

海岛配电网应对风灾灵活资源动态应急优化调控

郭乾¹, 吴龙腾¹, 吴杰康², 张彬²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广州 510060; 2. 广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

摘要: 在台风天气影响下, 海岛受地理位置的制约, 更容易受灾害影响, 并且海岛的可再生能源更丰富, 因此如何保证海岛微电网的可靠并且经济性运行尤为重要。考虑台风对于海岛地区的配电网影响, 并根据海岛地区的负荷分布情况、可再生能源储备发电情况和移动应急电源车调配情况, 在保证配电网稳定运行的前提下, 结合维修团队的调度, 以海岛配电网负荷损失最小、配电网电压稳定性更高为目标进行灵活资源应急调控, 建立了考虑台风天气下海岛微电网的多目标优化调度模型。并采用改进粒子群算法来求得全局最优解, 通过对算法中的惯性因子和学习因子进行优化, 为避免陷入局部最优解, 采用动态密集距离排序方式更新非劣解集, 提高该算法的求解精度和全局寻优能力。将改进粒子群算法运用到实际算例中, 算例结果表明该优化调度模型的可行性和有效性。

关键词: 台风灾害; 海岛电网; 灵活资源; 动态应急优化调控; 改进粒子群算法

Dynamic Emergency Optimization and Control of Flexible Resources for Island Distribution Network to Cope With Wind Disasters

GUO Qian¹, WU Longteng¹, WU Jiekang², ZHANG Bin²

(1. Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510060, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Under the influence of typhoon weather, islands, constrained by geographical conditions, are more vulnerable to disasters. Moreover, islands possess richer renewable energy resources, making it particularly crucial to ensure the reliable and economical operation of island microgrids. Considering the impact of typhoons on island power distribution networks, and based on the load distribution, renewable energy reserves, and mobile emergency power supply vehicle deployment in island areas, a multi-objective optimal scheduling model is established for island microgrids under typhoon conditions. The model aims to minimize load loss and enhance voltage stability in the distribution network while ensuring stable operation. By coordinating maintenance teams, flexible emergency resource regulation is implemented. An improved particle swarm optimization algorithm is employed to obtain the global optimal solution. Through optimization of inertia and learning factors in the algorithm, dynamic dense distance sorting is used to update the non-dominated solution set, improving the algorithm's accuracy and global optimization capability. Applied to practical case studies, the results demonstrate the feasibility and effectiveness of the optimized scheduling model.

Key words: typhoon disasters; island distribution network; flexible resources; dynamic emergency optimization and control; improved particle swarm optimization algorithm

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目—粤港澳研究团队项目(2020B1515130001); 中国南方电网有限责任公司科技项目(036000KK52222036(GDKJXM20222392))。

Foundation item: Supported by Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2020B1515130001); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (036000KK52222036(GDKJXM20222392))。

0 引言

近年来,强台风多次在我国南部城市登陆,造成大范围、大规模的停电,严重影响人们的生活与生命安全。海岛地区因地理位置因素,更容易受台风的影响,电网的运行稳定更容易遭到破坏。因此分析与研究台风过境对配电网运行的影响,如何充分调动当地的电力资源是实现故障电网快速复电和减少负荷损失的重要研究任务^[1-4]。

国内外对台风影响下配电网稳定运行方面做了大量研究。文献[5]分析了台风对电力设备的故障率影响途径,提出了台风下电网故障率的时空预警框架。文献[6]分析台风对海岛群的影响,提出了一种应对台风影响的海岛微网韧性提升策略。文献[7]基于PHM理论构建了架空线路故障率模型,并通过“馈线分区”的方式对配电网各分区进行韧性评估,构建提升韧性的储能两阶段规划模型。文献[8]构建配电线路故障率时空特性矩阵,提出了一种基于场景概率的鲁棒优化配电网移动储能配置与运行策略。文献[9]提出了一种以总停电损失最小和抢修时间最短为目标,使用离散细菌群体趋药性算法求解应急电源车调度和抢修顺序协同优化的双目标鲁棒调度模型。文献[10]使用广度优先搜索算法对配电网进行孤岛化,并提出了一种台风灾害下配电网的计算孤岛微电网减载量的韧性评估框架。文献[11]使用随机森林算法来预测Outage用户的数量,利用遗传算法根据损伤程度优化修复路线,提出了一种台风灾害下电力应急修复路径的优化模型。文献[12]结合台风期间风电、水电出力特性,提出了台风环境下含火电机煤耗、污染排放、电网总购电费用及弃风的多目标函数优化调度模型。文献[13]采用置信集法进行场景削减,构建了一种综合考虑潮流均匀度、受灾区域线路负载率和发电成本的多目标实时优化调度模型。文献[14-15]采用分散控制策略对停电区域进行区域划分,然后利用移动应急电源组成应急微电网对其中重要负荷供电用户供电的模型。

上述文献在台风过境后对海岛地区配电网灵活资源没有充分运用,并且在多种供电资源和线路维修方面协同运行方面存在一定问题,没有做到合理的重构与调配。因此,本文首先采用蒙特卡洛的方式建立台风影响下的线路故障模型,通过对灵活

资源的应急优化,充分发挥风力、光伏、储能和移动应急电源车的作用,考虑配电网节点负荷的重要性,并配合线路维修团队,以尽可能地减少负荷损失和配电网电压的偏移为目标,建立海岛微电网的多目标优化调度模型,并采用改进粒子群算法来求得全局最优解,通过对算法中的惯性因子和学习因子进行优化,为避免陷入局部最优解,采用动态密集距离排序方式更新非劣解集,提高该算法的求解精度和全局寻优能力。将改进粒子群算法运用到实际算例中,算例结果证明了该优化调度模型的可行性和有效性。

1 台风灾害的影响

1.1 台风风场模型场景模拟

台风结构主要有台风眼、涡旋风暴区和周边强风区,这些区域的风速各不相同,如图1所示。

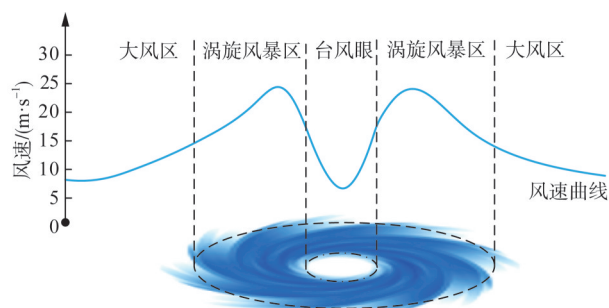


图1 台风风速结构图

Fig. 1 Diagram of typhoon wind speed structure

基于梯度风平衡方程的Holland模型^[16]具有台风风场中各位置梯度风速计算精度高的优点,如式(1)所示,参数 $R_{\max}$ 和 B 分别由式(2)和式(3)确定。

$$V_{g,r} = \sqrt{\frac{f_c^2 r^2}{4} + \frac{B \Delta p_c}{\rho} \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B \exp\left[-\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B\right] - \frac{f_c r}{2}} \quad (1)$$

$$R_{\max} = \exp(-0.1239 \Delta p_c^{0.6003} + 5.1034) \quad (2)$$

$$B = 2.0 - (p_c - 900)/160 \quad (3)$$

式中: $V_{g,r}$ 为距离台风中心位置 r 处的梯度风速; $R_{\max}$ 为最大风速对应的半径; B 为Holland径向压力分布参数; f_c 为与地球自转角速度和台风中心纬度有关的科里奥利参数; p_c 和 Δp_c 分别为台风中心的压力和气压差; ρ 为空气密度。

1.2 海岛配电网线路元件的失效概率

配电网线路元件主要由输电导线和杆塔组成,

可以通过计算台风对输电导线和杆塔的影响来模拟台风对输电线路的影响。

对元件上的风速变化及其受力情况进行模型,当台风风速为 s 时,输电导线和杆塔的故障率如式(4)所示,具体模型见文献[17]。

$$\begin{cases} \rho_L(s) = \int_0^{\sigma_s} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma - \mu_L}{\sigma_L}\right)^2\right] d\sigma \\ \rho_P(s) = \int_0^{M_T} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{M - \mu_P}{\sigma_P}\right)^2\right] dM \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\rho_L(s)$ 和 $\rho_P(s)$ 分别为输电导线故障率和杆塔故障率; σ_s 和 M_T 分别为最高点悬挂处导线截面所受应力和杆塔的综合弯矩; μ_L 和 σ_L 分别为导线抗拉强度的均值和标准差; μ_P 和 σ_P 分别为电杆抗弯强度的均值和标准差; σ 和 M 为积分求解的自变量参数。

当节点之间的导线或者杆塔其中之一发生故障,则该线路立即断开,无法导通。所以输电线路的故障概率为:

$$\rho_{ij}(s) = 1 - (1 - \rho_L(s))^{m_{ij}} (1 - \rho_P(s))^{y_{ij}} \quad (5)$$

式中: $\rho_{ij}(s)$ 为第 ij 条支路在台风风速为 s 时的故障率; m_{ij} 和 y_{ij} 分别为第 ij 条支路的导线和电杆数量。

1.3 台风不确定建模与线路故障采样

通过蒙特卡洛^[18]的方法进行采用,生成一系列台风样本,然后通过式(1)~(3)风场模型得到每个台风样本对应的风速样本,然后通过式(4)~(5)线路故障模型得到各条输电线路的故障率。

对 i 、 j 之间的所有导线中挑选一个 $[0, 1]$ 之间的数字 $R_{ij,t}$,并且与此时的 ij 线路的故障率 $\rho_{ij}(s)$ 相比较,有:

$$Z_{ij,t} = \begin{cases} 1, R_{ij,t} > \rho_{ij}(s) \\ 0, R_{ij,t} \leq \rho_{ij}(s) \end{cases} \quad (6)$$

当 $Z_{ij,t}$ 在 t 时刻为1时,随机数大于故障率,即这条线路正常运行,当 $Z_{ij,t}$ 在 t 时刻为0时,随机数小于故障率,即这条线路处于故障状态。

2 配电网弹性调控能力与可控负荷

2.1 配电网弹性能力评估

当电力系统受到台风影响时,容易发生输电导线故障、杆塔倒塌的情况,系统输配电能力降低,造成大范围、大规模的停电事故。台风影响下配电网

负荷变化如图2所示, t_1 点是灾害发生点, t_2 和 t_3 分别表示电力系统降额运行的始末时刻, $t_3 - t_4$ 阶段为电力系统的恢复阶段, t_4 之后电力系统恢复正常运行。

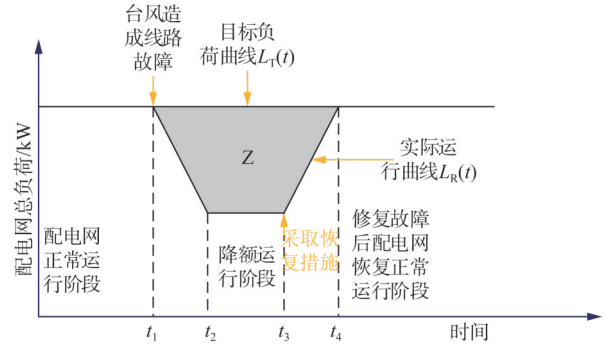


图2 台风影响下配电网负荷变化

Fig. 2 Load change of distribution network under the influence of typhoon

通过对比台风影响前的、假定正常运行的预测负荷曲线和受台风影响下配电网负荷曲线^[19],以正常运行的负荷曲线为目标,计算此次台风影响下的负荷缺失情况,具体如式(7)所示。

$$Z = \int_0^{T_0} L_T(t) dt - \int_0^{T_0} L_R(t) dt \quad (7)$$

式中: $L_R(t)$ 为受台风影响故障情况下的配电网运行负荷曲线; $L_T(t)$ 为台风影响前的、假定正常运行的预测负荷曲线; T_0 为配电网受台风影响的时间,从台风登录发生扰动事件至配电网的所有供电恢复正常为止。

本文考虑台风到来后,维修团队和移动应急电源的预布局配置联合恢复措施,使得在台风登录时间 $t_3 - t_4$ 内实现对重要负荷的供应、配电网电压更稳定,及配电网整体负荷损失的减少,具体负荷恢复模块流程如图3所示。

2.2 可控负荷

负荷重要性^[20]由负荷损失所造成的生命安全损失、经济性损失等因素建立,如医院等涉及人生安全的,大型工厂、铁路运输或者军工类等带来巨大经济损失的,为一级重要负荷,一般不允许停电或在满足最低负荷运行要求时允许部分断电;其余根据生命安全、经济性、特殊性权重等因素再进行排序,分为二级重要负荷与普通负荷,一般都为可允许部分停电。主动配电网根据实时情况和具体需求,实施调控发电及其负荷输出,即把负荷分为可

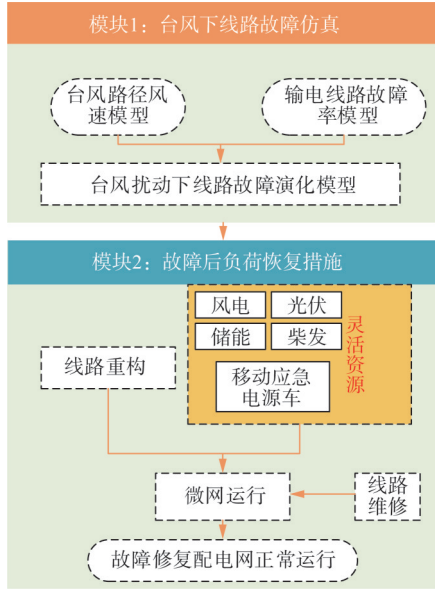


图3 负荷恢复的流程框架

Fig. 3 Process framework for load recovery

控与不可控负荷，可控负荷可根据具体需求进行负荷切除^[21]。

因海岛配电网规模较小，各级节点重要程度一般不如大型配电网，因此本文根据实际情况和该地区的负荷重要性的排序，采取的负荷节点权重如表1所示，配电网拓扑图如图4所示，并且所有的负荷节点均为可控负荷，可根据实际需求进行负荷切除。图4中红色的线路为联络线，星号则为储能位置。

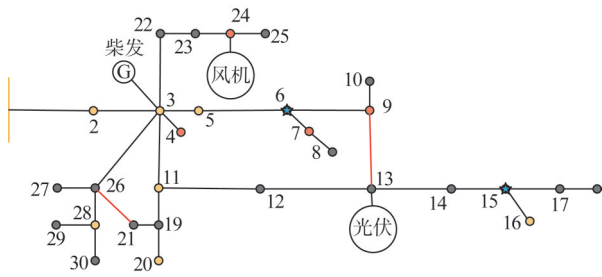


图4 配电网拓扑图

Fig. 4 Distribution network topology

表1 节点负荷权重等级

Tab. 1 Weight levels of node loads

负荷等级	权重	负荷节点
一级负荷	2.5	4、7、9、24
二级负荷	1.5	1、2、3、5、6、11、16、20、28
普通负荷	1.0	8、10、12、13、14、15、17、18、19、21、22、23、25、26、27、29、30

3 配电网灵活资源动态应急优化配置

3.1 目标函数

台风过境后配电网发生输电线路故障，采取恢复策略的首要目标是尽可能地按照重要程度恢复失电负荷，除此之外，配电网电压质量，移动应急电源车的调度成本也是优化配置的重要考虑因素，需综合考虑。因此本文采取多目标函数进行优化。

3.1.1 负荷损失成本

$$f_1 = \min \left(\sum_{t=1}^N \sum_{i \in C_L} w_i P'_{\text{Load}, i} - \sum_{t=1}^N \sum_{i \in C_L} w_i c'_i P'_{\text{Load}, i} \right) \quad (8)$$

式中： t 为故障时段分布区间内一个区间长度； N 为故障时段分布区间的数量； C_L 为配电网中所有节点集合； c'_i 为 t 时间段内节点 i 甩负荷大小在该时段内该点负荷的占比； w_i 为节点 i 的负荷等级所对应的权重； $P'_{\text{Load}, i}$ 为节点 i 在 t 时段内的负荷大小。

3.1.2 电压偏移量

$$f_2 = \min \sum |U'_i - U| \quad (9)$$

式中： U'_i 为节点 i 在 t 时段内的电压值； U 为基准电压。

3.2 约束条件

3.2.1 调控策略约束

为应对台风过境后配电网中出现的大规模断线和杆塔倒塌等输电线路故障，电网工作人员需及时组织和安排人员开展线路维修工作。在故障发生期间，他们需要在故障恢复的时间框架内确定最优的检修顺序。而优化故障调控策略的方法旨在应对配电网故障期间孤岛运行所带来的新约束条件，并将这些约束融合到新的统一恢复模型中。故障持续存在时，同一段时间内只能维修 h 条故障线路，对模型故障的开合状态表示调控策略约束如下。

$$Z_{ij}^1 = 0 \quad (10)$$

$$\begin{cases} Z_{ij}^{t_1} \leq Z_{ij}^{t_2} \\ t_1 \leq t_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum Z_{ij}^{t+T_i} - \sum Z_{ij}^t \leq h \quad (12)$$

式中： h 为同一段时间内最多能维修的线路数量； T_i 为检修 h 条线路所花的时间； Z_{ij}^t 为在线路 ij 在 t 时段内的通断状态，当 $Z_{ij}^t=0$ 时，线路 ij 处于断开状态，当 $Z_{ij}^t=1$ 时，线路 ij 处于接通状态。式(12)描述台风过境后，配电网线路的初始通断状态，式(14)表示时间 T_i 内最多维修 h 条线路。

3.2.2 移动应急电源车约束

对于每个地区的供电所,能够提供的移动应急电源车的数量和类别必须不超过该地区现有的移动应急电源车的可用数量及其种类的总和。为了确保每辆移动应急电源车能够有效地分配给最合适的候选连接节点,在调度这些移动应急电源车时,需要考虑以下限制条件^[22]。

当备选连接点与移动应急电源车相连接时,有:

$$\theta_{i,k} = 1, \forall k \in N_{\text{MEG}}, \forall i \in C_L \quad (13)$$

$$\sum_{k \in N_{\text{MEG}}} \theta_{i,k} \leq 1, \forall i \in C_L \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^{\theta_{\text{Total}}} \sum_{i \in C_L} \theta_{i,k} \leq \theta_{\text{Total}} \quad (15)$$

$$\sum_{i \in C_L} \sum_{t \in T} f_{i,t,k} = 1 \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^{N_{\text{MEG}}} \Delta t P_{i,\text{MEG}} f_{i,t,k} \leq E_{k,\text{MEG}} \quad (17)$$

式中: k 为该地区的某一辆移动应急电源车; N_{MEG} 为应急车辆集合; $\theta_{i,k}$ 为确认候选链接节点 i 是否通过移动应急电源车 k 连接; θ_{Total} 为该地区移动应急单元数量; $f_{i,t,k}$ 为二进制变量,表示移动应急电源车与候选节点的连接状态; $P_{i,\text{MEG}}$ 为 i 节点移动应急电源车的有功功率出力; $E_{k,\text{MEG}}$ 为第 k 辆移动应急电源车的最大容量。式(15)表示为备选连接节点所连接的 MEG 小于该地区移动应急单元数量。式(16)表示为每个 MEG 只能被分配给候选连接节点一次,并且不能被重复分配。式(17)表示第 k 辆车在 t 时段内 i 节点所消耗的移动应急电源车能量应小于等于装置的最大容量。

并且由于现实中移动应急电源车的调度和装配需要时间,所以在候选节点间更换频率太快并不可行,本文考虑移动应急电源车的移动与维修团队合作下在 T_i 时间段内做一次位置变更决策。

3.2.3 辐射状约束

在配电网系统在极端灾害下的不稳定性时,分布式电源通过构成众多的微电网模块展现出了显著的灵活性,尤其在电网故障时能为关键负荷的持续供电提供有效保障。因此本文采用了单商品流理论中的子图连通性约束^[23],目标是确保电网的分配设计能够遵循辐射状结构,即各微电网能够辐射性地向关键负荷区域供电。选择每个微电网中的 DG 节点作为“源”节点,得到:

$$\sum_{j \in \delta(i)} F_{ji} - \sum_{k \in \pi(i)} F_{ik} = -1, i \in C_L \setminus \{DG\} \quad (18)$$

$$\sum_{j \in \delta(i)} F_{ji} - \sum_{k \in \pi(i)} F_{ik} = W_i, i \in \{DG\} \quad (19)$$

$$-Ma_{ij} \leq F_{ij} \leq Ma_{ij}, \forall ij \in \varepsilon \quad (20)$$

$$-M(2 - Z_{ij}) \leq F_{ij} \leq M(2 - Z_{ij}), \forall ij \in \varepsilon \quad (21)$$

$$W_i \geq 1 \quad (22)$$

$$\sum_{ij \in \varepsilon} Z_{ij} = |C_L| - |\{DG\}| \quad (23)$$

式中: $\delta(i)$ 和 $\pi(i)$ 分别为节点 i 的所有父节点和子节点的集合; ε 为支路集合; $\{DG\}$ 为 DG 节点集合; F_{ij} 为虚拟网络中 ij 线上传输的功率; W_i 为虚拟网络中“源”节点提供的功率; M 为极大的数。

3.2.4 潮流约束约束

本文采用 DistFlow 潮流^[24]约束,并加入线路通断变量 Z_{ij} ,对已经断开的支路不再承载电流和功率,因此无需对该支路进行潮流计算。因此,通过使用大 M 法给一个足够大的整数 M ,并结合配电网拓扑结构中不同时段内的 Z_{ij} 变化,来对潮流约束进行简化。

$$\begin{cases} \sum_{j \in \delta(i)} P_{ij} - \sum_{k \in \pi(i)} P_{ik} - r_{ij} I_{ij}^2 + P_{i,\text{DG}} - P_{\text{ch}} + P_{\text{dch}} - \\ P_{\text{Load},i} + P_{\text{MEG}} = 0 \\ \sum_{j \in \delta(i)} Q_{ij} - \sum_{k \in \pi(i)} Q_{ik} - x_{ij} I_{ij}^2 + Q_{i,\text{DG}} - Q_{\text{Load},i} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 + \\ M(1 - Z_{ij}) \geq 0 \\ U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 - \\ M(1 - Z_{ij}) \leq 0 \end{cases} \quad (25)$$

线路中电压电流应满足如下条件:

$$\begin{cases} -MZ_{ij} \leq P_{ij} \leq MZ_{ij} \\ -MZ_{ij} \leq Q_{ij} \leq MZ_{ij} \\ 0 \leq I_{ij}^2 \leq MZ_{ij} \end{cases} \quad (26)$$

$$U_{i,\min}^2 \leq U_i^2 \leq U_{i,\max}^2 \quad (27)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ U_i^2 - I_{ij}^2 \end{matrix} \right\|_2 \leq I_{ij}^2 + U_i^2 \quad (28)$$

式中: P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间传输的有功功率和无功功率; $P_{\text{Load},i}$ 和 $Q_{\text{Load},i}$ 分别为节点 i 上用户所消耗的有功和无功负荷; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为 i 、 j 之间导线的电阻和电抗; I_{ij} 为 i 、 j 之间导线的电流; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 处的电压值; $U_{i,\max}^2$ 和 $U_{i,\min}^2$

分别为节点 i 处的电压最大、最小值的平方； $I_{\max}^2$ 为配电网线路电流最大值。

由于重构和孤岛模型有大量的 0-1 变量以及二次约束与二次目标函数，是一个混合整数非线性规划问题，无法应用常规解法对其求解。因此本文选用二阶锥松弛技术^[25]对该模型电压、电流、功率的关系进行优化松弛。

3.2.5 储能约束

$$\begin{cases} E_{ssi}^{t+1} = E_{ssi}^t + P_{ch}^t \eta_{ch} \Delta t - P_{dch}^t \Delta t / \eta_{dch} \\ E_{ssi, \max} \times 10\% \leq E_{ssi}^t \leq E_{ssi, \max} \times 90\% \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \gamma_{i, dch}^t + \gamma_{i, ch}^t \leq 1 \\ 0 \leq P_{ch}^t \leq \gamma_{i, ch}^t P_{i, ch, \max} \\ 0 \leq P_{dch}^t \leq \gamma_{i, dch}^t P_{i, dch, \max} \end{cases} \quad (30)$$

式中： $t \in [2, N]$ ， E_{ssi}^t 为在 t 时段 i 节点储能装置的剩余容量大小； η_{ch} 和 η_{dch} 分别为储能装置的放电与充电效率； P_{ch}^t 和 P_{dch}^t 分别为在 t 时段储能装置的放电与充电功率； $E_{ssi, \max}$ 为 i 节点储能装置能储存电量的最大值； $\gamma_{i, dch}^t$ 和 $\gamma_{i, ch}^t$ 分别为 t 时段 i 节点储能装置的放电、充电状态，相互约束，不能同时兼备充电与放电，为 0-1 变量； $P_{i, ch, \max}$ 和 $P_{i, dch, \max}$ 分别为 i 节点储能装置能给配电网发出与吸收的最大功率。

3.2.6 分布式电源约束

$$\begin{cases} P_{i, DG, \min} \leq P_{i, DG} \leq P_{i, DG, \max} \\ 0 \leq Q_{i, DG} \leq P_{i, DG, \max} \tan \phi \end{cases} \quad (31)$$

式中： $P_{i, DG, \min}$ 和 $P_{i, DG, \max}$ 分别为节点 i 上分布式电源的有功出力的最小值和最大值； $P_{i, DG}$ 和 $Q_{i, DG}$ 分别为节点 i 上分布式电源的有功功率出力和无功功率出力； ϕ 为功率因数角，取其上限为定值。

3.2.7 可控负荷约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i, de} \leq P_{i, L} \\ 0 \leq Q_{i, de} \leq Q_{i, L} \end{cases} \quad (32)$$

式中： $P_{i, de}$ 和 $Q_{i, de}$ 分别为节点 i 的有功功率、无功功率可控负荷； $P_{i, L}$ 和 $Q_{i, L}$ 分别为节点 i 的有功功率、无功功率负荷。

4 求解方法

本文采用基于改进粒子群算法的维修团队与灵活资源相配合模型的求解流程。

4.1 粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种基于群体智能概念的优化算法^[26]。它是由英

国科学家 Eberhart 和 Kennedy 在 1995 年提出的一种大量粒子在搜索空间中模拟鸟类或其他生物群体行为的模拟算法。在 PSO 中，每个粒子被视为解决优化问题的一个解决方案，每个粒子的位置和速度是其状态的两个特征，通过多次迭代来寻求最优解。其粒子更新位置和速度方式如下。

$$v_{ai}^{k+1} = wv_{ai}^k + c_1 r_1 (p_{ai}^k - x_{ai}^k) + c_2 r_2 (g_a^k - x_{ai}^k) \quad (33)$$

$$x_{ai}^{k+1} = x_{ai}^k + v_{ai}^{k+1} \quad (34)$$

式中： w 为惯性权重； c_1 、 c_2 为学习因子； r_1 、 r_2 为 $(0, 1)$ 之间的随机数； p_{ai}^k 为第 k 次迭代后第 i 个粒子最优位置向量中的第 a 维分量； g_a^k 为第 k 次迭代后种群最优位置向量的第 a 维分量。

尽管粒子群优化算法在许多优化问题中表现卓越，但它也存在一些缺陷和局限性。例如，算法容易导致种群多样性快速下降，从而陷入局部最优解；惯性权重的选择存在一定的局限性；此外，解集的分布性较差，影响了算法的整体性能。为了解决这些问题，本文对粒子群优化算法进行了相应的改进。

4.2 改进粒子群算法

4.2.1 自适应的惯性权重与学习因子

在粒子群算法中惯性权重对收敛性能具有重大影响，常用的惯性权重取值方式为随着迭代次数的增多而减小而学习因子固定不变，可是这种方法没有考虑到粒子自身特性， w 、 c_1 、 c_2 数值大小和缺乏指导，所以作出如下改变。

$$X_i^k = \frac{1}{(x_{\max} - x_{\min})A} \sum_{a=1}^A |g_a^k - x_{ai}^k| \quad (35)$$

$$w_i^k = w_{chu} - (w_{chu} - w_{zhong})(X_i^k - 1)^2 \quad (36)$$

$$\begin{cases} c_1 = c_{\max} - (c_{\max} - c_{\min}) \frac{k}{T_{\max}} \\ c_2 = c_{\min} + (c_{\max} - c_{\min}) \frac{k}{T_{\max}} \end{cases} \quad (37)$$

式中： A 为空间维数值； w_i^k 为迭代 k 次时的第 i 个粒子的惯性权重值； w_{chu} 、 w_{zhong} 分别为初始和终止时的惯性权重值； $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为粒子变量的最大、最小值； $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 分别为学习因子的最大、最小值； $T_{\max}$ 为最大迭代数量。通过以上方法，可以很好的体现负荷粒子位置与种群最优位置的关系，当粒子位置与种群最优位置离的远时， w 、 c_1 、 c_2 数值取较大的值，可以使粒子具有较好的全局搜索能力；而当粒子位置与种群最优位置离的近时， w 、

c_1 、 c_2 数值取较小的值,可以使粒子具有较好的局部搜索能力。

4.2.2 基于动态密集距离的非劣解集

粒子群算法在进行目标求解时,单目标的全局最优解可以通过简单的粒子适应度函数排序,即可选出,而多目标的全局最优解,每次迭代后得到的均为一组互不支配的 Pareto 解集,所以需对这 Pareto 解集进行联系,并择优录取。改进粒子群算法的伪代码如表2所示。

表2 IMPSO算法伪代码

Tab. 2 IMPSO algorithm pseudo code

输入:种群规模 N ;变量维数 A ;最大迭代次数 $T_{\max}$
输出:全局最优解(移动应急电源车的位置 a_1, a_2)
初始化种群
记录移动应急电源车不同时刻的位置,各目标函数的最大最小值。
while($t < T_{\max}$)
for $i = 1:N$
计算各粒子下的目标函数值
end
通过动态密集距离筛选更新移动应急电源车群体最佳的位置及群体最优解;
根据式子更新移动应急电源车的位置。
end
return 移动应急电源车的全局最优位置

本文采用动态密集距离^[27]的方法,在每次迭代求解后,对非劣解集进行更新,然后以密集距离 $I(x_i)$ 进行排序,去除密集距离最小的解,再选取密集距离前10%的任意一组作为多目标函数下的全局最优解集:

$$I(x_i) = \frac{\left| \left[f_1(x_j) - f_1(x_k) \right] \right|}{f_{1\max}} + \frac{\left| \left[f_2(x_j) - f_2(x_k) \right] \right|}{f_{2\max}} \quad (38)$$

式中: x_j 、 x_k 为距离 x_i 最近的两个粒子; $f_m(x_j)$ 为粒子 x_j 第 m 个目标函数; $f_{m\max}$ 为所有粒子第 m 个目标函数的最大值。

5 实例分析

本文以南方某城市海岛区域的配电网为例,并进行适当修改,通过蒙特卡洛方式生成一组台风数据,从5点登陆开始影响配电网,离开时间为8点,并造成5-6、9-10、11-12、13-14、11-19、26-27线路发生故障,其台风下的故障网络拓扑图如图5所示。

图5中被红色斜杠穿过的线路为受台风影响下

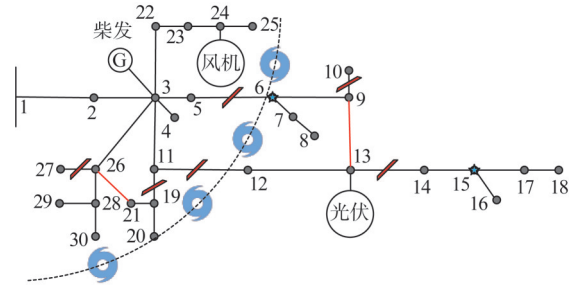


图5 台风影响下配电网拓扑图

Fig. 5 Topology diagram of distribution network under typhoon influence

的故障线路,此时在分布式电源的作用下形成许多微电网拓扑块,具体如图6所示。

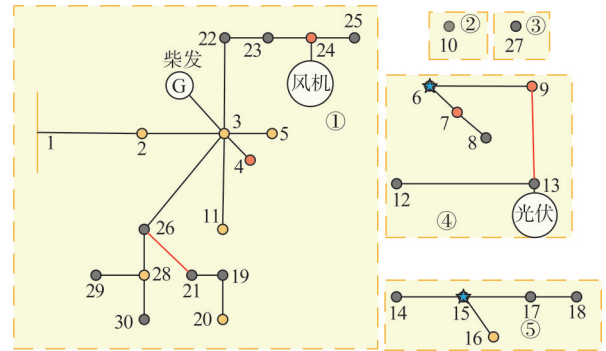


图6 故障下微电网拓扑块

Fig. 6 Topology blocks of microgrids under faults

本配电线路的网络总有功功率负荷为38 931 kW,无功功率为24 103 kvar,典型日负荷曲线如图7所示。系统额定电压为10.5 kV,节点电压允许波动范围为0.95~1.05 p. u.。

在此故障情况下,配备移动应急电源车2台并且容量均为500 kW,并且移动应急电源车调配配

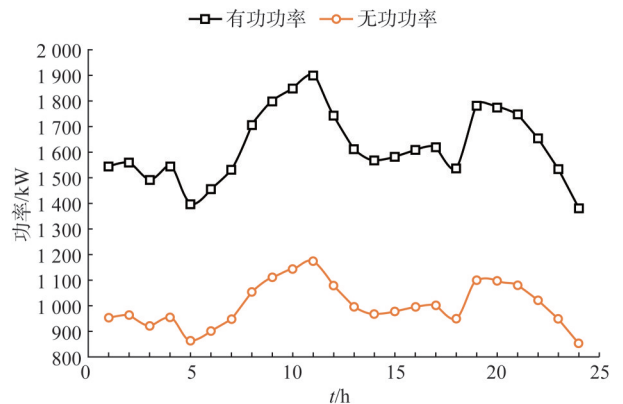


图7 典型日负荷曲线

Fig. 7 Typical daily load curves

合线路维修团队的维修情况，每 2 个时间段内做一次位置变更决策；6 和 15 处的储能分别为 1 500 kW 和 1 000 kW，而且已储容量在 90 %，每个时间段最多输出有功功率 300 kW；其风电和光伏的出力如图 8 所示。

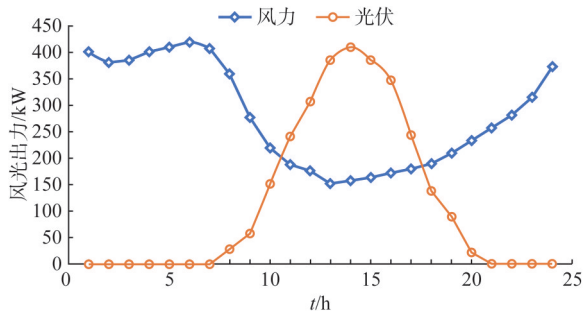


图 8 风电、光伏出力曲线

Fig. 8 Output curves of wind and photovoltaic power

通过比对不同调控模式下的负荷损失成本和电压稳定情况体现改进粒子群算法的优越性，可行性。

调控模式 1：无移动应急电源车等灵活资源参与下的协同优化调控。

调控模式 2：有移动应急电源车等灵活资源参与下的协同优化调控并使用传统粒子群算法。

调控模式 3：有移动应急电源车等灵活资源参与下的协同优化调控并使用改进粒子群算法。

调控模式 4：文献[9]中所提出的使用离散细菌群体趋药性算法求解应急电源车调度和抢修顺序协同优化调度模型。

不同调控模式下的的负荷损失成本和电压稳定情况对比如表 3 所示。

在单商品流理论的辐射状约束下，具体各节点的负荷损失率如图 9 所示，其中(a)、(b)、(c)、(d)分别为模式 1、2、3、4 情况下的节点负荷损失率情况。

通过表 3 和图 9(a)和(c)可以看出，在有、无移动应急电源车等灵活资源参与的优化调控下，在没有风电光伏、储能、移动应急电源车等灵活资源，只靠线路维修和主网的作用下，对配电网造成的负荷损失非常严重，也不能保证重要负荷的功率支撑、但由于为主网供电，因此电压偏移量较小。而在有移动应急电源车等灵活资源的调控下，在出现大规模线路故障时，对配电网重要负荷调控支撑

表 3 负荷损失成本和电压稳定性的对比

Tab. 3 Comparison of load loss costs and voltage stabilities

调控模式	移动应急电源车布局点	线路维修顺序	负荷损失情况/kW	电压偏移量/kV
模式 1		①11-12、13-14②9-10、26-27③11-19、5-6	1 886.76	0.253 0
模式 2	①8、16②10、27③10、27	①11-12、13-14②9-10、5-6③11-19、26-27	191.253 5	0.403 4
模式 3	①8、14②10、27③10、18	①5-6、13-14②9-10、26-27③11-12、11-19	191.242 9	0.388 4
模式 4	①18、7②27、7③27、7	①5-6、13-14②9-10、11-19③11-12、26-27	186.344 8	0.676 9

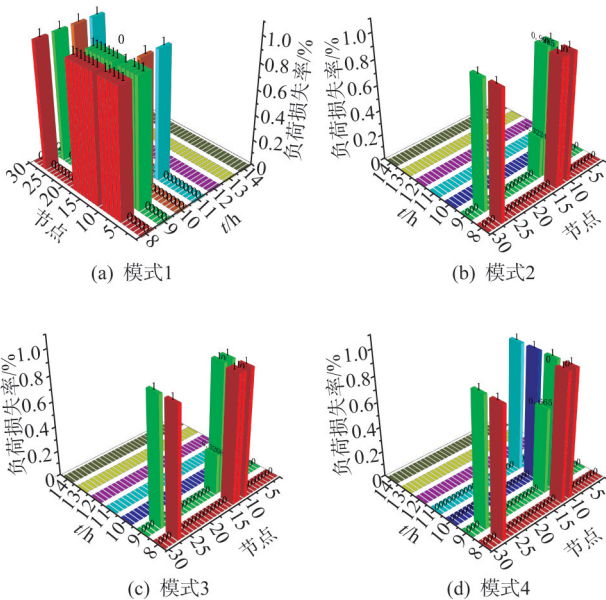


图 9 各模式下各节点的负荷缺失率

Fig. 9 Load loss rate of each node in each mode

作用，可以实现重要负荷 100 % 供电的同时，减少其他负荷损失情况。本文方法中在故障时间内受影响拓扑块具体的灵活资源调控供应情况如图 10 所示。

模式 2、3、4 的移动应急电源出力和电压分布情况如图 11—12 所示。其中图 11 的(a)、(b)、(c)分别为模式 2、3、4 的移动应急电源出力情况；图 12(a)、(b)、(c)分别为模式 2、3、4 的电压分布情况。

通过对比表 3 中模式 2、3、4 和图 13 中模式 2、3、4 的收敛曲线可以看出，在求解最优结果方面，

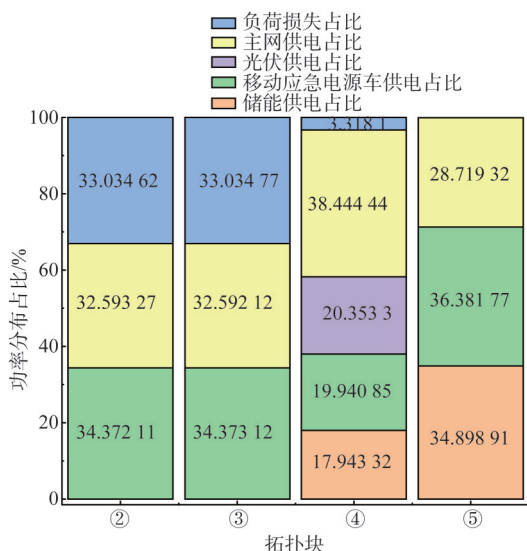


图10 拓扑块功率分布占比

Fig. 10 Topology block power distribution ratios

模式2与4分别陷入了早熟状态,未求得负荷损失最小和电压偏移的综合最优情况,而本文的IMPSO算法在最优结果的收敛速度上是优于传统PSO算法和DBCC算法的,且达到了该故障情况下的最优调

度结果。

6 结论

在台风天气影响下,海岛受地理位置的制约,外部主网供电更容易受影响,而形成孤岛运行状态,从而造成更大的灾害影响,因此如何保证海岛微电网的可靠并且经济性运行尤为重要。本文通过南方某城市的海岛区域作为实验例子,考虑灵活资源、重构、线路维修等情况,得到了如下结论。

1)通过采用蒙特卡洛的方式,有效模拟实际配电网在遭受台风灾害时的线路故障场景,并考虑海岛地区可再生能源的丰富性,充分应用到灾害后的配电网故障恢复中,比如有无移动应急电源车、风电光伏、储能等灵活资源在大规模故障时协同调控下的负荷损失情况,并在算例中可知在大规模故障时灵活资源的出力提供占比情况,体现灵活资源在故障情况应急化处理的重大负荷支撑作用,更贴近电网实际运行的特点。

2)对比改进PSO算法、传统PSO算法和DBCC

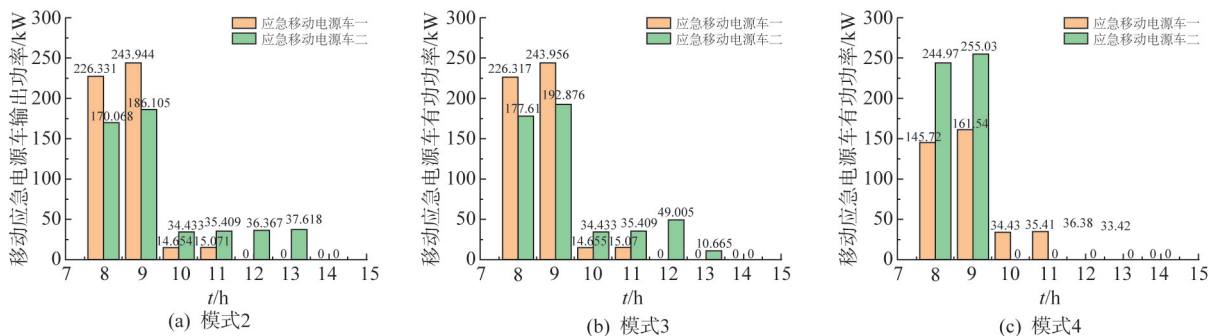


图11 模式2—4下移动应急电源车出力

Fig. 11 Mobile emergency power vehicle outputs under mode 2—4

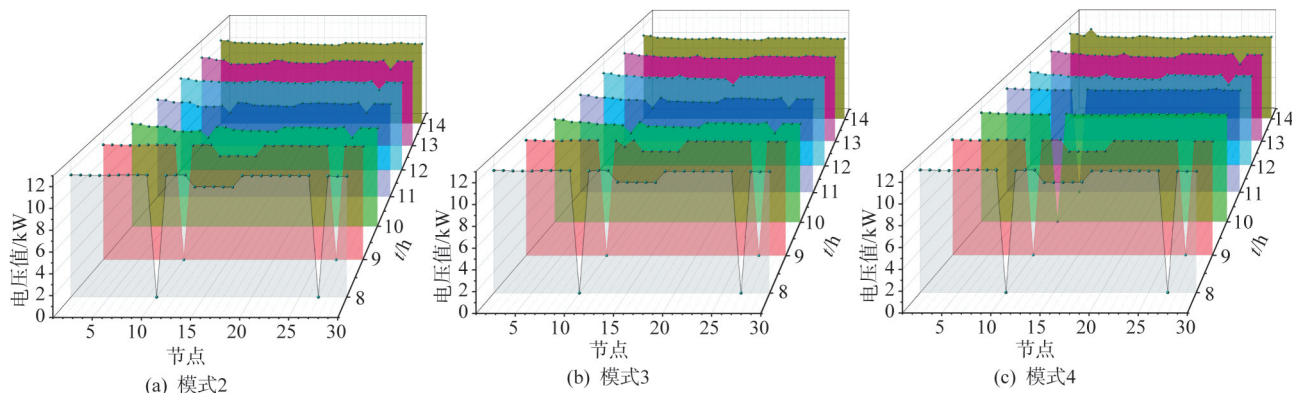


图12 模式2—4下配电网各节点调控电压情况

Fig. 12 Operating voltages of each node in distribution network under 2—4

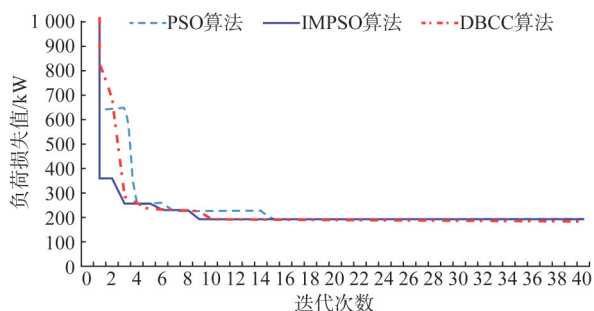


图 13 不同算法的寻优收敛曲线

Fig. 13 Optimization convergence curves of different algorithms

算法在本文的模型求解收敛结果, 可以知道本文改进算法在通过对算法中的惯性因子和学习因子进行优化求得全局最优解, 避免陷入局部最优解, 提高该算法的求解精度和全局寻优能力具有不错的效果。将改进粒子群算法运用到实际算例中, 表明该优化调度模型的可行性和有效性。

后续研究将继续开展对大规模海岛群方面的灵活资源应急化调度研究, 考虑电动汽车在微网这方面的作用, 探索更贴近现实生活的灵活资源优化调度方法。

参考文献

- [1] 黄冬梅, 吕嘉欣, 时帅, 等. 计及需求响应的海岛微电网群优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 88-98. HUANG Dongmei, LÜ Jiaxin, SHI Shuai, et al. Optimal operation of island microgrid clusters considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 88-98.
- [2] 汤耀景, 林雅, 张彩友, 等. 考虑台风动态过程的电网故障路径分析方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(2): 119-126. TANG Yaojing, LIN Ya, ZHANG Caiyou, et al. An analysis method of power grid failures path considering dynamic typhoon process[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 119-126.
- [3] 高降宇, 陈蓓, 黄帅博. 考虑主从博弈的远洋海岛微网能量管理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 1-9. GAO Xiangyu, CHEN Bei, HUANG Shuaiibo. Energy management strategy for pelagic island microgrid considering leader-follower game[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2023, 35(2): 1-9.
- [4] GUO S, WEI R, LIANG Y, et al. Review on optimal dispatch considering power system risk under typhoon disaster [C]//2021 5th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), December 02-04, 2021, Xiamen, China. New York: IEEE, 2021: 214-219.
- [5] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29, 83. WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29, 83.
- [6] 姜涛, 唐少南, 李雪, 等. 应对台风影响的海岛微电网韧性全过程提升[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6625-6641. JIANG Tao, TANG Shaonan, LI Xue, et al. Resilience boosting strategy for island microgrid clusters against typhoons [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6625-6641.
- [7] 于艾清, 金彪, 王育飞. 台风天气下提升配电网韧性的储能规划策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(8): 60-67. YU Aiqing, JIN Biao, WANG Yufei. Energy storage planning strategy for improving resilience of distribution network under typhoon weather [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2022, 34(8): 60-67.
- [8] 王钰山, 邓晖, 王旭, 等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 42-51. WANG Yushan, DENG Hui, WANG Xu, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 42-51.
- [9] 卢志刚, 高启明, 赵号, 等. 配电网多故障抢修中应急电源车的优化调度[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 82-92. LU Zhigang, GAO Qiming, ZHAO Hao, et al. Optimal dispatching of emergency power supply vehicle in multi fault repair of distribution network [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(10): 82-92.
- [10] WANG Y, HANG T, LI X, et al. A resilience assessment framework for distribution systems under typhoon disasters [J]. IEEE Access, 2021(9): 155224-155233.
- [11] ZHU S, HOU H, ZHU L, et al. An optimization model of power emergency repair path under typhoon disaster [J]. Energy Reports, 2021(7): 204-209.
- [12] 汪寅乔. 台风环境下电力系统多源协调调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [13] 黄大为, 李子安, 孔令国. 台风灾害下提升电网韧性的实时优化调度策略[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(3): 112-120. HUANG Dawei, LI Zi'an, KONG Lingguo. Real-time optimal dispatching strategy for improving power grid resilience under typhoon disaster [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(3): 112-120.
- [14] 何小良, 章雷其, 张俊峰, 等. 灾害条件下移动应急电源组网和分散控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 107-112, 149. HE Xiaoliang, ZHANG Leiqi, ZHANG Junfeng, et al. Formation scheme and decentralized control of microgrids consisting of mobile emergency power sources during natural disasters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 107-112, 149.
- [15] ZHANG J, JIANG F, ZHAO Y, et al. An improved hierarchical and decentralized control strategy for emergency power supply during disaster [C]//2018 International Conference on Power System Technology, November 6-8, 2018, Guangzhou, China. New York: IEEE, 2018.
- [16] 杨万康, 尹宝树, 伊小飞, 等. 基于 Holland 风场的台风浪数值计算[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 28-34. YANG Wankang, YIN Baoshu, YI Xiaofei, et al. Numerical

- calculation and research of typhoon waves based on Holland wind field[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 28-34.
- [17] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [18] 暴英凯, 王越, 唐俊熙, 等. 序贯蒙特卡洛方法在电力系统可靠性评估中的应用差异分析[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1189-1195.
- BAO Yingkai, WANG Yue, TANG Junxi, et al. Analysis on differences of applying sequential Monte Carlo methods in power grid reliability assessment[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1189-1195.
- [19] 刘冲. 极端天气情况下配电网弹性提升和优化配置模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [20] 刘小龙, 李欣然, 刘志谱, 等. 基于负荷重要性和源-荷互补性的离网系统终端电/热/冷负荷投切策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 552-564.
- LIU Xiaolong, LI Xinran, LIU Zhipu, et al. Research on power/heating/cooling load switching strategy of off-grid system based on load importance and source load complementarity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 552-564.
- [21] 张煜, 牟龙华, 王蕴敏, 等. 计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 104-110.
- ZHANG Yu, MU Longhua, WANG Yunmin, et al. Optimal dispatching of an active distribution network considering dynamic regulation of controllable load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 104-110.
- [22] 高鹏. 极端天气下的主动配电网故障恢复方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [23] DING T, LIN Y, LI G, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4145-4147.
- [24] 姚艳, 许家玉, 崔勤越. 基于DistFlow的含分布式电源配电网优化重构模型[J]. 能源工程, 2020(1): 12-16.
- YAO Yan, XU Jiayu, CUI Qinyue. Study on optimization reconfiguration modelling for distribution network with distributed generators based on DistFlow equations[J]. Energy Engineering, 2020(1): 12-16.
- [25] 魏伟, 季文文, 黄旭, 等. 含高比例分布式电源配电系统的参数辨识方法[J]. 电力建设, 2025, 46(5): 96-111.
- WEI Wei, JI Wenwen, HUANG Xu, et al. Parameter identification method for distribution systems with a high proportion of distributed renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(5): 96-111.
- [26] 彭寒梅, 尹棠, 肖千皓, 等. 高比例分布式电源配电网中低压柔性互联协调规划[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 117-129.
- PENG Hanmei, YIN Tang, XIAO Qianhao, et al. Coordinated planning of medium-voltage and low-voltage flexible interconnection for distribution networks with high proportion of distributed generation[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 117-129.
- [27] 叶亮, 吕智林, 王蒙, 等. 基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 27-37.
- YE Liang, LÜ Zhilin, WANG Meng, et al. Bi-level programming optimal scheduling of ADN with a multi-microgrid based on optimal power flow[J]. Power Systems Protection and Control, 2020, 48(18): 27-37.
- [28] 马智强, 马胜国, 陈亮, 等. 基于粒子群算法的新能源微电网局部停电负荷调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(4): 112-117, 126.
- MA Zhiqiang, MA Shengguo, CHEN Liang, et al. Research on the local outage load scheduling of the new energy microgrid based on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4): 112-117, 126.
- [29] 蔡百科, 王思成, 袁小明. 基于粒子群算法的变换器并网系统振荡初期交流信号幅频调制特征解调方法[J]. 南方电网技术, 2026, 20(4): 65-75, 95.
- CAI Baige, WANG Sicheng, YUAN Xiaoming. Demodulation method for amplitude-frequency modulation characteristics of AC signals in initial stage of converter interfaced system oscillation based on particle swarm optimization algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(4): 65-75, 95.
- [30] 李婷. 基于粒子群算法的蒸汽发生器多目标优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.

收稿日期: 2024-09-15; 网络首发日期: 2024-12-13

作者简介:

郭乾(1994), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电网调度运行控制, 835244483@qq.com;

吴龙腾(1988), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为配电网调度运行控制, 872535891@qq.com;

吴杰康(1965), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制。