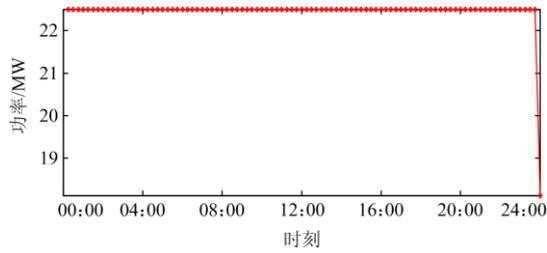


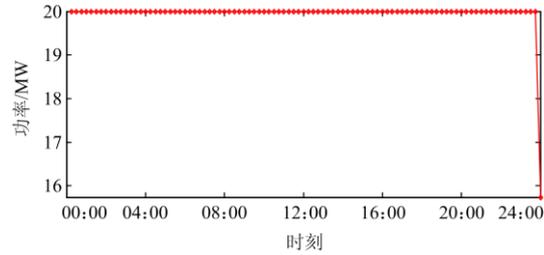
图6 本文策略与传统策略对比实验参与调度EV负荷充放电功率

Fig. 6 Experimental comparison of participating in the dispatch of EV load charging and discharging power of strategy of this paper and the traditional strategy





(c) 传统方案常规机组2出力



(f) 传统方案常规机组3出力

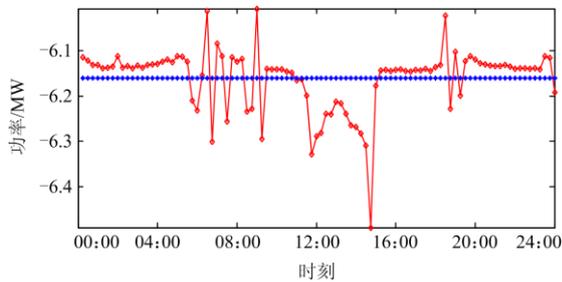
图 7 传统调度策略实验结果

Fig. 7 Experimental results of traditional scheduling strategy

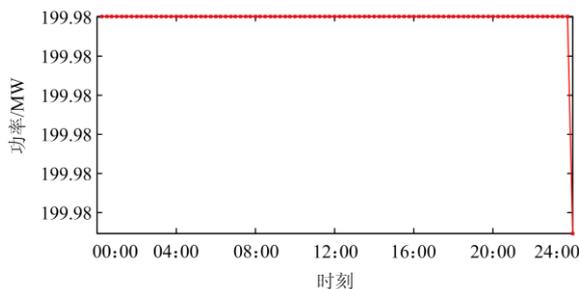
本文采用的方案包括多能源协同调度策略、模式划分、三类 EV 参与调度。图 8 为本文所用的调度策略所得的实验结果。

通过表 5 具体数值对比，发现本文所提调度策略在净负荷波动、可再生能源消纳和传统机组波动方面均优于传统调度策略。

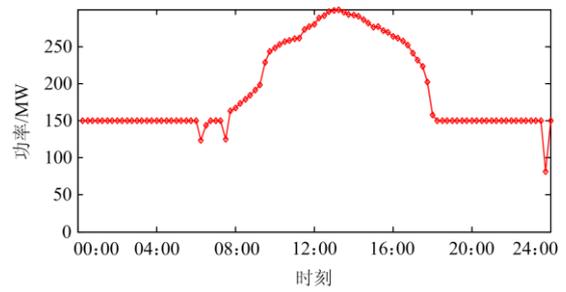
图 8(a)中净负荷波动最大点也不超过平均净负荷 0.5 MW，相比图 7(a)中净负荷功率围绕平均净负荷功率大范围波动，验证了本文所提调度策略对净



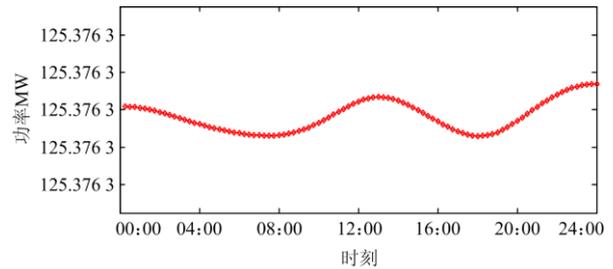
(a) 本文方案净负荷量



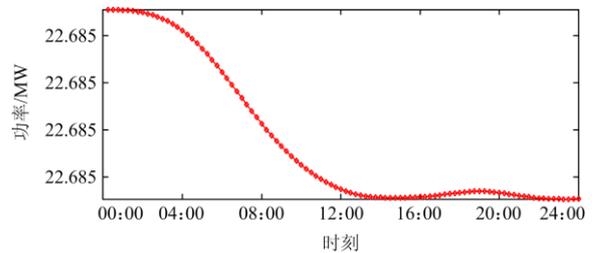
(b) 本文方案风电电站消纳量



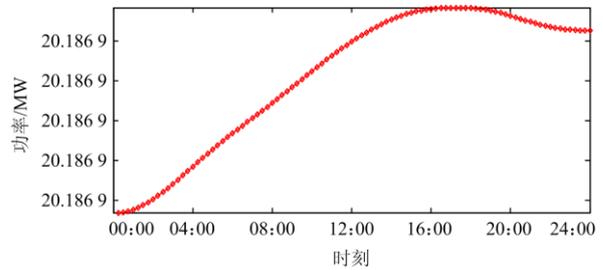
(c) 本文方案光伏与光热电站消纳量



(d) 本文方案传统机组1出力



(e) 本文方案机组2出力



(f) 本文方案传统机组3出力

图 8 本文调度策略实验结果

Fig. 8 Experimental results of scheduling strategy in this paper

负荷方差有了很大改善。

此外利用本文所提调度策略，可再生能源消纳量也有了很大提升。图 8(b)为运用本文策略处于有风无光模式下风电消纳情况，可以发现此时几乎每个时刻风电都消纳 198.98 MW，波动很小。而运用传统方案风电消纳仅达 100 MW，故本文所提策略对风电消纳水平有所提升。此外，有光无风模式下的光伏光热消纳实验结果如图 8(c)所示。在此模式下早晚无光情况下 CSP 电站 TES 系统放热通过 HTF 携带热量推动汽轮机组出力，而图 8(c)中的早

晚时段由于受太阳辐射指数限制并且无电加热系统将盈余电功率转化成热量储存。故此时段仍依靠光热电站利用白天盈余热能出力加之受蓄热系统热量约束限制导致出力较小。由此可见本文所提调度策略改善了光能利用率。

另外, 由图 8 中的分图(d)、(e)、(f)表示运用本文策略在无风无光模式下常规机组出力情况, 其出力曲线波动性很小, 最高点至最低点到小数点后第七位后才有明显的数值区分, 为了图像的简洁文中图像最多保留至小数点后第四位。将图 8 中的分图(d)、(e)、(f)对比图 7 中的分图(d)、(e)、(f)中运用传统方案的实验结果, 本文所提策略传统机组波动性有了很大改善, 故运用本文方案有助于减小传统机组的波动。

#### 4 总结与展望

本文提出一种风电-光热-光伏-EV 协调调度策略并且根据风光特性将联合系统划分为“有风有光”、“有风无光”、“有光无风”、“无风无光”四种运行模式。经过算例仿真分析得到以下结论。

1) 本文将 EV 充电负荷分为三类即无序 EV、单纯有序 EV 和 V2G。通过仿真分析改变三类 EV 渗透率对净负荷方差产生影响, 其中提高有序 EV 渗透率减少无序 EV 比例有利于减小净负荷方差。

2) 将本文提出的协调策略与传统的多目标协调策略进行对比分析发现本文提出策略在减小净负荷方差、增大可再生能源的消纳量及减小传统机组波动等方面均优于传统的多目标协调策略。

考虑到三类 EV 负荷渗透率不同对净负荷方差产生较大影响, 需要进一步研究三类 EV 的最佳渗透比例和不同特征负荷参与协调调度的优化策略。

#### 参考文献

- [1] MU Gang, GUO Gan, LI Junhui, et al. The control strategy of energy storage externality for reducing wind curtailment from wind farm cluster[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 233-239.
- [2] 刘德顺, 董海鹰, 汪宁渤, 等. 基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 73-83.  
LIU Deshun, DONG Haiying, WANG Ningbo, et al. Optimal dispatch of multi-source complementary power plants based on multi-scale coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 73-83.
- [3] 仲悟之, 黄思宇, 崔杨, 等. 考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3424-3432.  
ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, et al. Coordinated optimal dispatch of wind power, solar thermal and carbon capture virtual power plant considering source load uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3424-3432.
- [4] 崔杨, 张家瑞, 仲悟之, 等. 计及电热转换的含储热光热电站与风电系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6482-6493.  
CUI Yang, ZHANG Jiarui, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal scheduling of solar thermal power station with thermal storage and wind power system considering electrothermal conversion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6482-6493.
- [5] BRAVO R, ORTIZ C, CHACARTEGUI R, et al. Hybrid solar power plant with thermochemical energy storage: a multi-objective operational optimisation[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205.
- [6] JIANG P, DONG J, HUANG H. Optimal integrated demand response scheduling in regional integrated energy system with concentrating solar power[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 166.
- [7] LI Y, WANG J, ZHAO D, et al. A two-stage approach for combined heat and power economic emission dispatch: combining multi-objective optimization with integrated decision making[J]. Energy, 2018, 162: 237-254.
- [8] 贡韞韵, 董海鹰, 马志程, 等. 考虑需求响应与光热电站参与的多源系统优化经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 140-149.  
YUN Yunyun, DONG Haiying, MA Zhicheng, et al. Optimal economic dispatch of multi-source system considering demand response and solar thermal power station participation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 140-149.
- [9] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.  
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Orderly charging strategy of electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [10] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 1-9.  
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Multi objective optimal reconfiguration of active distribution network considering electric vehicle charging mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 1-9.
- [11] 常小强, 宋政湘, 王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. 高压电器, 2020,

- 56(8): 1-5.  
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on Monte Carlo algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 1-5.
- [12] 陈奎, 马子龙, 周思宇, 等. 电动汽车两阶段多目标有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 65-72.  
CHEN Kui, MA Zilong, ZHOU Siyu, et al. Study on two-stage multi-objective orderly charging strategy for electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 65-72.
- [13] 陈凯炎, 牛玉刚. 基于 V2G 技术的电动汽车实时调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 1-9.  
CHEN Kaiyan, NIU Yugang. Real time scheduling strategy for electric vehicles based on V2G technology[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 1-9.
- [14] 尹琦琳, 秦文萍, 于浩, 等. 计及风电波动性和电动汽车随机性的电力现货市场交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 118-127.  
YIN Qilin, QIN Wenping, YU Hao, et al. Electricity spot market trading model considering wind wave dynamics and electric vehicle randomness[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 118-127.
- [15] SACHAN S, DEB S, SINGH S N. Different charging infrastructures along with smart charging strategies for electric vehicles[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 60.
- [16] 谢琳宇, 唐忠, 黄星宇, 等. 考虑分布式电源和电动汽车不确定性的双层动态配网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 1-11.  
XIE Linyu, TANG Zhong, HUANG Xingyu, et al. Dual level dynamic distribution network reconfiguration considering distributed generation and electric vehicle uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 1-11.
- [17] 王毅, 陈进, 麻秀, 等. 采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 77-85.  
WANG Yi, CHEN Jin, MA Xiu, et al. Interactive dispatching strategy between electric vehicles and power grid based on cluster optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 77-85.
- [18] USAOLA J. Operation of concentrating solar power plants with storage in spot electricity markets[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(1): 59-66.
- [19] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.  
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Overview of electric vehicle charging load and dispatching control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [20] 鲍谚, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.  
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on auxiliary frequency control strategy of electric vehicle mobile energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.
- [21] 张宏, 陈钊, 黄蓉, 等. 风电-光伏-光热联合发电系统的模糊多目标优化模型[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 112-120.  
ZHANG Hong, CHEN Zhao, HUANG Rong, et al. Fuzzy multi-objective optimization model of wind power photovoltaic solar thermal combined power generation system[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 112-120.
- [22] 杨晓萍, 刘浩杰, 黄强. 考虑分时电价的风光储联合“削峰”优化调度模型[J]. 太阳能学报, 2018, 39(6): 1752-1760.  
YANG Xiaoping, LIU Haojie, HUANG Qiang. Optimal dispatching model of wind power storage combined with "peak shaving" considering time of use price[J]. Acta Solar Energy, 2018, 39(6): 1752-1760.
- [23] 孙沛, 傅旭, 李富春, 等. 含有电加热装置的光热机组运行策略研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 38-43.  
SUN Pei, FU Xu, LI Fuchun, et al. Study on operation strategy of photothermal unit with electric heating device[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 38-43.
- [24] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 基于自适应变异粒子群算法的电动汽车换电站充电调度多目标优化[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 25-29.  
TIAN Wenqi, HE Jinghan, JIANG Jiuchun, et al. Multi objective optimization of charging scheduling of electric vehicle battery swapping station based on adaptive mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 25-29.

收稿日期: 2020-09-02; 修回日期: 2021-01-07

作者简介:

胡福年(1967—), 男, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统鲁棒性、智能电网优化控制、多源配电网协调控制; E-mail: funian@jsnu.edu.cn

徐伟成(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行; E-mail: xuweichengonly1@163.com

陈军(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究生导师, 研究方向为模糊、时滞和神经网络等系统的稳定性分析。E-mail: jchen2019@jsnu.edu.cn

(编辑 姜新丽)