

基于IGDT含电动汽车接入的 能源系统输配协同双层优化调度

鄢仁武, 梁岑, 鲍金晟

(福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 电网中新能源与电动汽车渗透率的提升导致电力系统在局部时段灵活性严重不足。针对现有处理电力系统灵活性和供需不确定性过于保守或过于冒险的问题, 提出一种基于信息间隙理论的双层优化调度模型。建立了包含输电与配电的能源调度系统, 在此基础上提出电动汽车充放电双层优化调度策略。上层协调优化电动汽车、发电机组、风能和光伏发电, 以实现供电成本的最小化。同时针对可再生能源发电的随机性问题, 引入IGDT进行模拟分析。在配电网的下层优化, 通过引入节点损耗灵敏度和节点电价, 将电动汽车分配给充电节点, 以实现电网损耗成本和充电成本的最小化。最后, 通过ESS模型和IEEE33节点标准电网行仿真模拟分析, 验证了所提策略的有效性及优越性。

关键词: 电动汽车; 双层优化; 节点电价; IGDT

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0250-08

Bi-layer optimization scheduling of energy system transmission and distribution based on IGDT with electric vehicle access

YAN Renwu, LIANG Cen, BAO Jinsheng

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The increase in the penetration of new energy and electric vehicles in the power grid has led to a serious lack of flexibility of the power system in local time periods. Aiming at the existing problems of dealing with power system flexibility and supply uncertainty that are too conservative or too risky, a two-layer optimal scheduling model based on information gap decision theory (IGDT) is proposed. An energy scheduling system (ESS) including transmission and distribution is established, and a two-layer optimal scheduling strategy for EV charging and discharging is proposed on this basis. The upper layer coordinates the optimization of EVs, gensets, wind and photovoltaic power generation to minimize the cost of power supply. Meanwhile, for the stochastic problem of renewable energy generation, IGDT is introduced for simulation and analysis. In the lower layer optimization of the distribution network, EVs are assigned to charging nodes by introducing node loss sensitivity (NLS) and node electricity price (NEP) to minimize the grid loss cost and charging cost. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed strategy is verified by simulation and analyses through the ESS models and IEEE 33-node standard grid.

Keywords: electric vehicles; bi-layer optimization; node electricity price; IGDT

在我国“双碳”目标的大环境下^[1], 电力行业面临着更多的机遇与挑战。将电动汽车 (electric vehicles, EV) 与分布式电源融合后接入电网, 不仅能在充分利用清洁能源的基础上减少对化石燃料的依赖, 还能进一步提高电网的经济效益和环境效益^[2]。然而, 电动汽车充电负荷以及风能、光伏出力的不确定性会给配电网的稳定运行带来

新的挑战。电动汽车的大规模接入会导致配电网负荷波动和节点电压问题, 同时, 如果充电时间与风能、光伏出力不协调, 还可能增加发电成本, 影响电网的经济性。

针对可再生能源出力不确定问题, 目前大多采用鲁棒优化和随机优化实现灵活性供需平衡。文献[3]通过引入伪F-统计指标判断缩减后的

收稿日期: 2023-11-25

第一作者简介: 鄢仁武 (1981—), 男, 福建福州人, 副教授, 博士, 研究方向: 智能电网应用。

最优场景,以解决源-荷不确定性问题,提高电网的经济性。文献[4]建立基于模糊机会约束的多目标优化调度模型处理风电和负荷不确定性,结合涡流搜索算法进行求解,在一定程度上克服了局部最优限制,提升了备选解的丰富度。相较于上述方法,IGDT (information gap decision theory) 不需要不确定参数的概率分布,还可根据决策者的风险偏好提供与收益期望相对应的决策方案。当不确定参数的波动区间在最大波动范围内变化时,不影响预定的目标。基于这些优点,IGDT 为风险决策提供了更灵活的选择。文献[5]建立了多时段下微电网扩展规划模型,并利用 IGDT 解决了负荷增长的不确定性问题,但忽略了电动汽车接入电网的影响。文献[6]利用 IGDT 解决多个新能源机组接入虚拟电厂及配电网的不确定性问题,提出多新能源机组组合的风险和收入平衡最佳方案。

针对电动汽车有序充电的调度策略问题目前可以分为集中式调度、分散式调度和分区调度^[7-8]。文献[9]提出基于分布式有序充放电的电动汽车管理策略,兼顾了电网与用户双方的利益。文献[10]从多角度分析了各电动汽车有序充放电模型。文献[11]根据需求侧激励响应,提出一种兼顾车主、电网以及负荷聚集商三方利益的分布式多目标优化模型。文献[12]以负荷波动最小化及收益最大化为优化目标,提出一种考虑价格型与激励型的需求侧响应措施,针对电动汽车负荷聚集商调度策略则提出固定或灵活签约两种模式。文献[13]提出一种电动汽车充放电定价策略,以智能小区运营商和车主各自追求利益最大化建立主从博弈模型,实现运营商与电动汽车车主的双赢。

然而,上述模型仅在时间维度对电动汽车充电加以优化,忽略了从空间维度对配网的影响及与发电侧的协调。因此,本研究提出一种电动汽车充放电双层优化调度策略,旨在输电网层面综合优化电动汽车、发电机组及可再生能源的时间调度,并用 IGDT 分析了可再生能源输出的不确定性。在配电网层通过对电网每个节点的分析,提出了 NLS (node loss sensitivity) 来计算电网损耗,并提出了 NEP (node electricity price) 对电动汽车充放电负荷在空间维度进行优化。

1 能源调度系统模型

本研究构建的 ESS (energy scheduling system) 结构如图 1 所示。

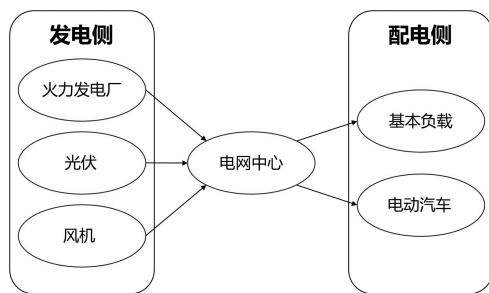


图 1 ESS 系统结构

Fig.1 ESS system structure

风电功率与风速的关系可以表示为:

$$P_{WT,t} = \begin{cases} 0 & v_s \leq v_{in} \\ P_{wr} \frac{v_s - v_{in}}{v_r - v_{in}} & v_{in} \leq v_s \leq v_r \\ P_{wr} & v_r \leq v_s \leq v_{out} \\ 0 & v_{out} \leq v_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{WT,t}$ 为风力发电机组的输出功率; P_{wr} 为风力发电机组的额定功率; v_s 和 v_r 分别为实际风速和额定风速; v_{in} 为切入风速; v_{out} 为切出风速。

光伏发电输出功率表达式如下:

$$P_{PV,t} = \frac{P_{stc} \cdot I_t [1 + k(T_t - T_{stc})]}{I_{stc}} \quad (2)$$

$$T_t = T_{env,t} + \frac{30I_t}{1\ 000} \quad (3)$$

式中, $P_{PV,t}$ 和 P_{stc} 分别为光伏发电的实际输出功率和额定功率; I_t 和 I_{stc} 分别为光照辐射强度和额定辐射强度; k 为功率温度系数; T_t 和 T_{stc} 分别为光伏面板的当前实际温度和额定温度; $T_{env,t}$ 为 t 时刻的环境温度。

2 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略

本研究所提的双层调度策略中,上层优化调度的目标是实现电力系统的运行成本和电动汽车充放电成本最小化,从而使 ESS 的效益最大化。考虑发电机组、风力发电厂、光伏发电厂和基本负荷等因素,可以得到每个时段中电动汽车最佳的充放电数量。下层调度则是分配配电网中电动汽车的充放电位置。当使用潮流计算来分析时,计算量增加,电动汽车无法及时获取电网提供的电

价信息。

本研究分析了配电网中每个节点的性能,并提出用 NLS 和 NEP 来减少计算量。NLS 可以通过离线计算获得,减少在计算电网损耗时的复杂性。NEP 也是时变的,可以从时间和空间上引导电动汽车参与调度。目标函数是最小化 NEP 下的电网损耗和充电成本,并优化分配电动车充放电节点。调度策略结构模型如图 2 所示。

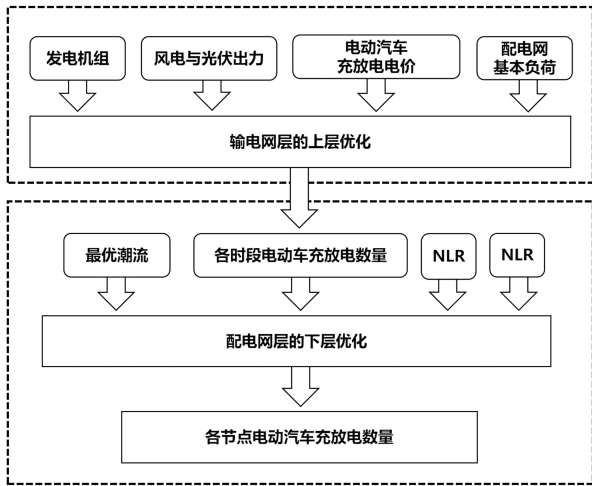


图 2 双层调度策略结构模型

Fig.2 Structural model of bi-layer scheduling strategy

2.1 上层优化调度策略建模

考虑可再生能源出力的不确定性,本研究引用了 IGD 进行分析。针对输电系统提出了机组组合模型的调度策略,使得电动汽车的充放电负荷在时间上与发电机组和风光出力的效果最优。该调度模型的优化变量为各个时段中各机组的出力情况和充放电的电动汽车数量。

2.1.1 目标函数

上层调度的目标函数是最小化运行成本、排放成本、充放电成本以及系统电力不足的损失。

(1) 燃料成本

$$C_{i,t}(P_{i,t}) = \alpha_i (P_{i,t})^2 + b_i (P_{i,t}) + c_i \quad (4)$$

式中, $C_{i,t}$ 是发电机组 i 在 t 时刻的燃料成本, α_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的燃料成本特性系数, $P_{i,t}$ 为发电机组 i 在 t 时段输出的有功功率。

(2) 排放成本

$$C_{e,i,t}(P_{i,t}) = \beta \cdot [a_{e,i}(P_{i,t})^2 + b_{e,i}(P_{i,t}) + c_{e,i}] \quad (5)$$

式中, $C_{e,i,t}(P_{i,t})$ 是发电机组 i 的排放成本, $a_{e,i}$ 、 $b_{e,i}$ 和 $c_{e,i}$ 是机组 i 的煤耗特性系数, β 是排放成本参数。

(3) 充电成本

$$C_{cd,t} = -p_{c,t} P_{c,t} + p_{d,t} P_{d,t} \quad (6)$$

式中, $C_{cd,t}$ 是 t 时段电动汽车的充电成本; $P_{c,t}$ 和 $P_{d,t}$ 分别为 t 时段充、放电功率, $p_{c,t}$ 和 $p_{d,t}$ 分别是 t 时段的充、放电价。

(4) 系统能源短缺成本

$$C_{ps,t} = -\theta (P_{ld,t} + P_{c,t} - P_{WT,t} - P_{PV,t} - P_{TP,t} - P_{d,t}) \quad (7)$$

式中, $C_{ps,t}$ 是 t 时段系统能源短缺成本, $P_{ld,t}$ 是系统基本负载, $P_{TP,t}$ 是 t 时段发电机组出力, θ 是成本系数。

故目标函数可以表示为:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 [C_{i,t}(P_{i,t}) + C_{e,i,t}(P_{i,t}) + C_{cd,t} + C_{ps,t}] \quad (8)$$

式中, T 为总优化时段数, 1 个时段取 15 min, T 为 96。

2.1.2 约束条件

约束条件包括设备约束、出力约束、功率平衡约束等。在每个时段 t 都必须满足下列约束条件。

(1) 发电机组出力爬坡约束

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (9)$$

$$R_{d,i} \leq R_{i,t} \leq R_{u,i} \quad (10)$$

式中, $R_{d,i}$ 和 $R_{u,i}$ 为发电机组 i 在单位时间段内最大下调有功量及最大上调有功量; P_i^{\max} 和 P_i^{\min} 分别为发电机组 i 有功出力的最大值和最小值。

(2) 风光出力约束

$$0 \leq P_{WT,t} \leq P_{WT,t}^{\max} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{PV,t} \leq P_{PV,t}^{\max} \quad (12)$$

式中, $P_{WT,t}^{\max}$ 和 $P_{PV,t}^{\max}$ 分别是 t 时刻风电和光伏出力的最大值。

(3) 功率平衡约束

$$P_{ld,t} + P_{c,t} - P_{WT,t} - P_{PV,t} - P_{TP,t} - P_{d,t} \geq 0 \quad (13)$$

(4) 能量约束

$$0 \leq P_{c,t} \leq P_c^{\max} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{d,t} \leq P_d^{\max} \quad (15)$$

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (16)$$

$$E_{t+1} = E_t + \tau \left(\eta_c P_{c,t} - \frac{P_{d,t}}{\eta_d} \right) \quad (17)$$

$$E_T = E_{\max} \quad (18)$$

式(14)~(18)表示电动汽车能量约束。在调度完成之后电动汽车必须充满电。 E_t 是 t 时段电动汽车的容量, E_{\min} 和 E_{\max} 分别是电动汽车容量的上限和下限; τ 是每个时段的长度; η_c 、 η_d 分别是电动汽车充放电效率, P_c^{\max} 和 P_d^{\max} 分别是充放电功率的上下限。

2.2 下层优化调度策略建模

下层优化策略是针对电动汽车接入配电网节点后的潮流分布问题进行优化。本研究在配电网层建立的NEP系统下,提出了基于最优潮流的优化调度策略,对各个节点上电动汽车的总充放电负荷进行优化调度。

2.2.1 节点电价

实际应用中,用户无法直接获得电网的运行状态,用户在选择充电方案时也不会考虑电网的指标。制定合理的NEP系统可以提高电网接受电动汽车的能力,并引导电动汽车积极参与调度。本研究在制定NEP系统时考虑了NLS和节点负载率(node load rate, NLR)两个因素。

(1) NLS

电动汽车并网充放电会产生电网损耗,当为每个节点分配不同的负载时,直接计算最优潮流将会增加优化过程的复杂性,降低电动汽车调度的实时性能。NLS表示由于电网节点的负荷增加而导致的电网损失量,如式(19)所示。

$$\text{NLS}_m = \frac{\partial L}{\partial P} \quad (19)$$

式中, NLS_m 是节点 m 的电网损耗灵敏度, L 是电网损耗, P 是节点的有功功率。

(2) NLR

如果单一追求降低电网损耗会导致单个节点出现重负荷或轻负荷,从而影响电网的调峰能力。NLR表示节点的实际负载与最大负载的比率,可用于评估节点的负载平衡,如式(20)所示。

$$\text{NLR}_{m,t} = \frac{P_{m,t}}{P_{\max}} \quad (20)$$

式中, $\text{NLR}_{m,t}$ 是节点 m 在时隙 t 中的负载率, $P_{m,t}$ 是节点 m 在时隙 t 中的总负载, P_{\max}^m 是节点 m 可承担的最大负载。

本研究假设电网的运行状态在单个调度时间内没有变化,每个时段内的电价是不变的,对NLS和NLR两个评价指标维度进行归一化和线性加权。

$$g_{m,t} = \omega_1 \text{NLS}_{m,t} + \omega_2 \text{NLR}_{m,t}, \omega_1 + \omega_2 = 1 \quad (21)$$

式中, $g_{m,t}$ 为线性加权后的指标; ω_1 、 ω_2 分别取0.6、0.4。

考虑到电价的边际成本,NEP可以定义为:

$$\text{NEP}_{m,t} = \text{NEP}_{\text{base},t} + g_{m,t} P_{m,t} \quad (22)$$

式中, $\text{NEP}_{\text{base},t}$ 是 t 时段的基本电价。

2.2.2 目标函数

下层调度的目标函数是在NEP系统下最大限度地减少电网节点的损失和电动汽车的充电成本。

(1) 电网损耗成本

$$L_{m,t} = \text{NEP}_{m,t} \text{NLS}_{m,t} P_{m,t} \quad (23)$$

式中, $L_{m,t}$ 为节点 m 在 t 时段的损耗成本。

(2) NEP下电动汽车的充电成本

$$C_{n_{m,t}} = \text{NEP}_{m,t} \tau (N_{\text{chg},m,t} P_c - N_{\text{dis},m,t} P_d) \quad (24)$$

式中, $N_{\text{chg},m,t}$ 和 $N_{\text{dis},m,t}$ 分别表示 t 时段 m 节点的电动汽车充放电数量。

下层优化调度策略的目标函数可以表示为:

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{32} (\omega_3 L_{m,t} + \omega_4 C_{n_{m,t}}) \\ \omega_3 + \omega_4 = 1 \end{cases} \quad (25)$$

式中, ω_3 、 ω_4 分别取0.9、0.1。

2.2.3 约束条件

(1) 电压幅值约束

各个节点的电压应小于该节点允许的最大电压,大于该节点允许的最小电压,如式(26)所示。

$$V_{\min} \leq V_{m,t} \leq V_{\max} \quad (26)$$

式中, $V_{m,t}$ 是节点 m 在 t 时段的电压, V_{\min} 和 V_{\max} 分别为节点 m 电压的下限与上限。

(2) 各时间段内电动汽车充放电数量约束

各时段内,电动汽车充电量之和应等于上层优化结果,如式(27)(28)所示。

$$\sum_{m=1}^{32} N_{c,m,t} = N_{\text{chg},m,t} = N_{c,t} \quad (27)$$

$$\sum_{m=1}^{32} N_{d,m,t} = N_{\text{dis},m,t} = N_{d,t} \quad (28)$$

式中, $N_{c,t}$ 和 $N_{d,t}$ 分别是上层优化调度中电动汽车的充放电数量。

(3) 各节点充放电数量约束

$$0 \leq N_{c,m,t} \leq N_{c,m,t}^{\max} \quad (29)$$

$$0 \leq N_{d,m,t} \leq N_{d,m,t}^{\max} \quad (30)$$

$$N_{c,m,t}^{\max} = \frac{M_c}{\text{NLR}_{m,t}} \quad (31)$$

$$N_{d,m,t}^{\max} = \frac{M_d}{\text{NLR}_{m,t}} \quad (32)$$

式中, $N_{c,m,t}^{\max}$ 和 $N_{d,m,t}^{\max}$ 分别是节点 m 在 t 时刻可以接入的充电和放电电动汽车的最大数量。 M_c 和 M_d 分别是最大充电和放电数量参数,本研究取50。

3 IGDТ 模型

IGDT 可根据预期目标直接对不确定参数的间隙进行优化,分析不确定参数对系统产生的影响。风光出力的不确定性建模如式(33)所示。

$$\begin{cases} U(\alpha, \tilde{P}_{DG,t}) = \left\{ P_{DG,t} : \left| \frac{P_{DG,t} - \tilde{P}_{DG,t}}{\tilde{P}_{DG,t}} \right| \leq \alpha \right\} \\ \alpha \geq 0 \\ P_{DG,t} = P_{PV,t} + P_{WT,t} \\ P_{DG,t} \in U(\alpha, \tilde{P}_{DG,t}) \end{cases} \quad (33)$$

式中, $U(\alpha, \tilde{P}_{DG,t})$ 为风光出力不确定模型; α 为实际出力的不确定性区间; $P_{DG,t}$ 为 t 时段的不确定出力; $P_{PV,t}$ 和 $P_{WT,t}$ 分别为 t 时段光伏、风电的不确定出力。

IGDT 存在风险规避和机会寻求两种不同的决策方式。本研究仅讨论基于机会寻求决策方式,以减少风力和光伏发电的不确定性给系统运行带来的不利影响。该策略认为不确定参数引起的波动会造成系统调度成本的减少,属于有利参数。决策者在最大调度成本不超过接受范围的前提下,最大化不确定参数的波动范围。

4 算例分析

4.1 上层输电网层的仿真分析

本研究仿真分析的风电和光伏数据参考文献[14],发电机组的相关参数参考文献[15],电价如图3所示,放电电价略高于充电的电价,以补偿放电加速电池的老化。

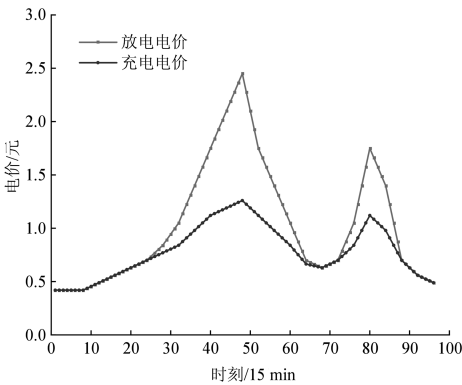


图 3 充放电电价

Fig.3 Charging and discharging prices

电动汽车在每个时隙的充放电容量如图4所示。用户驾驶电动汽车上班后,在时隙34~60间将

电动汽车连接到电网充电。时隙64~72期间,用户回家路上,电动汽车被放电。在84~92时隙间,用户回家后给汽车充电。根据每个时隙的充放电能量和充放电功率,可以得到每个时隙的电动汽车在电网上的数量。为了满足发电侧的电力需求,火力发电厂必须参与发电。发电机组的相关参数如表1所示。每个单元的发电与成本如表2所示。

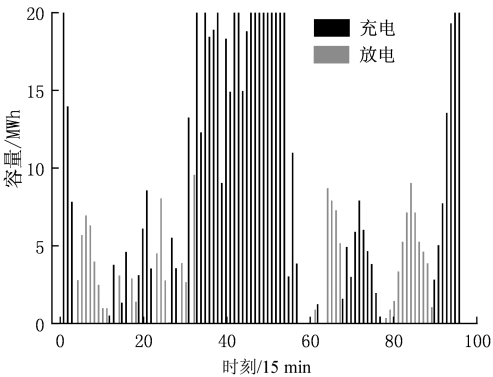


图 4 电动汽车充放电容量

Fig.4 Electric vehicle charging and discharging capacity

表 1 发电机组出力参数

Tab.1 Generator set output parameters

机组编号	最大出力/MW	最小出力/MW
1	35	10
2	30	0
3	22	0
4	20	0

表 2 各单元发电成本

Tab.2 Unit generation cost

发电单位	发电量/MWh	发电成本/千元	排放成本/千元
TP1	3 264.0	2 605.96	47.96
TP2	2 774.6	1 984.85	40.54
TP3	1 199	1 059.66	17.27
TP4	551.3	833.91	9.59
PV(光伏)	921.0	/	/
PP(风电)	811.8	/	/
EV	-483.0	-1 160.25	/

由表2可以计算出4个火力发电厂提供的单位电力成本分别为0.81、0.73、0.96和2.54元。然

而,电动汽车的平均充电成本为2.41 元,低于 TP4 的成本。因此,TP4 的发电不是用来给电动汽车充电,而是为了保持系统的电力平衡,避免电力不足产生的巨大成本。

4 个火力发电厂各时隙的输出状态如图 5 所示。由于成本低,TP1 和 TP2 在允许范围内输出大量功率,而 TP3 的输出略有降低。除了 75~90 的时隙之外,TP4 的输出较少,以确保电力系统具有足够的供电裕度来实现稳定操作。

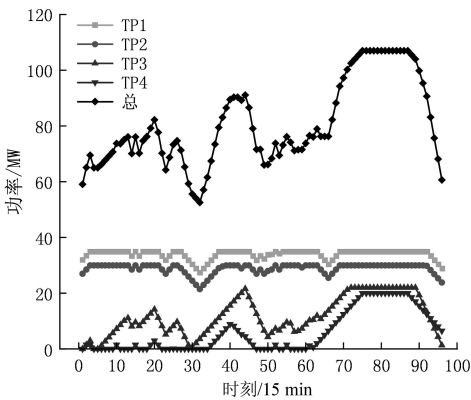


图 5 发电机组每个时隙的输出状态

Fig.5 Output status of each time slot of generator set

每个时隙中所有单元的输出状态如图 6 所示。电力系统在整个调度过程中的电力短缺为零,即发电量和耗电量相同。光伏发电主要集中在时段 25~72(6:00–18:00)。风力发电分布在整个调度间隔内,并且是多模式的。弃风率和弃光率分别为 0.0%、0.4%。放弃可再生能源的原因是电网节点无法连接到更多的电动汽车,将导致吸收能力不足和资源浪费。在本研究提出的调度策略下,可再生能源可以得到充分利用。

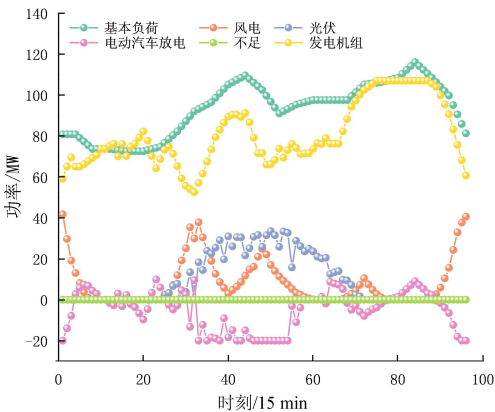


图 6 各单元输出状态

Fig.6 Output status of each unit

上述结果验证了电动汽车接入对 ESS 的优

化作用,但并未计及可再生能源出力的不确定性影响。在 IGDT 优化模型中最优调度的综合运行成本为 594 千元。本研究设定成本偏差因子 β^{OM} 的变化范围均为 0.01~0.10。图 7 为 α 和总运行成本随偏差因子变化趋势。由图 7 可知,在机会模型中,随着成本偏差因子 β^{OM} 的增加,不确定半径 α 随之增加,但总运行成本减少。当 β^{OM} 为 0.01 和 0.10 时,系统的最高运行成本和最低运行成本分别为 588、535 万元,减少了 9.1%。这是因为在机会寻求策略中,决策者认为不确定性能够为系统带来积极影响,不确定半径 α 越大,风光出力的不确定性也增大,收益增高的可能性加大,进而减小了总运行成本。且风光在 $[(1-\alpha)\tilde{P}_{DG,t}, (1+\alpha)\tilde{P}_{DG,t}]$ 内变化时,都能满足系统运行成本低于目标值 $(1-\beta^{OM})\times F_0$ 。

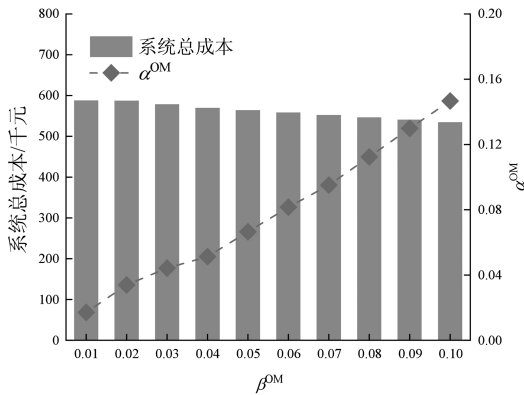


图 7 机会寻求策略下的运行成本和不确定度

Fig.7 Operating costs and uncertainties under opportunity-seeking strategy

4.2 下层配电网仿真分析

下层仿真的 IEEE33 节点配电网单线图如图 8 所示。节点 0 作为平衡节点。下层调度模拟使用 NEP 为从上层调度获得的充电和放电电动汽车分配接入节点。

4.2.1 NLS

NLS 反映了连接电动汽车后节点的损耗指标,配电网各节点的损耗灵敏度如图 9 所示。节点 18 的 NLS 在相同时隙中最小,并且当节点连接到电动汽车时产生的电网损耗最小。节点 17 具有最高的 NLS,这意味着该节点具有最低的损耗性能。分配电动汽车时通常会避免接入该节点。此外,NLS 将随时间变化。在时隙 73 中,节点 17 的电网损耗灵敏度达到最大值。结合图 8 和图 9,可以得出 NLS 随着与平衡节点 0 的距离

增加而增加。

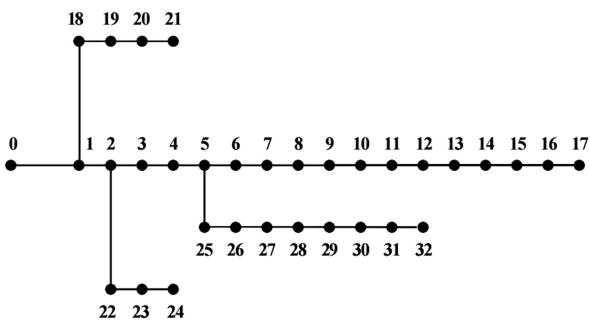


图 8 IEEE33 节点网络拓扑图
Fig.8 IEEE33 node network topology diagram

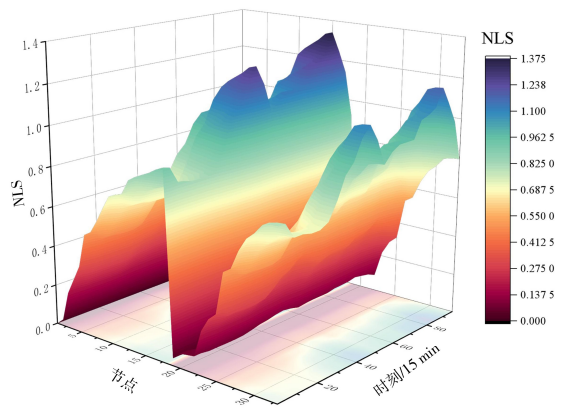


图 9 各时隙 NLS
Fig.9 NLS for each time slot

提出的 NEP 如图 10 所示,节点 24 上的 NEP 比其他节点高,故电动汽车在充电时应当避免接入改节点,从而增加损耗成本加大。

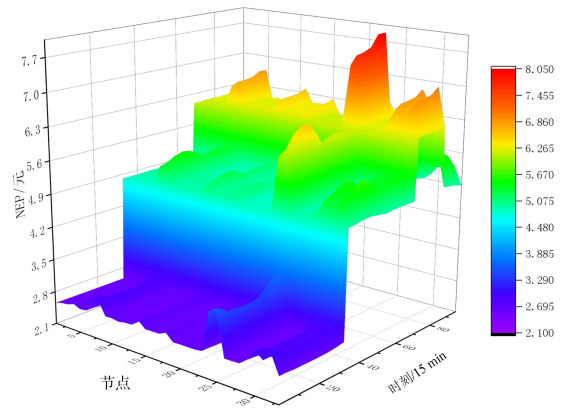


图 10 各时隙节点电价
Fig.10 NEP for each time slot

4.2.2 电动汽车充放电结果

充电电动汽车的时间和空间分布如图 11 所示。电动汽车的充放电主要集中在节点 1~6 和节点 18~26 上,这些节点的 NEP 和 NLS 都较小。

这种分布特性符合电网和电动汽车的共同利益。在充电站的规划中,可以尽量将其设置在靠近配电网起始端的位置。同时,还能通过在配电网中引入差异化的电价机制,综合分析用户对电价的响应程度,以此引导用户前往配电网首端进行充电。

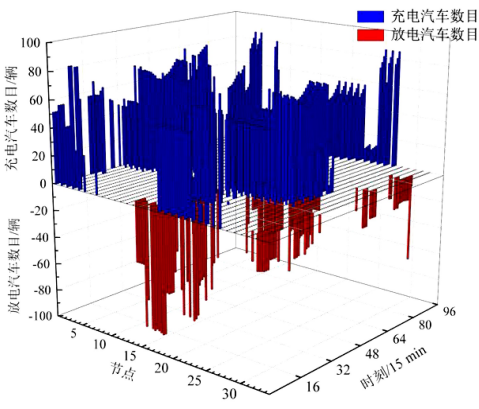


图 11 电动汽车充放电数量时空分布图
Fig.11 Distribution of EV charging and discharging volumes in space and time

为了验证所提调度策略的有效性,本研究设定 3 个不同电动车接入场景,分析电动汽车充电成本和节点损耗成本。场景 1 按本研究提出的方案分配电动汽车;场景 2 的电动汽车被随机分配给每个节点;场景 3 的电动汽车均匀分布在每个节点。不同情况下的节点损耗成本和电动汽车充电成本如表 3 所示。

表 3 不同情况下的节点损耗成本和电动汽车充电成本
Tab.3 Nodal loss costs and EV charging costs for different scenarios

场景	节点成本/千元	充电成本/千元	总成本/千元
1	330.19	1 599.01	1 929.20
2	1 073.17	1 584.38	2 657.55
3	1 105.44	1 581.86	2 687.30

从表 3 可见,3 种情况的充电成本大致相同。与场景 2 和场景 3 相比,场景 1 的节点损耗成本减少为 330.19 千元,相较于场景 2 和场景 3 分别降低 69.23%、70.31%。场景 1 的总成本为 1 929.55 千元,相较于场景 2 和场景 3 分别降低 27.4%、28.2%,表明所提出的考虑 NEP 的下层调度在降低节点损耗成本方面是有效的。

5 结论

本研究提出了一种双层调度策略,从发电侧和配电侧分别调度大型电动汽车的充放电。上层调度基于发电侧建立ESS模型。目标函数可以最大限度地降低ESS的运行成本,以解决每个机组的输出和电动汽车的最佳充放电功率。下层调度使用NLS和NLR来建立NEP系统,并通过最小化充放电成本和节点损耗来优化分配电动汽车充放电的空间位置。通过仿真实验,得出以下结论:

1)本研究建立的风能和光伏模型在上层调度中得到了充分利用。上层调度可以很好地适应分布式电源的不确定性,提高可再生能源的利用率,减少弃风率和弃光率。同时利用ESS对电动汽车的充放电能力进行评估,符合电动汽车车主日常的充放电模式,可以满足大部分电动汽车的充电需求。

2)通过运用IGDT,可以有效地描述风光能源的不确定性,并帮助调度管理者根据其风险偏好制定可靠的优化策略,以平衡预测误差和系统运行经济性,进而最大程度地利用风光能源,实现经济性和可靠性的均衡。

3)NLS随着与平衡节点的距离的增加而增加。与平局分布和随机分布相比,所提出的使用NEP来引导电动汽车的充放电可以有效地降低节点损耗和充电成本。

关于可再生能源出力成本及电动汽车充放电过程中电池损耗本研究暂未深入探讨,但在系统中兼顾二者并不完全现实。未来的研究将对可再生能源的出力成本进行建模,以找到平衡电动汽车和可再生能源的最佳优化方法;同时将考虑电动汽车的电池损耗,建立更灵活的调度机制,并对调度灵活性进行深入研究。

参考文献:

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
- [2] 程杉,倪凯旋,赵孟雨. 基于Stackelberg博弈的充换储一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):49-59,69.
- [3] 张靠社,冯培基,张刚,等. 考虑源荷不确定性的CCHP型微网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(17):18-27.
- [4] 李政洁,于强,龚文杰,等. 计及模糊机会约束的电-气-热能源枢纽多目标优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(9):49-56.
- [5] CAO X Y, WANG J X, ZENG B. A chance constrained information-gap decision model for multi-period microgrid planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):2684-2695.
- [6] 石文超,吕林,高红均,等. 考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):41-51.
- [7] ZHANG B, HU W H, CAO D, et al. Novel data-driven decentralized coordination model for electric vehicle aggregator and energy hub entities in multi-energy system using an improved multi-agent DRL approach[J]. Applied Energy,2023,339:120902.
- [8] 邱朵,杨洪明,赖明勇. 基于条件风险价值的智能区域代理商报价策略及EV充电管理[J]. 系统工程理论与实践,2018,38(8):1994-2005.
- [9] 王毅,麻秀,万毅,等. 基于分时充放电裕度的电动汽车有序充放电引导策略[J]. 电网技术,2019,43(12):4353-4361.
- [10] 崔金栋,罗文达,周念成. 基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4438-4450,4644.
- [11] 潘振宁,余涛,王克英. 考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J]. 中国电机工程学报,2019,39(12):3528-3541.
- [12] 侯慧,王逸凡,赵波,等. 价格与激励需求响应下电动汽车负荷聚合商调度策略[J]. 电网技术,2022,46(4):1259-1269.
- [13] 魏韡,陈玥,刘锋,等. 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理[J]. 电网技术,2015,39(4):939-945.
- [14] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewables and plug-in vehicles[J]. IEEE Systems Journal,2012,6(1):103-109.
- [15] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合[J]. 电力系统自动化,2011,35(21):16-20.