引用格式：吴桂联，朱乃璇，陈浩，等.基于多尺度注意力机制与多资源协同优化的台风灾害下配电网韧性提升方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):90-100.

Citation: WU Guilian, ZHU Naixuan, CHEN Hao, et al. Method for enhancing distribution network resilience under typhoon disasters based on multi-scale attention mechanisms and multi-resource coordinated optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(6): 90-100.

基于多尺度注意力机制与多资源协同优化的台风灾害下配电网韧性提升方法

吴桂联[1,2,3]，朱乃璇[1,2]，陈　浩[1,2]，孙锘祯[1,2]，廖锦霖[1,2]

（1.国家电网福建省电力有限公司经济技术研究院，福建 福州 350013；2.多灾害地区配电网规划与运行控制技术国家电网公司实验室，福建 福州 350013；3.上海交通大学电气工程学院，上海 200240）

摘　要：近年来，极端气象灾害频发，严重威胁配电网的安全运行。为提高台风致灾因子强度预测精度，先构建融合多尺度注意力机制的长短期记忆网络（long short term memory with multi-scale attention，LSTM-MSA）预测模型，该模型解决传统长短期记忆网络（long short term memory，LSTM）模型无法捕捉局部注意力机制的不足的问题；再在此基础上，为降低台风灾害对配电网的冲击，将线路加固、联络开关投切、风力发电和储能系统调控相结合，提出考虑多元灵活性资源协同优化的韧性提升策略；最后，基于 IEEE 33 节点和 IEEE 69 节点配电网系统进行算例分析，验证所提方法的可行性与有效性。所提方法为提升城市配电网鲁棒性提供新的视角和实用的方案。

关　键　词：LSTM-MSA；极端气象；配电网；多元灵活性资源；协调优化调度；韧性

DOI：10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.009　　**中图分类号**：TM73　　**文章编号**：1673-9140(2025)06-0090-11

Method for enhancing distribution network resilience under typhoon disasters based on multi-scale attention mechanisms and multi-resource coordinated optimization

WU Guilian[1,2,3], ZHU Naixuan[1,2], CHEN Hao[1,2], SUN Nuoling[1,2], LIAO Jinlin[1,2]

(1. Economic and Technology Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350013, China; 2. Distribution Network Planning and Operation Control Technology in Multiple Disaster Superimposed Areas State Grid Corporation Laboratory, Fuzhou 350013, China; 3. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In recent years, the increasing frequency of extreme weather events poses a serious threat to the secure operation of distribution networks. To improve the accuracy of typhoon-induced hazard intensity forecasting, an LSTM network enhanced with multi-scale attention (LSTM-MSA) is developed, which overcomes the deficiency of the traditional LSTM model that cannot capture the local attention mechanism. Building on this, a resilience-enhancement strategy is proposed that coordinates diverse flexible resources, including line reinforcement, tie-switch operation, wind power generation, and energy storage system control, to mitigate the impacts of typhoon disasters on the distribution network. Case studies on the IEEE 33-node and IEEE 69-node distribution systems demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method, providing a new perspective and a practical solution for enhancing the robustness of urban distribution networks.

Key words: LSTM-MSA; extreme weather; distribution network; diversified flexible resources; coordinated optimization scheduling; resilience

近年来，暴风雨、台风、寒潮和洪水等极端气象事件频繁发生，对电力系统的稳定性和可靠性构成了前所未有的挑战[1-5]。配电网作为电力系统的重要组成部分，直接关系到广大用户的用电安全和电

收稿日期：2025-04-22；**修回日期**：2025-05-06

基金项目：国网公司科技项目（5400-202411192A-1-1-ZN）

通信作者：吴桂联（1985—），女，博士研究生，高级工程师，主要从事配电网规划与设计等方面的研究；E-mail：wgltd@163.com

力系统的经济运行。极端气象这种高风险-低概率事件可能引发配电网元件故障，甚至导致停电事故[6-8]。在此背景下，配电网的运行环境因极端气象的影响变得更复杂与不确定。传统的配电网调度策略难以满足当前的需求。因此，如何提升配电网在极端气象灾害下的安全性和韧性，降低这类“黑天鹅”事件的影响，是当前研究人员亟待研究的课题[9-11]。

对灾害进行精确建模、模拟配电网的灾害响应过程，是韧性研究的模型基础。目前，国内外一些研究人员对极端气象事件对配电网的影响进行灾害建模。文献[12]采用了考虑台风边界层次的物理特征和地表情况的YAN MENG模型对台风风场进行建模，其元件故障信息根据台风风场强度和元件易损曲线确定，并采用蒙特卡洛方法模拟元件的故障过程。风速、闪电和降雨量等对电网的影响有所差别。文献[13]分别考虑了飓风以及伴随飓风而来的降雨对道路的影响，构建了飓风灾害下配电系统中断模型。文献[14]构建了输电塔的有限元模型，分析了台风与暴雨的荷载，讨论了极端天气下配电网线路的动力响应，建立了线路故障模型。针对极端台风灾害天气，对台风风速进行预测建模可有效提前防范其危害。文献[15]提出了基于时间卷积网络与双向长短期记忆网络和误差修正的组合模型，对极端天气下的风速进行预测。文献[16]则采用基于图卷积网络和频率增强分解的方法，建立了风速预测模型。

极端气象灾害对配电网的破坏是多方面的。如何准确评估灾害的影响也是研究人员关注的热点问题之一。极端气象灾害来临后，负荷与供电量等配电网的状态量会经历下降、降额维持和恢复上升的过程。文献[17]首次提出了描述浴盆曲线的“韧性梯形”面积指标，并用该指标来描述系统状态量在下降阶段、维持阶段和恢复阶段的变化。此外，事件后果的评估也是韧性评估的重要内容。文献[18]提出了采用负荷下降速度、负荷削减率和关键负荷缺供率等指标来评估雪灾发生后的配电网韧性，并基于这些指标提出了各种韧性增强措施，保障电网安全稳定运行。文献[19-20]则提出了考虑负荷重要程度的电网韧性评估方法，根据韧性提升策略下各节点切负荷率和负荷重要程度来评估配电网韧性。文献[21]采用电负荷、气负荷、热负荷削减总量、负荷削减次数和负荷削减概率等来评估能源系统的韧性。

目前，为降低极端气象灾害对配电网安全运行的影响，国内外研究学者已针对配电网韧性提升措施开展了大量的研究。考虑极端灾害对配网元件造成的时序故障，文献[22]协同考虑分布式电源、移动式应急电源和交直流配电网动态重构等资源，提出了面向韧性提升的交直流混合配电网协同故障恢复方法。文献[23]基于“域”的概念，采用顶点枚举法，对储能资源聚合体的剩余调节能力与运行功率进行刻画，提出面向“灾前-灾中-灾后”全阶段的电网优化运行与韧性提升模型。电动汽车的发展使传统独立的配电网与交通网深度耦合。考虑交通信号灯、电动车、维修队伍等应急资源协同优化方法可为灾害下双网耦合模型的韧性提升提供支持[24]。文献[25]将充电站布点规划问题构建为一个混合整数线性规划模型，提出了一种兼顾配电网韧性和充电便利性的充电站布点规划方法。

针对传统长短期记忆(long short-term memory，LSTM)模型无法捕捉局部注意力机制的不足，本文先通过融合关键局部信息和长时间序列，引入注意力机制，开发融合多尺度注意力机制的长短期记忆网络(long short-term memory with multi-scale attention，LSTM-MSA)模型，精准预测台风致灾因子强度；再在此基础上，提出一种综合利用线路加固、联络线、风电和储能系统等多元灵活性资源的优化调度方法，该方法突破传统单一资源优化的局限性，整合风电出力不确定性与储能调节能力；然后，对台风影响路径进行物理建模，提高模型对实际灾害场景的适应性和准确性；最后，基于MATLAB/Yalmip平台的Gurobi求解器，对该方法进行编程与求解，并对IEEE 33节点和IEEE 69节点配电网系统进行分析，验证了所提方法的有效性和实用性。

1　基于LSTM-MSA的台风预测与配电网故障模型

在实际中，电网的部分配电线路长期暴露于环境中，极易受到极端气象灾害的影响[26-27]。台风预测的准确性直接关系到配电网灾害分析的有效性。本文基于LSTM-MSA，在短范围和长范围两个尺度上融合注意力机制，提升传统LSTM模型的预测性能，为提升配电网应对极端气象灾害的韧性提供数据支持。

1.1　LSTM-MSA模型

传统LSTM模型通过输入门、遗忘门和输出门3个门控结构来更新隐藏t时刻的状态h_t和细胞状态c_t。近年来，LSTM广泛应用在电网数据预测等

领域，但其只能捕捉序列中的长期依赖关系，对关键局部信息关注不足[28]。本文结合短、长范围注意力机制[29]，对LSTM模型进行改进，增强模型信息收集性能。

1.1.1 短范围注意力机制

在LSTM模型中，短范围注意力部分通过分块机制来实现。在每个时间步长中，LSTM会计算短范围的上下文。假设LSTM输出的隐状态为$\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_T]^{\mathrm{T}}$。其中，$T$为总时间步长。模型先将时间序列分割成多个块，对$\boldsymbol{h}_t$所属的块$B_i$，采用一个短范围注意力机制，通过线性变换$f_{\mathrm{sa}}(\boldsymbol{h}_t)$，得到时段$t$的注意力权重$w_t^{\mathrm{sa}}=\sigma\left(f_{\mathrm{sa}}(\boldsymbol{h}_t)\right)$，$\sigma(\cdot)$为softmax的归一化表示。进而得到当前块$B_i$的前后数据$\boldsymbol{b}_i^{\mathrm{c}}$和所有块结果拼接起来形成的短范围注意力$\boldsymbol{S}$的前、后数据，即

$$\boldsymbol{b}_i^{\mathrm{c}}=\sum_{t\in B_i}w_t^{\mathrm{sa}}\boldsymbol{h}_t \tag{1}$$

$$\boldsymbol{S}=\mathrm{concat}(\boldsymbol{b}_1^{\mathrm{c}},\boldsymbol{b}_2^{\mathrm{c}},\cdots,\boldsymbol{b}_{n_{\mathrm{b}}}^{\mathrm{c}}) \tag{2}$$

式中，n_{b}为时间序列分块个数；concat(•)为张量数据的拼接；w_t^{sa}为时间块B_i内第t个时间步的短范围注意力权重。

1.1.2 长范围注意力机制

为计算长范围的数据注意力，对整个LSTM的输出进行自适应平均池化操作，长范围注意力机制的计算式为

$$\boldsymbol{G}=\mathrm{global_pooling}(\boldsymbol{H}) \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{G}$为全局池化后得到的长范围全局表示；global_pooling(•)为自适应平均池化算子，其将序列$\boldsymbol{H}$压缩成一个固定维度的表示，从而得到整个序列的全局信息。

1.1.3 注意力机制的融合

通过将短范围注意力和长范围注意力进行加权融合，实现多尺度注意力机制的融合，即

$$\boldsymbol{M}=w_{\mathrm{s}}\boldsymbol{S}+w_{\mathrm{g}}\boldsymbol{G} \tag{4}$$

式中，M为短范围注意力特征；$\boldsymbol{S}$与长范围全局特征$\boldsymbol{G}$融合得到的多尺度表示；w_{s}、w_{g}分别为短范围特征$\boldsymbol{S}$和长范围特征$\boldsymbol{G}$的融合权重。

最后，经过注意力融合后的数据被输入到一个全连接层$\varphi(\cdot)$，进行输出预测，即

$$\hat{y}=\varphi(M) \tag{5}$$

式中，$\hat{y}$为模型的预测值。

采用均方误差(mean squared error，MSE)作为该模型的损失函数，并采用Adam求解器对其进行优化。

改进后的LSTM-MSA模型与传统LSTM模型的比较见表1。

表1 LSTM-MSA模型与LSTM模型对比

Table 1 Comparison between LSTM-MSA model and LSTM model

特点	信息处理范围	全局信息捕捉	局部信息捕捉	计算复杂度	模型适应性
LSTM	只能捕捉序列中的长期依赖关系	难以很好地捕捉全局信息	对局部信息的关注较弱	较高，特别是序列很长时	对长序列数据比较适用，但在捕捉关键局部信息时有所不足
LSTM-MSA	同时捕捉短期和长期依赖关系，利用注意力机制提供灵活的上下文关注	全局池化和短范围注意力结合，使得模型能更好地理解全局上下文	短范围注意力机制帮助模型聚焦于序列中的局部特征	虽然增加了注意力层，但通常能够提高模型效果，减少不必要的长序列依赖	在长短序列任务中具有更好的适应性，尤其在需要处理多层次特征时表现更好

据近年来沿海地区台风灾害分析报告，台风对电网的破坏主要体现在强风和强降雨两个方面。其中，台风登陆时带来的短时强风会严重影响配电线、杆塔等元件的正常运行，进而引发停电事故[30-31]。因此，本文基于改进LSTM-MSA模型对强风风速这一致灾因子进行预测。

1.2 配电网故障模型

台风带来的强风极易导致配电线路的断线、杆塔垮塌等故障。其中，配电线路断线的概率与风速呈线性关系，配电线路杆塔的易损性可被描述为一个对数正态分布[32-33]。配电线路断线和杆塔故障概率模型分别为

$$P_{ij,n}^{\mathrm{wire}}=\begin{cases}0, & v_{ij,n}^{\mathrm{wire}}<v_{ij,n,\min}^{\mathrm{wire}}\\ \dfrac{v_{ij,n}^{\mathrm{wire}}-v_{ij,\min}^{\mathrm{wire}}}{v_{ij,\mathrm{des}}^{\mathrm{wire}}-v_{ij,n,\min}^{\mathrm{wire}}}, & v_{ij,n,\min}^{\mathrm{wire}}\leqslant v_{ij,n}^{\mathrm{wire}}<v_{ij,n,\mathrm{des}}^{\mathrm{wire}}\\ 1, & v_{ij,n,\mathrm{des}}^{\mathrm{wire}}\leqslant v_{ij,n}^{\mathrm{wire}}\end{cases} \tag{6}$$

$$P_{ij,m}^{\mathrm{pole}}=\Phi\left[\frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{v_{ij,m}^{\mathrm{pole}}}{v_{ij,m,\mathrm{des}}^{\mathrm{pole}}}\right)\right] \tag{7}$$

式中，$P_{ij,n}^{\mathrm{wire}}$为线路(i,j)上第n条配电线故障概率；$v_{ij,n}^{\mathrm{wire}}$、$v_{ij,n,\min}^{\mathrm{wire}}$和$v_{ij,n,\mathrm{des}}^{\mathrm{wire}}$分别为线路$(i,j)$上第$n$条配电线的风速、最小故障概率风速和设计风速；$v_{ij,m}^{\mathrm{pole}}$为线

路(i,j)上第m个杆塔的风速大小，$P_{ij,m}^{\text{pole}}$为线路(i,j)上第m个杆塔的故障概率；$v_{ij,m,\text{des}}^{\text{pole}}$为线路$(i,j)$上第$m$个杆塔的设计风速；$\beta$为杆塔达到损坏阈值时的工程参数标准差；$\Phi[\cdot]$为标准正态分布函数。

假设连接节点i和j的线路(i,j)上共有M_{P}个杆塔和N_{L}条配电线，各杆塔和配电线故障概率相互独立，则线路(i,j)的故障概率p_{ij}^{fault}与其组成元件故障概率之间有关系：

$$P_{ij}^{\text{fault}}=1-\prod_{n}\left(1-P_{ij,n}^{\text{wire}}\right)\prod_{m}\left(1-P_{ij,m}^{\text{pole}}\right) \tag{8}$$

随着台风的不断推进，配电网元件故障概率不断变化。当部分元件的故障概率超过阈值时，配电网发生故障，引发停电事故。

2　极端气象灾害影响模型

为降低极端气象灾害对配电网的影响，本文利用线路加固、联络线切换等方式和储能及风电等资源，提出多元灵活性资源协同优化策略，降低停电负荷，提高配电网的韧性。为此，本文将极端气象灾害对配电网的影响描述为一个优化问题。

2.1　约束条件

2.1.1　线路加固资源约束

常用的脆弱线路辨识方法包括脆弱性评估、基于复杂网络的方法等，这些方法依据线路的脆弱性为线路加固措施提供指导。本文将线路是否加固作为一个决策变量，根据目标函数的优化结果确定预先加固线路的位置。线路加固资源的约束条件为

$$\sum_{ij\in D_{\text{L}}}X_{ij}^{\text{HD}}\leqslant N^{\text{HD}} \tag{9}$$

式中，X_{ij}^{HD}为表征线路(i,j)是否得到加固的0-1决策变量（当$X_{ij}^{\text{HD}}=1$时，线路得到加固；反之，当$X_{ij}^{\text{HD}}=0$时，则线路未加固）；N^{HD}为最大加固个数；D_{L}为线路集合。

在进行线路加固后，配电线路的故障概率应满足以下约束：

$$P_{ij}^{\text{f_new}}=\left(1-X_{ij}^{\text{HD}}\right)P_{ij}^{\text{fault}}+\sigma X_{ij}^{\text{HD}}P_{ij}^{\text{fault}} \tag{10}$$

式中，$P_{ij}^{\text{f_new}}$为线路(i,j)加固后的故障概率；σ为线路加固后的故障概率缩小因子，$0\leqslant\sigma<1$。

当$X_{ij}^{\text{HD}}=1$时，线路得到加固，线路故障概率变为原故障概率与σ的积；当$X_{ij}^{\text{HD}}=0$时，线路不加固，线路故障概率不变。

2.1.2　联络线资源约束

辐射形配电网拓扑结构较简单，其所有负荷均依赖源节点供电。这也导致其对极端气象灾害异常敏感。部分靠近源节点的线路发生故障后，其末端连接的负荷都将失去电力供应。因此，本文采用联络线资源，增强配网的拓扑结构，提高网络的韧性。联络线资源的配置应满足约束条件：

$$\sum_{i,j\in D_{\text{N}}}X_{ij}^{\text{TL}}\leqslant N^{\text{TL}},\quad ij\notin D_{\text{L}} \tag{11}$$

$$u_{ij}\leqslant X_{ij}^{\text{TL}} \tag{12}$$

式中，X_{ij}^{TL}为表征节点i与节点j之间是否增加联络线的0-1决策变量（当$X_{ij}^{\text{TL}}=1$时，增加联络线；反之，当$X_{ij}^{\text{TL}}=0$时，若节点i与节点j之间已有配电线路，则不增加新的联络线）；D_{N}为节点集合；u_{ij}为表征节点i与节点j之间的线路是否接通的0-1决策变量（当$u_{ij}=1$时，线路接通；当$u_{ij}=0$时，线路不接通）；N^{TL}为最大联络线条数。

2.1.3　储能资源约束

作为灾难中参与配电网供能的灵活性资源，储能同时呈现出负荷与电源的两面性。本文以停靠在充电站的电动汽车作为灵活性储能资源。为模拟其充、放电过程，该模型也应满足如下约束条件：

$$p_{i,t}^{\text{C}}=\sum_{n_{\text{s}}}p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{dch}}-\sum_{n_{\text{s}}}p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{ch}} \tag{13}$$

$$0\leqslant p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{ch}}\leqslant\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{ch}}p_{n_{\text{s}}}^{\text{ch,max}} \tag{14}$$

$$0\leqslant p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{dch}}\leqslant\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{dch}}p_{n_{\text{s}}}^{\text{dch,max}} \tag{15}$$

$$I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC}}=\Delta t\left(\frac{\eta^{\text{ch}}p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{ch}}-p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{dch}}/\eta^{\text{dch}}}{E_{n_{\text{s}}}^{\text{c}}}\right)+I_{n_{\text{s}},t-1}^{\text{SOC}} \tag{16}$$

$$I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC,min}}\leqslant I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC}}\leqslant I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC,max}} \tag{17}$$

$$\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{ch}}+\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{dch}}\leqslant 1 \tag{18}$$

$$\sum_{n_{\text{s}}}\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{ch}}+\sum_{n_{\text{s}}}\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{dch}}\leqslant N_{i}^{\text{SE}} \tag{19}$$

式中，$p_{i,t}^{\text{C}}$为节点i在t时刻向电网输送功率；$\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{dch}}$为表征节点$i$的电池$n_{\text{s}}$在$t$时刻是否处于放电状态的0-1决策变量（当$\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{dch}}=1$时，电池放电；反之，当$\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{dch}}=0$时，电池不放电）；$\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{ch}}$为表征节点$i$电池$n_{\text{s}}$在$t$时刻是否处于充电状态的0-1决策变量（当$\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{ch}}=1$时，电池充电；反之，当$\mu_{i,t}^{n_{\text{s}},\text{ch}}=0$时，电池不充电）；$p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{dch}}$和$p_{i,n_{\text{s}},t}^{\text{ch}}$分别为电池$n_{\text{s}}$在$t$时刻放、充电的功率；$p_{n_{\text{s}}}^{\text{ch,max}}$、$p_{n_{\text{s}}}^{\text{dch,max}}$分别为电池$n_{\text{s}}$充、放电的最大功率；$I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC}}$为电池$n_{\text{s}}$在$t$时刻的电池荷电状态；$I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC,max}}$、$I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC,min}}$分别为$I_{n_{\text{s}},t}^{\text{SOC}}$的最大、最小值；$\eta^{\text{dch}}$和$\eta^{\text{ch}}$分别为电池的放、充电效率；$E_{n_{\text{s}}}^{\text{c}}$为电池容量；$N_{i}^{\text{SE}}$为节点$i$的电池数量。

式(9)～(11)为电池出力约束。式(12)～(13)限制了电池荷电状态。式(14)表明一块电池在某一时刻只能处于充电或者放电两种状态中的一种。

式(15)限制了每个储能站的电池个数。

2.1.4 风电资源约束

当台风来临时,风能也能转化为电能,为负荷提供电力支持;但当风速超过风机的切出风速时,风机将停运。因此,风电资源的约束模型为

$$p_{i,t}^{\mathrm{W}}=\begin{cases}0, & v_{i,t}<v_{\mathrm{in}}\text{或}v_{i,t}>v_{\mathrm{out}}\\ p_{\mathrm{rated}}^{\mathrm{W}}\dfrac{v_{i,t}^{3}-v_{\mathrm{in}}^{3}}{v_{\mathrm{rated}}^{3}-v_{\mathrm{in}}^{3}}, & v_{\mathrm{in}}\leqslant v_{i,t}<v_{\mathrm{rated}}\\ p_{\mathrm{rated}}^{\mathrm{W}}, & v_{\mathrm{rated}}\leqslant v_{i,t}\leqslant v_{\mathrm{out}}\end{cases}\tag{20}$$

式中,$p_{\mathrm{rated}}^{\mathrm{W}}$ 为风机额定功率;$p_{i,t}^{\mathrm{W}}$ 为节点 i 在 t 时刻的实际功率;$v_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的风速大小;v_{in}、v_{rated} 和 v_{out} 分别为风机切入、额定和切出风速。

2.1.5 配电网运行约束

除应满足这些灵活性资源的约束条件外,还须满足配电网运行约束条件,即

$$\sum_{j\in N}p_{ij,t}^{\mathrm{F}}+p_{i,t}^{\mathrm{G}}+p_{i,t}^{\mathrm{C}}+p_{i,t}^{\mathrm{W}}=\sum_{j\in N}p_{ij,t}^{\mathrm{F}}+p_{i,t}^{\mathrm{L}}-\Delta p_{i,t}\tag{21}$$

$$\sum_{j\in N}q_{ji,t}^{\mathrm{F}}+q_{i,t}^{\mathrm{G}}=\sum_{j\in N}q_{ij,t}^{\mathrm{F}}+q_{i,t}^{\mathrm{L}}-\Delta q_{i,t},\forall i,j\in N\tag{22}$$

$$0\leqslant\Delta p_{i,t}\leqslant p_{i,t}^{\mathrm{L}}\tag{23}$$

$$0\leqslant\Delta q_{i,t}\leqslant q_{i,t}^{\mathrm{L}}\tag{24}$$

$$0\leqslant p_{i,t}^{\mathrm{G}}\leqslant p_{i,\max}^{\mathrm{G}}\tag{25}$$

$$0\leqslant q_{i,t}^{\mathrm{G}}\leqslant q_{i,\max}^{\mathrm{G}}\tag{26}$$

$$-\mu_{ij,t}p_{ij,\max}^{\mathrm{F}}\leqslant p_{ij,t}^{\mathrm{F}}\leqslant\mu_{ij,t}p_{ij,\max}^{\mathrm{F}}\tag{27}$$

$$-\mu_{ij,t}q_{ij,\max}^{\mathrm{F}}\leqslant q_{ij,t}^{\mathrm{F}}\leqslant\mu_{ij,t}q_{ij,\max}^{\mathrm{F}}\tag{28}$$

$$U_{i,t}-U_{j,t}\geqslant M\left(\mu_{ij,t}-1\right)+2\left(r_{ij}p_{ij,t}^{\mathrm{F}}+x_{ij}q_{ij,t}^{\mathrm{F}}\right)\tag{29}$$

$$U_{i,t}-U_{j,t}\leqslant M\left(1-\mu_{ij,t}\right)+2\left(r_{ij}p_{ij,t}^{\mathrm{F}}+x_{ij}q_{ij,t}^{\mathrm{F}}\right)\tag{30}$$

$$U_{i,\min}\leqslant U_{i,t}\leqslant U_{i,\max}\tag{31}$$

式中,$p_{ij,t}^{\mathrm{F}}$ 和 $q_{ij,t}^{\mathrm{F}}$ 分别为线路(i,j)在时刻 t 传输的有功和无功功率;$p_{i,t}^{\mathrm{G}}$ 和 $q_{i,t}^{\mathrm{G}}$ 分别为节点 i 在时刻 t 的有功和无功功率;$p_{i,t}^{\mathrm{L}}$ 和 $q_{i,t}^{\mathrm{L}}$ 分别为节点 i 在时刻 t 的负荷有功和无功功率;$\Delta p_{i,t}$ 和 $\Delta q_{i,t}$ 分别为节点 i 在时刻 t 的有功和无功功率削减量;N 为配电网母线节点个数;$\mu_{ij,t}$ 为时刻 t 在线路$(i,j)\in D_{\mathrm{L}}$ 上的运行状态(当线路故障,$\mu_{ij,t}=0$ 时,流经线路(i,j)有功和无功功率均为 0 W);$p_{i,\max}^{\mathrm{G}}$ 与 $q_{i,\max}^{\mathrm{G}}$ 分别为节点 i 的发电机的有功与无功出力上限;$p_{ij,\max}^{\mathrm{F}}$ 和 $q_{ij,\max}^{\mathrm{F}}$ 分别为允许流经线路(i,j)有功和无功最大值;$U_{i,t}$ 为节点 i 在时刻 t 的电压的平方;r_{ij} 和 x_{ij} 分别为线路(i,j)的电阻和电抗;$U_{i,\min}$、$U_{i,\max}$ 分别为节点 i 的最小、最大电压值的平方;M 为大 M 法对电压变量进行约束中的一个较大的常数。

式(17)~(20)为功率平衡约束。功率平衡约束确保了配电网中有功功率和无功功率的平衡。式(21)~(22)为功率上、下限约束。式(23)~(24)为潮流约束。式(25)~(27)为节点电压约束。

2.2 目标函数

为降低极端气象灾害事件对配电网的影响,本文基于文 2.1 中的约束条件,以负荷削减量及规划成本最小作为模型的目标函数,即

$$\min\sum_{t\in T}\sum_{i\in N}\Delta p_{i,t}+\sum_{ij\in D_{\mathrm{L}}}c^{\mathrm{HD}}X_{ij}^{\mathrm{HD}}+\sum_{ij\in D_{\mathrm{N}}}c^{\mathrm{TL}}X_{ij}^{\mathrm{TL}}\tag{32}$$

式中,T 为故障时间集合;c^{HD} 和 c^{TL} 分别为加固资源和联络线资源成本。

该目标函数的第一项用于最小化台风来临后配电网总负荷削减量,降低台风灾害对配电网安全运行的冲击;第二项和第三项用于最小化配电网配置资源成本。

2.3 模型求解

本文采用 MATLAB/Yalmip 中的 Gurobi 求解器对所提的优化问题进行求解,模型求解流程如图 1 所示。

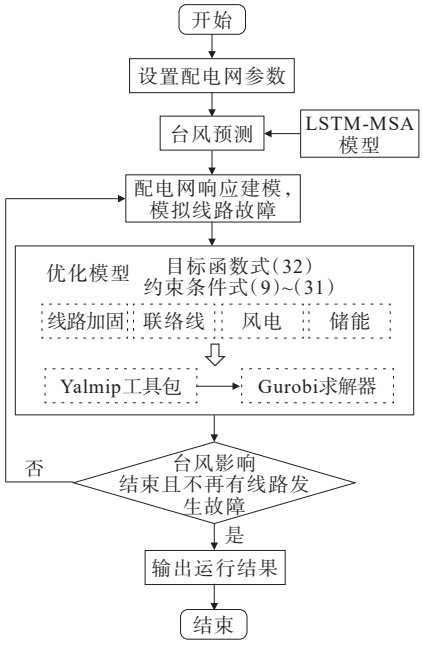

图 1 模型求解流程

Figure 1 Model solution process

3 算例分析

为验证所提方法的有效性,本文先对 LSTM-MSA 模型进行测试,再分别采用 IEEE 33 节点和 IEEE 69 节点配电网系统进行仿真分析。

3.1　LSTM-MSA 模型预测性能

为测试LSTM-MSA模型在预测台风数据方面的性能，本文将其与传统LSTM、门控循环单元(gated recurrent unit，GRU)模型进行对比，并采用MSE、均方根误差(root mean squared error，RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error，MAE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error，MSPE)和决定系数(R^2)5个指标评价这3个模型的预测性能。不同模型台风数据预测结果如图2所示，各模型性能指标见表2。

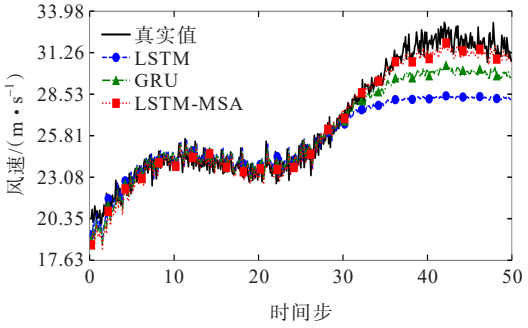

图 2　不同模型台风数据预测结果

Figure 2　Typhoon data prediction results with different models

表 2　各模型性能指标

Table 2　Performance metrics of different models

指标值	MSE/%	RMSE/%	MAE/%	MAPE/%	R^2
LSTM	2.606 9	1.614 6	1.210 0	14.07	0.817 9
GRU	1.369 4	1.170 2	0.918 0	14.86	0.904 4
LSTM-MSA	0.613 4	0.783 2	0.619 8	15.76	0.957 2

由表2可知，LSTM-MSA模型在MSE、RMSE和R^2等指标上表现最佳。LSTM-MSA模型的MSE比GRU和LSTM的MSE分别降低了0.756 0和1.993 5个百分点，且LSTM-MSA决定系数更接近于1，这说明其拟合效果更佳。从图2中可以看出，引入了多层注意力机制后，模型能更好地捕捉数据中的复杂模式。因此，将LSTM-MSA作为预测台风致灾因子数据的模型。

3.2　IEEE 33节点配电网系统

IEEE 33节点配电网系统如图3所示。从图3中可以看出，该网络为一个辐射型网络。该配电网包含3个分布式风电电源、2个储能节点与5条联络线。配电网各节点位置信息见表3。其灵活性资源配置位置见表4。为模拟台风的影响，假设台风在(−10 km，5 km)的位置登陆，并以20 km/h的速度向东北方45°方向行进，该台风风速数据也基于LSTM-MSA的预测结果。

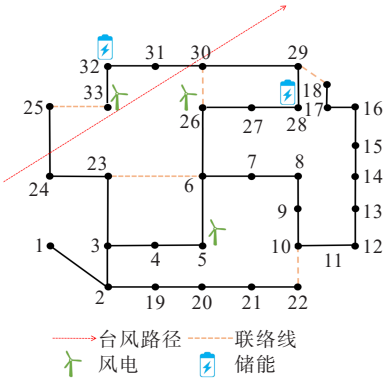

图 3　IEEE 33节点配电网系统

Figure 3　IEEE 33-bus distribution system

表 3　各节点位置

Table 3　Location information for each node in the distribution network　　km

节点	x轴	y轴	节点	x轴	y轴
1	0	6	18	29	29
2	6	0	19	11	0
3	6	6	20	16	0
4	11	6	21	21	0
5	16	6	22	26	0
6	16	16	23	6	16
7	21	16	24	0	16
8	26	16	25	0	26
9	26	11	26	16	26
10	26	6	27	21	26
11	29	6	28	26	26
12	32	6	29	26	32
13	32	11	30	16	32
14	32	16	31	11	32
15	32	21	32	6	32
16	32	26	33	6	26
17	29	26			

表 4　灵活性资源配置位置

Table 4　Flexible resource allocation location

初始信息	分布位置
风电	节点：5、26、33
储能	节点：28、32
联络线	线路：6-23、10-22、18-29、26-30、25-33

配电线路故障概率如图4所示。从图4中可以看出，随着台风从逐渐靠近到远离，配电线路的故障概率经历了先增大，再减小，继续增大，最终减小的过程。其中，部分线路故障概率处于较高的水平，极有可能发生故障。为便于分析，本文假设当故障概率大于0.6时，该线路处于故障状态。线路故障顺序见表5。由表5可知，该线路故障与线路和

台风中心的位置信息相关，其主要故障点分布在配电网靠近台风路径的左上方。

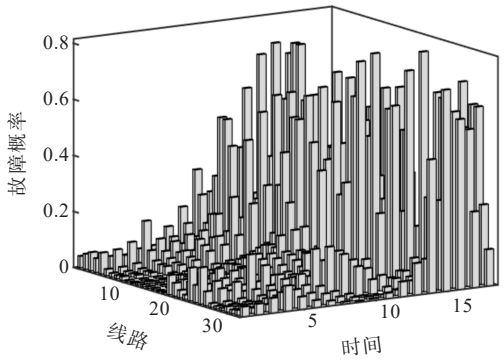

图 4 配电线路故障概率

Figure 4 Failure probabilities of distribution lines

表 5 线路故障顺序

Table 5 Sequence of distribution line failures

故障时间	故障线路
11:00	3-23
12:00	5-6、14-15、23-24、24-25
14:00	6-7、7-8、6-26
15:00	15-16
16:00	31-32
17:00	15-16、26-27
18:00	27-28、29-30、30-31

为确定加固线路的条数，本文仿真了加固 0～4 条线路情况下的系统负荷削减的变化。加固线路条数对负荷削减的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出，当加固线路较少时，系统韧性较差，靠近 1 号节点的线路发生故障后，附近大量节点会失去电力供应，造成严重的负荷削减。而当加固线路超过 4 条时，系统韧性得到了显著增强，台风对系统的不利影响得到有效降低。为更好地模拟台风影响下系统负荷的下降过程，考虑加固资源成本的限制，本文将加固线路的最大条数设置为 3。根据优化结果，加固位置分别为线路 3-23、23-24、24-25。此外，优化结果显示，联络线 10-22 被启用。

为评估所提多资源协同优化方法的有效性，本文设置了分别考虑储能资源和风电是否参与电力供应情况下的 4 种场景，场景设置见表 6。

采用韧性面积 R_r[34] 来度量各场景下配电网的鲁棒性，即

$$R_r=\int_{t_1}^{t_2}\left(\frac{\sum_i \Delta p_{i,t}}{\sum_i p_i^L}\right)\mathrm{d}t \tag{33}$$

式中，p_i^L 为节点 i 的负荷量；t_1 为系统发生负荷削减的时刻；t_2 为不再有负荷削减增长的时刻。

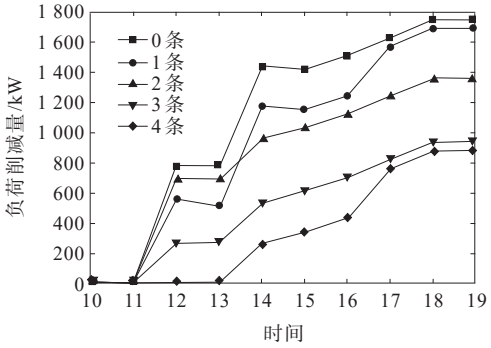

图 5 加固线路条数对负荷削减的影响

Figure 5 Influence of the number of reinforced lines on load reductions

表 6 场景设置

Table 6 Case settings

场景	储能是否参与供能	风电是否参与供能
1	否	否
2	否	是
3	是	否
4	是	是

R_r 本质是故障情况下负荷削减量与正常情况的差值在时间上的积分，其描述了故障导致系统负荷量下降的速度和严重程度。R_r 值越小，故障情况与正常情况越接近，造成的停电影响越小；反之，R_r 值越大，故障情况与正常情况越偏离，造成的停电影响越严重。

负荷削减情况如图 6 所示。场景 1 到场景 4 的 R_r 分别为 1.849 3、1.811 6、1.394 3 和 1.114 4。结果表明，储能和风电参与供能能有效提高配电网的韧性。

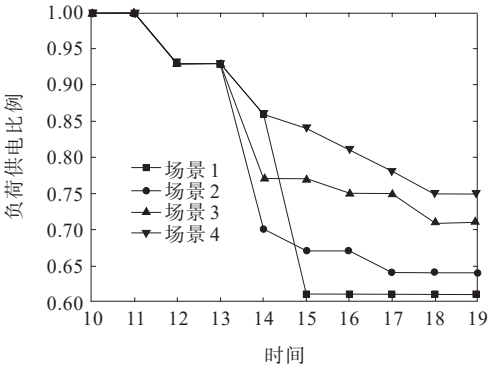

图 6 负荷削减情况

Figure 6 Load reductions of system in different cases

从图 6 中可以看出，在未考虑储能和风电灵活性资源的场景中（场景 1），系统负荷削减最严重，造成了 1 450 kW 的负荷削减。而在考虑灵活性资源参与供能后，负荷削减得到缓解，在 19:00，也就是台风影响结束时，场景 2、3 的负荷削减量比场景 1 的分别降低了 8.27% 和 26.90%。特别是在同时考

虑储能和风电参与的场景 4 中，其负荷削减比场景 1 的降低了 35.17%，取得最好的结果。

场景 4 中的负荷平衡情况如图 7 所示。

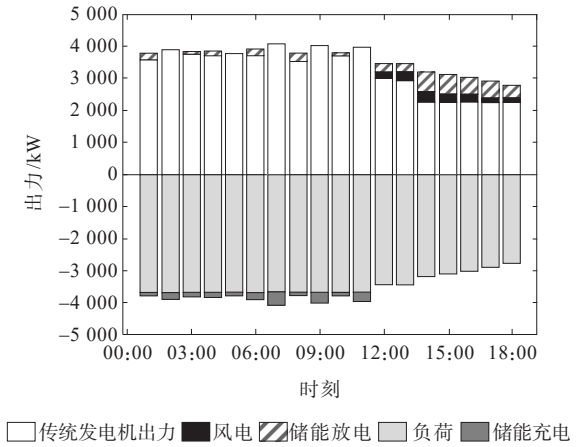

图 7　场景 4 中的负荷平衡情况

Figure 7　Power balance of system in case 4

从图 7 中可以看出，在台风影响初期，负荷削减量较小，此时的负荷富余的风点可以为储能充电，增加储能电量。当台风导致大量线路故障后，储能为部分与发电机失去连接的节点提供电力供应，以减少系统的负荷削减量。

3.3　IEEE 69 节点配电网系统

IEEE 69 节点配电网系统如图 8 所示。在 IEEE 69 节点配电网系统中，共有 5 条联络线和 5 条线路得到了加固。在台风灾害影响下，共有 11 条配电线路发生故障，该配网配置了 3 个储能电站参与台风灾后应急恢复。为讨论储能配置资源对灾后修复的影响，本节设置各储能站电池数量分别为 10、20、30、40 和 50 块。不同储能情况下系统负荷削减情况如图 9 所示，储能供电比例如图 10 所示。

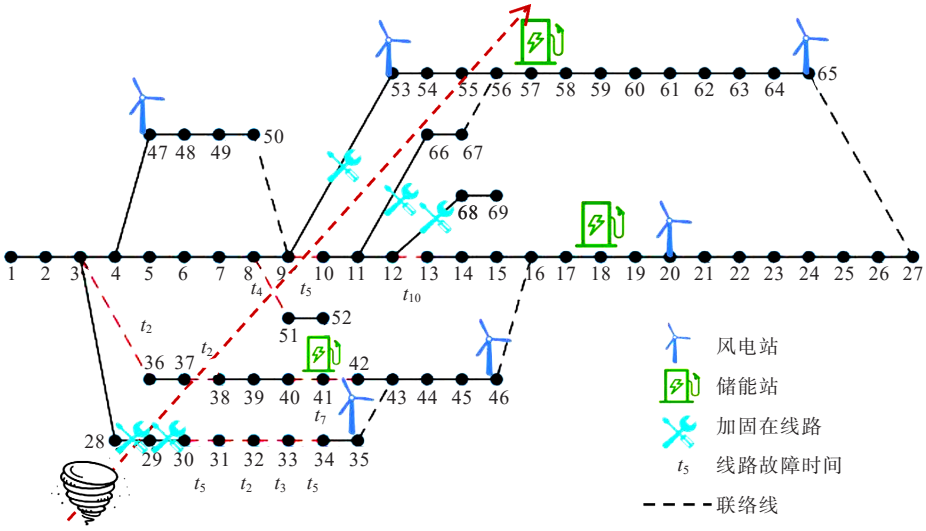

图 8　IEEE 69 节点配电网系统

Figure 8　IEEE 69-bus distribution system

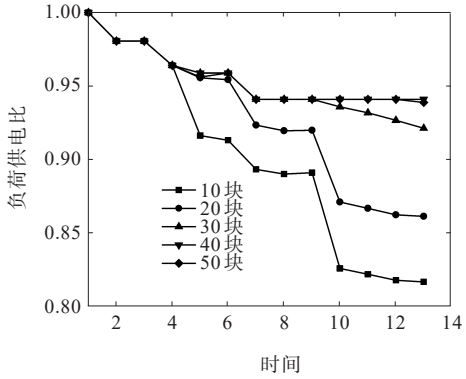

图 9　不同储能情况下系统负荷削减情况

Figure 9　Load reductions of system under different energy storage cases

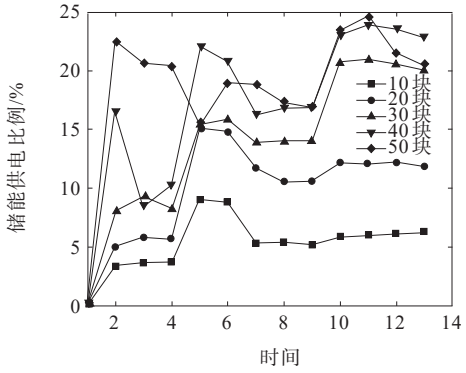

图 10　储能供电比例

Figure 10　Ratio of energy storage in power supply

从图 9 中可以看出，当储能站配备较少的电池容量时，其对系统负荷供电恢复能力受限，导致负荷削减量达到最大值。随着电池容量的逐步增加，系统负荷供电量也相应提升，最高可实现 10.9% 的负荷供电增加。然而，当电池容量增加到一定程度后，其对负荷恢复的贡献将达到饱和。因此，为尽快恢复配电网的正常运作，必须及时采取有效的系统修复措施。图 10 中储能供电比例结果也印证了该结论。由此可知，储能作为新型灵活性资源，能有效提高配电网在极端气象灾害下的韧性。

4 结语

针对极端天气下配电网韧性提升的问题，本文以台风灾害为例，构建了台风参数预测与配电网协同防御调度的一体化方法体系，并在算例仿真中验证其有效性。主要结论如下：

1）融合短范围与长范围注意力机制，开发了 LSTM-MSA 模型，实现对台风关键参数的精准预测，为后续配电网风险评估与调度决策提供高质量先验输入；

2）为降低极端天气对配电网运行的威胁，提出考虑线路加固、联络线、风电与储能等多元的灵活的资源协同优化调度方法，并将其构建为以最小化负荷削减量与规划成本为目标、满足多类资源约束的线性优化问题，提升模型可求解性与工程适用性；

3）在算例仿真中，对不同加固资源配置下的系统表现进行对比分析，并据此筛选得到最优加固策略，为灾前资源配置提供依据；

4）进一步在 4 种场景下评估负荷削减效果，并结合韧性面积指标进行验证。风电与储能参与供能可有效降低负荷削减量，显著降低停电规模与停电持续时间，为运行人员制定资源预配置与防御措施提供技术支撑。

参考文献：

[1] 李少岩，赵汉广，顾雪平，等．考虑次生故障差异化影响下韧性主动提升的输电系统网架重构策略[J]. 中国电机工程学报，2024, 44(5): 1712-1726.
LI Shaoyan, ZHAO Hanguang, GU Xueping, et al. A novel transmission network reconfiguration strategy considering active improvement of system resilience under the differential influence of contingencies[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1712-1726.

[2] 杜洁，张海锋，王佳蕊，等．计及用户热耐受度的区域综合能源系统韧性评估及提升研究[J]. 全球能源互联网，2024, 7(1): 3-13.
DU Jie, ZHANG Haifeng, WANG Jiarui, et al. Resilience assessment and enhancement oriented human heat tolerance of regional integrated energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 3-13.

[3] 李沛霖，刘友波，廖红兵，等．面向极端事件的配电网差异化韧性供电服务及其定价方法[J]. 电网技术，2024, 48(10): 4074-4086.
LI Peilin, LIU Youbo, LIAO Hongbing, et al. Differentiated resilient power supply service and its pricing method of distribution network for extreme events[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4074-4086.

[4] 陶文嘉，冯亮，彭克，等．极端灾害下基于光储优化配置的配电网供电恢复方法[J]. 电力系统自动化，2025, 49(7): 189-197.
TAO Wenjia, FENG Liang, PENG Ke, et al. Power restoration method for distribution network based on optimal configuration of photovoltaic and energy storage in extreme disaster scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(7): 189-197.

[5] LI Z P, TANG W H, LIAN X L, et al. A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107497.

[6] 张亚超，丁志龙，谢仕炜，等．面向能源互联网的配电网韧性提升研究综述及展望[J]. 电网技术，2023, 47(5): 2054-2069.
ZHANG Yachao, DING Zhilong, XIE Shiwei, et al. Review and prospect of power distribution network resilience enhancement for energy Internet[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2054-2069.

[7] 张博，马梓耀，王辰，等．含光储充一体化电站的城市交直流混合配电网韧性提升策略[J]. 电力系统自动化，2023, 47(12): 28-37.
ZHANG Bo, MA Ziyao, WANG Chen, et al. Resilience improvement strategy for urban AC/DC hybrid distribution network with photovoltaic-storage-charging integrated station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 28-37.

[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] 王要强，李午祥，韩婧，等. 极端天气下配电网韧性评估及提升研究综述[J]. 电力建设，2025, 46(3): 1-15.
WANG Yaoqiang, LI Wuxiang, HAN Jing, et al. Review of evaluation and improvement of distribution network resilience under extreme weather[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 1-15.

[10] 李邦源，李铭益，杨家全，等. 极端天气下配电网故障多时段恢复韧性提升策略[J]. 电工电能新技术，2024, 43(6): 101-112.
LI Bangyuan, LI Mingyi, YANG Jiaquan, et al. Multi-period recovery strategy for improving distribution network resilience during extreme weather conditions[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(6): 101-112.

[11] 王乐，唐捷，黄远飞，等. 考虑微地形的配电系统雨涝淹没停电风险区划分方法[J]. 电力科学与技术学报，2024, 39(4): 84-92.
WANG Le, TANG Jie, HUANG Yuanfei, et al. Risk zone assessment of rainstorm induced waterlogging associated outage of distribution system with consideration of micro-topography[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 84-92.

[12] 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 Wenhu, 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.

[13] 孔惠文，马静，程鹏，等. 基于灾害场景预估的配电系统韧性两阶段故障恢复策略[J]. 电网技术，2024, 48(9): 3812-3821.
KONG Huiwen, MA Jing, CHENG Peng, et al. Resilience two-stage fault recovery strategy for distribution network based on disaster scenario prediction[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3812-3821.

[14] 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. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 59-66.

[15] 刘善峰，李哲，陈锦鹏，等. 基于误差修正的极端天气下风速预测[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版)，2023, 15(5): 574-584.
LIU Shanfeng, LI Zhe, CHEN Jinpeng, et al. Wind speed prediction in extreme weather based on error correction[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2023, 15(5): 574-584.

[16] 孙亦皓，刘浩，胡天宇，等. 基于时空关联特征与 GCN-FEDformer 的风速短期预测方法[J]. 中国电机工程学报，2024, 44(21): 8496-8507.
SUN Yihao, LIU Hao, HU Tianyu, et al. Short-term wind speed forecasting based on GCN and FEDformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8496-8507.

[17] 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(7): 1202-1213.

[18] 王守相，黄仁山，潘志新，等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. 高电压技术，2020, 46(1): 123-132.
WANG Shouxiang, HUANG Renshan, PAN Zhixin, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 123-132.

[19] 别朝红，李更丰. 极端天气条件下新型电力系统风险评估与弹性提升[J]. 全球能源互联网，2024, 7(1): 1-2.
BIE Zhaohong, LI Gengfeng. Risk assessment and resilience improvement of new power systems in extreme weather[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 1-2.

[20] 侯祖锋，王超，徐春华，等. 考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法[J]. 电力科学与技术学报，2024, 39(3): 78-85.
HOU Zufeng, WANG Chao, XU Chunhua, et al. Promotion strategy and evaluation method of distribution network resilience considering load importance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 78-85.

[21] 龚贤夫，韦慈航，廖晖，等. 考虑线路覆冰预测的冰灾下区域能源系统负荷削减评估方法[J]. 广东电力，2023, 36(12): 63-75.
GONG Xianfu, WEI Cihang, LIAO Hui, et al. Load shedding assessment method for regional energy systems considering line icing thickness prediction[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 63-75.

[22] 傅守强，陈翔宇，张立斌，等. 面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J]. 中国电力，2023, 56(7): 95-106.
FU Shouqiang, CHEN Xiangyu, ZHANG Libin, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 95-106.

[23] 赖业宁, 孙仲卿, 陆志平, 等. 考虑储能资源聚合参与的电网优化运行与韧性提升策略[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 57-65.
LAI Yening, SUN Zhongqing, LU Zhiping, et al. Power grid optimization operation and resilience improvement strategy considering the participation of energy storage resource aggregation[J].Electric Power,2025,58(2):57-65.

[24] LI J Q, XU X Y, YAN Z, et al. Resilient resource allocations for multi-stage transportation-power distribution system operations in hurricanes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(4): 3994-4009.

[25] 苏明玉, 许寅, 王颖, 等. 考虑配电网韧性与充电便利性的电动汽车充电站布点方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 341-348.
SU Mingyu, XU Yin, WANG Ying, et al. Placement of charging stations for electric vehicles considering distribution system resilience and charging convenience [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2 (4): 341-348.

[26] 卢明, 郭志明, 孟高军, 等. 输电线路气象风险精细化建模及气象灾害的在线预警防御策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 208-217.
LU Ming, GUO Zhiming, MENG Gaojun, et al. Refined meteorological risk modeling of transmission lines and online warning and defense strategies of meteorological disasters[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 208-217.

[27] 张海春, 陈望达, 沈浚, 等. 计及灵活性资源的配电网韧性研究评述[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 66-84.
ZHANG Haichun, CHEN Wangda, SHEN Jun, et al. Review of power distribution network resilience studies considering flexibility resources[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 66-84.

[28] 刘杰, 从兰美, 夏远洋, 等. 基于DBO-VMD和IWOA-BILSTM神经网络组合模型的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 123-133.
LIU Jie, CONG Lanmei, XIA Yuanyang, et al. Short-term power load prediction based on DBO-VMD and an IWOA-BILSTM neural network combination model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 123-133.

[29] 尚秋峰, 樊小凯, 谷元宇, 等. 基于双分支卷积神经网络结构和多注意力机制的输电线路状态识别方法[J]. 光学学报, 2024, 44(22): 47-58.
SHANG Qiufeng, FAN Xiaokai, GU Yuanyu, et al. Transmission line state recognition method based on dual-branch convolution neural network structure and multi-attention mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(22): 47-58.

[30] 付兴, 李宏男, 李钢, 等. 输电塔线体系风雨荷载计算理论及耦合失效评估研究进展[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 198-212.
FU Xing, LI Hongnan, LI Gang, et al. Advances in calculation theory of wind and rain loads and failure estimation for transmission tower-line systems[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(3): 198-212.

[31] FU X, LI H N, LI G, et al. Failure analysis of a transmission line considering the joint probability distribution of wind speed and rain intensity[J]. Engineering Structures, 2021, 233: 111913.

[32] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(5): 3747-3757.

[33] HOU G Y, CHEN S R. Probabilistic modeling of disrupted infrastructures due to fallen trees subjected to extreme winds in urban community[J]. Natural Hazards, 2020, 102(3): 1323-1350.

[34] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.