

引用格式:张彦昌,徐妙风,胡高铭,等.考虑多类型储能系统时空灵活性支撑的配电网日前优化调度策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):104-115.

Citation:ZHANG Yanchang, XU Miaofeng, HU Gaoming, et al. A day-ahead optimal scheduling strategy for distribution networks with spatiotemporal flexibility support of multi-type energy storage systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 104-115.

考虑多类型储能系统时空灵活性支撑的 配电网日前优化调度策略

张彦昌,徐妙风,胡高铭,徐钰栋,赵加利

(国网浙江省电力有限公司乐清市供电公司,浙江 乐清 325600)

摘要:大规模分布式资源的接入使配电网的调控更加困难,如何合理有效地利用多元化资源以降低配电网的运行成本成为亟待解决的关键技术问题。考虑可移动式储能系统和电动汽车的互补特性,提出一种考虑多类型储能系统时空灵活性支撑的配电网日前优化调度策略,提高配电网系统的运行经济性。首先,建立电动汽车和可移动式储能系统的调度模型,并建立电动汽车停车生成率模型,简化了模型的复杂度,提高了求解效率;其次,引入基于集合的改进粒子群算法,并将其改造为适用于配电网优化调度的求解算法,提高其在离散空间寻优的求解效率;最后,在 IEEE 33 节点配电系统中所提出的协同优化调度策略进行仿真分析,验证所提策略的有效性。

关键词:电动汽车;可移动式储能;停车生成率;配电网优化调度;改进的粒子群算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.012 中图分类号:TM734 文章编号:1673-9140(2024)03-0104-12

A day-ahead optimal scheduling strategy for distribution networks with spatiotemporal flexibility support of multi-type energy storage systems

ZHANG Yanchang, XU Miaofeng, HU Gaoming, XU Yudong, ZHAO Jiali

(Yueqing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Yueqing 325600, China)

Abstract: The access of large-scale distributed resources makes the regulation and control of the distribution grid more difficult, and how to reasonably and effectively utilize diversified resources to reduce the operating cost of the distribution grid has become a key technical problem to be solved. Considering the complementary characteristics of removable energy storage systems and electric vehicles, a day-ahead optimal scheduling strategy for distribution grids with the support of temporal and spatial flexibility of multiple types of energy storage systems is proposed to improve the operating economy of the distribution grid system. Firstly, the scheduling models of electric vehicles and removable energy storage systems are established and the electric vehicle parking generation rate model is built, which simplifies the complexity of the model and improves the solution efficiency. Secondly, the ensemble-based improved particle swarm algorithm is introduced and adapted to be suitable for the optimal scheduling of distribution grids, which improves the solution efficiency of its optimization search in discrete space. Lastly, simulation analysis conducted on the IEEE 33-bus distribution system verifies the effectiveness of the proposed coordinated optimization scheduling strategy.

Key words: electric vehicles; removable energy storage; parking generation rate; optimal scheduling of distribution network; improved particle swarm optimization algorithm

电能替代是中国实现“碳中和”的主要技术手段之一。根据全球能源互联网发展合作组织的估算,预计截至 2060 年,电能在终端能源消费中的比

例将提升至约 70%。同时,随着电力系统的发展,大量灵活资源接入电网,会增加电力系统管理调控的难度。其中,可移动式储能系统(mobile energy storage

收稿日期:2023-08-30;修回日期:2023-12-11

基金项目:浙江省电力实业总公司科技项目(CF058809002022001)

通信作者:张彦昌(1987—),男,高级工程师,主要从事电力调度、电高电压技术、储能优化等研究;E-mail:zhangyanchang508@126.com

system, MESS)以及电动汽车(electric vehicle, EV)由于具有时空灵活性,能够平滑新能源出力波动、削峰填谷以及降低电力系统的运行成本^[14],未来将被广泛纳入电力系统调控中。学者们针对不同类型储能系统在配电网中的应用展开了研究,以探索如何充分利用这些储能系统的优势。

在EV优化调度方面,文献[5-8]重点关注了EV的建模研究,文献[9-12]研究了EV的出行习惯以及用户的行为需求对参与电网优化调度的影响,文献[13-17]研究了EV与电网的交互。其中,文献[13]考虑EV的充电需求和V2G技术,提出了一种EV的有功和无功联合调度策略。文献[14]提出一种用于EV智能充电的随机方法并建立了与车辆电池组退化相关的综合模型。文献[15]通过引入分时电价引导车主对EV进行有序地充放电,减小系统负荷峰谷差并促进对风电的消纳。文献[16]分析了EV入网对系统的影响,研究了用电高峰时段,最小化供电机组污染物排放时的EV放电电价模型。文献[17]提出了一种提高能效的能量感知优化策略,提高了EV的能量利用效率。然而,EV由于其受出行条件、用户主观意愿等因素的制约,在参与配电网的优化调度方面仍然存在一定的局限性。此外,由于EV数量庞大,对其单体行为进行详细建模往往会提高模型复杂度,造成求解效率低下或者求解困难,是需要解决的另一技术难题。

另一方面,MESS在参与配电网优化调度方面表现出了良好的灵活支撑作用^[18]。与固定式储能系统(stationary energy storage system, SESS)相比,MESS可灵活选择接入位置及容量且日常闲置时可向配电网提供削峰填谷、改善电能质量等多种服务^[19]。此外,与EV相比,配电网中MESS数量相对较少,容量相对较大且不受用户出行需求的制约,因此,在配电网的优化调度领域受到广泛的关注。文献[20-23]研究了MESS在电力系统遭受自然灾害而发生故障时的应用,合理地调度MESS可以更快地恢复负荷,提高系统弹性。文献[24]考虑其有功出力参与削峰填谷、无功出力参与电压调节,提出了一种基于电压灵敏度分析的有源配电网MESS的优化调度方法。文献[25]针对MESS以及可移动式负载构建了多目标优化模型,并提出了一种改进的偏好—激励协同进化算法,提高了配电网的运行经济性。文献[26]建立了含MESS的两阶段双层优化,并采用增强烟花算法进行求解,在取得明显的削峰填谷效果的同时又能获得可观的经济效益。然而,虽然MESS相对EV而言不受用户出行

条件的制约,更具有灵活性,但对于配电网区域而言,其配备数量相对较少且在交通网中的旅行时间较长,多数情况下不能进行及时调度。

综上所述,尽管已有许多学者在EV和MESS参与配电网优化调度方面进行了研究,但大多数研究仅限于探讨单一类型储能系统在配电网优化调度中的作用。然而,EV由于受到用户出行条件等的限制,无法及时参与配电网的优化调度。而MESS则需要调度到配电网的可接入节点才能进行充放电,因此具有较长的延迟,无法及时响应配电网的优化调度策略。此外,当MESS进行长距离调度时,其迁移成本也会对配电网的经济性产生一定影响。因此,无论是EV还是MESS,在参与配电网优化调度方面都存在各自的局限性。而与单一储能相比,多类型储能系统的联合优化调度能够实现不同类型储能之间的优势互补,更好地适应不同的负荷需求和配电网网络条件。通过EV和MESS之间的组合优化,配电网可以灵活地分配各种类型的储能资源,满足不同时间段和负荷变化下的能量供需平衡。此外,多类型储能联合优化调度可以根据电价波动和负荷需求的变化,灵活地管理EV以及MESS的充放电策略,提高清洁能源的消纳,实现配电网的经济运行。

针对以上问题,本文通过将MESS与EV相结合,提出考虑MESS与EV协同的配电网优化调度策略,实现了2种灵活资源的优势互补。所提策略以最小化配电网区域的经济成本为目标函数,针对MESS的单体特征,建立包含路径调度模型与充放电行为模型的MESS优化调度模型;针对EV的集群特性,建立包含停车生成率、移动模型以及充放电策略模型的EV优化调度模型,将与EV参与配电网调度中复杂的用户出行需求、经济状况等约束转化为研究该区域某一时段的停车数量,并在此基础上提出MESS与EV协同的优化调度策略。最后,为了提高粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法在离散空间的求解效率,引入基于集合的改进PSO算法(set-PSO, S-PSO),并重新定义位置、速度更新规则以及基于集合的运算法则,将其改造成配电网优化调度的求解算法,并通过仿真算例验证本文所提协同调度策略的有效性。

1 EV集群调度模型

EV储能具有移动性大、间歇性强、时空分布分

散等特性,在受控状态下能够实现同电网的双向有序互动,达到协同可再生能源出力、降低负荷峰谷差、平抑负荷波动等目的。

然而,相较于可移动式储能具有规模分布特定和移动特性,传统的采用原点—终点的矩阵建模方法对于区域中数量庞大的EV不再适用,因此,本文建立了网格化区域电网模型,并建立停车生成率模型描述EV的集群特性,为EV与MESS的协同优化提供模型基础。

1.1 停车生成率模型

现有关于EV参与配电网优化调度的研究较为广泛,一般对于EV建模主要包括路径建模以及充放电行为模型,然而面对数量庞大的EV集群,对每一辆EV单体进行路径建模会造成模型复杂、求解效率低下的问题,此外,由于EV参与配电网充放电的过程受到用户出行行为的制约,如果对每一辆单体EV进行用户出行行为建模,同样会加大模型的复杂度。因此,有必要针对EV对配电网的作用机理对模型进行简化,降低模型复杂度,提高求解效率。

停车生成率是根据用地性质建立的单位建筑面积的停车需求比率,用该比率可以计算停车需求,是刻画具有不同特征的区域停车需求的重要指标。区域的停车生成率与该区域的建筑用地类型、所属的城市区位、经济状况、人口密度、用户出行规律等密切相关,因此,停车生成率的建立过程本身即包含了用户的出行需求约束^[18]。

如图1所示,停车生成率的思路是将区域内各种不同性质的用地都看作是停车发生、吸引源,把单位指标吸引的单个地块的停车需求量相加作为总停车需求^[19],具体公式如下:

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

式中, P_i 为区域*i*的停车需求; P_{ij} 为区域*i*的*j*类土地的停车生成率; X_{ij} 为区域*i*的*j*类土地的利用指标; n 为该区域用地分类数。

本文主要利用停车生成率表示区域内大规模EV的集群特性,进而刻画区域内EV的充放电行为对电力系统的影响,因此本文假设已知优化时段内的不同区域停车生成率,在此基础上刻画EV的移动模型。因此,当区域*i*的停车生成率以及车位数量已知的情况下,该区域的停车量为

$$N_i = P_i N_p \quad (2)$$

式中, N_i 为区域*i*的实际停车数量; N_p 为停车位数量; P_i 为停车生产率。

本文所采用的停车生成率模型将EV参与配电网调度中复杂的用户出行需求、经济状况等约束转化为研究该区域某一时段的停车数量,在此基础上,EV对配电网的影响即可转化为该区域所停车车辆的充放电行为。停车生成率模型大大简化了模型的复杂度,提高了求解效率。

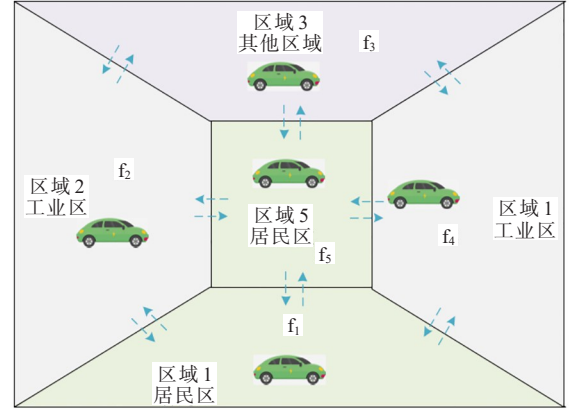


图1 基于停车生成率的EV移动特性示意图

Figure 1 Diagram of electric vehicle movement characteristics based on parking generation rate

1.2 电动汽车移动特性模型

在配电网的优化调度中,区域中的EV主要通过停车状态下的充放电行为对配电网产生影响,为了更好地刻画EV的行为,本文建立了EV状态模型,主要包括移动调度模型以及充放电行为模型: $S_{EV} = \{S_{EV}^{Disp}, S_{EV}^{Char}\}$,其中, $S_{EV}^{Disp} = \{S_{area}, S_p\}$ 为EV的移动调度模型,具体如下:

$$S_{area}(n) = \begin{cases} k, & \text{停放在区域} k \\ 0, & \text{行驶状态} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_p(n) = \begin{cases} 1, & \text{停放状态} \\ 0, & \text{行驶状态} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)中, $S_{area}(n)$ 为第*n*台EV的停放区域,若为*k*则表示电动汽车*n*停放在*k*区域,若为0则表示处于行驶状态,此时不参与配电网的优化调度; $S_p(n)$ 为EV的停放与行驶状态,若为1则表示停放,若为0表示处于行驶状态;式(3)、(4)表示了EV的位置信息以及动作状态。

此外,EV的停驶状态是基于各区域的停车生成率以随机方式进行更新的。然而,为了避免出现不合理的情况,即车辆在短时间内移动距离过大,本文对车辆的下一时刻所处的区域作出了限制。具体而言,本文将配电网对应的区域进行了网格化分割,并在假设各区域面积和纵横比相等的前提

下,对车辆的移动性作出以下假设和约束。

1) 在一个单位时间内, EV 最远只能行驶到与当前区域相邻的区域。

2) 如果车辆状态发生改变, 则它只能在当前区域或相邻区域之间移动。为了更好地分析各区域之间的关系, 本文采用图论的思想, 构建了一个无向图来表示这些关系, 并使用邻接矩阵将各区域的相邻关系进行数字化。当有 N 个区域时, 邻接矩阵 B 是一个大小为 $N \times N$ 的矩阵, 其中当区域 p 和 q 相邻时, 对应的矩阵元素 $B(p, q)$ 为 1, 其他情况下矩阵元素为 0。在更新车辆状态时, 本文需要满足以下约束条件^[18]:

$$S_{\text{area}}(t+1, n) \in \{0, p, J\} \quad (5)$$

$$J = \{q | B(p, q) = 1, q \in [1, N]\} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, p 为车辆在 t 时段所处的区域编号; J 为与 p 点相邻的区域的集合。式(5)、(6)表示 EV 在下一个时刻只能从其上一个时刻所处区域移动到该区域相邻的区域或者一直处于行驶状态。

在每一个状态更新时刻, 计算由停车生成率模型得到的区域停车数量与该区域的实际停车数量的差值 ΔD , 若 $\Delta D > 0$, 则随机抽取行驶中的车辆停放至该区域, 即令其 S_p 为 1; 若 $\Delta D < 0$, 则随机抽取停放在该区域的荷电状态 (state of charge, SOC), 符合离开要求的车辆驶离。更新每辆 EV 的状态标志, 使得整个 EV 群体的停放、行驶状态符合该地区 EV 的出行规律。由 EV 的状态标志能够得到该车辆当前或过去任意时刻的停放和行驶记录, 车辆状态标志的更新就是车辆移动性的体现, 如图 2 所示。

电动汽车的状态更新策略

初始化区域停车数量、日内停车生成率、电动汽车状态信息

for $t=1:24$

for $i=1:N_{\text{area}}$

由停车生成率计算区域 i 停车数量 $N_{i,t}$

计算 $\Delta D = N_{i,t} - N_{i,t-1}$

if $\Delta D > 0$

随机选择 ΔD 辆电动汽车令其 F_p 为 1

else

随机选择 $|\Delta D|$ 辆电动汽车令其 F_p 为 0

更新每辆车的位置信息并计算车辆当前 SOC

end

end

end

图2 电动汽车的移动状态更新策略

Figure 2 Mobile state update strategy for electric vehicles

1.3 EV 的充放电行为模型

充放电行为模型主要为 $S_{\text{EV}}^{\text{Char}} = \{P_{\text{state}}, S_{\text{OC}}, Q, S_{\text{min}}^{\text{master}}, S_{\text{max}}^{\text{master}}, S_{\text{min}}^{\text{battery}}, S_{\text{max}}^{\text{battery}}\}$, 具体如下:

$$S_{\text{OC}}(t, n) = S_{\text{OC}}(t-1, n) + \frac{P(t, n)\Delta t}{Q} \quad (7)$$

$$S_{\text{min}}(n) \leq S_{\text{OC}}(t, n) \leq S_{\text{max}}(n) \quad (8)$$

$$S_{\text{min}}^{\text{battery}}(n) \leq S_{\text{OC}}(t, n) \leq S_{\text{max}}^{\text{battery}}(n) \quad (9)$$

式(7)~(9)中, $S_{\text{min}}^{\text{master}}, S_{\text{max}}^{\text{master}}$ 分别为车主根据其出行需求设置的车辆离开时段 EV 的剩余 SOC 上、下限; $S_{\text{min}}^{\text{battery}}, S_{\text{max}}^{\text{battery}}$ 分别为 EV 电池容量的上、下限, 其中, $S_{\text{min}}^{\text{battery}}$ 为 0.9, $S_{\text{max}}^{\text{battery}}$ 为 0.2^[21]; $S_{\text{OC}}(t, n)$ 为电动汽车 n 在 t 时刻的 SOC; $P(t, n)$ 为电动汽车 n 在 t 时刻的充放电功率。式(7)表示 EV 的 SOC 与其充放电功率以及上一时刻的 SOC 有关; 式(8)表示其在优化决策结束时刻的 SOC 需要满足用户下一日的出行需求; 式(9)表示 EV 的 SOC 还与其配备的电池容量上、下限有关。

2 MESS 调度模型

2.1 MESS 路径调度模型

MESS 具有灵活的移动特性, 可实现电能时空特性上的解耦, 即电能不再只能在某一固定地点以及某一固定时刻进行交换, 而是可以通过 MESS 的充放电行为进行时间与空间上的转移。区域配电网中, MESS 与 EV 相比, 具有数量少、容量大、调度灵活且不受用户出行制约等特点, 因此, 其模型规模相对较小。对 MESS 的单体行为进行建模, 主要包括充放电行为以及路径调度模型。

在 MESS 的优化调度中, 令 S 为 MESS 的集合。设 N_p 表示配电网中 MESS 可接入点的集合, E_p 表示交通网中 PN 边的集合, 边表示连接 2 个顶点的可用移动路径。设 T 表示优化调度的时间集合, T_m, T_n 分别表示储能系统到达待接入点 m, n 的时间, 根据这些定义, MESS 的优化调度路径可以进行如下刻画^[22]。

首先, 保证每辆 MESS 在电力系统对应的交通网中的仓库节点出发, 并保证在优化调度结束时刻重新返回到仓库节点:

$$\sum_{m \in N_p} \alpha_{b, m, s} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{m \in N_p} \sum_s \alpha_{m, b, s} = N_{\text{mess}} \quad (11)$$

式(10)、(11)中, s 为 MESS 标号; S 为 MESS 集合, $s \in S$; b 为仓库节点; N_{mess} 为配电网中 MESS 的个

数。式(10)表示对于可移动式储能系统 s 而言,其在优化调度过程开始时,必须由初始点出发到达可接入点 m ;式(11)表示其在优化调度过程结束后,必须返回原仓库节点。

此外,对于某辆 MESS,如果其到达某一接入点,在其供电结束后,也要从该点离开:

$$\sum_{\forall n \in N_p / \{m\}} \alpha_{m,n,s} - \sum_{\forall n \in N_p / \{m\}} \alpha_{n,m,s} = 0 \quad (12)$$

式中, $\alpha_{m,n,s}$ 、 $\alpha_{n,m,s}$ 分别表示储能系统是否由接入点 m 到达 n 点和由 n 点到达 m 点的标志位,如果其为1则表示接入该点,否则为0。

另外,为了保证 MESS 路径上的连续性,对其进行如下刻画:

$$y_{m,s} = \sum_{\forall n \in N_p / \{m\}} \alpha_{m,n,s} \quad (13)$$

$$\sum_s y_{m,s} \leq 1 \quad (14)$$

式(13)、(14)中, $y_{m,s}$ 为可移动式储能系统 s 是否访问过可接入点 m 的状态变量,若访问过 m 则值为1,否则为0;式(13)表示 s 如果从 m 到达 n ,则 s 必然访问过 m 。另外,本文假定 MESS 接入点只能被1辆 MESS 访问,MESS 到达下一个接入点 n 的时间如下,其示意图如图3所示。

$$\begin{cases} T_{n,s} \leq T_{m,s} + r_{m,n,s} + s_{n,s} + (1 - \alpha_{m,n,s})M \\ T_{n,s} \geq T_{m,s} + r_{m,n,s} + s_{n,s} - (1 - \alpha_{m,n,s})M \end{cases} \quad (15)$$

式中, $T_{m,s}$ 、 $T_{n,s}$ 分别为 MESS 到达 m 和 n 号接入点的时间; $s_{n,s}$ 为接入 m 号接入点后的供电时间; $r_{m,n,s}$ 为移动储能 s 由 m 号节点到达 n 号节点的道路旅行时间, M 为较大整数,如果 $\alpha_{m,n,s}$ 为1,则式(15)表示 MESS 到达 n 的时间为到达 m 时间、在 m 的供电时间以及由 m 到 n 的旅行时间之和,如果 $\alpha_{m,n,s}$ 为0,则对 $T_{n,s}$ 不进行约束。

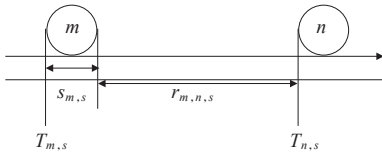


图3 MESS 旅行时间关系

Figure 3 Travel time graph of MESS

此外,还要保证 MESS 满足以下约束:

$$\sum_t t_{f_{arv,m,t,s}} \leq \sum_s T_{m,s} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \sum_t t_{f_{lev,m,t,s}} \leq \sum_s (T_{m,s} + s_{m,s}) \\ \sum_t f_{lev,m,t,s} = 1 \end{cases} \quad (17)$$

式(16)、(17)中, $f_{arv,m,t,s}$ 、 $f_{lev,m,t,s}$ 分别表示可移动式储

能系统 s 在 t 时刻是否到达和离开接入点 m 的状态变量,若是则为1,否则为0;式(16)表示其到达时间等于 $T_{m,s}$;式(17)表示其离开时刻必须在其供电结束时刻。

在 MESS 持续供电时间内,该点的状态为

$$h_{arv,m,t,s} = \sum_{\tau=1}^t f_{arv,m,\tau,s} \quad (18)$$

$$h_{lev,m,t,s} = \sum_{\tau=1}^t f_{lev,m,\tau,s} \quad (19)$$

$$h_{m,t,s} = h_{arv,m,t,s} - h_{lev,m,t,s} \quad (20)$$

式(18)~(20)中, $h_{arv,m,t,s}$ 和 $h_{lev,m,t,s}$ 分别为可移动式储能 s 到达和离开 m 时该点的可用状态; $h_{m,t,s}$ 为在 m 供电持续时间内的可用状态。

2.2 充放电模型

此外,MESS 还应满足以下充放电约束:

$$a_{ch,m,s}^t + a_{dis,m,s}^t \leq h_{m,t,s}, \forall m \in M, t \in T \quad (21)$$

$$0 \leq P_{ch,m,s}^t \leq a_{ch,m,s}^t P_{chmax}, \forall m \in M, t \in T \quad (22)$$

$$0 \leq P_{dis,m,s}^t \leq a_{dis,m,s}^t P_{dismax}, \forall m \in M, t \in T \quad (23)$$

$$E_s^{t+1} = E_s^t + (\eta_{ch,s} P_{ch,m,s}^t - P_{dis,m,s}^t / \eta_{dis,s}) \Delta T, \quad (24)$$

$$\forall s \in S, t \in T$$

$$E_{min} \leq E_s^t \leq E_{max}, \forall s \in S, t \in T \quad (25)$$

式(21)~(25)中, M 为安装 MESS 的节点集合; m 为节点标号; $a_{ch,m,s}^t$ 、 $a_{dis,m,s}^t$ 分别为 t 时刻可移动式储能系统 s 在节点 m 处的充电和放电标志位,若 MESS 处于充电状态则 $a_{ch,m,s}^t$ 为1,否则为0; $P_{ch,m,s}^t$ 、 $P_{dis,m,s}^t$ 分别为 t 时刻 MESS 在节点 m 处的充电和放电有功功率; P_{chmax} 、 P_{dismax} 分别为 MESS 的最大充电功率和放电功率; $\eta_{ch,m,s}$ 、 $\eta_{dis,m,s}$ 分别为在节点 m 处的 MESS 的充电效率和放电效率; E_s^t 为 t 时刻 MESS 的电量; E_{min} 和 E_{max} 分别为电量的最低值和最高值限制。

3 含 MESS 和 EV 的配电网调度策略

考虑多类型储能系统时空灵活性支撑的配电网日前优化调度策略流程如图4所示。首先,建立 EV 和 MESS 的调度模型,可以得到每一个优化调度时刻各 MESS 和 EV 在配电网中的接入位置以及充放电功率,然后建立配电网的网络模型,主要包括潮流约束、节点电压约束等,将 EV、MESS 的决策变量、SESS 出力以及风、光出力等传入配电网模型,结合所建立的 S-PSO 算法进行求解,在保证区域配电网总购电费用以及 MESS 迁移成本最小的情况下,得到下一日的各灵活资源调度情况,从而保证配电网的经济运行以及提高清洁能源的消纳水平。

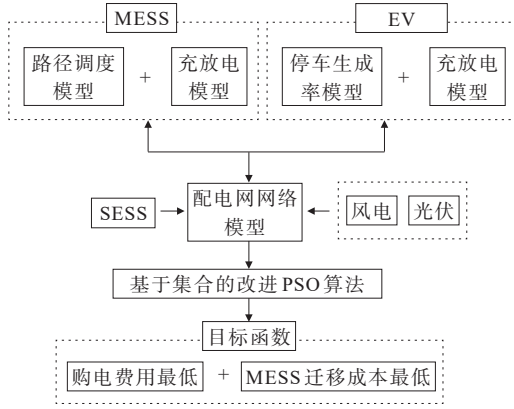


图4 协同优化策略流程

Figure 4 Collaborative optimization strategy flowchart

3.1 目标函数

本文所建立的配电网优化运行策略中,优化目标是 minimized 区域配电网单日内的总费用,主要包括购电费用以及 MESS 的迁移成本,其目标函数如下:

$$\min \sum_{t \in T_e} C_{es} P_{es,t} + \sum_{t \in T_d} C_{ds} P_{ds,t} + \sum_{t \in T_v} C_{vs} P_{vs,t} + \sum_{t \in T} C_{fuel} D_t \quad (26)$$

式中,前3项为区域级配电系统购电成本; C_{es} 、 C_{ds} 、 C_{vs} 分别为电力系统峰时电价、平时电价以及谷时电价; $P_{es,t}$ 、 $P_{ds,t}$ 、 $P_{vs,t}$ 分别为区域级配电网向上级电网在峰时、平时以及谷时的购电量; T_e 、 T_d 、 T_v 分别表示峰时时刻、平时时刻以及谷时时刻。当考虑网格化的交通网络时, C_{fuel} 为每前行一网格时 MESS 所搭载的卡车的燃料成本,当考虑搭载卡车为 EV 时,也可以是每一网格旅行距离下 MESS 的耗电量成本; $D_t = (1 - S_p) * D_{mess}$,为 t 时刻卡车实际移动的距离, D_{mess} 为每一优化步长下 MESS 的行驶距离,值为常数,当 MESS 处于行驶状态时, S_p 为0,此时 D_t 为该时间步长下的行驶距离,否则 D_t 为0。

3.2 配电网网络约束

本文将 Lin-Distflow 模型用于约束配电网潮流,主要建立了配电网潮流和节点电压约束^[23]。设 N_p 、 L_p 分别为配电网中的电力负荷节点和电力线路的集合,令 $\forall i, j \in N_p, \forall g(i, j) \in L_p$; $P_{sub,i}^t$ 、 $Q_{sub,i}^t$ 分别为在节点 i 的变电站在 t 时刻输出的有功和无功功率; $P_{DG,i}^t$ 、 $Q_{DG,i}^t$ 分别为在节点 i 的分布式电源在 t 时刻输出的有功和无功功率; $P_{l,g}^t$ 、 $Q_{l,g}^t$ 分别为线路 g 在 t 时刻流动的有功和无功功率; $g(i, :)$ 表示从 g 节点流出, $g(:, i)$ 表示从其他节点流入 g 节点; $P_{load,i}^t$ 、 $Q_{load,i}^t$ 分别为节点 i 在 t 时刻的有功负荷需求和无功

负荷需求; P_{ch}^{sess} 、 P_{dis}^{sess} 分别为 t 时刻 SESS 的充电和放电有功功率; $U_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压幅值; r_g 和 x_g 分别为线路 g 的电阻和电抗; U_{max} 、 U_{min} 分别为配电网中节点电压的最大值和最小值; S_g^{max} 与 S_g^{min} 为线路 g 上的最大视在功率和最小视在功率; $P_{DG,max,i}$ 、 $P_{DG,min,i}$ 分别为节点 i 安装的分布式电源的最大有功功率和最小有功功率。基于上述描述,配电网模型可以公式化如下:

$$P_{sub,i}^t + P_{DG,i}^t + P_{EV,aver,i}^t - \sum_{s \in S} P_{ch,i,s}^t + \sum_{s \in S} P_{dis,i,s}^t - P_{ch,i}^{sess} + P_{dis,i}^{sess} + \sum_{g \in (i, :)} P_{l,g}^t - \sum_{g \in (:, i)} P_{l,g}^t - P_{load,i}^t = 0 \quad (27)$$

$$Q_{sub,i}^t + Q_{DG,i}^t + \sum_{g \in (i, :)} Q_{l,g}^t - \sum_{g \in (:, i)} Q_{l,g}^t - Q_{load,i}^t = 0 \quad (28)$$

$$U_{j,t}^2 - U_{i,t}^2 = 2 \cdot (r_g \cdot P_{l,g}^t + x_g \cdot Q_{l,g}^t) \quad (29)$$

$$U_{min}^2 \leq U_{i,t}^2 \leq U_{max}^2 \quad (30)$$

$$-S_g^{max} \leq P_{l,g}^t \leq S_g^{max}, -S_g^{max} \leq Q_{l,g}^t \leq S_g^{max} \quad (31)$$

$$P_{sub,i}^t \geq 0, Q_{sub,i}^t \geq 0 \quad (32)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{DG,i}^t \leq P_{DG,max,i} \\ 0 \leq Q_{DG,i}^t \leq Q_{DG,max,i} \end{cases} \quad (33)$$

式(27)、(28)表明,所有节点必须保持有功和无功功率的平衡;式(30)表示电压幅度是有限的;式(31)对线路的有功和无功潮流进行了约束;式(32)限制了配电网中安装的分布式电源产生的有功和无功功率;式(33)设置了变电站有功和无功功率的上、下限。

3.3 固定式储能系统

SESS 模型与 EV 以及 MESS 的充放电行为模型类似:

$$s_{dis,t}^{sess} + s_{ch,t}^{sess} \leq 1 \quad (34)$$

$$0 \leq P_{ch,t}^{sess} \leq s_{ch,t}^{sess} P_{ch,max}^{sess} \quad (35)$$

$$0 \leq P_{dis,t}^{sess} \leq s_{dis,t}^{sess} P_{dis,max}^{sess} \quad (36)$$

$$E_{t+1}^{sess} = E_t^{sess} + (\eta_{ch}^{sess} P_{ch,t}^{sess} - P_{dis,t}^{sess} / \eta_{dis}^{sess}) \Delta T \quad (37)$$

$$E_{min} \leq E_t^{sess} \leq E_{max} \quad (38)$$

式(34)~(38)中, $s_{ch,t}^{sess}$ 、 $s_{dis,t}^{sess}$ 分别为 t 时刻的充电和放电标志位; $P_{ch,t}^{sess}$ 、 $P_{dis,t}^{sess}$ 分别为 t 时刻 SESS 的充电和放电有功功率; η_{ch}^{sess} 、 η_{dis}^{sess} 分别为在节点 m 处的 SESS 的充电效率和放电效率; E_t^{sess} 为 t 时刻 SESS 的电量。

4 基于 S-PSO 的配电网优化运行策略

上述所建模型在本节中采用基于集合的改进

PSO算法进行求解。PSO算法主要用于求解连续优化问题。由于其算子最初是在 n 维连续空间中设计的,因此使用PSO算法在离散空间中寻找解的进展缓慢。为了更好地对本文所提出的EV与MESS的协同优化调度策略进行求解,引入了一种基于集合的改进PSO算法,在保持传统的PSO算法框架的基础上,重新定义了离散空间的“位置”和“速度”以及所有相关算子,使其更好地求解本文所建立的离散—连续优化策略模型。

4.1 传统的PSO算法

传统的PSO算法中, M 个粒子协作在 N 维空间中搜索全局最优解,第 i 个粒子的位置为 $X_i=(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^N)$,速度为 $V_i=(v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^N)$ 。在每一轮迭代过程中,每一个粒子使用自身的搜索经验以及整个种群的搜索经验来更新速度并飞行到新的位置。更新规则如下^[24]:

$$v_i^j \leftarrow v_i^j + c_1 r_1^j (p_{\text{best},i}^j - x_i^j) + c_2 r_2^j (g_{\text{best}}^j - x_i^j) \quad (39)$$

$$x_i^j \leftarrow x_i^j + v_i^j \quad (40)$$

式(39)~(40)中, $P_{\text{best},i}=(p_{\text{best},i}^1, p_{\text{best},i}^2, \dots, p_{\text{best},i}^N)$ 是第 i 个粒子的个体历史最优值; $G_{\text{best}}=(g_{\text{best}}^1, g_{\text{best}}^2, \dots, g_{\text{best}}^N)$ 是整个粒子群迄今为止获得的最优解; c_1 为学习因子; c_2 为社会因子; r_1, r_2 为 $0 \sim 1$ 均匀分布的伪随机数。

4.2 基于集合的改进PSO算法

4.2.1 传统的PSO算法

S-SOP仍然遵循传统PSO算法的思想,其速度更新格式如式(39)所示,但速度、位置以及所有运算符都被重新定义^[25]。

1) 位置:和传统PSO算法相似,粒子位置仍表示可行解。首先定义一个全局集合 $E=E^1 \cup E^2 \cup \dots \cup E^N$,将第 i 个粒子的位置表示为 $X_i(X_i \subseteq E)$,位置由 N 维组成,即 $X_i=X_i^1 \cup X_i^2 \cup \dots \cup X_i^N$,且 $X_i^j \subseteq E^j(j=1, 2, \dots, N)$,同理, $P_{\text{best},i}, G_{\text{best},i} \subseteq E$,基于此,优化问题转化为在满足约束条件下的可行解集合 X 中寻找使目标函数最优的解 X^* 。

2) 速度:在S-PSO中,速度被定义为一个具有概率的集合:

$$V=\{e/p(e)|e \in E\} \quad (41)$$

式(41)表示速度集合中的每一个元素 $e \in E$ 均具有一个概率值 $p(e) \in [0, 1]$,所以,在S-SOP中,第 i 个粒子的速度 V_i 是一个定义在 E 上的具有概率值的集合,即 $V_i=\{e/p(e)|e \in E\}$ 。其中,第 j 维上的速

度 V_i^j 为定义在 E 上的具有概率值的集合,且 $V_i^j=\{e/p(e)|e \in E^j\}$, $p(e)$ 表示粒子 V_i 从元素 e 中学习以更新得到新位置的可能性。

此外,做出以下定义:

$$\begin{cases} cV=\{e/p'(e)|e \in E\}, \\ p'(e)=\begin{cases} 1, & c*p(e)>1 \\ c*p(e), & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (42)$$

$$A-B=\{e/e \in A \text{ 且 } e \notin B\} \quad (43)$$

$$\begin{cases} V_1+V_2=\{e/\max(p_1(e), p_2(e))|e \in E\} \\ V_1-V_2=\{e/p_1(e)|e \in E\}, V_2-V_1=\{e/p_2(e)|e \in E\} \end{cases} \quad (44)$$

式中, \cdot 表示1个系数和1个具有概率的集合之间的乘积运算;式(43)表示2个集合之间的差为属于 A 集合且不属于 B 集合的元素;式(44)表示2个集合 V_1, V_2 的加法运算为取2个集合中较大的概率为2个集合相加的概率。

4.2.2 位置更新公式

更新速度后,粒子 i 使用新的速度 V_i 调整其当前位置 X_i ,并构建新位置 $X_{\text{new},i}$ 。与连续空间中的情况不同,离散空间中的位置必须满足约束条件。为了确保新生成位置 $X_{\text{new},i}$ 的可行性,在S-PSO算法中,第 i 个粒子应用图5中给出的位置更新程序(X_i, V_i)来构建新位置。

在每次迭代中,为每个粒子生成一个随机数 $\alpha \in (0, 1)$ 。对于第 j 维中的每个元素 e ,如果其对应的可能性 $p(e)$ 不小于 α ,则元素 e 保留在集合 $C_\alpha(V_i^j)$ 中,即:

$$C_\alpha(V_i^j)=\{e|e/p(e) \in V_i^j \text{ 且 } p(e) \geq \alpha\} \quad (45)$$

式(45)表明,具有较大 $p(e)$ 的元素 e 有更高的概率保留在 $C_\alpha(V_i^j)$ 中。

粒子 i 学习 $C_\alpha(V_i^j)$ 中的元素更新新的位置:在S-PSO中,新的位置是逐步得到的,一开始,新的位置设置为空集,并将第 i 维的 $X_{\text{new},i}$ 记为 $X_{\text{new},i}^j$ 。对于每个维度 j ,粒子 i 首先从 $C_\alpha(V_i^j)$ 中的元素中选取并将它们添加到新的 X_i^j 中。如果新 X_i^j 的构建尚未完成,并且 $C_\alpha(V_i^j)$ 中没有可用的元素,则粒子 i 重新选取先前 X_i^j 中的元素来构建新 X_i^j 。在所有的 $X_{\text{new},i}^j$ 都被填充之后, $X_{\text{new},i}^j$ 的构造过程完成。

另外,在候选集合 $C_{\text{set},i}^j$ 中选择元素加入到 $X_{\text{new},i}$ 的过程,可以是随机选择的,也可以是基于启发式的选择应用一些与问题相关的信息来选择相对较优的元素。

S-PSO 位置更新规则

```

生成一个随机数  $\alpha \in (0,1)$ 
for  $j=1:N$ 
     $C_a(V_i^j) = \{e | e/p(e) \in V_i^j \text{ 且 } p(e) \geq \alpha\}$ 
end
 $X_{\text{new},i} = \Phi$ ;
for  $j=1:N$ 
     $C_{\text{set},i}^j = \{e | e \in C_a(V_i^j) \text{ 且 } e \text{ 满足约束}\}$ 
    While  $X_{\text{new},i}$  未构造完成且  $C_{\text{set},i}^j \neq \Phi$ 
        从  $C_{\text{set},i}^j$  中选择一个元素并加入到  $X_{\text{new},i}^j$ 
        更新  $C_{\text{set},i}^j$ 
    end
    if  $X_{\text{new},i}$  未构造完成
         $C_{\text{set},i}^j = \{e | e \in X_i^j \text{ 且 } e \text{ 满足约束}\}$ 
        While  $X_{\text{new},i}$  未构造完成且  $C_{\text{set},i}^j \neq \Phi$ 
            从  $C_{\text{set},i}^j$  中选择一个元素并加入到  $X_{\text{new},i}^j$ 
            更新  $C_{\text{set},i}^j$ 
        end
    end
end
 $X_i = X_{\text{new},i}$ 

```

图5 S-PSO 位置更新规则

Figure 5 Location update rule in S-PSO

4.2.3 基于改进 PSO 算法的配电网优化运行策略

本文所建立的多类型协同优化调度策略基于 S-PSO 算法进行寻优,以式(26)为优化目标,优化粒子为 EV 的位置状态信息,通过 S-PSO 求解最优的一组 $S_{\text{EV}}^{\text{Disp}} = \{S_{\text{area}}, S_P\}$ 以及该粒子下配电网其余设备的最优决策情况,具体步骤如下。

1) 设置粒子群算法的相关参数。

2) 生成初始的 $S_{\text{EV}}^{\text{Disp}} = \{S_{\text{area}}, S_P\}$ 粒子群,并随机为每一个粒子生成一个概率值。

3) 将每组 $S_{\text{EV}}^{\text{Disp}} = \{S_{\text{area}}, S_P\}$ 粒子代入建立的配电网经济优化模型进行问题求解,得到配电网单日购电总费用以及该粒子下的 MESS 最优调度路径下的迁移成本。

4) 更新各组 $S_{\text{EV}}^{\text{Disp}} = \{S_{\text{area}}, S_P\}$ 粒子的当前个体极值与粒子群的当前全局最优解。

5) 根据文 4.2.1 和文 4.2.2 中的定义更新各个粒子的速度和位置。

6) 判断是否达到迭代终止条件:若达到最大迭代次数或连续 2 次迭代得到的全局最优解差值小于收敛精度,则转至步骤 7);若否,转至步骤 3)。

7) 将最后一次迭代得到的全局最优解作为结果输出,优化结束。

5 算例分析

本文以 IEEE 33 节点配电系统为研究背景探讨考虑 MESS 与 EV 协同的配电网日前优化调度策略。首先根据改造的 IEEE 33 节点配电系统拓扑结构建立了网格化交通网络^[26],其地理位置、交通网以及改造的配电网结构如图 6 所示,负荷及线路参数参考文献[27],分时电价如表 1 所示。

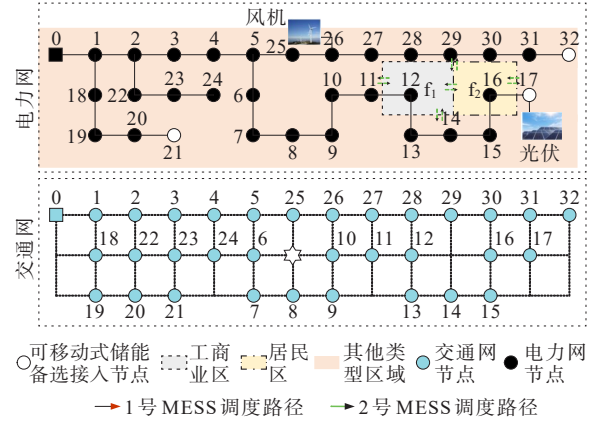


图6 算例示意图

Figure 6 Example diagram of case study

表1 分时电价情况表

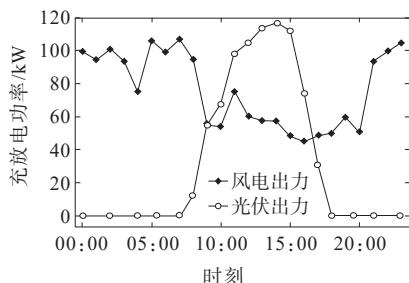
Table 1 Time of use electricity price table

时段	电价/元
00:00—08:00	0.3
08:00—12:00	1.2
12:00—17:00	0.8
17:00—21:00	1.2
21:00—24:00	0.8

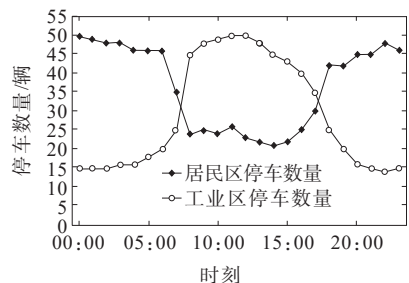
5.1 算例参数

本文算例主要包含 1 台风电、1 台光伏发电,分别接入节点 17、26,其 24 h 发电功率如图 7(a)所示,电压基准值为 12.66 kV,基准功率为 10 MV · A,节点电压的允许范围标幺值为 0.95~1.05 p.u.。该配电网区域共配置 2 台 MESS,为方便计算,2 台储能系统为同一型号,均为 200 kW/1 000 kW · h,储能系统 SOC 的初始值、下限值和上限值分别为 0.50、0.10、0.90,充放电效率为 0.938 1。网格距离为 10 km,待调度 MESS 均位于交通网的仓库处统一停放管理,MESS 的单位距离燃料成本为 4.515 元/km,MESS 以 20 km/h 的速度行驶^[13]。为了更加明确地反映 EV 在配电网优化调度中起到的作用,对算例区域进行了简化,主要考虑 12 号电力节点对应的工商业区以及 16 号电力节点对应的居民区 EV 的集群

特性对配网优化调度的影响,且2个区域的停车位相同,均为50,其日内停车率数据参考文献[12],其结果如图7(b)所示,为方便计算,假设EV均为相同型号,电池容量为 $18\text{ kW}\cdot\text{h}$,每 100 km 耗电量为 $10\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。



(a) 新能源出力曲线



(b) 停车数量曲线

图7 算例参数

Figure 7 Example parameters of case study

5.2 算例仿真结果

为了更好地测试所提策略的正确性,本文选取4种场景进行仿真测试,如表2所示。其中场景1为不考虑EV以及MESS的配电网优化调度策略,场景2、场景3分别为仅考虑MESS和EV参与的配电网优化调度策略,场景4为本文所提的考虑EV以及可移动储能协同的区域配电网优化调度策略。

表3给出了4种仿真算例下的总经济情况,图8为4种仿真算例下的区域配电网总购电情况,对比场景1和场景2可以看出,移动式储能系统参与配电网的情况,提高了新能源的消纳能力,并起到了能量在空间和时间上的转移,从而提高了配电网的经济性。然而,由于MESS数量较少,且MESS往往需要较长的道路旅行时间才能到达可接入点,因此,其时间灵活性不够,从而导致在一些情况下不能在最优的时间点接入到配电网中。另外,其进行远距离调度时,迁移成本往往较高,某些情况下可能对配电网的经济性改善效果不够明显。

表2 算例场景说明

Table 2 Example scenario description sheet of case study

算例场景	EV是否参与	MESS是否参与
1	否	否
2	是	否
3	否	是
4	是	是

表3 算例场景经济情况

Table 3 Economic situation of case study

算例场景	系统购电成本/元	MESS迁移成本/元	总成本/元
1	21 320	0	21 320
2	18 925	2 160	21 085
3	14 463	0	14 463
4	10 035	2 160	12 195

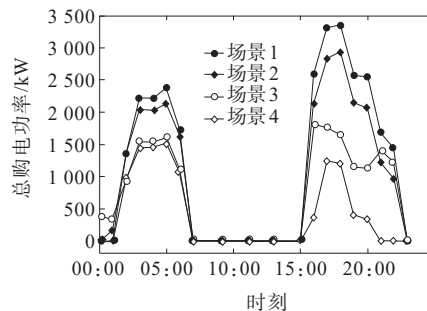


图8 区域配电网购电功率对比

Figure 8 Comparison of purchasing power of regional distribution network

对比场景1和场景3可以看出, EV可以起到一定的新能源的消纳效果,然而,其受到用户出行需求的制约,在一些需要其参与到配电网中的情况时可能出现不能及时接入的情况。因此,虽然对配电网的经济水平有所改善,但改善水平有限。

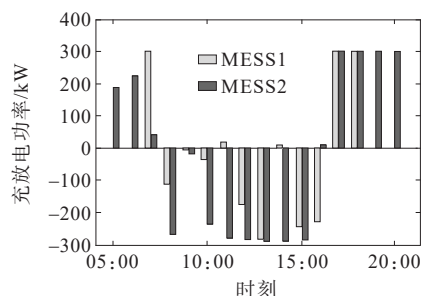
表4给出了协同优化策略下MESS的接入点以及充放电状态,其中, $S_1(b, 17)$ 表示在00:00时刻,1号MESS系由仓库前往接入点17, $Dis(1, 17)$ 表示在优化时刻1号MESS位于17号可接入点进行放电操作, $Char(2, 21)$ 表示在优化时刻2号MESS位于21号可接入点进行充电操作。

表4 协同调度策略MESS接入位置以及充放电状态表

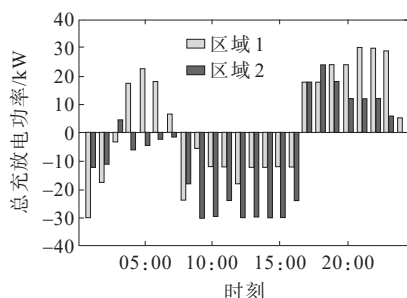
Table 4 MESS access locations and charging/discharging states under cooperative scheduling strategy

时刻	调度方案	时刻	调度方案
00:00	$S_1(b, 17), S_2(b, 21)$	11:00	$Char(1, 21)$
05:00	$Dis(1, 17)$	17:00	$Dis(1, 17) Dis(2, 21)$
07:00	$Dis(2, 21)$	18:00	$S_1(17, b)$
08:00	$Char(1, 17)$	24:00	$S_2(21, b)$

图9分别给出了MESS和EV的充放电情况,图10给出了协同优化策略中MESS的路径调度情况。对比4种仿真场景,由表3、4可以看出,虽然本文仿真算例中仅考虑了2个特殊区域的EV参与配电网的情况,但是在其与MESS相配合的情况下,可以大大提高配电网的经济性,这是因为当MESS在调度过程中,EV集群即可参与到配电网的优化调度中,两者相互协调,一方面提高了新能源的消纳水平,另一方面也可以通过其时空灵活性,在高峰电价时放电,在低谷电价时充电,来降低区域配电网的日内总购电费用。通过EV与MESS的协同互补,提高对新能源的消纳水平以及电网的经济性。



(a) 协同策略下MESS充放电



(b) 协同策略下EV充放电

图9 协同策略下MESS及EV充放电情况

Figure 9 Charging and discharging situation of MESS and EV under collaborative strategy

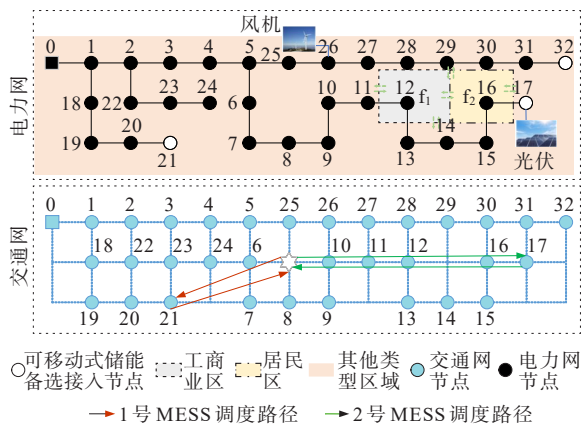


图10 协同策略下MESS调度情况示意图

Figure 10 Schematic diagram of MESS scheduling conditions under collaborative strategy

6 结语

现有研究多集中于单一类型储能系统参与配电网优化的情况,然而,无论是MESS还是EV,在参与配电网优化调度的过程中均由于其特有属性而存在局限性,对配电网的改善效果并不明显。本文通过将MESS与EV相结合,提出了考虑MESS与EV协同的配电网优化调度策略,减弱其特有属性的局限对配电网优化调度的影响,实现了2种灵活资源的优势互补,并进一步引入了基于集合的改进PSO算法,重新定义了位置、速度更新规则以及基于集合的运算法则,将其应用于配电网优化调度策略的求解。仿真研究结果表明,本文所提的EV和MESS协同的配电网优化调度策略能够实现两者的优势互补,通过对EV和MESS的联合调度,实现区域配电网能量的时空转移,从而有助于提高配电网的经济性。

参考文献:

- [1] 刘勇,李全优,戴朝华.电动汽车充电负荷时空分布建模研究综述[J].电测与仪表,2022,59(8):1-9.
LIU Yong, LI Quanyou, DAI Chaohua. Review on the spatiotemporal distribution modeling of electric vehicle charging load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 1-9.
- [2] 锁军,李龙,贺瀚青,等.考虑交通路况的电动汽车充电负荷预测[J].电网与清洁能源,2022,38(10):141-147.
SUO Jun, LI Long, HE Hanqing, et al. Load forecasting of electric vehicle charging considering traffic conditions [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 141-147.
- [3] 李婧祺,王丹,樊华,等.含移动式储能的主动配电网分层优化控制方法[J].电力系统自动化,2022,46(10):189-198.
LI Jingqi, WANG Dan, FAN Hua, et al. Hierarchical optimal control method for active distribution network with mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 189-198.
- [4] 谢学渊,刘潇潇,李超,等.考虑分布式电源和电动汽车集群调度的配电网重构[J].中国电力,2023,56(1): 119-125.
XIE Xueyuan, LIU Xiaoxiao, LI Chao, et al. Distribution network reconfiguration considering distributed generation and electric vehicle cluster scheduling[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 119-125.

- [5] SINGH J, TIWARI R. Cost benefit analysis for V2G implementation of electric vehicles in distribution system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56 (5):5963-5973.
- [6] AHMADIAN A, SEDGHI M, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Cost-benefit analysis of V2G implementation in distribution networks considering PEVs battery degradation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2):961-970.
- [7] 许敏茹, 魏斌, 韩肖清. 计及差异化服务费定价的电动汽车聚合商两阶段调度策略[J]. 电力建设, 2023, 44(8): 95-106.
XU Minru, WEI Bin, HAN Xiaoqing. Two-stage scheduling strategy for electric vehicle aggregator based on differentiated pricing[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(8):95-106.
- [8] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1):58-71.
YANG Jingsi, QIN Wenping, SHI Wenlong, et al. Two-stage optimal dispatching of regional power grid based on electric vehicles' participation in peak-shaving pricing strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1):58-71.
- [9] 高洪超, 王宣元, 邱小燕, 等. 新型电力系统环境下的虚拟电厂辅助调峰市场机制及其商业模式设计[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3):376-385.
GAO Hongchao, WANG Xuanyuan, QIU Xiaoyan, et al. Ramping energy market mechanism and its business model of virtual power plants oriented to new power system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(3): 376-385.
- [10] ZHANG Y, CHEN J C, YOU T, et al. Energy-aware optimization of connected and automated electric vehicles considering vehicle-traffic nexus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(1): 282-293.
- [11] 邓慧琼, 张晓飞, 曾凡淦, 等. 动态分时电价机制下的电动汽车充放电调度策略研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(3): 59-66+78.
DENG Huiqiong, ZHANG Xiaofei, ZENG Fangan, et al. Electric vehicle charging and discharging scheduling strategy under dynamic time-of-use electricity price mechanism[J]. Smart Power, 2023, 51(3):59-66+78.
- [12] 肖丽, 谢尧平, 胡华锋, 等. 基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J]. 高压电器, 2022, 58(5):164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5):164-171.
- [13] 李婧祺, 王丹, 樊华, 等. 含移动式储能的主动配电网分层优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 189-198.
LI Jingqi, WANG Dan, FAN Hua, et al. Hierarchical optimal control method for active distribution network with mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10):189-198.
- [14] 孙伟卿, 刘唯, 张婕. 高比例可再生能源背景下配电网动态重构与移动储能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19):80-90.
SUN Weiqing, LIU Wei, ZHANG Jie. Collaborative optimization for dynamic reconfiguration of distribution network and mobile energy storage in background of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19):80-90.
- [15] 潘华, 肖雨涵, 梁作放, 等. 基于改进隶属度函数的电动汽车充放电多目标优化调度模型[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6):85-93.
PAN Hua, XIAO Yuhan, LIANG Zuofang, et al. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicle charging and discharging based on improved membership functions[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6):85-93.
- [16] SONG Y M, LIU Y J, WANG R, et al. Multi-objective configuration optimization for isolated microgrid with shiftable loads and mobile energy storage[J]. IEEE Access, 2019, 7:95248-95263.
- [17] 王育飞, 郑云平, 薛花, 等. 基于增强烟花算法的移动式储能削峰填谷优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (5):48-56.
WANG Yufei, ZHENG Yunping, XUE Hua, et al. Optimal dispatch of mobile energy storage for peak load shifting based on enhanced firework algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5):48-56.
- [18] 陈中, 刘艺, 陈轩, 等. 考虑移动储能特性的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2):77-85.
CHEN Zhong, LIU Yi, CHEN Xuan, et al. Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 77-85.
- [19] 王瑞. 基于用地区位分析的停车需求预测研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
WANG Rui. Research on parking demand prediction based on land location analysis[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [20] 李琦. 基于经济效益评估的微网运行优化策略[D]. 成

都:电子科技大学,2017.

LI Qi. Micro-grid operation optimization strategy based on evaluation of economic benefit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2017.

- [21] 郁琛,李尚轩,谢云云,等.考虑交通网与配电网信息融合的台风后配电网抢修策略优化[J].电力系统自动化,2022,46(4):15-24.

YU Chen,LI Shangxuan,XIE Yunyun,et al.Optimization of post-typhoon rush repair strategy for distribution network considering information integration of traffic network and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(4):15-24.

- [22] 李咸善,周晓岚,姚俊伟,等.考虑车主多模式需求响应模糊意愿的优化调度策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(2):89-101.

LI Xianshan,ZHOU Xiaolan,YAO Junwei,et al.Optimal dispatch strategy considering fuzzy intention of multi-mode demand response of vehicle owners[J]. Power System Protection and Control,2023,51(2):89-101.

- [23] SUN X C,CHEN J,ZHAO H R,et al.Sequential disaster recovery strategy for resilient distribution network based

on cyber-physical collaborative optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2023,14(2):1173-1187.

- [24] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia. IEEE,1995:1942-1948.

- [25] CHEN W N,ZHANG J,CHUNG H S H,et al.A novel set-based particle swarm optimization method for discrete optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2010,14(2):278-300.

- [26] 任郡枝.光伏配电网中储能系统规划方法研究[D].济南:山东大学,2020.

REN Junzhi. Research on planning method of energy storage system in photovoltaic distribution network[D]. Jinan:Shandong University,2020.

- [27] 陈健,林咨良,赵浩然,等.考虑信息耦合的电—气综合能源系统韧性优化方法[J].中国电机工程学报,2020,40(21):6854-6864.

CHEN Jian, LIN Ziliang, ZHAO Haoran, et al. Optimization method for resilience of integrated electric-gas system with consideration of cyber coupling[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(21):6854-6864.

(上接第47页 Continued from page 47)

LI Zhiqiang,GAO Dabing,SU Sheng,et al.Big data based intrusion detection method of smart meters[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(1): 121-126.

- [21] 乔黎伟,王静怡,郭炜,等.基于随机森林算法的中短期用电量预测[J].电力科学与技术学报,2020,35(2): 150-156.

QIAO Liwei,WANG Jingyi,GUO Wei,et al.Medium and short-term electricity demand prediction based on random forests algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(2):150-156..

- [22] 徐明林.基于小波降噪和经验模态分解的滚动轴承故障诊断[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

XU Minglin. Fault diagnosis of rolling element bearing based on wavelet denoising and empirical mode decomposition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2013.

- [23] 李静,徐路路.基于机器学习算法的研究热点趋势预测模型对比与分析:BP神经网络、支持向量机与LSTM

模型[J].现代情报,2019,39(4):23-33.

LI Jing,XU Lulu. Comparison and analysis of research trend prediction models based on machine learning algorithm—BP neural network, support vector machine and LSTM model[J]. Journal of Modern Information, 2019,39(4):23-33.

- [24] 耿丽娟,李星毅.用于大数据分类的KNN算法研究[J].计算机应用研究,2014,31(5):1342-1344+1373.

GENG Lijuan, LI Xingyi. Improvements of KNN algorithm for big data classification[J]. Application Research of Computers,2014,31(5):1342-1344+1373.

- [25] 范昕炜.支持向量机算法的研究及其应用[D].杭州:浙江大学,2003.

FAN Xinwei.Support vector machine and its applications [D].Hangzhou:Zhejiang University,2003.

- [26] 孔英会,景美丽.基于混淆矩阵和集成学习的分类方法研究[J].计算机工程与科学,2012,34(6):111-117.

KONG Yinghui, JING Meili. Research of the classification method based on confusion matrixes and ensemble learning[J]. Computer Engineering & Science, 2012,34(6):111-117.