

基于线路加固的配电网网架规划模型

吕晓杰^{1*}, 刘树楷¹, 吴亚雄¹, 杨金铎², 唐惠玲³, 吴杰康⁴

¹中国南方电网有限责任公司, 广东 广州

²贵州电网有限责任公司, 贵州 贵阳

³广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州

⁴广东工业大学自动化学院, 广东 广州

收稿日期: 2026年9月22日; 录用日期: 2026年10月13日; 发布日期: 2026年10月23日

摘要

为提升配电网应对台风等极端灾害的韧性, 本文提出一种基于线路加固的配电网网架规划模型。首先, 构建线路加固经济指标与功率可达性指标, 分别量化加固成本效益与灾害下关键负荷的供电通达能力; 进而采用熵权法确定两指标权重, 加权得到线路加固重要度, 以此筛选关键加固线路。模型同时考虑电源出力、线路传输功率及频率偏差等运行约束。以某沿海城市配电网为算例, 采用线性递减惯性权重粒子群算法求解。结果表明, 所提方案较传统方案, 受损线路长度减少78.81%, 断杆数量减少82.35%, 负荷恢复时长由15小时缩短至7小时, 功率可达性由56.77%提升至92.64%, 验证了模型在提升电网抗灾能力与恢复效率方面的有效性。

关键词

配电网, 极端灾害, 网架规划, 线路加固

Grid Planning Model for Distribution Network Based on Line Reinforcement

Xiaojie Lv^{1*}, Shukai Liu¹, Yaxiong Wu¹, Jinduo Yang², Huiling Tang³, Jiekang Wu⁴

¹China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang Guizhou

³School of Physics & Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

⁴School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Received: September 22, 2026; accepted: October 13, 2026; published: October 23, 2026

*通讯作者。

文章引用: 吕晓杰, 刘树楷, 吴亚雄, 杨金铎, 唐惠玲, 吴杰康. 基于线路加固的配电网网架规划模型[J]. 智能电网, 2026, 16(5): 163-170. DOI: 10.12677/sg.2026.165018

Abstract

To enhance the resilience of distribution networks against extreme disasters such as typhoons, this paper proposes a grid planning model based on line reinforcement. Two indices are first constructed: the economic index of line reinforcement and the power accessibility index, which respectively quantify the cost-effectiveness of reinforcement and the power supply accessibility for critical loads under disasters. The entropy weight method is then adopted to determine the weights of these two indices, yielding the reinforcement importance of each line for selecting key lines to be strengthened. The model also incorporates operational constraints including power source output, line transmission capacity, and frequency deviation. A coastal city distribution network is taken as a case study, and the linear decreasing inertia weight particle swarm optimization algorithm is employed for solution. Results show that compared with the traditional scheme, the proposed scheme reduces damaged line length by 78.81% and broken pole count by 82.35%, shortens load recovery time from 15 hours to 7 hours, and improves power accessibility from 56.77% to 92.64%, demonstrating the model's effectiveness in enhancing disaster resistance and restoration capability.

Keywords

Distribution Network, Extreme Disasters, Grid Planning, Line Reinforcement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力行业是社会发展的核心支柱，其稳定运行直接影响经济、社会与环境的可持续性[1]-[3]。智能电网建设为配电网规划注入活力的同时也提出了更高要求，配电网网架规划需适配智能电表、智能开关等设备应用需求，统筹考虑信息通信网络布局，预留足够通信带宽[4]。人工智能负荷预测、优化算法的应用提升了配电网规划精度与效率，但也带来了大数据分析决策、智能化设备集成等新挑战[5] [6]。

早期配电网规划以经验和负荷预测为核心，依靠历史数据与专家判断确定建设方案，缺乏系统性与科学性，对非线性负荷增长模式适配性不足，易导致规划结果偏差较大[7]。早期方法多以单一目标为导向，忽略多重运行约束，易引发线路过载、电压越限等问题，但其为后续理论发展奠定了基础[1]。

传统规划阶段逐渐从经验驱动转向科学建模，辐射状网络规划通过优化线路路径与节点布局，在保障供电的同时降低网络损耗，但其刚性结构对复杂运行场景适配性不足[7]。确定性规划技术以数学优化模型为基础，通过明确目标函数与约束条件求解最优方案，如基于最短路径算法的规划方法可提升方案经济性与可靠性，但对输入数据精度要求高，难以处理不确定性因素[8]。后续通过引入整数编码、改进遗传算法，构建多目标规划模型，进一步弥补了单一目标规划的不足。

分布式电源接入对配电网的影响主要体现在电压波动、潮流变化、短路电流增加三方面，对可靠性的影响具有两面性，需在规划阶段结合接入位置、容量配置、运行策略详细分析[9]。适配分布式电源接入的规划策略主要包括微网规划、储能系统配置、分布式电源布局优化三类，可通过分析源荷时序特性、灾害风险、负荷分布等，优化规划方案，提升新能源消纳能力[2] [10]。

能源转型背景下，分布式电源接入规模不断扩大，其间歇性与随机性增加了配电网运行不确定性，双向潮流成为常态，对规划模型和方法提出更高要求[9]。当前学界已提出多目标协同规划、考虑碳交易

成本的扩展规划等方法,但在新能源出力不确定性量化、经济效益与环境效益协同等方面仍存在难点,相关研究仍需深化[2][10]。数学优化方法中,线性规划通过构建线性目标函数与约束条件求解规划问题,常用于线路投资与运行成本最小化模型,计算效率高,但难以准确反映复杂非线性因素[6]。非线性规划可适配线路阻抗、节点电压约束等带来的非线性特征,通过序列二次规划法、内点法等可获得更精确的规划方案,但计算复杂度较高,处理大规模问题时易出现收敛困难。启发式算法中,遗传算法借鉴生物进化理论,通过染色体编码、适应度函数设计等操作逐步搜索最优解,全局搜索能力较强,但局部搜索能力相对较弱,可通过引入精英保留机制、自适应调整交叉变异概率改进性能[6]。粒子群算法模拟鸟群觅食行为,简单易实现、计算效率高,适用于大规模配电网规划问题,但存在早熟收敛问题,可通过引入混沌搜索机制等改进。人工智能方法中,人工神经网络可处理非线性、时变性强的时间序列数据,提升负荷预测精度,辅助规划决策,但训练需大量高质量数据,模型解释性较差[4][11][12]。深度学习通过构建深层神经网络模型,可自动提取数据高级特征,处理多因素耦合问题,在复杂配电网场景规划中潜力巨大,但也存在计算资源需求大、模型解释性不足等挑战。

本文将加固决策嵌入配电网运行优化模型,考虑电源出力上下限、线路传输功率限值和频率偏差等安全约束,构建完整的规划模型。求解方面,选用线性递减惯性权重粒子群算法,兼顾全局搜索与局部开发能力,避免早熟收敛。采用熵权法客观赋权,线性加权得到每条线路的加固重要度,据此优先选出重要度最高的线路作为加固对象,从而实现有限资源下的精准投入。

2. 网架规划的优化模型

本文提出了线路加固经济指标 F_{lc} 和功率可达性指标 K_l ,采用熵权法对两个指标评价结果进行加权,得出各线路加固的重要度,并根据重要度选择关键线路进行加固。实际中针对加固线路的导线采用钢芯耐热铝金型线替换,针对加固线路的杆塔采用更大规模或更高强度的材料来实现,针对加固线路旁的植被进行严格的修剪管理。线路加固重要度 G 表达式为

$$G = \omega_p F_{lc} + \omega_q K_l \quad (1)$$

式中, ω_p 和 ω_q 分别为两种指标的权重系数,且满足 $\omega_p + \omega_q = 1$ 。

2.1. 线路加固经济指标

线路加固经济指标包括线路加固成本 C_{jg} 、切负荷惩罚成本 C_q ,通过对线路加固,减少切负荷,提高系统的稳定性,该指标越小,配电网韧性越强。其表达式为

$$\begin{cases} F_{lc} = C_{jg} + C_q \\ C_{jg} = \sum_{l \in \Omega_l} c_g d_l \\ C_q = \sum_{s \in \Omega_s} Z_s \sum_{t \in Z_t} c_a P_{s,t}^{shed} \end{cases} \quad (2)$$

式中, c_g 为线路加固费用; d_l 为线路加固决策 0-1 变量,若 d_l 为 1 即对线路 l 进行加固,为 0 则不加固; Ω_l 为系统所有线路合集; Ω_s 为台风场景集合; Z_s 为台风场景 s 发生概率; Z_t 为台风时段; c_a 为单位切负荷惩罚成本; $P_{s,t}^{shed}$ 为系统在场景 s 下 t 时刻的切负荷量。

2.2. 功率可达性指标

在台风灾害期间,配电网中本地分布式电源、固定式备用柴油发电机组、移动式备用柴油发电机组等电源点与负荷点的连接关系,对于恢复供电起到关键性的作用。台风灾害可能对电源点与负荷点的连接关系有破坏的影响。为此,本文采用线路功率可达性作为一个指标来衡量电源点与负荷点的连接关系

受影响程度。通过计算线路功率可达性指标得出优先加固的关键线路，保障关键负荷复电。线路功率可达性指标其表达式为

$$K_t = \sum_{s \in \Omega_s} Z_s \psi_{k-l}^s / N_{G-L} \quad (3)$$

式中， ψ_{k-l}^s 为场景 s 下电源 k 与负荷 l 间的连通性，若 $\psi_{k-l}^s = 1$ 则在台风灾害期间电源 k 与负荷 l 间是连通， $\psi_{k-l}^s = 0$ 则电源 k 与负荷 l 间不连通； N_{G-L} 为台风灾害前电源 G -负荷节点 L 对总数。

2.3. 约束条件

2.3.1. 电源出力约束

电源出力不能大于其允许的最大值，也不能小于其允许的最小值：

$$\begin{cases} P_G^{\min} \leq P_{G,t} \leq P_G^{\max} \\ Q_G^{\min} \leq Q_{G,t} \leq Q_G^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $P_{G,t}$ 、 $Q_{G,t}$ 分别为配电系统电源在第 t 时刻的有功和无功功率； $P_G^{\min}$ 、 $P_G^{\max}$ 、 $Q_G^{\min}$ 、 $Q_G^{\max}$ 分别为配电系统电源有功和无功功率的最小值和最大值。

2.3.2. 线路传输功率约束

线路传输功率不能大于其允许的最大值，也不能小于其允许的最小值：

$$S_{ij}^{\min} \leq S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} \quad (5)$$

式中， S_{ij} 为线路 ij 传输的视在功率； $S_{ij}^{\min}$ 、 $S_{ij}^{\max}$ 分别为线路 ij 输送的视在功率最小值和最大值。

2.3.3. 配电网频率约束

系统频率偏差不能超出或低于其允许的最大频率偏差：

$$|f_t| \leq f_{\max} \quad (6)$$

式中， f_t 为系统在第 t 时刻的频率偏差； $f_{\max}$ 为系统安全运行的最大频率偏差。

3. 算例计算与分析

3.1. 数据来源与参数设置

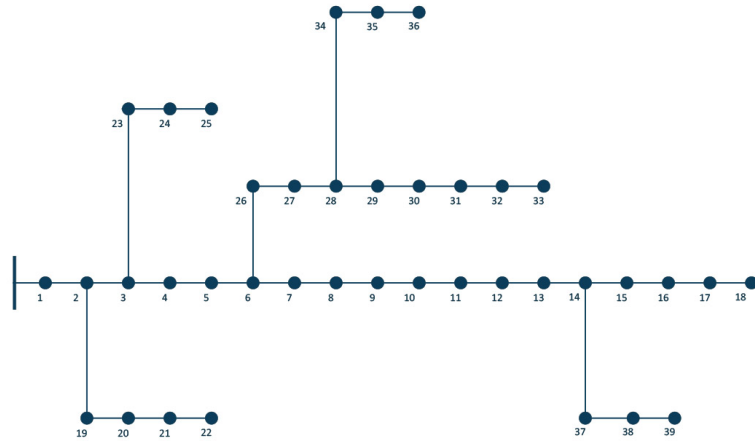


Figure 1. The topological structure diagram of the distribution network
图 1. 配电网拓扑结构图

本文以某沿海城市为例，采用如图 1 所示的某配电网进行仿真分析。台风灾害建模参数如下：空气密度 $\rho=1.15\text{kg/m}^3$ ；最大风速半径 $R_{\max}=35\text{km}$ ；环境背景气压 $P_n=101\text{hpa}$ ；中心气压 $P_c=90\text{hpa}$ 。各负荷节点重要等级如表 1 所示，配电系统切负荷成本为 $5000\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。线性递减惯性权重粒子群算法参数设置：初始种群大小为 80；最大迭代次数为 $T^{\max}=100$ ；惯性权重最大值为 $\omega_{\max}=0.9$ ；惯性权重最小值为 $\omega_{\min}=0.4$ 。

Table 1. Nodal load levels
表 1. 据节点负荷等级

负荷等级	负荷节点
一级负荷	1, 2, 5, 17, 19, 23, 24, 29, 31
二级负荷	3, 6, 11, 15, 16, 21, 22, 25, 30, 32, 33, 37
三级负荷	4, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 18, 26, 27, 28, 34, 35, 36, 38, 39

3.2. 线路加固规划

根据线路加固重要度指标计算可以得出各支线的加固重要度如图 2 所示。根据线路加固重要度排序选取出重要度最高的 7 条线路做为加固线路，其各指标数值如表 2 所示。

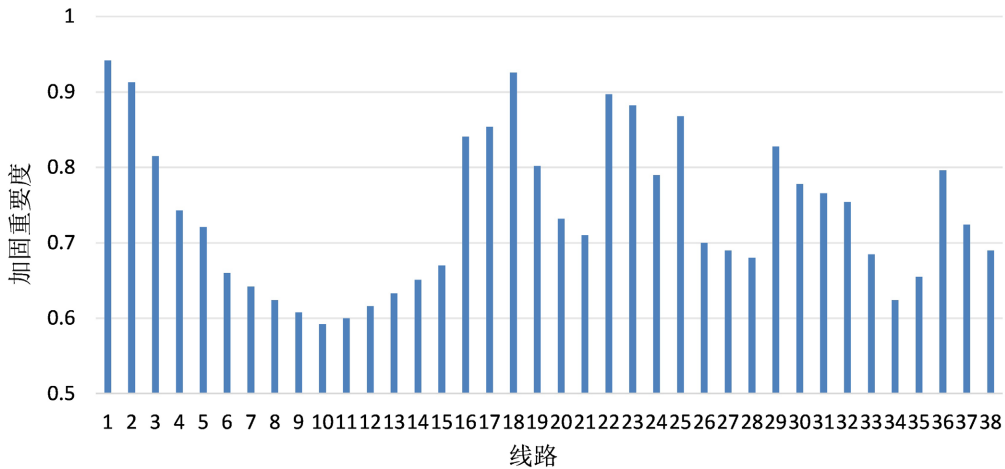


Figure 2. Importance of line reinforcement
图 2. 线路加固重要度

Table 2. Priority ranking results of line reinforcement
表 2. 线路加固重要度排序结果

排序	线路	加固重要度	经济指标	功率可达性指标
1	1	0.942	0.918	0.961
2	18	0.926	0.899	0.948
3	2	0.913	0.884	0.937
4	22	0.897	0.866	0.923
5	23	0.882	0.850	0.909
6	25	0.868	0.835	0.896
7	17	0.854	0.820	0.883

根据图 2 线路加固重要度排序可以优先选出 1-2、2-19、2-3、3-23、23-24、6-26、17-18 这 7 条加固重要度最高的线路段进行加固。由表 2 可以看出,若仅使用一种指标,会导致评估结果存在一定偏差,而基于这两种指标选择的线路进行加固,能够在控制成本的同时最大程度提升电网的供电可靠性和抗灾能力。

在相同台风灾害影响下,两种方案线路、电杆受损情况如图 3 所示。

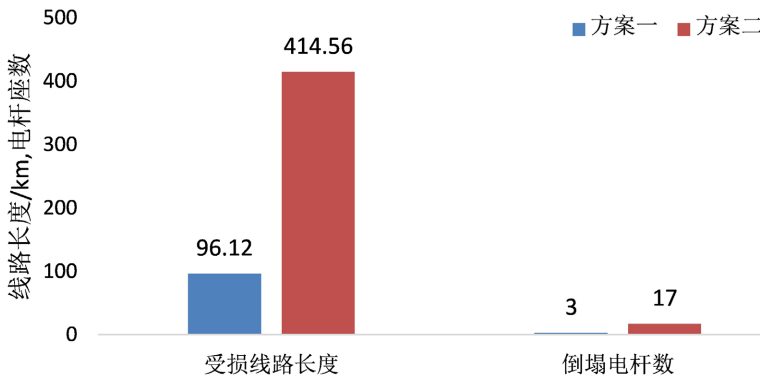


Figure 3. Damage of lines and poles
图 3. 线路、电杆受损比较

由图 3 可以看出,经过线路加固的方案一受损线路长度与方案二相比减少了 78.81%,断杆数量减少了 82.35%。由此可知,网架结构得到有效加强后,提高了配电系统韧性,减少了停电损失。

在受到台风的影响,两种方案下的负荷恢复结果如图 4 所示,供电恢复时长和功率可达性如表 3 所示。

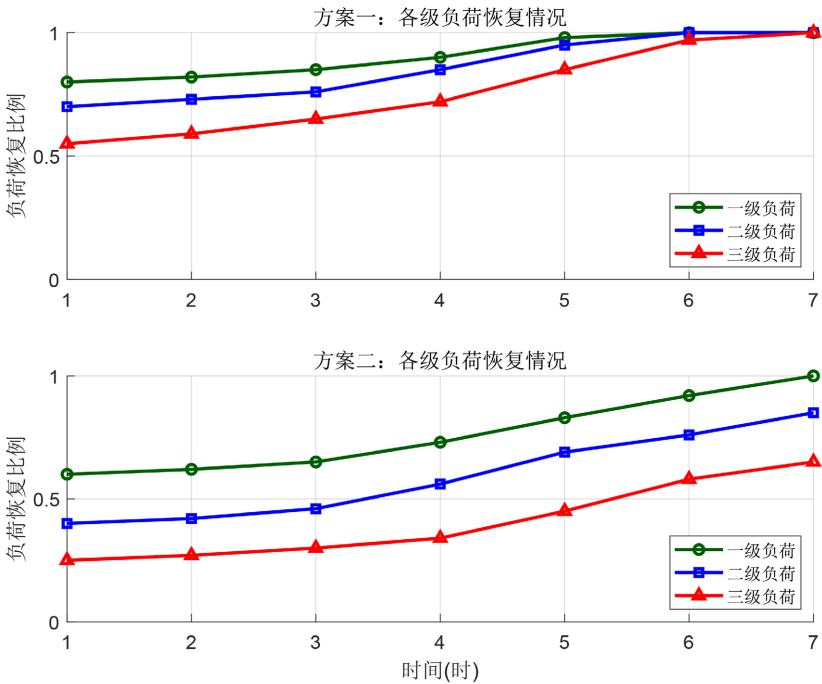


Figure 4. Load recovery results at all levels
图 4. 各级负荷恢复结果

Table 3. Comparison of recovery time and power availability**表 3.** 恢复时长和功率可达性比较

恢复方案	恢复时长	功率可达性/%
方案一：线路加固的网架优化	7 个小时	92.64
方案二：传统电网规划	15 个小时	56.77

由图 4 可以看出,在台风登陆造成影响时,方案一的电网进行了网架加固,各级负荷缺失比例与方案二相比减少了接近一半;在方案一中,充分整合利用复电资源,与方案二相比,负荷恢复速度更快;由表 3 可以看出,从台风刚登陆造成影响时方案一负荷供电完全恢复时长仅需 7 个小时,而方案二恢复需要 15 小时,方案一的功率可达性也远高于方案二。

4. 结论

1) 线路加固重要度指标能有效识别关键薄弱环节:所提出的经济指标与功率可达性指标相结合,通过熵权法加权得到的加固重要度,可综合反映线路加固的经济性与供电可达性,避免单一指标导致的偏差,为精准选线提供量化依据。

2) 加固方案显著提升配电网结构韧性与抗灾性能:算例表明,对重要度排序前 7 的线路进行加固后,台风灾害下线路受损长度和断杆数量均降低超过 78%,说明网架结构的物理加强可大幅减少直接破坏,降低停电风险。

3) 采用线路加固的网架优化,可以增强单位供电恢复能力:加固后的电网在灾害中各级负荷损失比例减少近一半,恢复时长缩短 53.3%,功率可达性提高约 35.9 个百分点,证明线路加固与协同调度相结合能显著加快复电进程,增强极端事件下的供电保障能力。

基金项目

南方电网有限责任公司科技计划项目(20970800JSFWF20260900011)。

参考文献

- [1] 王明渊,何凯,王木.基于配网规划等值曲线的输配电网协调规划[J].电力科学与技术学报,2022,37(6):46-54.
- [2] 徐小琴,王博,赵红生,杜治,杨东俊,李高俊杰,刘军,胡钊.基于交替方向乘子法及最优潮流的输配电网协调规划方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(16):18-27.
- [3] 肖白,郭蓓.配电网规划研究综述与展望[J].电力自动化设备,2018,38(12):200-211,217.
- [4] 刘志勇,曾庆彬,吴晗.高比例新能源接入的农村配电网网架多目标协同规划方法[J].广东电力,2023,36(9):34-42.
- [5] 刘伟生,刘洪,刘志清,王飞,王春义,崔文婷.配电网模块化规划体系与方法[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(11):139-144.
- [6] 李楠,王炜,马雪,李芳,杨帆,李雪男.考虑碳交易成本及区域能源优化的配电网扩展规划研究[J].科学技术与工程,2022,22(8):3101-3109.
- [7] 李楠,邹晓松,孙志勇,王森.基于改进 Dijkstra 算法的配电网网架扩展规划[J].电力科学与工程,2020,36(4):38-43.
- [8] 聂明林,汪泓,陈春,王凌纤,董旭柱.考虑可靠性的配电网网架多目标规划[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(1):10-16.
- [9] 施鹏佳,雷勇,张林垚,张良一,王孝慈,董树锋.抗灾型配电网网架规划方法研究[J].浙江电力,2019,38(6):46-52.
- [10] 高崇,赵懿祺,唐俊熙,张俊潇.以解决现状电网问题为导向的配电网自动规划方法研究[J].电力系统保护与控制

制, 2018, 46(15): 85-92.

[11] 王文才. 关于智能配电网技术在配电网规划中的具体应用[J]. 经济技术协作信息, 2021(20): 142-142.

[12] 刘超, 王旭阳, 刘娟楠, 王云飞, 吴延琳, 张寓涵, 赵刚. 配电网规划标准体系优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 93-98.