

# 基于电池换电的海岛配电网负荷恢复优化调度

顾延勋<sup>1</sup>, 杨 昆<sup>2</sup>, 李大荃<sup>1</sup>, 马玉坤<sup>1</sup>, 马云聪<sup>2</sup>, 魏繁荣<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限公司珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 日益频发的极端自然灾害可能会造成海岛配电网长时间停电, 通过卡车等交通工具将电池灵活配置在需要的站点有助于保障海岛配电网供电, 减少停电损失。在恢复过程中极端天气可能会影响电池在各站点间的转移速度, 导致站点之间的调度时间非整数小时。为了解决此问题, 提出一种新的海岛配电网负荷恢复优化策略。首先, 分析环境因素对可再生能源发电和电池传输时间的影响, 在此基础上, 提出一种协调调度步骤和非整数小时电池传输时间的双重状态决策方法; 然后, 基于小时调度步长提出一种集成电池调度决策和网络重构决策的最优海岛配电网负荷恢复模型; 最后, 通过仿真算例验证所提策略的有效性。

**关键词:** 海岛配电网; 换电系统; 非整时调度; 双重状态决策方法; 负荷恢复

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.020 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2023)04-0187-11

## Optimized scheduling strategy for load restoration in island distribution networks based on battery exchange model

GU Yanxun<sup>1</sup>, YANG Kun<sup>1</sup>, LI Daquan<sup>1</sup>, MA Yukun<sup>1</sup>, MA Yuncong<sup>2</sup>, WEI Fanrong<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Power Supply Company, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The high frequency of extreme natural disasters may cause long-term power outages in the island distribution network. The flexible deployment of batteries at the required sites through trucks and other vehicles can help ensure the power supply of the island distribution network and reduce power outage losses. During the recovery process, extreme weather may affect the transfer speed of batteries between sites, resulting in non-integer hours of scheduling time between sites. In order to solve this problem, this paper proposes a new optimization strategy for load restoration of island distribution network. First, the impact of environmental factors on renewable energy generation and battery transfer time is analyzed. On this basis, a dual-state decision-making method for coordinating scheduling steps and non-integer-hour battery transfer time is proposed. In addition, based on the 1-hour scheduling step length, an optimal island distribution network load recovery model that integrates battery scheduling decisions and network reconfiguration decisions is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is verified by a simulation example.

**Key words:** island distribution network; exchange system; non-integer-hour dispatch; dual-state decision-making method; load recovery

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-12-08

基金项目: 广东电网公司电力规划专题研究项目(030400QQ00210001); 国家重点研发计划(2022YFE0120400)

通信作者: 魏繁荣(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事新能源微网能量管理、信息物理系统网络安全的研究; E-mail: 610300307@qq.com

极端天气条件下海岛配电网可能会因为故障与外部电网断开连接,致使电能传输通道阻塞,负荷长期处于停电状态。现阶段关于提高配电网恢复力水平的方法主要分为2类:传统电力设备的加强和灾后恢复策略的优化<sup>[1]</sup>。文献[1]基于不同台风强度和负荷等级,对比了线路加固改造、双回线建设和缩短故障修复时间3种方式对输电网韧性的影响;文献[2]考虑了自然灾害袭击的影响,对部分重要骨干线路进行高标化建设,综合抗灾害能力、经济性和效益型优选最佳线路规划方案。上述文献的研究重点仍为改造高强度线路等规划方法,然而,受限于电网元件的改造费用,这类方法通常不能大面积实施。因此,为探究应用更为广泛的恢复力水平提升措施,一些专家另辟蹊径,从运行的角度开展课题研究,具体又可分为灾前预防措施和灾后恢复措施。

文献[3]指出:灾害发生前可以加强电网在极端天气发生时的事故预警、故障检测和故障定位能力,根据极端天气灾害预测信息提前调整配电网运行方式,使电网在灾害后能尽快做出相应的反应,减小负荷损失;文献[4-5]提出了利用柴机、燃气机等分布式能源在配电网负荷恢复中发挥作用的方法;文献[6-7]聚焦于负荷恢复过程中的社会、经济等效益,提出了配电网多目标故障恢复模型;文献[8-9]分析了需求侧响应对配电网供电可靠性的影响,提出了可控负荷参与配电网负荷恢复策略,显著提高了电网重建的效率。然而,随着海岛配电网风、光等可再生能源占比逐步提高,可再生能源的不确定性导致不能将其视为确定性功率源来处理<sup>[10-11]</sup>。在此背景下,不少学者考虑引入储能电池参与负荷恢复。储能电池除了提供功率支撑<sup>[12]</sup>和频率调节<sup>[13]</sup>之外,一定程度上还可以保证系统的安全运行,提高系统恢复效率<sup>[14]</sup>。文献[15]通过调配故障区域的分布式储能系统,制定合理的换流器控制策略,保障了负荷供电;文献[16-17]在此基础上,考虑多种类型的储能协同互补,在不同时间细粒度下优化配置储能容量,提升了负荷恢复效果。

然而,由于极端灾害造成的停电事故具有很强的随机性,配置大量的且利用率低的分布式储能系

统必然会造成资源浪费,设备利用率过低等问题<sup>[18]</sup>。在此背景下,移动式储能因为具有可移动性、能量密度高等优点而进入大众的视野<sup>[19]</sup>。文献[20]通过调度闲置的电动汽车来恢复配电网的电力负荷。但是,文献[20]在建模过程中仅考虑了电动汽车的充放电特性,对于移动储能的时空转移特性考虑甚少。文献[21-22]计及电动公交车换电量需求和充换电行为,提出了一种换电站—电池充电站建设模式,求得了充电站的最优选址定容方案;文献[23]考虑到电动汽车的随机性和转移时延特性,提出了换电站日前调度和实时调度模型,对电池的转移路径进行优化,实现电池换电站与电网的经济运行;文献[24]构建了包含移动储能和维修人员协调调度的配电网供电恢复框架,在此基础上,文献[25-26]考虑交通路况及降雨因素的影响,使得负荷恢复方案更贴近实际运行场景。值得注意的是,在环境因素的影响下,车辆在站点间传输时间可能并非整时,与调度时间尺度不匹配。现有的处理方式主要分为2类:文献[27-28]直接对转移时间进行四舍五入取整,以匹配调度时间尺度,但是这种处理方式会导致调度资源闲置,负荷需求无法及时满足;文献[29]通过细化调度时间尺度(如15 min)再取整,虽然可以改善电池调配的结果,但是时间尺度的细化导致了优化变量数量和求解时间剧增,工程适用性较差。

针对上述问题,本文提出一种新型的海岛配电网负荷恢复优化调度策略。首先,分析降雨等环境因素对可再生能源发电及电池转移时间的影响;然后,在此基础上,为了能够减小整时调度策略给电池带来的资源闲置影响,充分利用电池换电系统负荷恢复能力,提出一种考虑双重状态决策方法的海岛微电网负荷恢复优化调度模型;最后,对IEEE 11节点海岛配电网进行仿真研究,验证所提策略的有效性。本文的主要创新点如下:

- 1) 量化分析环境因子的影响,评估含换电系统的海岛配电网负荷恢复能力;
- 2) 提出一种双重状态决策方法来协调电池非整数小时转移时间和调度步长;
- 3) 提出一种经济性最优的海岛配电网恢复模型并通过两阶段求解方法实现该模型的求解。

# 1 基于 BCSS 的配电网负荷恢复架构

## 1.1 电池充换电站的工作模式

本文采用的蓄电池充电交换站 (battery charging and swapping station, BCSS) 由多个电池充电站和电池交换站组成,其工作原理如图 1 所示。电池充电站对电量较低的电池进行充电,而电池交换站为当地电动汽车提供电池交换服务。为不失一般性,本文假设每个站都能充放电和交换电池。此外,各站点间由于电池充换电的需求不尽相同,需要卡车在不同站点间进行调度,以匹配电网充放电功率和用户的换电需求。

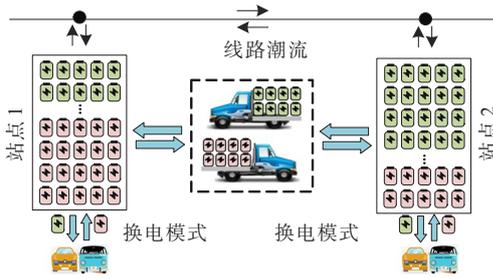


图 1 电池充换电站示意

Figure 1 Battery charging swapping station

在极端天气状态下,由于海岛配电网电力供应短缺,电网将优先支持重要负荷供电;与此同时,BCSS 系统将暂停对个人用户的换电服务,所以利用 BCSS 来提高负荷恢复能力显得恰如其分。在此背景下,本文提出基于 BCSS 的海岛配电网负荷恢复协同调度网络架构,通过源、网、荷 3 个方面的协同配合,尽可能地恢复受损负荷的供电。该网络架构如图 2 所示,可知极端天气情况下海岛配电网与外部电网断开了连接,导致系统长时间停电。此时,电网可以通过分段开关等自动化设备对配电网进行实时监控和重构;与此同时,还可以配电网内的分布式电源(柴机、风光机组)快速恢复配电网负荷,特别是重要负荷。此外,本文提出利用卡车在 BCSS 站点间转移电池,可以灵活地调度各站点的电池容量分布,并且,运输电池的卡车也可以作为一种新型能源传输通道来实现各站点间的电力传输。因此,本文所提海岛配电网负荷恢复协同调度网络架构可以减少极端天气下的经济损失和社会影响。

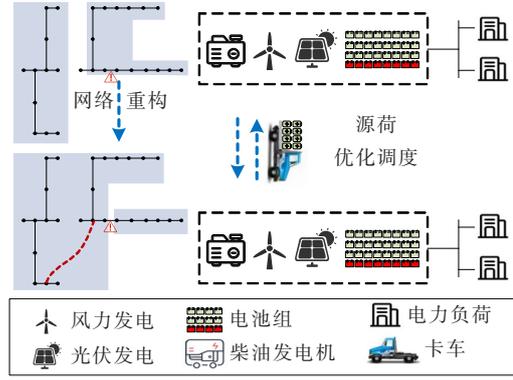


图 2 基于 BCSS 的海岛配电网负荷恢复协同调度网络架构  
Figure 2 Scheduling model of island distribution network load restoration based on BCSS

## 1.2 极端天气因素的影响评估

除此之外,极端天气(如台风)通常都伴随着大风和大雨,这可能会影响可再生能源发电和电池的物流速度。因此,本文在此对极端天气条件对调度模型的影响进行量化分析,具体建模过程如下。

风速、太阳辐射和降雨对恢复力的提高有很大影响,其中,  $v_i^{wind}$ 、 $S_t$ 、 $R_t$  分别表示风速、太阳辐射以及降雨等因素,这些因素对可再生能源发电的出力影响如下:

$$P_t^{PVm} = \frac{R_t}{100} P^{PVN} \quad (1)$$

$$P_t^{WTm} = \begin{cases} 0, & \text{if } v_i^{wind} < v^{in} \text{ or } v_i^{wind} > v^{out} \\ \frac{v_i^{wind} - v^{in}}{v^r - v_i^{wind}} P^{WTN}, & \text{if } v^{in} \leq v_i^{wind} \leq v^r \\ P^{WTN}, & \text{if } v^r \leq v_i^{wind} \leq v^{out} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中,  $P_t^{PVm}$ 、 $P_t^{WTm}$  分别为光伏、风机的实时功率;  $P^{PVN}$ 、 $P^{WTN}$  分别为光伏和风机的额定出力;  $v^{in}$ 、 $v^r$ 、 $v^{out}$  分别为切入、额定和切除风速。

式(1)表示太阳辐射与光伏出力的关系;式(2)表示风速和风机出力的关系。此外,极端天气下降雨量激增导致车辆的转移过程受限,主要体现在卡车的运输转移路径由于路面积水,使得安全行驶速度下降,其降雨强度、水膜厚度和道路附着系数之间的关系为

$$h_i = 0.125 8I^{0.6715} \cdot i^{-0.314} \cdot T_D^{0.726} \cdot q^{0.77} \quad (3)$$

$$f_i = 1.328 - 0.007 8V_i - 0.017h_i \quad (4)$$

式(3)、(4)中,  $h_i$  为水膜厚度;  $I$  为道路坡长;  $i$  为坡

度;  $T_D$  为表面构造深度;  $q$  为降雨强度;  $f_i$  为道路附着系数;  $V_i$  为车辆转移速度。

车辆在行驶过程中停车视距模型如图 3 所示, 可知车辆停车距离  $L$  由车辆反应距离和制动距离组成:

$$L = \frac{53V_i}{72} + \frac{V_i^2}{25.92f_i g} - \frac{f_i g}{600} \quad (5)$$

其中,  $g$  为重力加速度。

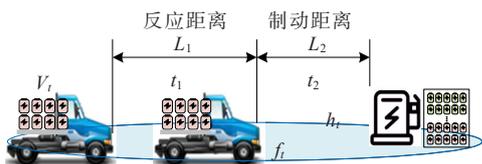


图 3 车辆停车视距模型

Figure 3 Vehicle parking sight distance model

由图 3 可知, 卡车在  $i, j$  节点之间转移的时间为

$$t_{ij} = t_1 + t_2 + t_0 \quad (6)$$

式中,  $t_1$  为卡车转移时间;  $t_2$  为停车视距模型总时间;  $t_0$  为装卸电池所用的时间。

根据以上分析可以推测, 电池的转移时间很可能为非整数小时。为了最大程度上提高配电网的负荷恢复能力, 本文提出一种基于双重状态决策方法的新型调度模型。

## 2 配电网负荷恢复优化调度模型

### 2.1 双重状态决策方法

由文献[25-26]可知, 在经典的配电网负荷恢复模型中, 通常将车辆在站点间的转移时间进行四舍五入, 以匹配固定调度步长, 如此处理后车辆在每个调度步长上只有一个运行状态。然而, 这样的处理方式忽略了非整时时间内调度主体的运行状态, 与实际调度方案偏差较大, 调度方案的适用性堪忧。为了解决以上问题, 本文提出一种基于双重状态决策的调度方法, 如图 4 所示。

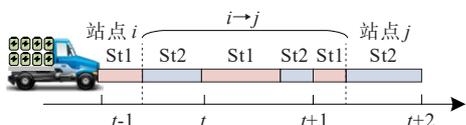


图 4 双重状态变量

Figure 4 Dual state variables

由图 4 可以看出, 每个调度单元在任意一个调度步长上都有 2 种运行状态。将 2 种运行状态定义为 St1 和 St2, 假设调度步长为 1 h, 则在每个调度步长中, St1 运行时间为  $1 - \lambda$  (h), St2 运行时间为  $\lambda$  (h)。例如, 调度步长为 1 h 且带电池的 vehicle 运动时间为 0.6 h。使用双重状态决策法处理可知, 电池与电网连接时间为 0.4 h, 与电网断开的时间为 0.6 h。通过上述处理, 可以精确刻画出车辆提前到达和延时出发的运行情况。

### 2.2 配电网负荷恢复模型

#### 1) 目标函数。

配电网负荷恢复模型以配电网负荷恢复成本最小为目标函数, 包括负载的损失、柴油消耗、电池运行以及车辆运输转移成本, 具体算式为

$$\min \sum_t \sum_i \left[ \begin{aligned} & \alpha \sum_j (P_{j,t}^{lm} - P_{j,t}^1) (1 - \lambda_{d,t}^i - \lambda_{a,t}^i) + \\ & \alpha \sum_j (P_{j,t}^{lm} - \bar{P}_{j,t}^1) (\lambda_{d,t}^i + \lambda_{a,t}^i) + \\ & \beta \sum_j (k_1 P_{j,t}^G + k_2 P_j^{Gm}) (1 - \lambda_{d,t}^i - \lambda_{a,t}^i) + \\ & \beta \sum_j (k_1 \bar{P}_{j,t}^G + k_2 P_j^{Gm}) (\lambda_{d,t}^i + \lambda_{a,t}^i) + \\ & \gamma \sum_{n,j} (P_t^{jc,n} \eta + P_t^{jd,n} / \eta) (1 - \lambda_{d,t}^i - \lambda_{a,t}^i) + \\ & \gamma \sum_{n,j} (\bar{P}_t^{jc,n} \eta + \bar{P}_t^{jd,n} / \eta) (\lambda_{d,t}^i + \lambda_{a,t}^i) + \\ & \sigma \sum_{j,j \neq i} Z_t^j d_{ij} \end{aligned} \right] \quad (7)$$

式中,  $\lambda_{d,t}^i, \lambda_{a,t}^i$  分别为车辆的延迟出发、提前到达时间;  $k_1, k_2$  均为分布式能源机组的能耗参数;  $P_{j,t}^{lm}$  为  $t$  时刻的负荷电能需求, 亦即  $t$  时刻  $j$  节点可供给负荷电能的最大值;  $P_{j,t}^1$  为  $t$  时刻负荷有功功率;  $\bar{P}_{j,t}^1$  为 St2 状态下的负荷有功功率; 式中的其他上划线变量均对应为该变量在 St2 状态下的值;  $P_{j,t}^G, P_j^{Gm}$  分别为  $t$  时刻分布式新能源机组的有功功率、额定功率;  $P_t^{jc,n}, P_t^{jd,n}, \eta$  分别为电池  $t$  时刻的充电功率、放电功率、充放电效率;  $Z_t^j$  为  $t$  时刻的车辆位置;  $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$  分别为负荷损失、柴油发电、电池运行和车辆运输成本。

#### 2) 车辆和电池组运行约束。

在配电网负荷恢复模型中, 车辆通过在各站点的转移实现电池的充放电调度。车辆的时空约束

如下:

$$\lambda_t^{ij} = \text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij} \quad (8)$$

$$\sum_{ij} L_t^{ij} = 1 \quad (9)$$

$$L_t^{ii} \leq \sum_j L_{t+\text{rod}(\tau_t^{ij})+1}^{jj} \quad (10)$$

$$U_{d,t}^{ij} + U_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij} = (1 - L_{t-1}^{ij}) L_t^{ij}, \quad i \neq j \quad (11)$$

$$\lambda_{d,t}^i = \sum_j (\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij}) U_{d,t}^{ij} \quad (12)$$

$$\lambda_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^j = \sum_i (\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij}) U_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij} \quad (13)$$

式(8)~(13)中,  $\text{rod}(\tau_t^{ij})$  为四舍五入后的车辆运输时间;  $L_t^{ij}$  为车辆的时空位置状态变量;  $U_{d,t}^{ij}$ 、 $U_{a,t}^{ij}$  分别为车辆延迟到达和提前离开状态变量。式(8)表示四舍五入和实际车辆运输时间的差异,式(9)、(10)限制了车辆空间位置的唯一性和各站点之间的运输时间,式(11)表示车辆的状态只会是晚离开站点和提前到达站点,式(12)、(13)表示延迟离开和提前到达的时间。

由于电池需要通过车辆来实现转移,所以车辆与电池之间存在约束:

$$L_{a,t}^{ii} - L_{d,t}^{ii} = L_t^{ii} - L_{t-1}^{ii} \quad (14)$$

$$B_{a,t}^{ii,n} - B_{d,t}^{ii,n} = B_t^{ii,n} - B_{t-1}^{ii,n} \quad (15)$$

$$B_{a,t}^{ii,n} \leq L_{a,t}^{ii} \quad (16)$$

$$B_{d,t}^{ii,n} \leq L_{d,t}^{ii} \quad (17)$$

$$\sum_i B_t^{ii,n} \leq 1 \quad (18)$$

式(14)~(18)中,  $L_{a,t}^{ii}$ 、 $L_{d,t}^{ii}$  分别为车辆出发和到达状态变量;  $B_{a,t}^{ii,n}$ 、 $B_{d,t}^{ii,n}$  分别为电池转移开始和停止的状态变量;  $B_t^{ii,n}$  为电池的时空分布状态变量。式(14)、(15)表示车辆和电池的转移时空约束条件,式(16)、(17)表示电池跟随车辆转移需要满足的约束,式(18)表示电池空间位置的唯一性约束。

电池组的能量约束如下:

$$u_t^{ic,n} + u_t^{id,n} \leq B_t^{ii,n}, \quad \forall n, \forall t, \forall i \quad (19)$$

$$0 \leq P_t^{ic,n} \leq u_t^{ic,n} P^m, \quad \forall n, \forall t, \forall i \quad (20)$$

$$0 \leq P_t^{id,n} \leq u_t^{id,n} P^m, \quad \forall n, \forall t, \forall i \quad (21)$$

$$\bar{u}_t^{ic,n} + \bar{u}_t^{id,n} \leq \sum_j U_{d,t}^{ij} + \sum_j U_{a,t}^{ji}, \quad \forall t, \forall i \quad (22)$$

$$0 \leq \bar{P}_t^{ic,n} \leq \bar{u}_t^{ic,n} P^m, \quad \forall n, \forall t, \forall i \quad (23)$$

$$0 \leq \bar{P}_t^{id,n} \leq \bar{u}_t^{id,n} P^m, \quad \forall n, \forall t, \forall i \quad (24)$$

$$S_{oc,t}^n = S_{oc,t-1}^n + \sum_i \frac{(\bar{P}_t^{ic,n} \eta - \bar{P}_t^{id,n} / \eta)(\lambda_{d,t}^i + \lambda_{a,t}^i)}{E^m} + \sum_i \frac{(P_t^{ic,n} \eta - P_t^{id,n} / \eta)(1 - \lambda_{d,t}^i - \lambda_{a,t}^i)}{E^m} \quad (25)$$

式(19)~(25)中,  $P^m$ 、 $\eta$  分别为电池充电功率最大值和充放电效率;  $u_t^{ic,n}$ 、 $u_t^{id,n}$  分别为电池的充、放电状态变量;  $P_t^{ic,n}$ 、 $P_t^{id,n}$  分别为  $t$  时刻电池的充、放电功率;  $S_{oc,t}^n$  为  $t$  时刻电池的荷电状态 (state of charge, SOC)。式(19)~(21)表示电池充放电约束,式(22)~(24)表示 St2 状态下电池的工作限制,式(25)表示电池的荷电状态约束。

3) 负荷切除约束。

St1 状态下切负荷满足以下约束条件:

$$0 \leq P_{i,t}^1 \leq P_{i,t}^{lm} \quad (26)$$

$$Q_{i,t}^1 = P_{i,t}^1 \tan(\cos^{-1} \varphi_i) \quad (27)$$

St2 状态下系统切负荷满足以下约束条件:

$$0 \leq \bar{P}_{i,t}^1 \leq P_{i,t}^{lm} \left( \sum_j U_{d,t}^{ij} + \sum_j U_{a,t}^{ji} \right) \quad (28)$$

$$\bar{Q}_{i,t}^1 = \bar{P}_{i,t}^1 \tan(\cos^{-1} \varphi_i) \quad (29)$$

4) 配电网约束条件。

网络重构条件下配电网需满足放射状约束:

$$\begin{cases} k_{ij} + k_{ji} = \mu_{ij}, \quad \forall (i, j) \in E \\ \sum_{i \in N(j)} k_{ij} = 1, \quad j \in \Omega_s^N / \Omega^N \\ \sum_{i \in N(j)} k_{ij} = 0, \quad j \in \Omega_s^N \end{cases} \quad (30)$$

式中,  $\mu_{ij}$  为  $i$ 、 $j$  节点间的线路连通状态变量,  $k_{ij}$ 、 $k_{ji}$  为线路的方向变量,  $k_{ij} = 1$  表示节点  $i$  是节点  $j$  的父节点;  $N(j)$  为与  $j$  节点相连的节点集合,  $\Omega_s^N$ 、 $\Omega^N$  分别为源节点和节点集合。式(30)的含义:系统中只有源节点没有父节点,其他节点有且只有一个父节点。

对于 St1 状态而言,线路潮流约束为

$$P_{i,t}^G + P_{i,t}^{WT} + P_{i,t}^{PV} - P_{i,t}^1 + \sum_n (P_{i,t}^{d,n} - P_{i,t}^{c,n}) = \sum_{j \in A_i} P_t^{ij} \quad (31)$$

$$Q_{i,t}^G + Q_{i,t}^{WT} + Q_{i,t}^{PV} - Q_{i,t}^1 = \sum_{j \in A_i} Q_t^{ij} \quad (32)$$

$$-M(1 - \mu_{ij}) \leq v_t^j - v_t^i - \frac{r_{ij} P_t^{ij} + x_{ij} Q_t^{ij}}{V_0} \leq M(1 - \mu_{ij}) \quad (33)$$

$$\begin{cases} -\mu_{ij}S^{ijm} \leq P_i^{ij} \leq \mu_{ij}S^{ijm} \\ -\mu_{ij}S^{ijm} \leq Q_i^{ij} \leq \mu_{ij}S^{ijm} \\ -\sqrt{2}\mu_{ij}S^{ijm} \leq P_i^{ij} + Q_i^{ij} \leq \sqrt{2}\mu_{ij}S^{ijm} \\ -\sqrt{2}\mu_{ij}S^{ijm} \leq P_i^{ij} - Q_i^{ij} \leq \sqrt{2}\mu_{ij}S^{ijm} \end{cases} \quad (34)$$

式(31)~(34)中,  $P_{i,t}^{WT}$ 、 $Q_{i,t}^{WT}$  分别为风机的有功、无功功率;  $P_{i,t}^{PV}$ 、 $Q_{i,t}^{PV}$  分别为光伏的有功、无功功率;  $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$  分别为线路阻抗和电抗;  $v_i^j$  为节点  $i$  电压值;  $S^{ijm}$  为线路承载的最大潮流; 式(31)、(32)表示节点  $i$  的有功和无功功率平衡; 式(33)为节点电压约束,  $M$  为一较大的数; 式(34)为线路传输容量约束。

对于 St2 状态而言, 线路的功率流也满足功率平衡、线路容量以及节点电压约束, 由于篇幅有限, 此处不再赘述。

### 5) 柴油发电机出力约束。

柴油发电机需要满足出力上下限约束和爬坡率约束, 分别为

$$0 \leq P_{i,t}^G \leq P_{\max}^G \quad (35)$$

$$|\Delta P_{i,t}^G| \leq \alpha P_{\max}^G \quad (36)$$

## 3 两阶段求解算法

上述配电网负荷恢复模型含有众多布尔型变量和非线性约束, 导致求解过程异常复杂。为了简化该模型的求解过程, 本文提出一种两阶段求解算法, 其流程如图 5 所示。

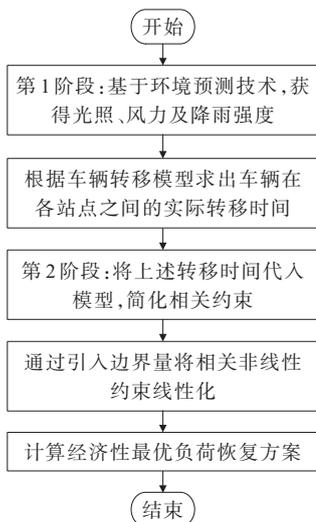


图 5 两阶段求解算法流程

Figure 5 Flow chart of two-stage solution algorithm

第 1 阶段考虑环境影响。基于现有的环境预测技术, 获得当日的光照强度、风力以及降雨强度等数据。然后, 通过式(5)、(6)计算出各站点之间的车辆运输时间, 并将结果保存在电脑中。

第 2 阶段将文 2 中的非线性约束条件线性化。用  $P_t$  代表  $P_{j,t}^l$ 、 $\bar{P}_{j,t}^l$ 、 $P_{j,t}^G$ 、 $\bar{P}_{j,t}^G$ 、 $P_t^{ic,n}$ 、 $\bar{P}_t^{ic,n}$ 、 $P_t^{id,n}$ 、 $\bar{P}_t^{id,n}$ 。进一步地,  $P_{d,t}^{ij} = P_t^i(\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij})U_{d,t}^{ij}$ 、 $P_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij} = P_t^i(\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij})U_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij}$  可分别改写为以下的线性描述:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{d,t}^{ij} \leq P_t^i(\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij}) \\ -M + U_{d,t}^{ij}M + \\ P_t^i(\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij}) \leq P_{d,t}^{ij} \leq U_{d,t}^{ij}M \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij} \leq P_t^i(\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij}) \\ -M + U_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij}M + \\ P_t^i(\text{rod}(\tau_t^{ij}) - \tau_t^{ij}) \leq P_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij} \\ P_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij} \leq U_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij}M \end{cases} \quad (38)$$

再用  $P_{d,t}^i$ 、 $P_{a,t}^i$  代替式(7)、(25)中的非线性变量  $P_t^i \lambda_{d,t}^i$  和  $P_t^i \lambda_{a,t}^i$ 。由式(12)、(13)可得  $P_{d,t}^i$ 、 $P_{a,t}^i$  定义式如下:

$$P_{d,t}^i = P_t^i \lambda_{d,t}^i = \sum_j P_{d,t}^{ij} \quad (39)$$

$$P_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^i = P_{t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^i \lambda_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^i = \sum_j P_{a,t+\text{rod}(\tau_t^{ij})-1}^{ij} \quad (40)$$

经过式(37)~(40)的变换过程, 配电网负荷恢复模型可以转换为一个经典的 MILP 问题, 然后通过商业求解器 Gurobi 对上述模型进行求解。

## 4 算例分析

### 4.1 配电网系统

为验证本文所提方案的有效性, 选取南海某岛屿作为负荷中心岛, 其中海岛微电网采用改进 IEEE 11 节点网络, 选取该海岛常规负荷并进行等比例调整; 在节点 2、6 处存在光伏发电设备, 额定功率为 2 MW, 在节点 6 处存在风电机组, 额定功率为 1 MW; 此外, 考虑供电可靠性问题, 孤岛微电网配置一台额定功率为 1 000 kW 分布式柴油发电机。

为不失一般性,设置该孤岛配电网系统有 2 个电池充电站,每个站配备 100 块电池,每个电池容量参数为 20 kW/40 kW·h。调度时将 50 个电池包装成为一个电池组来运输和工作。该配电网的拓扑结构如图 6 所示。

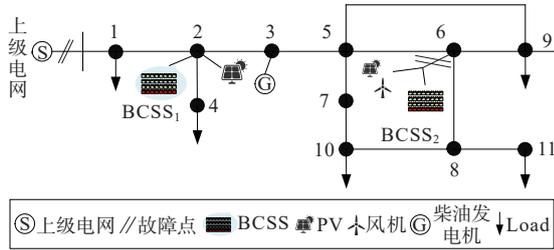


图 6 海岛配电网系统示意

Figure 6 Schematic diagram of island distribution network system

由于极端天气事件,配电网与上级电网断开,节点 6 处的分布式能源电站与配电网断开连接。电池充放电效率为 90%,运维成本为 0.6 元/(kW·h);租用车辆运维成本设定在 300 元,切负荷的成本设定为 8 元/(kW·h);配电网的电压运行范围为 0.95~1.05, DG 的发电参数为  $k_1=0.2$ 、 $k_2=0.06$  L/kW, 燃料价格设定为  $\beta=6.5$  元/L。可再生能源出力如图 7 所示。

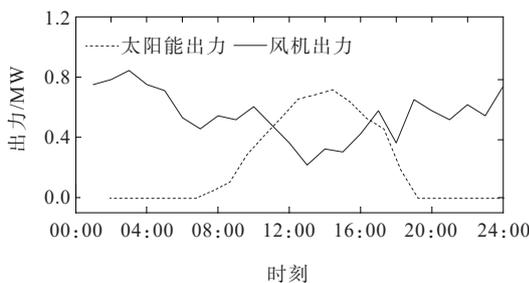


图 7 可再生能源出力

Figure 7 Renewable energy contribution

本算例以 24 h 为调度周期,设置 4 个对比方案来验证所提策略的优越性:

方案 1 采用本文所提的恢复策略,电池随着车辆转移,在各换电站之间运输、工作;

方案 2 采用常见额定配电网负荷恢复调度策略,电池按照传输时间进行四舍五入来匹配配电网整时调度;

方案 3 考虑网络重构,电池不参与移动,仅在本地支持配电网负荷恢复;

方案 4 仅考虑网络重构和切负荷等负荷恢复措施,电池不参与配电网负荷恢复。

在配置为 4.3 GHz RAM16 GB Windows10 的计算机上,基于 Matlab 平台进行建模,通过 YALMIP 分别调用 Gurobi 中的混合整数规划求解器和混合整数二次约束规划求解器求解上述模型。

#### 4.2 环境影响预处理结果

由参考文献[30]中的道路模型参数求得环境影响因素下的车辆运输时间和速度变化情况,如图 8 所示,可知由于降雨等极端天气的影响,车辆的安全行驶速度不是一个定值;而车辆的运输时间为 1.21~1.58 h。可以推测,不同的非整数小时运输时间会给调度带来很大的挑战。

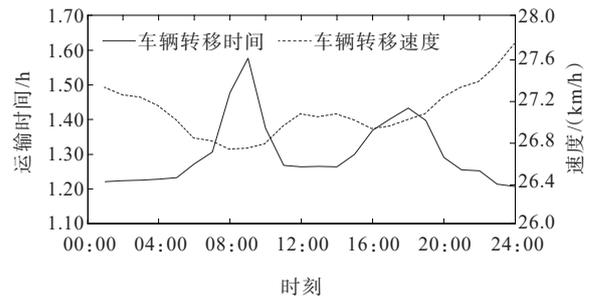


图 8 考虑环境因素的车辆运输时间

Figure 8 Vessel transit time considering environmental factors

#### 4.3 配电网负荷恢复的结果分析

考虑环境对车辆运输时间的影响,本文分析配电网负荷恢复的结果。方案 1 中电池组的空间位置和运行功率如图 9 所示,可以看出,电池组跟随车辆在电池换电站之间移动,电池组 1~4 的行程顺序分别为 ①→②→①、①、②→①→②、②→①→②。按照本文所提调度策略,当车辆运输时间为非整数小时,电池可以在 1 h 内切换运行状态。如图 9(a) 所示,电池组在 14:00—14:13 期间以 0.788 0 MW 运行,而在 14:14—15:00 期间以 -1.000 0 MW 运行。该结果表明,即使模型的调度步长为 1 h,电池依然可以实现非整时调度(图 9(c)、(d)同理)。证明本文所提的双重状态决策方法具有可行性。

方案 1 中的配电网功率分布如图 10 所示,可知配电网先进行网络重构,再断开线路 5-9、6-8;与此同时,电池和分布式电源进行协同调度来减少用户

切负荷损失。值得注意的是,电池的充放电功率也有2个运行状态。例如:06:00—06:45时车辆工作在St1状态下,06:46—07:00时车辆工作在St2状态下。方案1配电网切负荷为28.68 MW·h。

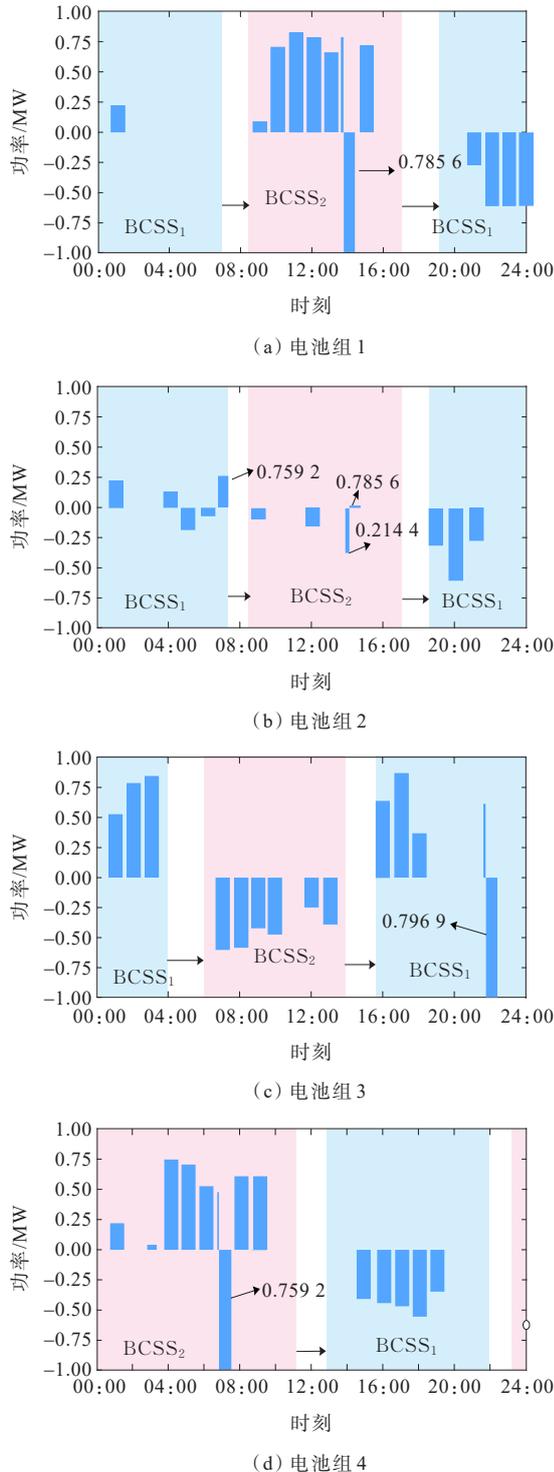


图9 方案1中电池组空间位置与运行功率

Figure 9 Battery pack space location and operating power in case 1

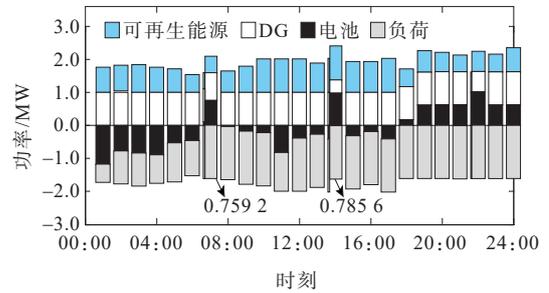


图10 方案1配电网功率分布情况

Figure 10 Case 1 distribution network power distribution

方案2中电池组的转移顺序如表1所示,可知1~4号电池组的行程顺序分别为①→②→①、①→②→①、②→①→②和②→①。除此之外,该模型对车辆的运输时间进行四舍五入来配合配电网整时调度。

表1 方案2中电池组转移顺序

Table 1 Battery pack transfer sequence in case 2

电池组	转移序列
1	①→② (12:00—14:00), ②→① (21:00—23:00)
2	①→② (06:00—08:00), ②→① (15:00—17:00)
3	②→① (09:00—11:00), ①→② (18:00—20:00)
4	②→① (03:00—05:00)

方案2中的配电网功率分布情况如图11所示,可知配电网通过网络重构断开了线路5-9、6-8,以提高配电网的恢复力水平;此外,蓄电池和分布式电源协同配合,支撑配电网负荷恢复。然而,在电池非整时到达的时段,电池不能参与电网负荷恢复工作,只有分布式电源单独支撑配电网负荷恢复。所以在方案2的策略引导下,配电网切负荷量增加到31.97 MW·h。

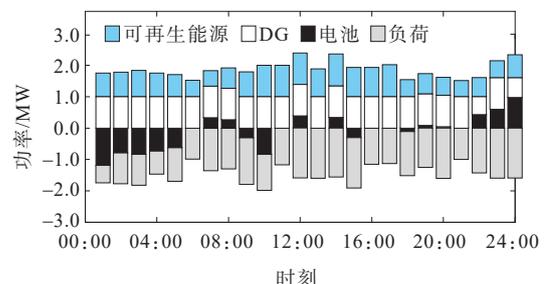


图11 方案2中配电网功率分布情况

Figure 11 Distribution network power distribution in case 2

方案 3 中的配电网负荷恢复情况如图 12 所示,由图 12(a)可知,方案 3 基于配电网网络重构断开了线路 6-9、8-10,但由于线路传输功率及节点电压约束,固定电池参与电网调节的效果不够显著,因此,在这种情况下配电网切负荷量变为 37.38 MW。图 12(b)显示了方案 4 中配电网功率分布情况,为了减少经济损失,配电网基于网络重构断开了线路 5-9、6-8,由于此时缺少电池的支撑,配电网切负荷量增加为 37.96 MW。

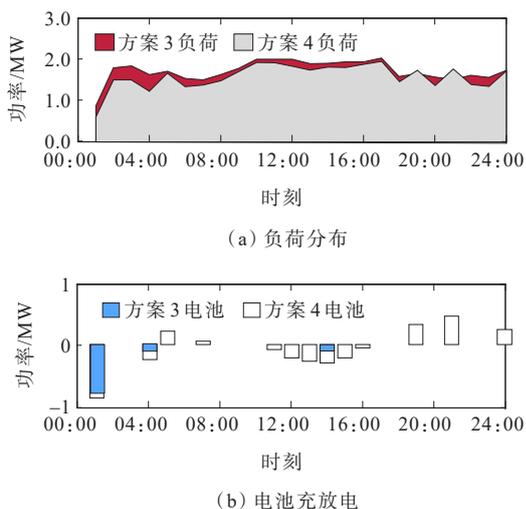


图 12 方案 3 配电网负荷恢复情况

Figure 12 Distribution network load restoration in case 3

不同方案下的配电网负荷恢复成本如表 2 所示,各方案对应的配电网负荷恢复总成本分别为 280 461、304 196、339 938 和 342 826 元。其中,方案 1 与方案 2、3、4 相比,负荷恢复成本分别减少了 23 735 (7.8%)、59 477 (17.5%) 和 62 407 (18.2%) 元。结果表明,本文所提出的配电网负荷恢复策略可以大大节省大停电事件带给配电网的经济损失。

表 2 各方案下的配电网负荷恢复成本

Table 2 Distribution system restoration cost in four cases

方案	配电网负荷恢复成本/元				总成本/元
	柴机发电	电池运维	车辆运输	切负荷损失	
1	39 258	8 143	3 600	229 460	280 461
2	40 058	4 178	4 200	255 760	304 196
3	40 560	308	0	299 070	339 938
4	39 208	0	0	303 660	342 868

## 5 结语

本文提出了一种基于换电模式的海岛配电网负荷恢复优化调度策略,并通过理论分析和仿真验证得出以下结论:

- 1) 通过对环境因子的量化分析,建立了计及车辆转移特性的海岛配电网负荷恢复模型;
- 2) 较之传统的调度方式,采用双重状态决策方法可以对车辆进行非整时调度,与实际调度场景更加贴合;
- 3) 所提的配电网最优负荷恢复模型通过网络重构以及电池换电等调度策略,减少了切负荷的比例,节省了大停电事件带给配电网的经济损失。

### 参考文献:

[1] PANTELI M, MANCARELLA P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 11(3):1733-1742.

[2] 张飞飞. 考虑自然灾害影响的中压配电网规划方法[D]. 北京:华北电力大学, 2013.

ZHANG Feifei. The method of medium voltage distribution network planning considering the influence of natural disasters[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[3] TON D T, WANG W T P. A more resilient grid: the US department of energy joins with stakeholders in an R&D plan[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 26-34.

[4] 杨丽君, 吕雪姣, 李丹, 等. 含分布式电源的配电网多故障抢修与恢复协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 13-19.

YANG Lijun, LÜ Xuejiao, LI Dan, et al. Coordinated optimization strategy of multi-fault repair and recovery for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 13-19.

[5] 许寅, 王颖, 和敬涵, 等. 多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 123-131.

XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal

- decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources[J].Automation of Electric Power Systems, 2020,44(2):123-131.
- [6] 朱冬雪,顾雪平,钟慧荣.电力系统大停电后机组恢复的多目标优化方法[J].电网技术,2013,37(3):814-820.  
ZHU Dongxue, GU Xueping, ZHONG Huirong. A multi-objective optimization method for post-blackout unit restoration[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 814-820.
- [7] 刘仲,牟龙华,杨智豪.大停电后含分布式电源的电网分区及负荷恢复方案[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):55-61.  
LIU Zhong, MU Longhua, YANG Zhihao. Scheme for partitioning and load restoration of power grid containing distributed generation after blackout[J]. Power System Protection and Control,2015,43(22):55-61.
- [8] 赵洪山,赵航宇,侯杰群,等.需求响应对配电网供电可靠性影响分析[J].电力自动化设备,2017,37(1):8-14.  
ZHAO Hongshan,ZHAO Hangyu,HOU Jiequn,et al.Effect of demand response on supply reliability of distribution network[J].Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):8-14.
- [9] 刘礼邦,武传涛,随权,等.计及可控负荷参与的主动配电网动态恢复供电策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):27-35.  
LIU Libang, WU Chuantao, SUI Quan, et al. Power supply strategy for active distribution network dynamic recovery with controllable load participation[J]. Power System Protection and Control,2020,48(9):27-35.
- [10] 马国真,林毓军,张泽亚,等.计及源荷多重不确定性的综合能源系统鲁棒经济调度方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):43-52.  
MA Guozhen, LIN Yujun, ZHANG Zeya, et al. A robust economic dispatch method for an integrated energy system considering multiple uncertainties of source and load[J].Power System Protection and Control,2021,49(20):43-52.
- [11] 王辉,付凌云,孙世民,等.海上风电场集电系统电压选择研究[J].高压电器,2022,58(9):112-119.  
WANG Hui, FU Lingyun, SUN Shimin, et al. Study on voltage selection of collection system in offshore wind farm [J].High Voltage Apparatus,2022,58(9):112-119.
- [12] 何晨可,朱继忠,刘云,等.计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J].电工技术学报,2022,37(1):92-111.  
HE Chenke, ZHU Jizhong, LIU Yun, et al. Coordinated planning of electric vehicle charging-swapping-storage integrated station and active distribution network considering carbon reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(1):92-111.
- [13] 叶季蕾,李斌,张宇,等.基于全球能源互联网典型特征的储能需求及配置分析[J].发电技术,2021,42(1):20-30.  
YE Jilei, LI Bin, ZHANG Yu, et al. Energy storage requirements and configuration analysis based on typical characteristics of global energy internet[J]. Power Generation Technology,2021,42(1):20-30.
- [14] 谢云云,李虹仪,崔红芬.考虑电网侧储能调频能力的电力系统负荷恢复策略[J].电力工程技术,2021,40(6):43-51.  
XIE Yunyun, LI Hongyi, CUI Hongfen. Load restoration strategy for power system considering the transient frequency control ability of energy storage system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 43-51.
- [15] 尹航,刘友波,高红均,等.含分布式储能系统的交直流混合配电网负荷恢复策略[J].电力自动化设备,2021,41(8):25-32.  
YIN Hang, LIU Youbo, GAO Hongjun, et al. Load recovery strategy of AC/DC hybrid distribution network with distributed energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(8):25-32.
- [16] 王颖,祝士焱,许寅,等.考虑多类型储能协同的重要负荷恢复方法[J].电力自动化设备,2022,42(1):72-78.  
WANG Ying, ZHU Shiyan, XU Yin, et al. Critical load restoration method considering coordination of multiple types of energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(1):72-78.
- [17] CHEN Bo, CHEN Chen, WANG Jianhui, et al. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(6):6793-6805.
- [18] HAMIDREZA M, AHAD A, SHAHRAM J, et al. Load restoration and energy management of a microgrid with distributed energy resources and electric vehicles participation under a two-stage stochastic framework[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2021,133:107320.
- [19] 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 the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.
- [20] MOMEN H, ABESSI A, JADID S. Using EVs as distributed energy resources for critical load restoration in resilient power distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(18): 3750-3761.
- [21] 葛少云, 孙睿, 刘洪, 等. 内嵌运行优化与动力电池梯次利用的光储充换电站多阶段规划[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 149-156.
- GE Shaoyun, SUN Rui, LIU Hong, et al. Multi-stage planning of charging and battery swapping station with photovoltaic and energy storage considering embedded operation optimization and cascaded utilization of electric vehicle batteries[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 149-156.
- [22] 许彭锦, 梁承姬. 考虑电池包数量的自动化集装箱码头多AGV调度优化[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(9): 2653-2659.
- XU Pengjin, LIANG Chengji. Research on multi AGV scheduling optimization of automated container terminal considering number of battery packs[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(9): 2653-2659.
- [23] 刘灵恺, 雷霞, 李竹, 等. 电动汽车换电站可用电池组数动态调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 242-250.
- LIU Lingkai, LEI Xia, LI Zhu, et al. Dynamic scheduling strategy for available battery number of electric vehicle in battery-swap station[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2017, 32(22): 242-250.
- [24] LEI S, CHEN C, LI Y, et al. Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6187-6202.
- [25] ABDELTAWAB H H, MOHAMED Y A R I. Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 6828-6840.
- [26] 黄玉雄, 李更丰, 张理寅, 等. 弹性配电系统动态负荷恢复的深度强化学习方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 68-78.
- HUANG Yuxiong, LI Gengfeng, ZHANG Liyin, et al. Deep reinforcement learning method for dynamic load restoration of resilient distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 68-78.
- [27] SUN Y Y, LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M, et al. Battery-based energy storage transportation for enhancing power system economics and security[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2395-2402.
- [28] SUN Y Y, LI Z Y, TIAN W, et al. A lagrangian decomposition approach to energy storage transportation scheduling in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4348-4356.
- [29] 随权, 魏繁荣, 武传涛, 等. 面向生态友好型远洋海岛群的储电概念船舶及其供能路径优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 168-181.
- SUI Quan, WEI Fanrong, WU Chuantao, et al. Research on electric conceptual vessel and energy supply path optimization strategy for ecology-friendly pelagic clustering islands[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 168-181.
- [30] 季天剑, 高玉峰, 陈荣生. 轿车轮胎动力滑水分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 57-60.
- JI Tianjian, GAO Yufeng, CHEN Rongsheng. Dynamic hydroplaning analysis of car tire[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 57-60.