

# 面向台风天气下主动配电网韧性提升的改进分级减载策略

王振浩<sup>1</sup>, 罗剑潇<sup>1</sup>, 成龙<sup>1</sup>, 李国庆<sup>1</sup>, 顾欣然<sup>2</sup>

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;  
2. 国网辽宁省电力有限公司锦州供电公司, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:** 为有效提升台风天气下主动配电网的韧性, 提出同时考虑分级减载和同级负荷削减的主动配电网韧性提升方法。首先, 综合考虑台风天气下强风和暴雨对配电网的影响, 通过建立 Batts 台风风场模型和暴雨压强模型实现了对配电网元件故障率的量化分析, 进而采用蒙特卡洛(Monte Carlo)法模拟台风天气下的主动配电网故障场景, 并利用系统信息熵进行场景筛选, 确定故障规模。其次, 提出了同时考虑最大化一级负荷存活量与故障孤岛中同级负荷削减逻辑的主动配电网分级减载策略。然后, 提出包括综合鲁棒性、一级负荷损失速度和损失率、总负荷曲线面积缺失比的 4 个主动配电网韧性评估指标, 并通过遗传-粒子群融合算法(hybrid GA and PSO algorithm, GA-PSO)对配电网韧性评估模型进行高效求解。最后, 基于 Matlab 2020a 仿真平台建立某实际配电网和 IEEE 118 节点测试系统算例, 验证了提出的考虑分级减载的台风天气下主动配电网韧性评估方法的正确性和有效性。

**关键词:** 主动配电网; 韧性评估; 分级减载; 台风; 遗传-粒子群融合算法

## Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon

WANG Zhenhao<sup>1</sup>, LUO Jianxiao<sup>1</sup>, CHENG Long<sup>1</sup>, LI Guoqing<sup>1</sup>, GU Xinran<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. Jinzhou Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** To improve the resilience of an active distribution network in a typhoon, a resilience enhancement method for the network considering both hierarchical load reduction and hierarchical load reduction is proposed. First, the typhoon with strong wind and a rainstorm is considered for its influence on the distribution network. The Batts typhoon wind field model and a rainstorm pressure model is established to implement the quantitative analysis of the distribution network element failure rate. Then the Monte Carlo method is used to simulate the active distribution network fault scenarios in a typhoon, and a system information entropy for scenario selection is used to determine the fault scales. Second, a graded load shedding strategy for the active distribution network is proposed, one which considers both the maximum first-level load survival and the load shedding logic at the same level in the fault islands. Next, four active distribution network resilience evaluation indices are proposed, i.e. comprehensive robustness, first-level load loss speed, loss rate and total load curve area loss ratio. The hybrid GA and PSO algorithm is used to efficiently analyze the distribution network resilience assessment model. Finally, based on the Matlab 2020a simulation platform, an actual distribution network and an IEEE 118-node test system are established to verify the correctness and effectiveness of the proposed active distribution network resilience assessment method considering graded load shedding in a typhoon.

This work is supported by the Joint Project of Commission of National Natural Science Foundation of China-Smart Grid of State Grid Corporation of China (No. U2066208).

**Key words:** active distribution network; resilience evaluation; graded load reduction; typhoon; GA-PSO algorithm

## 0 引言

随着全球气候变暖, 台风、地震、冰灾等自然灾害日益频发, 严重影响电力系统的安全可靠运行<sup>[1-5]</sup>。尤其对于直接面向电力用户的配电网而言, 由于其点多面广, 拓扑结构复杂且运行方式灵活多变等典型特征, 更易受到极端天气的破坏。各类自然灾害将严重影响工业和居民用户的生产生活, 并带来不同程度的经济损失和社会问题。因此, 国内外学者针对配电网应对极端天气的能力开展了大量研究, 并借鉴了“韧性”的概念用来评估配电网在这种“低概率-多故障”事件的防御和恢复到正常运行状态的能力<sup>[6-7]</sup>。韧性在物理学中表示材料在塑性形变和断裂过程中吸收能量的能力。从配电网角度来看, 韧性可以阐述为配电网面对极端天气带来的严重扰动和恶劣影响, 是否有能力通过调整自身运行方式来降低故障中的负荷损失, 并且在不受极端天气影响后能最大程度恢复到原来的供电水平, 特别是对配电网中关键负荷的尽可能保留和恢复。

目前对于配电网韧性方面的研究主要从以下三个方面展开。一是极端天气对配电网韧性的影响。文献[8]从单个灾害下多种元件故障出发, 考虑了台风和暴雨对配电网在时空上的影响, 建立了时空预警框架。文献[9]考虑了更小发生概率的复合灾害, 分析了不同自然灾害在形式、空间、时间维度的演化规律, 提出了自然灾害影响配电网的时空范围判别方法。文献[10]基于有限元回归分析方法对输电导线的风灾易损性进行了研究, 并采用对数正态分布的累积分布函数拟合得到各种导线材料和风攻角的易损性曲线参数。二是在配电网韧性评价指标方面。文献[11]在故障场景发生概率量化分析的基础上, 提出了额外考虑灾害持续时间和故障损失的配电网韧性综合评估指标。文献[12]提出了配电网在极端天气下故障防御和降低故障影响两个层面的韧性评估指标体系, 包括配电网防御时间、弹性恢复系数、孤岛可持续时间覆盖率和重要负荷平均中断时间 4 个具体指标。文献[13]定义了韧性评估指标集合, 这套指标集合提供了 4 个电网韧性指标, 分别用于描述韧性定义中所涉及到的适应力及恢复力。文献[14]将配电网故障时负荷曲线与正常运行时的缺失面积比作为配电网韧性指标。三是在配电网韧性评估方法方面。文献[15]以台风灾害期间配电网移动储能配置成本与经济损失最小为目标, 构建 3 层鲁棒优化模型, 对移动储能车及负荷投切实现优化组合, 增强配电网的台风灾害抵御能力。文献[16]

构建了内外层优化模型, 以联络线开关的投切指令为控制变量, 最大化负荷恢复为优化目标, 并采用近端策略优化算法求解。文献[17]基于最小恢复路径提出了配电网韧性评估方法, 用于评估配电网灾后的恢复能力。文献[18]提出了利用广度优先搜索法遍历整个配电网, 以定量研究系统的减载情况并实现韧性评估。文献[19]提出一种台风灾害下配电网两阶段应急抢修恢复优化策略, 有效提高配电网灾后复电速度。文献[20]针对恶劣天气下配电网应对极端事故的系统韧性提升问题, 提出了计及复合自然灾害时空相关性的配电网储能电站多层规划方法。文献[21]在配电网韧性评估中以最小化切负荷量为目标的最优潮流建立系统响应模型, 模拟灾害下电网调度人员进行发电机出力调整和切负荷操作过程, 以此降低线路的潮流过载。但这些文献在对负荷进行分级减载时, 并没有考虑同等级负荷之间的削减逻辑。

在“双碳”目标和新型电力系统建设背景下, 主动配电技术快速发展, 其最主要特征便是大量可控分布式电源(distributed generator, DG)接入, 这从根本上改变了传统配电网的运行和控制方式<sup>[22]</sup>, 在应对极端灾害天气时, 可通过主动管理和调控系统中的 DG 出力来保证对重要负荷的持续供电, 从而提升配电网的整体韧性<sup>[23]</sup>。

综合以上分析, 本文以主动配电网为研究对象, 提出了同时考虑分级减载和同级负荷削减的主动配电网韧性提升方法。首先, 基于 Batts 台风风场和暴雨压强构建配电网元件故障模型, 采用 Monte Carlo 法模拟故障场景, 并利用系统信息熵进行场景筛选, 确定故障规模; 其次, 同时考虑最大化重要负荷保留量与孤岛中同级负荷之间的负荷削减逻辑, 提出一种新的分级减载策略; 然后从不同角度构建 4 个评估指标, 并通过在传统粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)的基础上引入遗传算法(genetic algorithm, GA)的交叉操作, 实现了对韧性评估模型的高效求解; 最后, 通过某实际配电网算例和 IEEE 118 节点测试系统算例, 验证了所提方法的正确性和有效性。

## 1 台风天气下配电网故障建模与故障场景集选取

### 1.1 台风天气下配电网故障建模

#### 1.1.1 台风风场模型

本文采用 Batts 模型来模拟台风的过境过程<sup>[24]</sup>, 台风中心到外围风速变化示意图如图 1 所示。图中:

$R_{\max}$  为台风中心  $O$  到最强烈风带之间的距离, 即最大风速半径;  $V_{R_{\max}}$  为最大风速半径处的风速;  $V_{\text{in}}$ 、 $V_{\text{out}}$  分别为模拟地点在最大风速半径内部和外部的风速;  $\Delta p$  为台风中心与外围气压之间的压差, 其计算方法详见文献[24];  $r$  为配电线路与台风中心间的距离。由此, 将台风风场各点的风速  $V$  定义为

$$V = \begin{cases} V_{\text{in}} = V_{R_{\max}} r / R_{\max}, & r \leq R_{\max} \\ V_{\text{out}} = V_{R_{\max}} (R_{\max} / r)^x, & r > R_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 任意位置的风速  $V$  的方向定义为逆时针切向方向;  $x$  为台风强度沿径向衰减系数, 一般取值在 0.5~0.7 之间, 本文取 0.6。

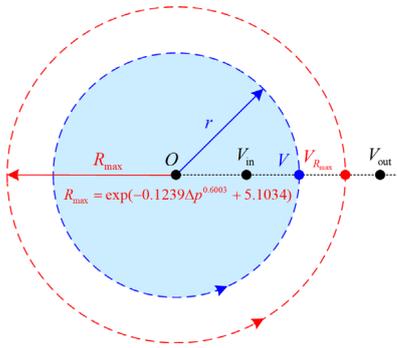


图 1 Batts 台风风场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Batts typhoon field

### 1.1.2 暴雨压强模型

台风天气一般都伴随着强降雨, 大多数文献仅考虑了配电网元件受风荷载的影响, 实际上暴雨对配电网线路和杆塔的荷载作用也不能忽略。本文根据文献[25]推导出的雨荷载模型来量化暴雨对配电网元件的影响。雨压强可表示为

$$P_{\text{rain}} = \begin{cases} P_{\text{th}}(V, D_r) = k \rho_r n_r V_{\text{th}}^3 D_r^3 \\ P_{\text{rv}}(V, D_r) = k \rho_r n_r V_{\text{rv}}^3 D_r^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{th}}$ 、 $P_{\text{rv}}$  分别为降雨产生的水平和垂直方向的雨压强;  $D_r$  为雨滴直径;  $\rho_r$  为雨滴密度, 取  $\rho_r = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $n_r$  为雨滴谱;  $k$  为影响因子, 取  $k = 102$ ;  $V_{\text{th}}$ 、 $V_{\text{rv}}$  分别为雨滴落在配电网元件上的水平和垂直方向瞬时速度, 参数具体计算方法详见文献[26]。

### 1.1.3 元件故障率模型

配电网中, 易遭受台风破坏的主要元件包括导线和杆塔, 通过元件自身强度和所受荷载之间的大小关系可得到元件处于可靠状态、极限状态和失效状态的概率, 因此将元件功能函数  $Z$ <sup>[27]</sup> 定义为

$$Z = R - S \quad (3)$$

式中:  $R$  为元件自身强度;  $S$  为荷载效应, 如导线

应力和杆塔弯矩。由于  $Z$  为连续函数, 元件自身强度与其所受荷载相等的概率为零, 因此元件仅存在可靠和失效状态。当  $Z < 0$  时, 元件处于不可靠运行状态, 即故障状态, 其概率为

$$P_{L,T} = P\{Z < 0\} \quad (4)$$

式中,  $P_{L,T}$  表示导线或杆塔的不可靠度, 即故障率。下面分别对导线和杆塔的故障率进行具体分析。

#### 1) 台风下的导线荷载

忽略沿导线方向风荷载, 在水平风速  $V$  作用下, 单位长度导线上的垂直风荷载  $\vec{F}_{\text{wind}}$  为

$$\vec{F}_{\text{wind}} = (V^2 / 1.6) D \alpha \mu_{\text{sc}} \mu_z L_{\text{H}} \sin^2 \theta \quad (5)$$

式中:  $D$  为导线外径;  $\alpha$  为风压不均匀系数, 按国家标准《建筑结构荷载规范: GB50009-2012, 2006》中的第 7.1.2 条确定, 取  $\alpha = 0.61$ ;  $\mu_{\text{sc}}$  为风荷载体型系数, 当  $D < 17 \text{ mm}$  时取  $\mu_{\text{sc}} = 1.2$ , 当  $D \geq 17 \text{ mm}$  时取  $\mu_{\text{sc}} = 1.1$ ;  $\mu_z$  为风压高度变化系数, 取  $\mu_z = 1.0$ ;  $L_{\text{H}}$  为杆塔水平档距;  $\theta$  为风向与导线方向夹角。

另外, 台风天气下暴雨对单位长度导线的水平和垂直荷载  $\vec{F}_{\text{th}}$ 、 $\vec{F}_{\text{rv}}$  根据文献[26]的 2.1 节内容确定。则单位长度导线的台风和降雨综合荷载为

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{wind}} + \vec{F}_{\text{m}} + \vec{F}_{\text{th}} + \vec{F}_{\text{rv}} \quad (6)$$

式中,  $\vec{F}_{\text{m}}$  为单位长度导线的垂直荷载分量, 即由于自身重力带来的荷载。由此可得到导线截面上所受应力  $\vec{\sigma}_g$ <sup>[27]</sup>。

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》规定, 材料极限强度的概率分布宜采用正态分布<sup>[28]</sup>, 因此导线荷载不可靠度(故障率)可表示为

$$P_L = \int_0^{\sigma_g} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_1} \exp\left[-\frac{1}{2\delta_1^2}(\sigma_1 - \mu_1)^2\right] d\sigma_1 \quad (7)$$

式中:  $\mu_1$ 、 $\delta_1$  分别为导线抗拉强度均值和标准差;  $\sigma_1$  表示导线的破坏应力。

#### 2) 台风下的杆塔荷载

台风天气风雨荷载下的杆塔弯矩  $\vec{M}_T$ <sup>[26]</sup>

$$\vec{M}_T = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 \quad (8)$$

式中:  $\vec{M}_1$  为风雨荷载对杆塔产生的弯矩;  $\vec{M}_2$  为导线对杆塔产生的弯矩。

因此, 杆塔荷载不可靠度(故障率)可表示为

$$P_T = \int_0^{M_T} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_t} \exp\left[-\frac{1}{2\delta_t^2}(M_t - \mu_t)^2\right] dM_t \quad (9)$$

式中:  $M_t$  为杆塔的破坏弯矩;  $\mu_t$ 、 $\delta_t$  分别为杆塔材质的抗拉强度均值和标准差。

#### 3) 配电线路综合故障率

两变电站间的配电线路均由不定数量的杆塔和导线构成, 当任一导线或杆塔发生故障, 整条线路将失去电能传输能力。任意一条配电线路的故障率  $P_{Z,i}$  可表示为

$$P_{Z,i} = 1 - \prod_{k=1}^{m_1} (1 - P_{L,i,k}) \prod_{k=1}^{m_2} (1 - P_{T,i,k}) \quad (10)$$

式中:  $P_{L,i,k}$  为线路  $i$  的第  $k$  档导线故障概率;  $P_{T,i,k}$  为线路  $i$  的第  $k$  根杆塔故障概率;  $m_1$  和  $m_2$  分别为导线档数和杆塔数。

## 1.2 故障场景集的构建与选取

为了更加准确全面地评估配电网韧性, 本文根据配电网元件的时序故障率采用蒙特卡洛模拟法生成故障场景<sup>[29]</sup>。但由于蒙特卡洛模拟法的故障场景生成过程中所需数据量非常庞大, 有必要对故障场景进行筛选和削减, 选取典型故障场景进行计算分析。本文采用系统信息熵法来描述配电网故障的不确定度<sup>[30]</sup>, 从而达到筛选的目的。配电网的熵值  $W$  可描述为

$$W = \sum_{j \in \Omega} (-\log_2 p_{j,t}) z_{j,t}, t \in T \quad (11)$$

式中:  $\Omega$  为配电网线路集合;  $T$  为台风从开始破坏配电网到离开配电网所用的时间, 即配电网抵御台风的时间;  $p_{j,t}$  为线路  $j$  在  $t$  时刻的故障率;  $z_{j,t}$  表示线路  $j$  在  $t$  时刻是否恰好发生故障, 如果发生故障则其值为 1, 反之则为 0。由于本文不考虑在台风影响配电网期间线路发生故障后的恢复过程, 即不考虑重复故障的情况, 所以  $z_{j,t}$  在  $T$  时段内最多只能有一个时刻点为 1。根据生成场景的实际可能性约束, 每个合理场景对应的熵值都应在一定范围内, 即:

$$\begin{cases} W_{\min} \leq W \leq W_{\max} \\ \sum_t z_{j,t} \leq 1 \end{cases}, t \in T \quad (12)$$

式中,  $W_{\min}$ 、 $W_{\max}$  分别为系统信息熵的最小值和最大值。综上, 配电网韧性评估所需的故障场景集则可由式(11)和式(12)所示的熵值约束确定。

## 2 主动配电网韧性评估指标与评估方法

### 2.1 韧性评估指标

主动配电网正常运行及其在台风灾害下的负荷曲线如图 2 所示, 分别记为  $L_N(t)$  和  $L_F(t)$ 。如图 2 所示, 台风于  $t_1$  时刻登陆, 由于此时配电网线路未处于台风风场范围, 不会发生线路故障, 系统负荷还处于正常运行状态, 到  $t_2$  时刻配电网线路发生故

障, 系统不能维持原有运行状态, 台风于  $t_3$  时刻离开, 在整个台风过境期间配电网遭受台风破坏损失负荷总量为  $P^{\text{loss}}$ ;  $t_3$  时刻后配电网开始进行故障修复, 直到  $t_4$  时刻恢复正常运行。为对上述过程中主动配电网韧性的量化评估, 本文选取了鲁棒性、重要负荷供电能力以及系统整体韧性 3 个方面的评估指标, 具体如下所述。

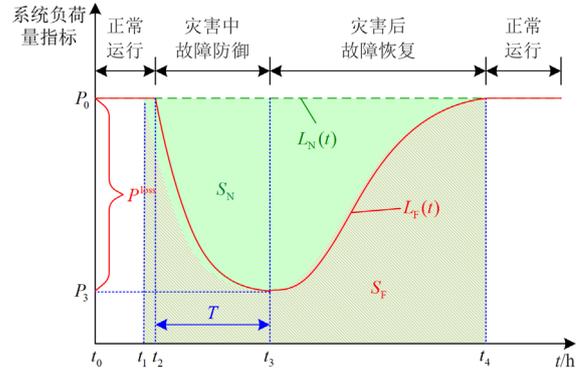


图 2 配电网负荷曲线对比示意图

Fig. 2 Comparison diagram of load curves of distribution network

1) 配电网鲁棒性是指遭遇台风时配电网自身对灾害的抵御能力。本文采用综合鲁棒性指标  $R_C$  来描述配电网防御阶段的鲁棒性, 即

$$R_C = \frac{\int_{t_1}^{t_3} L_F(t) dt}{\int_{t_1}^{t_3} L_N(t) dt} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad (13)$$

综合鲁棒性指标  $R_C$  不仅考虑了系统抵御灾害时的能力, 还考虑了系统自台风登陆后未发生负荷缺额的持续时间, 能较全面地体现系统的鲁棒性。

2) 根据负荷的重要程度将其分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。其中一级负荷要求配电网对其保证持续供电不能中断, 因此分析配电网韧性时也需要着重考虑一级负荷的相关指标。

抵御台风阶段, 可通过一级负荷的损失速度  $V_L^{\text{first}}$  和平均损失率  $R_L^{\text{first}}$  来评估配电网韧性, 即

$$V_L^{\text{first}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n_{\text{first}}} P_{i,t}^{\text{first-loss}} \quad (14)$$

$$R_L^{\text{first}} = \frac{1}{n_T} \sum_{t \in T} \sum_{i=1}^{n_{\text{first}}} \frac{P_{i,t}^{\text{first-loss}}}{P_{i,t}^{\text{first}}} \quad (15)$$

式中:  $P_{i,t}^{\text{first}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{first-loss}}$  分别为节点  $i$  在时段  $T$  内任一时刻的一级负荷量及其损失量;  $n_{\text{first}}$  为含一级负荷节点的个数;  $n_T$  为时刻数。

3) 在整个台风过境与故障恢复期间, 也可通过

与配电网正常运行时的负荷曲线面积比来评估配电网韧性, 即

$$I_{EP} = \frac{S_F}{S_N} = \frac{\int_{t_1}^{t_4} L_F(t) dt}{\int_{t_1}^{t_4} L_N(t) dt} \quad (16)$$

式中:  $S_F$  为图 2 中以红色斜线阴影标识的面积;  $S_N$  为图 2 中绿色虚线与横轴  $t_1 - t_4$  时段围成的浅绿色阴影面积。

## 2.2 考虑分级减载的主动配电网韧性评估

### 2.2.1 负荷分级削减策略

台风登陆将损坏配电网部分元件, 导致配电网形成多个源-荷孤岛, 为保证配电网中重要负荷的连续可靠供电, 需要在孤岛内 DG 出力不足时对负荷进行必要削减。因此, 以最小化负荷削减量为主要优化目标的负荷削减策略如式(17)所示<sup>[31]</sup>。

$$P_S = \min \left\{ \sum_{t \in T} \sum_{i \in \Omega_D} \omega_i (P_{i,t} - \sum_{n \in I} P_{i,n,t}) \right\} \quad (17)$$

式中:  $P_S$  为负荷削减总量;  $\Omega_D$  为配电网负荷节点集合;  $\omega_i$  为负荷等级权重, 一级负荷为 1.0、二级负荷为 0.6、三级负荷为 0.4<sup>[27]</sup>;  $P_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的负荷量;  $P_{i,n,t}$  为孤岛  $n$  中节点  $i$  在  $t$  时刻的负荷恢复量;  $I$  为配电网中的孤岛集合。

对于孤岛中不同节点之间同等级负荷削减情况, 就需要在满足主要优化目标的前提下, 以最小化配电网网损为次要目标对负荷削减策略进行优化, 其目标函数如式(18)所示。

$$\Delta S_L = \min \left\{ \sum_{j \in \Omega} \frac{\Delta P_j^2 + \Delta Q_j^2}{U_j^2} (R_j + jX_j) \right\} \quad (18)$$

式中:  $\Delta S_L$  为线路总损耗;  $\Delta P_j$ 、 $\Delta Q_j$  分别为第  $j$  段线路上损失的有功和无功功率;  $U_j$  为节点  $j$  的电压;  $R_j$ 、 $X_j$  分别为第  $j$  段线路的电阻和电抗。

考虑分级减载的主动配电网需要满足的功率平衡约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{j \in \Omega_D} P_{j,t} - \sum_{i \in \Omega_D} P_{Gi,t} - \sum_{i \in \Omega_D} P_{Si,t} = 0 \\ \sum_{j \in \Omega_D} Q_{j,t} - \sum_{i \in \Omega_D} Q_{Gi,t} - \sum_{i \in \Omega_D} Q_{Si,t} = 0 \\ 0 \leq P_{Si,t} \leq P_{j,t}, \forall i, j \in \Omega_D \\ 0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max}, \forall i \in \Omega_D \\ 0 \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max}, \forall i \in \Omega_D \\ U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max}, \forall i \in \Omega_D \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$  分别为节点  $j$  在  $t$  时刻的有功和无

功功率;  $P_{Gi,t}$ 、 $Q_{Gi,t}$  分别为节点  $i$  处 DG 在  $t$  时刻输出的有功和无功功率;  $P_{Si,t}$ 、 $Q_{Si,t}$  分别为节点  $i$  在  $t$  时刻的有功和无功削减量;  $P_{Gi,max}$ 、 $Q_{Gi,max}$  分别为节点  $i$  处 DG 的最大有功和无功出力;  $U_i^{\max}$  和  $U_i^{\min}$  分别为节点  $i$  的电压幅值上下限。

### 2.2.2 遗传粒子群融合算法

PSO 是一种模拟鸟类捕食行为的算法, 具有搜索复杂问题全局最优解的能力, 通过生成一组具有随机速度和位置的初始化粒子, 实现在个体适应度条件下的全局搜索。在搜索过程中, PSO 需要通过跟踪其局部和全局优化目标来不断更新每个粒子的速度和位置, 而随着迭代次数的增加可能导致局部最优的“早熟”现象<sup>[32]</sup>。本文通过在粒子群算法中引入 GA 的交叉操作, 形成遗传粒子群融合算法 (hybrid GA and PSO algorithm, GA-PSO), 以提高算法的全局优化能力<sup>[33]</sup>。算法具体流程如下:

1) 设置 GA 和 PSO 基本参数, 随机生成初始种群, 得到  $N$  个粒子的初始位置和速度。

2) 计算每个粒子的适应度值, 并根据适应度值大小对粒子进行排序。

3) 舍弃 1/4 适应度低的粒子, 将剩余粒子按照适应度值分成 3 等份, 取中间适应度值的 1/3 粒子进行复制, 与保留下来的粒子组成新的种群。

4) 根据精英竞争策略, 随机选择两组, 每组两个个体, 选择两组中适应度高的两个个体进行交叉和变异。假设两个个体分别为  $x^1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$  和  $x^2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$ , 则交叉后的新个体为

$$\begin{cases} x^{1,new} = \alpha_0 x^2 + (1 - \alpha_0) x^1 \\ x^{2,new} = \alpha_0 x^1 + (1 - \alpha_0) x^2 \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $\alpha_0$  为常数,  $\alpha_0 \in (0, 1)$ 。

进而对新个体进行变异。假设个体为  $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$ ,  $x_j^i \in [a_j, b_j]$ ,  $i = 1, 2$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。变异过程如式(21)所示。

$$x_{j,new}^i = \omega x_j^i + c_1 r_1 (b_j - x_j^i) + c_2 r_2 (x_j^i - a_j) \quad (21)$$

式中:  $x_j^i$  为待变异分量;  $x_j$  为上一代最优个体的第  $j$  个分量;  $\omega$  为惯性权重系数, 取 0.7298;  $c_1$  和  $c_2$  为算法学习因子, 取  $c_1 = c_2 = 1.4945$ ;  $r_1$  和  $r_2$  表示 (0,1) 内的随机数。

5) 按照 PSO 算法更新剩余两个个体的速度和位置, 更新方式如式(22)所示。

$$\begin{cases} v_{k+1} = \omega v_k + c_1 (P_{best,k} - x_k) + c_2 (G_{best,k} - x_k) \\ x_{k+1} = x_k + v_{k+1} \end{cases} \quad (22)$$





图 5 各节点的负荷峰值和负荷类型

Fig. 5 Peak load and load type of each node

### 3.1.2 配电网元件故障率仿真分析

由式(7)和式(9)可计算得到风速与导线故障率和杆塔故障率的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,导线的抗风能力明显低于杆塔,当风速分别达到 70 km/s 和 120 km/s 时,导线和杆塔的故障率将显著增大。对于导线,风速和降雨强度对其故障概率的影响结果如图 7 所示。

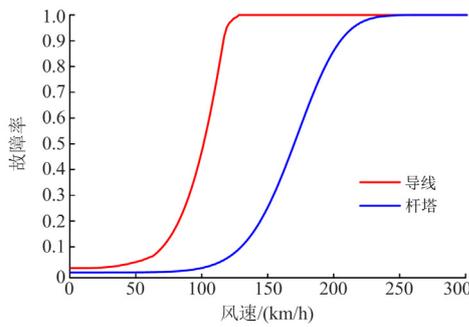


图 6 风速对杆塔和导线的影响

Fig. 6 Effect of wind speed on pylons and wires

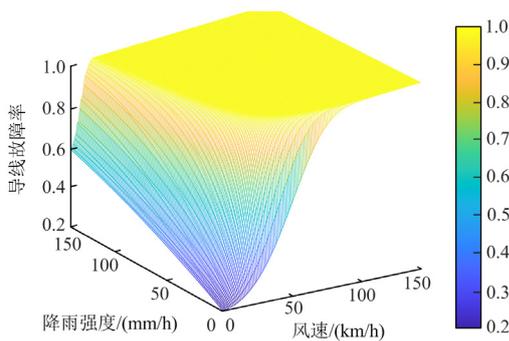


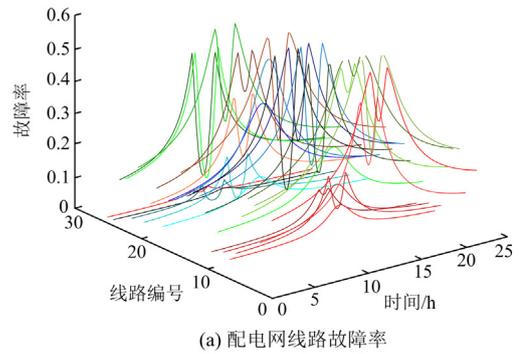
图 7 风速和降雨强度对导线的影响

Fig. 7 Effect of wind speed and rainfall intensity on wires

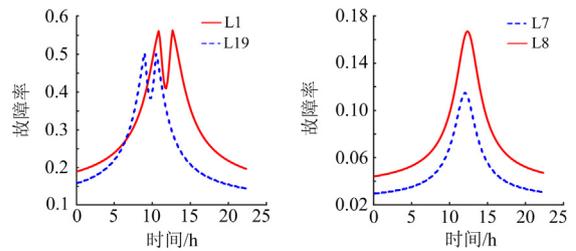
配电网中 27 条线路的时变故障率变化曲线如图 8(a)所示,图中的仿真起始 0 时刻为台风登陆时刻,在台风登陆 25 h 后该区域配电网基本不再受台风影响。结合实际地理图分析可知,配电网线路位于台风最大风速半径处时故障率最大,最大故障率线

路 4,故障率高达 58.08%。

台风逐渐接近配电网的过程中,线路所处位置的风速逐渐增大,在台风最大风速半径处,风速达到峰值,而在台风最大风速半径内,风速反而减小。以线路 L1 和 L19 为例,二者分别在台风登陆后 10.83 h 和 9 h 位于最大风速半径,当线路处于台风最大风速半径内时,根据式(1)得知此时作用在线路上的有效风速在减小;当线路离开台风最大风速半径时,线路上的有效风速又重新增大,因此对应求得的故障率曲线呈先增大再减小、再增大再减小的两个尖峰形态,与台风风速的变化趋势基本一致;由于 L19 比 L1 更早位于台风的最大风速半径处,因此 L19 比 L1 更早达到故障率最大值,如图 8(b)所示。对于线路 L7 和 L8,由于在风速达到峰值时二者所处位置仍在台风最大风速半径之外,作用在线路上的有效风速不会先下降再上升,因此线路故障率曲线呈单尖峰形态,如图 8(c)所示。



(a) 配电网线路故障率



(b) 线路L1、L19时变故障率

(c) 线路L7、L8时变故障率

图 8 配电线路的时变故障率

Fig. 8 Time-varying failure rate of distribution lines

如图 9 所示,台风天气下配电网杆塔的时变故障率变化规律与配电网导线的基本一致,但其故障率远小于配电网导线,相差了  $10^{-3}$  数量级,因此在后续的仿真分析中,可以忽略配电网倒塔对故障场景的影响。

### 3.1.3 故障规模分析

为验证蒙特卡洛模拟法的合理性,在上述求得各条线路时序故障率的基础上,以线路 L14 为例,

将蒙特卡洛模拟次数设定为 10 000 次, 得到蒙特卡洛仿真次数对应的故障概率关系如图 10 所示。由图 10 可知, 随着蒙特卡洛仿真次数不断增加, 得到的配电线路故障概率逐渐趋于稳定, 在仿真次数达到 5000 次时, 故障概率为 52%, 与 5000~10 000 次的故障概率相差在 3% 以内, 因此下文将蒙特卡洛仿真次数设定为 5000 次。

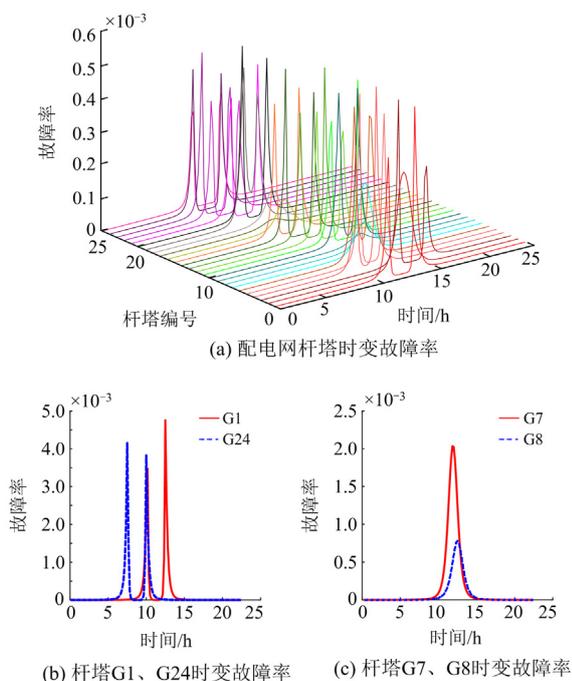


图 9 配电网杆塔的时变故障率

Fig. 9 Time-varying failure rate of pylons in distribution network

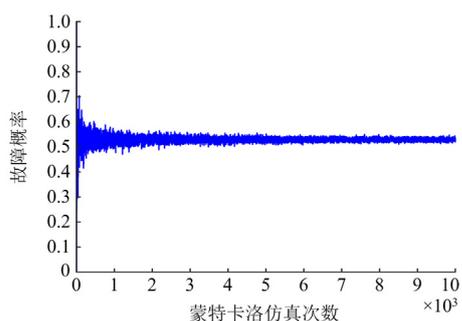


图 10 蒙特卡洛仿真次数与故障概率的关系

Fig. 10 Relationship between Monte Carlo simulation times and failure probability

在利用蒙特卡洛模拟法生成大量的故障场景基础上, 通过式(11)可以计算出每个故障场景的系统信息熵值  $W$ , 其概率分布如图 11(a)所示。场景对应的熵值生成概率越大, 说明该场景在台风天气

下的故障可能性越高。图中 90% 的系统熵值分布在  $[3, 26.5]$  中, 因此式(12)中  $W_{\min}$  取 3、 $W_{\max}$  取 26.5。

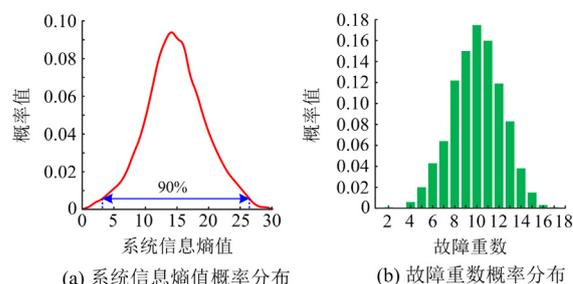


图 11 不同场景对应信息熵值和故障重数概率分布

Fig. 11 Probability distribution of information entropy and fault multiplicity corresponding to different scenarios

配电网在台风天气下的故障规模概率分布与台风的剧烈程度和电网自身的抵御能力有关, 对遭受台风破坏的配电线路数量进行统计分析, 不同故障重数发生概率分布如图 11(b)所示, 总体呈正态分布。由图可知, 在一定的元件强度下, 该区域配电网发生 9~11 重故障的概率最大, 更多重故障及不发生故障的概率都极低。

### 3.1.4 主动配电网韧性评估

以发生概率最高的 10 重故障场景为例, 计算配电网负荷损失并对配电网韧性进行评估分析。设台风登陆时间为凌晨 0 时, 配电线路 1、3、4、5、11、12、13、14、15 和 22 分别在台风登陆后 2.4 h、11.8 h、3.4 h、11.4 h、11.4 h、12.1 h、5 h、7.5 h、8.2 h 和 6.5 h 发生故障; 当台风过境后立即进行供电恢复, 设单个孤岛的故障修复时间为 0.5 h; 系统正常运行状态的负荷曲线为某典型日负荷。台风过境期将伴随着强降雨和阴天, 光伏板能接收的光照量相对较小, 本文选取扬州市 2018 年 7 月 22 日暴雨天某电站的实际光伏出力作为参考, 设置分布式光伏接入节点为 3、5、8、10、11、12、13、15、16、18、19、22、24、25, 光伏功率曲线如图 12 所示。

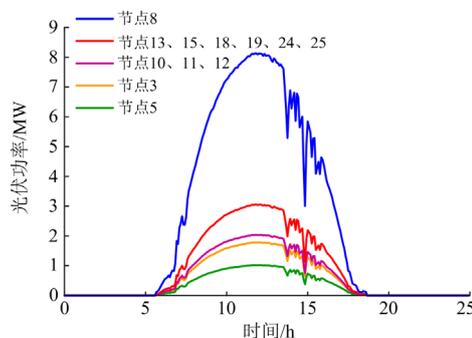


图 12 光伏功率曲线

Fig. 12 PV power curves

原始配电网正常运行、发生故障以及分布式光伏接入的配电网故障后负荷曲线如图 13 所示。由图可以看出,随着台风经过,配电网停电范围越来越大,在未接入光伏时,最大负荷损失发生在 21 h 时刻,其负荷损失量达到 72.86 MW。在 25 h 后台风不再影响配电网,各个故障开始修复,在 30 h 时配电网故障全部修复完毕,系统恢复正常运行。而光伏接入后,在 5.83 h 时刻光伏开始出力,对配电网中部分负荷进行供电,对配电网运行起到了一定的支撑作用,其最大出力作用出现在 13 h 时刻,比无光伏接入时的负荷量提高了 28.12 MW。

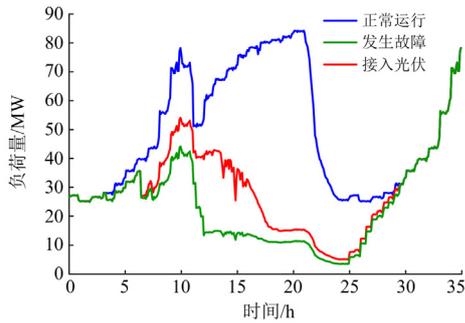


图 13 不同条件下的配电网负荷曲线

Fig. 13 Distribution network load curves under different conditions

不同情况下的配电网一级负荷存活率曲线如图 14 所示。光伏接入能够对孤岛内的关键负荷持续供电,提升了系统应对台风事件的韧性,一级负荷存活率显著上升,最大作用时刻为 12.33 h,提高了 46.55%;在此基础上,采取本文提出的负荷分级削减策略,一级负荷存活率又有了一定提升,最大作用时刻为 14.25 h,比单纯接入光伏提高了 11.35%。

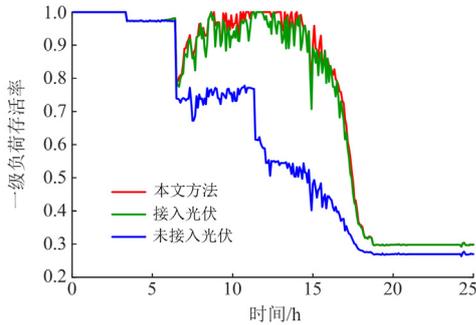


图 14 3 种情况下一级负荷存活率对比

Fig. 14 Comparison of survival rate of primary load under three conditions

由式(13)一式(16)计算得到台风天气下的该区域配电网韧性指标结果如表 1 所示。与原始配电网

相比,接入分布式光伏且仅考虑功率平衡条件下,系统综合鲁棒性指标  $R_C$  从 0.0849 提升到 0.1165,一级负荷损失平均速度  $V_L^{first}$  从 0.2158 MW/h 下降到 0.1160 MW/h,一级负荷损失率  $R_L^{first}$  从 42.05% 下降到 21.66%,由  $I_{EP}$  体现的配电网遭遇台风引发故障后的负荷存量从正常运行状态下的 35.28% 提升到了 49.19%,因此可以说明,分布式光伏接入可以有效提高配电网对台风破坏的防御能力,提升配电网的供电可靠性和整体韧性水平。在此基础上考虑本文提出的负荷分级削减策略后,一级负荷损失平均速度  $V_L^{first}$  和损失率  $R_L^{first}$  分别比单纯考虑分布式光伏接入场景降低了 0.0114 MW/h 和 1.28%。

表 1 算例 1 韧性评估指标结果

评估指标	$R_C$	$V_L^{first}/(MW/h)$	$R_L^{first}$	$I_{EP}$
原始配电网	0.0849	0.2158	0.4205	0.3528
含光伏配电网	0.1165	0.1160	0.2166	0.4919
优化后含光伏配电网	0.1165	0.1046	0.2038	0.4919

另外,为验证本文所提改进分级减载策略在改善台风抵御期间的经济性优势,根据式(23)计算得到的配电网平均网损率  $S_{AL}$  由单纯光伏接入场景下的 2.1463 MW/h 下降到 2.1156 MW/h,降低了 1.43%。

$$S_{AL} = \frac{\Delta S_L}{t_3 - t_1} = \frac{\sum_{j \in Q_L} \frac{\Delta P_j^2 + \Delta Q_j^2}{U_j^2} (R_j + jX_j)}{(t_3 - t_1)} \quad (23)$$

为分析光伏渗透率对主动配电网韧性提升的影响,针对光伏渗透率在 20%~600% 范围内不同数值对应的负荷量进行分析,结果如图 15 所示。由图可知,光伏渗透率从 20% 增加到 150%,一级负荷存活率从 73.77% 提升到 87.88%,提升了 14.11%。由于某些时刻光伏电源已能够完全支撑孤岛负荷,达到饱和,因此当光伏渗透率达到 150% 后,对一级负荷存活率的提升效果已不太明显,当其从 150% 增加到 600%,一级负荷存活率仅提升了 5.56%。

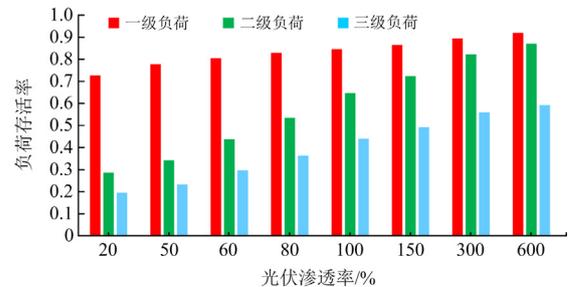


图 15 光伏渗透率对负荷存活率的影响

Fig. 15 Effect of PV permeability on load survival rate

### 3.2 算例 2: IEEE 118 节点配电网测试算例

为进一步验证本文提出的改进分级减载的主动配电网韧性提升方法对规模较大系统的适用性, 本节采用 IEEE118 节点测试系统建立仿真算例, 其结构及设定的坐标轴位置如图 16 所示。设图中任一小段距离为 5 km, 如支路 2-4 距离为 5 km、支路 1-2 距离为 35 km; 电压等级统一设置为 35 kV; 各节点光伏出力曲线形状均与图 12 一致, 但为了实现源荷相对匹配, 对其出力值进行了比例调整。同时, 通过元件故障率计算和故障场景生成, 确定以 42 重典型故障场景进行配电网韧性分析。台风登陆时刻设置为 0.83 h, 到 10.83 h 完全过境。各段线路故障顺序和对应时刻、各光伏电源最大有功出力以及各节点负荷配置结果详见附录 A 表 A2, 线路及各节点负荷参数见附录 A 表 A3。

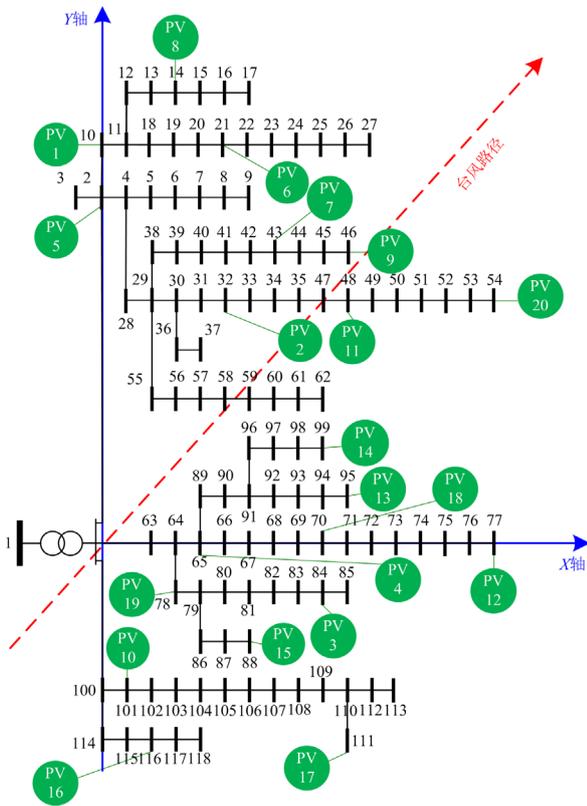


图 16 IEEE 118 节点系统示意图

Fig. 16 Schematic diagram of IEEE 118-bus system

为更加直观地进行配电网韧性评估与分析, 本节参考文献[29]将原始配电网正常运行时的负荷曲线设定为恒定功率, 因此得到原始 IEEE 118 节点配电网正常运行、发生故障以及分布式光伏接入的配电网故障后负荷曲线如图 17 所示。由图可以看出, 在未接入光伏时, 最大负荷损失发生在 6.75 h 时刻, 其负荷损失量达到 20.72 MW。在 10 h 后台风

不再影响配电网, 各个故障开始修复, 在 18 h 时配电网故障全部修复完毕, 系统恢复正常运行。而光伏接入后, 在 5.83 h 时刻光伏开始出力, 对配电网中部分负荷进行供电, 对配电网运行起到了一定的支撑作用, 其最大出力作用出现在 10.83 h 时刻, 比无光伏接入时的负荷量提高了 14.17 MW。

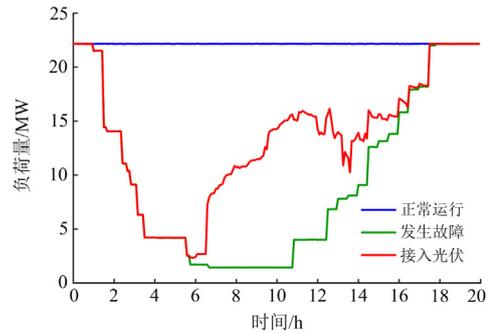


图 17 不同条件下的配电网负荷曲线

Fig. 17 Distribution network load curves under different conditions

在整个台风过境期间, 即配电网故障防御阶段不同典型时刻的系统一级负荷存活率曲线如图 18 所示。光伏未接入时一级负荷存活率在台风过境期间持续降低, 由台风登陆 0.83 h 时刻的 100% 下降到了台风离开 10.83 h 时刻的 6.74%。在光伏接入场景下, 5.83 h 时刻光伏开始出力, 一级负荷存活率开始有了一定提升, 在整个台风过境周期内平均提升了 14.57%。而在此基础上考虑本文提出的分级减载策略后, 算例系统的持续供电能力进一步改善, 平均一级负荷存活率比前两个场景分别提高了 32.68% 和 18.11%, 3 种情况下 2 h、6 h 和 10 h 对应的负荷存活量如图中绿色柱状图所示, 从而验证了本文提出的负荷分级削减策略的正确性和有效性, 且对于规模较大系统的韧性提升效果更为显著。

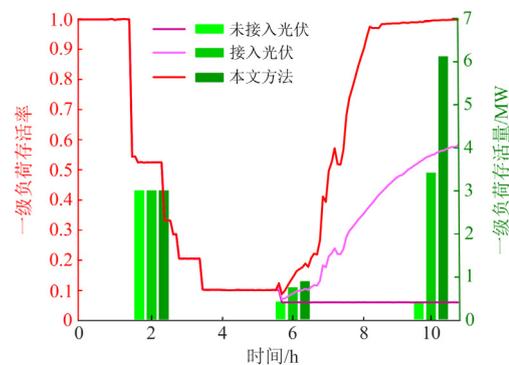


图 18 3 种情况下一级负荷存活率对比

Fig. 18 Comparison of survival rate of primary load under three conditions

由式(13)一式(16)计算得到台风天气下的该 IEEE118 节点配电网韧性指标结果如表 2 所示。由表 2 可知,与原始配电网和单纯接入光伏配电网相比,考虑本文提出的负荷分级削减策略后的系统一级负荷损失平均速度  $V_L^{\text{first}}$  分别降低了 78.97%和 9.88%,一级负荷损失率  $R_L^{\text{first}}$  分别降低了 61.82%和 48.33%,平均网损率比起单纯接入光伏配电网时降低了 3.07%。从而再次验证了本文所提方法的有效性和韧性提升效果。

表 2 算例 2 韧性评估指标结果

Table 2 Resilience evaluation index results of case 2

评估指标	$R_C$	$V_L^{\text{first}}/(\text{MW/h})$	$R_L^{\text{first}}$	$I_{EP}$
原始配电网	0.1469	0.5377	0.6991	0.3072
含光伏配电网	0.2066	0.1255	0.5165	0.5239
优化后含光伏配电网	0.2066	0.1131	0.2669	0.5239

#### 4 结论

本文针对台风灾害天气,提出一种改进分级减

载的主动配电网韧性提升方法。通过建立综合考虑台风天气下强风和暴雨相关性的配电网元件故障模型,保证了 Monte Carlo 法模拟的故障场景能够全面、客观地反映台风灾害特点,有效提升主动配电网韧性评估的准确性。通过负荷分级削减,并结合元件故障模型与分布式光伏功率时序波动性相协同的动态孤岛策略,有效保证了台风灾害期间对主动配电网重要负荷的持续可靠供电,并在一定程度上降低网络损耗。某实际配电网算例和 IEEE 118 节点测试系统算例验证了所提方法对不同拓扑配电网的有效性和适用性。

本文聚焦于台风灾害下主动配电网在故障防御阶段的韧性提升方法,后续将综合考虑源、储配置与故障恢复优化,对极端天气下主动配电网的全过程韧性提升技术开展进一步研究。

#### 附录 A

表 A1 区域配电网参数

Table A1 Specific parameters of the area distribution network system

序号	首端节点	末端节点	电压等级/kV	导线型号	线路长度/km	线路电阻/ $\Omega$	线路电抗/ $\Omega$
1	QG	QZ	110	LGJ-70	26.90	12.105	11.621
				LGJ-120	27.10	7.317	11.084
2	QZ	RM	110	LGJ-95	43.398	14.321	18.054
3	RM	MS	110	LGJ-150	70.108	14.723	28.254
4	QZ	YF	35	LGJ-70	23.71	10.670	9.531
5	YF	DS	35	LGJ-95	8.90	2.937	3.435
6	QZ	MZ	35	LGJ-150	7.43	1.560	2.771
7	QZ	ZG	35	LGJ-120	9.658	2.615	3.671
8	ZG	LH	35	LGJ-50	8.62	5.430	3.551
9	QZ	LD	35	LGJ-150	8.23	1.728	3.070
10	QZ	JS	35	LGJ-70	19.80	8.910	7.960
11	JS	ZH	35	LGJ-50	18.35	11.561	7.560
12	ZH	ZX	35	LGJ-50	18.34	11.554	7.556
13	QG	YC	35	LGJ-50	16.08	10.130	6.625
14	QG	XH	35	LGJ-50	22.71	14.307	9.357
15	MS	TD	35	LGJ-70	19.018	8.558	7.645
16	TD	CD	35	LGJ-50	12.24	7.711	5.043
17	TD	YL	35	LGJ-70	5.00	2.250	2.010
18	MS	TQ	35	LGJ-50	14.32	9.022	5.900
19	MS	SX	35	LGJ-50	9.00	5.670	3.708
20	SX	YJ	35	LGJ-120	8.90	2.403	3.373
21	MS	AG	35	LGJ-70	26.00	11.700	10.452
22	AG	FR	35	LGJ-70	2.60	1.17	1.045
23	AG	GR	35	LGJ-50	13.10	8.253	5.397
24	AG	XR	35	LGJ-50	12.37	7.793	5.096
25	JAG	QZ	110	LGJ-150	1.9048	0.400	0.767
26	MSG	MS	110	LGJ-150	2.197	0.4614	0.885
27	QG	YF	35	LGJ-95	1.86	0.614	0.718
28	YC	SX	35	LGJ-50	7.72	4.864	3.181

表 A2 IEEE 118 节点系统典型故障场景设置结果

Table A2 IEEE Typical fault scenario for a 118-bus system

导线故障顺序	89-90、96-97、28-29、5-6、43-44、8-9、59-60、65-66、80-81、78-79、87-88、104-105、2-10、19-20、2-3、16-17、40-41、24-25、74-75、75-76、56-57、100-101、1-2、84-85、91-92、115-116、45-46、31-32、34-35、90-91、35-47、82-83、48-49、52-53、47-48、83-84、67-68、68-69、107-108、71-72、26-27、41-42			
导线故障对应时刻/h	1、1.42、1.5、1.67、1.75、1.92、2.17、2.42、2.67、2.83、2.92、3.17、3.5、3.83、4.08、4.33、4.58、4.92、5.08、5.33、5.5、5.58、5.75、5.92、6.33、6.67、6.83、7、7.33、7.42、7.58、7.75、8、8.25、8.58、8.75、8.92、9.25、9.5、9.83、10.08、10.67			
分布式光伏电源的 最大有功出力/kW	PV1	500	PV11	1000
	PV2	1000	PV12	500
	PV3	500	PV13	500
	PV4	500	PV14	500
	PV5	500	PV15	500
	PV6	500	PV16	500
	PV7	1000	PV17	500
	PV8	500	PV18	500
	PV9	1000	PV19	500
	PV10	1000	PV20	500
节点负荷类型	节点 1-30: 30%一级负荷; 30%二级负荷; 40%三级负荷			
	节点 31-60: 40%一级负荷; 60%二级负荷			
	节点 61-90: 40%一级负荷; 60%三级负荷			
	节点 91-118: 50%二级负荷; 50%三级负荷			

表 A3 IEEE 118 节点系统参数

Table A3 Specific parameters of IEEE 118-bus system

支路 编号	首端 节点	末端 节点	线路 电阻/ $\Omega$	线路 电抗/ $\Omega$	负载/kW	支路 编号	首端 节点	末端 节点	线路 电阻/ $\Omega$	线路 电抗/ $\Omega$	负载/kW
1	0	1	0	0	0	60	59	60	0.338	0.1218	80.551+j49.156
2	1	2	0.036	0.01296	133.84+j101.14	61	60	61	0.207	0.0747	95.86+j90.758
3	2	3	0.033	0.01188	16.214+j11.292	62	61	62	0.247	0.8922	62.92+j47.7
4	2	4	0.045	0.0162	34.315+j21.845	63	1	63	0.028	0.0418	478.8+j463.74
5	4	5	0.015	0.054	73.016+j63.602	64	63	64	0.117	0.2016	120.94+j52.006
6	5	6	0.015	0.054	144.2+j68.604	65	64	65	0.255	0.0918	139.11+j100.34
7	6	7	0.015	0.0125	104.47+j61.725	66	65	66	0.21	0.0759	391.78+j193.5
8	7	8	0.018	0.014	28.547+j11.503	67	66	67	0.383	0.138	27.741+j26.713
9	8	9	0.021	0.063	87.56+j51.073	68	67	68	0.504	0.3303	52.814+j25.257
10	2	10	0.166	0.1344	198.2+j106.77	69	68	69	0.406	0.1461	66.89+j38.713
11	10	11	0.112	0.0789	146.8+j75.995	70	69	70	0.962	0.761	467.5+j395.14
12	11	12	0.187	0.313	26.04+j18.687	71	70	71	0.165	0.06	594.85+j239.74
13	12	13	0.142	0.1512	52.1+j23.22	72	71	72	0.303	0.1092	132.5+j84.363
14	13	14	0.18	0.118	141.9+j117.5	73	72	73	0.303	0.1092	52.699+j22.482
15	14	15	0.15	0.045	21.87+j28.79	74	73	74	0.206	0.144	869.79+j614.775
16	15	16	0.16	0.18	33.37+j26.45	75	74	75	0.233	0.084	31.349+j29.817
17	16	17	0.157	0.171	32.43+j25.23	76	75	76	0.591	0.1773	192.39+j122.43
18	11	18	0.218	0.285	20.234+j11.906	77	76	77	0.126	0.0453	65.75+j45.37
19	18	19	0.118	0.185	156.94+j78.523	78	64	78	0.559	0.3687	238.15+j223.22
20	19	20	0.16	0.196	546.29+j351.4	79	78	79	0.186	0.1227	294.55+j162.47
21	20	21	0.12	0.189	180.31+j164.2	80	79	80	0.186	0.1227	485.57+j437.92
22	21	22	0.12	0.0789	93.167+j54.594	81	80	81	0.26	0.139	243.53+j183.03
23	22	23	1.41	0.723	85.18+j39.65	82	81	82	0.154	0.148	243.53+j183.03

续表 A3

支路 编号	首端 节点	末端 节点	线路 电阻/ $\Omega$	线路 电抗/ $\Omega$	负载/kW	支路 编号	首端 节点	末端 节点	线路 电阻/ $\Omega$	线路 电抗/ $\Omega$	负载/kW
24	23	24	0.293	0.1348	168.1+j95.178	83	82	83	0.23	0.128	134.25+j119.29
25	24	25	0.133	0.104	125.11+j150.22	84	83	84	0.252	0.106	22.71+j27.96
26	25	26	0.178	0.134	16.03+j24.62	85	84	85	0.18	0.148	49.513+j26.515
27	26	27	0.178	0.134	26.03+j24.62	86	79	86	0.16	0.182	383.78+j257.16
28	4	28	0.015	0.0296	594.56+j522.62	87	86	87	0.2	0.23	49.64+j20.6
29	28	29	0.012	0.0276	120.62+j59.117	88	87	88	0.16	0.393	22.473+j11.806
30	29	30	0.12	0.2766	102.38+j99.554	89	65	89	0.669	0.2412	62.93+j42.96
31	30	31	0.21	0.243	513.4+j318.5	90	89	90	0.266	0.1227	30.67+j34.93
32	31	32	0.12	0.054	475.25+j456.14	91	90	91	0.266	0.1227	62.53+j66.79
33	32	33	0.178	0.234	151.43+j136.79	92	91	92	0.266	0.1227	114.57+j81.748
34	33	34	0.178	0.234	205.38+j83.302	93	92	93	0.266	0.1227	81.292+j66.526
35	34	35	0.154	0.162	131.6+j93.082	94	93	94	0.233	0.115	31.733+j15.96
36	30	36	0.187	0.261	448.4+j369.79	95	94	95	0.496	0.138	33.32+j60.48
37	36	37	0.133	0.099	440.52+j321.64	96	95	96	0.196	0.18	531.28+j224.85
38	29	38	0.33	0.194	112.54+j55.134	97	96	97	0.196	0.18	507.03+j367.42
39	38	39	0.31	0.194	53.963+j38.998	98	97	98	0.186	0.122	26.39+j11.7
40	39	40	0.13	0.194	393.05+j342.6	99	98	99	0.074	0.318	45.99+j30.392
41	40	41	0.28	0.15	326.74+j278.56	100	1	100	0.0625	0.0265	100.66+j47.572
42	41	42	1.18	0.85	536.26+j240.24	101	100	101	0.1501	0.234	456.48+j350.3
43	42	43	0.42	0.2436	76.247+j66.562	102	101	102	0.1347	0.0888	522.56+j449.29
44	43	44	0.27	0.0972	53.52+j39.76	103	102	103	0.2307	0.1203	408.43+j168.46
45	44	45	0.339	0.1221	40.328+j31.964	104	103	104	0.447	0.1608	141.48+j134.25
46	45	46	0.27	0.1779	39.653+j20.758	105	104	105	0.1632	0.0588	104.43+j66.024
47	35	47	0.21	0.1383	66.195+j42.361	106	105	106	0.33	0.099	96.793+j83.647
48	47	48	0.12	0.0789	73.904+j51.653	107	106	107	0.156	0.0561	493.92+j419.34
49	48	49	0.15	0.0987	114.77+j57.965	108	107	108	0.3819	0.1374	225.38+j135.88
50	49	50	0.15	0.0987	918.37+j1205.1	109	108	109	0.1626	0.0585	509.21+j387.21
51	50	51	0.24	0.1581	210.3+j146.66	110	109	110	0.3819	0.1374	188.5+j173.46
52	51	52	0.12	0.0789	66.68+j56.608	111	110	111	0.2445	0.0879	918.03+j898.55
53	52	53	0.405	0.1458	42.207+j40.184	112	110	112	0.2088	0.0753	305.08+j215.37
54	53	54	0.405	0.1458	433.74+j283.41	113	112	113	0.2301	0.0828	54.38+j40.97
55	29	55	0.391	0.141	62.1+j26.86	114	100	114	0.6102	0.2196	211.14+j192.9
56	55	56	0.406	0.1461	92.46+j88.38	115	114	115	0.1866	0.127	67.009+j53.336
57	56	57	0.406	0.1461	85.188+j55.436	116	115	116	0.3732	0.246	162.07+j90.321
58	57	58	0.706	0.5461	345.3+j332.4	117	116	117	0.405	0.367	48.785+j29.156
59	58	59	0.338	0.1218	22.5+j16.83	118	117	118	0.489	0.438	33.9+j18.98

参考文献

[1] 田慧丽, 张鼎茂, 周荣生, 等. 台风灾害下配电系统受损评估研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 16-24.  
TIAN Huili, ZHANG Dingmao, ZHOU Rongsheng, et al. A study on damage evaluation of power distribution system under typhoon disaster[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 16-24.

[2] 杨少勇, 赵建国. 电力系统地震灾害预防技术综述[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 57-63.  
YANG Shaoyong, ZHAO Jianguo. An overview on prevention technology of earthquake disaster for power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 57-63.

[3] LIU P Y, HE H M, PAN C P. Investigation of 2008' frozen disaster and research on de-icing in Guangdong power grid[C] // 2008 China International Conference on Electricity Distribution, December 10-13, 2008, Guangzhou, China.

[4] 马晨霄, 戴则梅, 胡超凡, 等. 应对严重自然灾害的省级高压网架增强辅助策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 119-127.  
MA Chenxiao, DAI Zemei, HU Chaofan, et al. Strengthening auxiliary strategy of provincial high-voltage power grid in response to severe natural disasters[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 119-127.

- [5] 李涛, 王谦, 吴登国, 等. 台风风场下的 1000 kV 输电塔风洞试验与风振响应分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 76-82.  
LI Tao, WANG Qian, WU Dengguo, et al. Wind tunnel test and wind-induced response analysis of 1000 kV transmission line under typhoon wind fields[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 76-82.
- [6] PELIKAN E, EBEN K, RESLER J, et al. Wind power forecasting by an empirical model using NWP outputs[C] // International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2010, Prague, Czech Republic: 45-48.
- [7] 梁海平, 石皓岩, 王岩, 等. 基于提升韧性的输电网灾后应急维修策略优化[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 142-151.  
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Yan, et al. Resilience-improving based optimization of post-disaster emergency maintenance strategy for transmission networks[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 142-151.
- [8] 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.
- [9] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 复合自然灾害下的电力系统稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 10-18.  
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Power system stability analysis for intercurrent natural disasters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 10-18.
- [10] MA L, BOCCHINI P, CHRISTOU V. Fragility models of electrical conductors in power transmission networks subjected to hurricanes[J]. Structural Safety, 2020, 82: 1-15.
- [11] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.  
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
- [12] 李振坤, 王法顺, 郭维一, 等. 极端天气下智能配电网的弹性评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 60-68.  
LI Zhenkun, WANG Fashun, GUO Weiyi, et al. Resilience evaluation of smart distribution network in extreme weather[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 60-68.
- [13] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Power systems resilience assessment: hardening and smart operational enhancement strategies[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(99): 1202-1213.
- [14] ZOBEL C W. Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience[J]. Decision Support Systems, 2011, 50(2): 394-403.
- [15] 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.
- [16] 王子昊, 王旭, 蒋传文, 等. 基于近端策略优化算法的灾后配电网韧性提升方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 62-70.  
WANG Zihao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Resilience improvement method of post-disaster distribution network based on proximal policy optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 62-70.
- [17] LIU Y, XIE S P, DENG M H, et al. Toughness analysis and enhancement strategy research of distribution network in extreme environment[C] // 2020 IEEE 4th conference on energy internet and energy system integration, September 30-October 1, 2020, Wuhan, China: 1929-1934.
- [18] WANG Yuantao, HUANG Tianen, LI Xiang, et al. A resilience assessment framework for distribution systems under typhoon disasters[J]. IEEE Access, 2021, 9: 155224-155233.
- [19] 侯慧, 刘超, 陈希, 等. 台风灾害下配网两阶段应急抢修恢复优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 169-179.  
HOU Hui, LIU Chao, CHEN Xi, et al. Optimization strategy for two-stage emergency repair and recovery of a distribution network after a typhoon disaster[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 169-179.
- [20] 李吉侗, 王洲, 达紫祺, 等. 计及恶劣天气时空相关性的弹性配电网储能电站多层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 128-137.  
LI Jitong, WANG Zhou, DA Ziqi, et al. Multi-level planning method of energy storage stations for resilient distribution networks considering spatio-temporal correlation of severe weather[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 128-137.
- [21] ZHANG H, WANG P, YAO S, et al. Resilience assessment of interdependent energy systems under

- hurricanes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3682-3694.
- [22] 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.
- [23] 彭寒梅, 刘子威, 谭貌, 等. 面向弹性提升的主动配电网重构与元件修复协同方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 35-44.  
PENG Hanmei, LIU Ziwei, TAN Mao, et al. Collaborative method for an active distribution network reconfiguration and component repair for resilience improvement[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 35-44.
- [24] BATTS M E, SIMIU E, RUSSELL L R. Hurricane wind speeds in the united states[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(10): 2001-2016.
- [25] FU X, LI H, LI G. Fragility analysis and estimation of collapse status for transmission tower subjected to wind and rain loads[J]. Structural Safety, 2016, 58: 1-10.
- [26] 王增平, 相禹维, 王彤. 台风暴雨灾害下的 110 kV 线路倒塔与断线事故评估方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 59-66.  
WANG Zengping, XIANG Yuwei, WANG Tong. An assessment method for 110 kV towers failure and lines disconnection accidents under typhoon and torrential rain disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 59-66.
- [27] 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.  
LAN Ying. Distribution system reliability evaluation and design considering influence of typhoon[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [28] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Unified standard for reliability design of building structures GB: 50068—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [29] 王永明, 殷自力, 李琳, 等. 台风灾害场景下考虑运行状态的配电网风险评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 60-65.  
WANG Yongming, YIN Zili, LI Lin, et al. Risk assessment method for distribution network considering operation state in the scene of typhoon disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(12): 60-65.
- [30] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513, 681.  
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- [31] 姜涛, 唐少南, 李雪, 等. 应对台风影响的海岛微网群韧性全过程提升[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.
- [32] 李帅龙, 崔国民, 肖媛. 换热网络优化中粒子群算法早熟现象的机理分析及改进策略[J]. 能源工程, 2017(1): 9-16, 23.  
LI Shuailong, CUI Guomin, XIAO Yuan. Analysis and improvement strategy of the premature phenomenon in particle swarm optimization for heat exchanger network[J]. Energy Engineering, 2017(1): 9-16, 23.
- [33] 陈璐璐, 邱建林, 陈燕云, 等. 改进的遗传粒子群混合优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(2): 395-399.  
CHEN Lulu, QIU Jianlin, CHEN Yanyun, et al. Improved hybrid optimization algorithms based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(2): 395-399.

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-06-13

作者简介:

王振浩(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事输电变电设备运行状态在线监测与诊断以及柔性直流输电方面的研究工作; E-mail: zhenhaowang@126.com

罗剑潇(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事主动配电网韧性评估与优化的研究工作; E-mail: 510785267@qq.com

成 龙(1988—), 男, 通信作者, 博士生, 实验师, 主要从事交直流配电网运行与控制以及新能源电力系统方面的研究工作。E-mail: chl@neepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)