

配电网防风抗灾加固措施优化决策方法

高鑫, 唐飞*, 张童彦, 李宇

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072)

Optimal Decision-making Method of Wind-proof and Disaster-resistant Reinforcement Measures for Distribution Network

GAO Xin, TANG Fei*, ZHANG Tongyan, LI Yu

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

摘要: 台风是常见的自然灾害之一, 会严重影响配电网基础设施的正常运行。通过加固系统元件(如导线和电杆)提升其抗灾强度, 是降低由极端天气事件所造成损失的一种有效方法。为此, 提出了考虑经济性约束的配电网基础设施灾前加固策略。首先对极端天气自然灾害发生、元件脆弱性、灾害对配电网影响进行建模, 并利用蒙特卡罗仿真方法评估配电网的抗灾能力。然后, 将配电网加固策略问题作为优化问题, 综合考虑总加固预算约束、负荷的重要度和配电网元件脆弱性, 并通过粒子群优化算法求解最优加固策略。最后, 将所提出策略应用于改进的18节点配电系统以验证其有效性。

关键词: 台风; 配电网; 抗灾能力评估; 基础设施加固

ABSTRACT: Typhoon is one of the common natural disasters, which will seriously affect the normal operation of the distribution network infrastructure. Reinforcing system infrastructure (such as wires and poles) to improve their disaster resilience is an effective way to reduce losses caused by extreme weather events. Therefore, this paper proposes a pre-disaster reinforcement strategy for the distribution network infrastructure considering economic constraints. Firstly, the models of occurrence of extreme weather, component fragility and the disaster response process were created. Then, the disaster resilience of distribution network was evaluated via Monte Carlo simulation. The reinforcement strategy was further optimized through the particle swarm optimization algorithm, considering the total reinforcement budget, the load importance and the component fragility. Finally, the proposed strategy was applied to an improved 18-bus distribution system to verify its effectiveness.

KEY WORDS: typhoon; distribution network; disaster resilience evaluation; infrastructure reinforcement

0 引言

近年来, 以台风为代表的极端天气灾害频发, 严重破坏了电力关键基础设施, 引发大范围停电, 造成巨大经济损失^[1-2]。2012年, 美国飓风“桑迪”造成当地电网线路与杆塔的大面积倒塌与断线, 引发大范围停电^[3]。2019年, 超级台风“利奇马”登陆我国东南沿海地区, 导致浙江、山东等省份电网大量线路故障并引发停电, 造成巨大经济损失。考虑到配电网作为公共基础设施的重要性, 提高配电网抗灾能力具有十分重要的意义^[4]。

配电网抗灾能力提升主要分为关键基础设施加固与运行策略优化2部分^[5]。其中运行策略优化主要包括对分布式电源(distributed generation, DG)、储能设备、微电网等设备进行优化调度, 实现故障区域的孤岛自治供电, 提高配电网在灾害持续期间与灾后恢复阶段的抗灾能力。但若因配电网设施抗灾能力不足而大面积损坏, 导致无法进行优化运行, 则灾后运行策略对配电网抗灾能力的提升效果将会被极大削弱。关键基础设施加固是在配电网规划或灾前阶段, 通过对部分关键基础设施(如重要变电站、电杆、线路)预加固, 提高配电网对潜在灾害的抵御能力, 从而减少负荷缺供和抢修工作所需的时间。现已有多种措施可用于提高配电网基础设施的抗灾能力, 如植被

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977157)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51977157).

修剪管理、架空线路地下电缆化与预先规划黑启动资源等措施。对现有架空设施进行加固,如将电杆升级为更坚固的杆、对电杆结构进行加固与翻新等,是目前较具有实践意义的配电网抗灾能力提升措施。

目前对电力系统抗灾能力提升的研究大多数集中在输电网上。然而,历史数据表明大多数停电事故都发生在配电网中,配电网更容易受到极端天气的影响^[6-9]。因此,研究极端天气灾害对配电网的影响同样具有重要意义。配电网基础设施加固问题主要包括2方面^[3]:一是如何确定配电网中各支路的加固优先级;二是对每条支路应采取哪些加固措施。针对这2方面问题,常用的方法是根据专家经验进行判断或升级先前已损坏的设施。文献[10]以提高配电网的可靠性为目标,通过识别关键线路风险来加固最有可能发生故障的电杆;文献[11]提出了一种植被修剪管理调度算法,以确定架空线路周边植被修剪的最佳时间。但上述文献都仅限于单一的加固措施,并且忽略了极端天气强度的影响。文献[12]提出了基于用户侧分布式电源进行配电系统负荷恢复力评估的研究框架,但未考虑基础设施加固对配电系统恢复力的影响。文献[13]采用三层鲁棒优化模型,以植被修剪管理和电杆升级为加固策略,寻找在极端天气下使得系统负荷减少最小的加固方案,但未考虑分布式电源等灵活性资源与经济性。文献[14]将移动储能容量作为决策变量,提出了考虑恢复力与经济性的配电网移动储能规划策略,但未考虑规划阶段的其他加固措施。

针对以上问题,本文提出一种配电网防风抗灾加固措施优化决策方法。首先采用蒙特卡罗仿真(Monte Carlo simulation, MCS)方法模拟极端天气下配电网故障,并对配电网的抗灾能力进行评估;其次,采用植被修剪管理以及电杆的升级、翻新与加固等基础设施加固措施提升配电网防风抗灾能力;最后,在计及经济性约束的同时,考虑负荷重要度以及受限于维修资源的元件修复时间,采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法确定各支路的加固优先级,实现加固措施的优化决策。

1 极端天气模型与元件故障模型

1.1 极端天气模型

配电网元件在台风下的损坏主要有以下2种情况:1)强风等外力导致杆塔倒塌或线路中断,因物理元件失效而中断电力供应;2)外力导致横担与绝缘子等元件故障,因电气性能下降而中断电力供应。

极端天气的强度服从一定的概率分布,如台风的风速可由Weibull分布函数预测^[15]:

$$f_v(v) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(v/\lambda)^k} \quad (1)$$

式中: k 和 λ 是与Weibull分布有关的参数; v 为台风风速。

可通过统计待评估地区台风历史数据将台风事件建模为概率分布,并通过式(2)得到一定年限下的最大风速^[16]。

$$v = \lambda (\ln T)^{1/k} \quad (2)$$

式中 T 为选定的统计数据年限。

1.2 元件故障模型

1.2.1 元件脆弱性模型

台风等极端天气对配电网元件的破坏程度取决于多种因素,如灾害类型与强度、配电网设备状况与抗灾水平等。因此,除确定极端天气的类型与强度外,还应评估配电网抗灾水平。配电网包含元件众多,如电杆、线路、变压器、开关等。其中电杆与线路由于直接暴露在强风中,是最容易遭受台风损害的元件。

目前,主要有3种模型可用于评估元件的脆弱性,包括统计模型、结构分析模型与脆弱性曲线。其中脆弱性曲线可直观表述元件故障率与极端天气强度之间的关系,该曲线可以通过实验法、统计法、结构分析法、专家经验法,或上述方法的组合方法获得^[17]。本文采用脆弱性曲线估计元件的故障率,如图1所示。图1中黑色曲线为一种典型的元件脆弱性曲线,可以看出,元件故障率随风速的增大而不断上升,在风速大于50 m/s后元件有较大概率发生故障。

1.2.2 电杆与线路脆弱性模型

通过对台风强度与电杆、线路故障有关的历

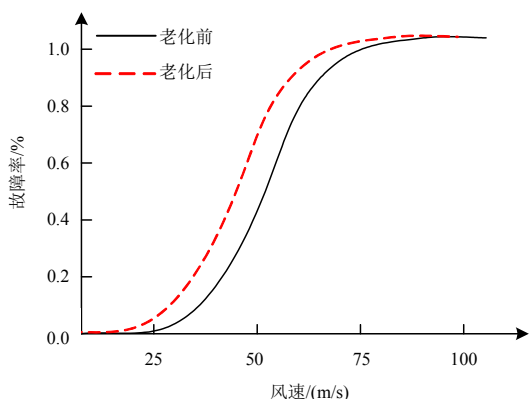


图1 元件脆弱性曲线

Fig.1 Element fragility curve

史数据和实验数据进行统计拟合, 可得到电杆与线路的脆弱性曲线, 并将电杆、线路故障概率 P_p 、 P_c 分别表示为风速 v 的函数^[13]:

$$P_p = A_p \cdot e^{B_p \cdot v} \quad (3)$$

$$P_c = A_c \cdot e^{B_c \cdot v} \quad (4)$$

式中 A_p 、 B_p 和 A_c 、 B_c 分别为与电杆和线路脆弱性相关的系数, 其值根据地理条件及电杆和线路的老化程度、类型与类别等因素综合得出。

1.2.3 老化对元件脆弱性曲线的影响

元件老化是造成配电网元件故障的重要因素之一。如木杆因真菌侵蚀与昆虫蛀蚀会逐渐腐烂, 最终倒塌损坏; 混凝土杆会受水气与盐分等环境因素影响, 由于毛细吸渗作用而逐渐腐蚀。因此无论是混凝土杆还是木杆, 配电网中电杆的抗灾强度都会随老化而逐渐降低。如图1中红色虚线所示, 老化通常会导致脆弱性曲线整体左移, 即即防风抗灾能力减弱^[18]。

2 抗灾能力评估与基础设施加固

在台风影响下, 配电网可能会因元件故障导致部分区域停电, 因此可用期望缺供电量 (expected energy not supplied, EENS) 指标衡量配电网的抗灾能力。在对配电网支路进行故障建模后, 使用 MCS 方法模拟配电网故障场景, 评估配电网抗灾能力。

2.1 抗灾能力评估

2.1.1 支路故障模型

每条支路包含多个电杆和线路, 只有当所有电杆与线路均保持正常运行时, 该支路才可正常

运行。因此, 将支路故障模型等效为多元件串联模型^[19]:

$$P_l = 1 - \prod_i (1 - P_{fi}) \quad (5)$$

式中: P_l 为支路 l 的故障率; P_{fi} 为元件 i 的故障率; K 为支路 l 中的总元件数, 包含电杆与线路。

2.1.2 修复时间模型

当配电网因极端天气而发生故障后, 由于故障区域极端天气仍在持续, 一般不能立即开展抢修工作。因此, 一般认为故障抢修工作在极端天气结束一段时间后才开始。同时, 设备的维修用时取决于多种因素, 如受灾程度、维修人员数量、备用设备数量等。本文假设修理每个故障电杆和线路用时分别为 3~5 h 和 1~2 h 之间的随机数^[20], 可表示为

$$t_r^{p,c} = \begin{cases} U(3,5), & \text{电杆} \\ U(1,2), & \text{线路} \end{cases} \quad (6)$$

若用 N_l^p 和 N_l^c 分别表示支路 l 所包含电杆和线路数量, 则支路 l 的总修复时间 $T_{r,l}$ 可表示为

$$T_{r,l} = N_l^p \cdot t_{r,l}^p + N_l^c \cdot t_{r,l}^c \quad (7)$$

2.1.3 评估流程

首先, 设定 MCS 模拟次数, 并根据历史数据得到的风速最大值与各元件的脆弱性曲线计算元件故障率 P_x 。其次, 在每次模拟中, 根据各支路元件数量产生一系列服从均匀分布的随机数 $r(r \in [0,1])$ 。将各元件对应的随机数与其故障率 P_x 进行比较, 若 $r > P_x$, 则认为该元件未发生故障; 若 $r \leq P_x$, 则认为其因发生故障而停运。因此, 在每次模拟中, 都将得到一组表示元件运行状态的 0-1 变量, 从而生成一个故障场景并计算其缺供电量 (energy not supplied, ENS)。最后, 完成所有模拟后, 可计算 ENS 的期望值 EENS。通常 EENS 指标越低, 表示该配电网抗灾能力越强。

2.2 配电网基础设施加固措施

2.2.1 基础设施加固措施分类

基础设施加固常作为配电网规划阶段的抗灾能力有效提升措施, 一般可分为以下 4 种^[21]:

1) 加固关键基础设施元件。通过用更高质量等级的电杆替换现有电杆、翻新电杆上绝缘器件等途径, 提高电杆抗灾强度; 通过更换裸导线、

加装雷电防护装置、选用防水配电元件等途径,提高配电网线路抗灾强度。

2) 植被修剪管理。通过修剪和清除可能危害配电网运行的树木与植被,降低极端灾害发生时因树木倒塌导致的电杆或线路损坏。

3) 将部分架空线替换为地下电缆。

4) 将线路和变电站移至安全区域,如抬高变电站水平位置,增加其抗灾能力。

一般后2种措施成本较高,经济性较差。本文主要关注如何在有限的改造预算下提升配电网抗灾能力,因此所考虑的基础设施加固措施主要包括植被修剪管理以及电杆的升级、翻新与加固。

2.2.2 植被修剪管理

在台风天气中,电杆或线路周边的树枝或树干受风力影响倾倒或断裂掉落后,可能会压倒电杆或压断线路。因此对周边植被定期进行修剪管理,可以提升配电网的抗灾能力。除常规的修剪管理外,有必要利用其他植被管理措施来提高抗灾能力,如在配电网规划阶段就做好植被的协同规划工作,选择合适当地土壤特征的树木进行种植,并且尽量不在电杆周边种植过高的树木。

2.2.3 电线杆的升级、翻新和加固

大多数配电网是为正常天气条件运行而规划的,一般仅考虑 $N-1$ 安全稳定约束,缺乏抵御极端天气灾害造成的 $N-k$ 事故的能力。一方面,普通电杆在设计时就未考虑抗台风因素,当台风发生后,电杆可能由于无法承受巨大风力或周边树木倒向电杆时的压力而毁坏;另一方面,随着配电网中电杆的老化,其抗灾能力也会不断降低。为满足电杆抗灾强度要求并尽可能延长使用寿命,除根据安装的地理位置和可能承受的最大风速选择合适的电杆等级外,也要选择合适的电杆制造材料。因此,为了降低电杆的故障率,本文采用升级、翻新和加固3种不同的方式提高电杆抗灾强度,如:使用拉线对电杆进行加固;用新杆或更坚固的杆替换旧杆。

3 优化决策问题及其求解方法

3.1 目标函数与约束

配电网基础设施加固包括2个步骤:1) 分析

应该采取哪些措施来加固支路;2) 确定这些支路的加固优先级。对于步骤1),本文采用植被修剪管理与电杆升级、翻新和加固措施。采用考虑负荷重要度的失负荷成本作为失负荷价值(value of lost load, VoLL)计算指标,判断不同支路的加固优先级。VoLL 可表示由于能源供应中断而造成的社会总体损失经济指标值^[22]。考虑台风影响的配电网基础设施加固决策问题目标函数表示为

$$\min(C_1 + C_2) \quad (8)$$

C_1 为 VoLL 指标值,其取决于系统元件的强度、台风的强度、维修用时、负荷以及元件位置等因素,计算公式为

$$C_1 = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot L_i^{\text{loss}} \quad (9)$$

式中: ω_i 为配电网中节点 i 的考虑负荷重要度的单位 ENS 成本,元/(kW·h); L_i^{loss} 为节点 i 的 ENS 指标值, kW·h; N 为配电网总节点数。

C_2 为配电网基础设施加固成本,可表示为

$$C_2 = \sum_{j=1}^M x_j \cdot c_j \quad (10)$$

式中: x_j 为 0-1 变量,表示支路 j 上的元件是否进行加固; c_j 为支路 j 上所有元件加固的总成本; M 为配电网的总支路数。

本文所考虑的经济性约束如下:

$$C_2 \leq C_{2,\max} \quad (11)$$

式中 $C_{2,\max}$ 为配电网设施总加固预算。根据此约束,总加固成本不能超过总加固预算。

3.2 求解方法

本文采用 PSO 算法求解基础设施加固决策问题,综合考虑了元件的故障率、加固成本、负荷重要度、维修用时以及不同的加固方案。采用基于 MCS 的方法获得每次迭代中的 ENS 并进一步计算得到 VoLL 指标。最后,在总加固预算的约束下,选择能够最大化提升配电网抗灾能力的支路优先进行加固。求解方法流程如图2所示。

4 算例分析

4.1 仿真算例数据

为验证所提优化决策方法的有效性,本文采

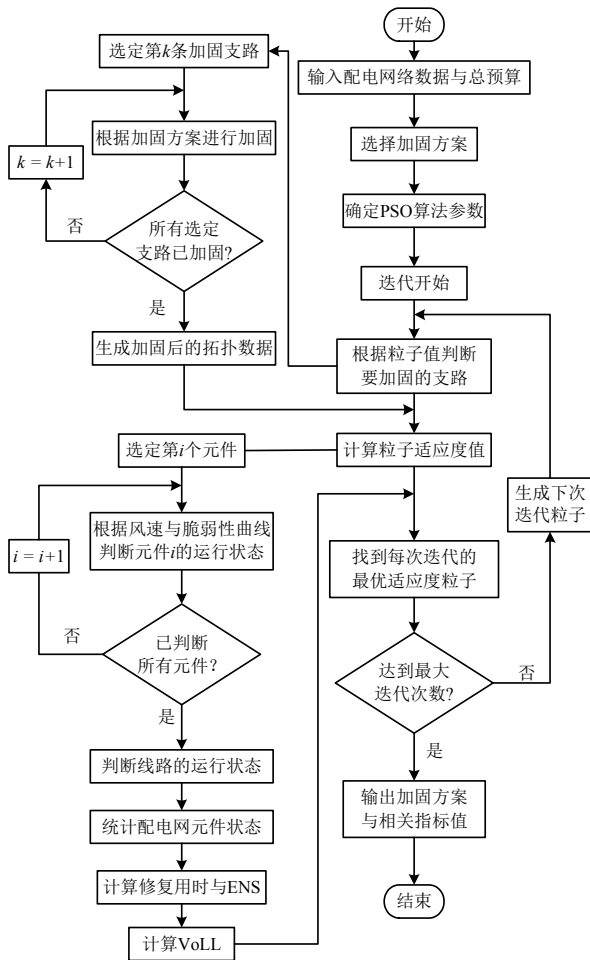


图2 求解方法流程图

Fig.2 Flowchart of solving method

用改进的 18 节点配电网系统^[23]进行仿真分析,如图 3 所示。系统总负荷为 11.6 MW+7.6 MV·A,额定电压为 12.5 kV,其支路数据如表 1 所示。

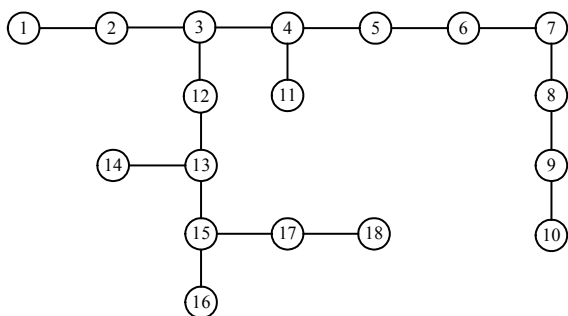


图3 仿真算例

Fig.3 Simulation example

4.2 台风风速的选定

本文所用 Weibull 分布函数的参数 $k=1.714$, $\lambda=18.22$, 根据式(2)并考虑到最坏情况^[20], 选定最大台风风速为 50 m/s。

表1 仿真算例支路数据

Tab. 1 Branch data of simulation example

起始节点	终止节点	电杆类型	线路类型	起始节点	终止节点	电杆类型	线路类型
1	2	5	1	8	9	3	1
2	3	5	1	9	10	3	1
3	4	3	1	12	13	3	2
3	12	1	1	13	14	3	2
4	5	3	1	13	15	3	2
4	11	1	1	15	16	3	2
5	6	3	1	15	17	3	2
6	7	1	1	17	18	3	2
7	8	3	1				

注: 电杆类型 1—5 分别表示旧木杆、新木杆、旧混凝土杆、中混凝土杆、新混凝土杆; 线路类型 1、2 分别表示普通线路与易受植被威胁线路。

4.3 元件脆弱性数据

电杆和线路的脆弱性曲线如图 4 所示。目前的配电系统中大多数电线杆为混凝土杆, 但仍存在少量木杆, 主要用于山地等吊车与安装设备较难进入的区域。虽然目前已有部分发达地区使用新型轻型材料电杆, 用于山地等场景的安装使用, 但由于造价较高, 本文中暂不考虑。混凝土杆按老化程度可分为新、中等和旧 3 个等级; 木杆可分为新、旧 2 个等级。图 4 所示电杆脆弱性曲线为旧木杆的脆弱性曲线, 以该曲线为基准, 新木杆故障率较其低 30%, 旧混凝土杆低 20%, 中等混凝土杆低 30%, 新混凝土杆低 40%。图 4 所示线路脆弱性曲线为普通线路, 周边有植被威胁的线路故障率在此基础上提高了 35%。

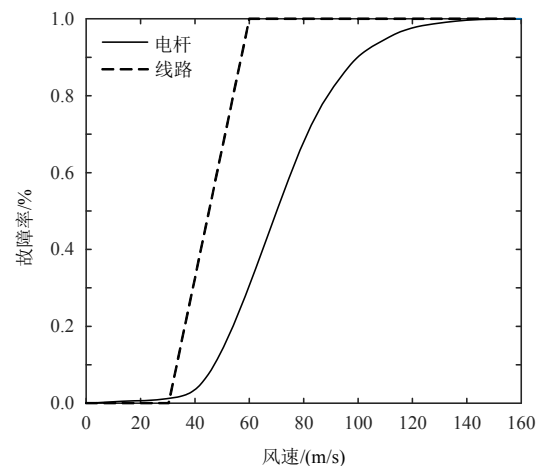


图4 电杆和线路的脆弱性曲线

Fig.4 Vulnerability curves of poles and lines

4.4 基础设施加固策略

本文采用表2中各项措施进行配电网加固。对于翻新措施,假设翻新后的电杆故障率降低30%。对于周围有植被威胁的线路,假设经过植被修剪管理后,这些线路的故障率恢复至一般线路水平。为了研究不同策略的影响,考虑了以下3种不同的方案。

表2 各类加固措施的成本

Tab.2 Cost of various reinforcement measures

加固措施	成本/元
替换同等级的混凝土杆	800
替换更高等级的混凝土杆	1 300
替换同等级的木杆	500
替换更高等级的木杆	700
加固电杆	400
植被修剪管理	300

1) 不进行任何加固。

在该场景下,不采用任何元件加固措施,在遭遇台风时配电网处于原始状态。由于配电网一般为辐射状运行,因此抢修工作从距上级电网馈线最近的线路开始,并假设有足够的维修人员同时维修一条支路的不同部分。

2) 加固策略1。

在该场景下,采用植被修剪管理、用同等级的新杆替换旧杆、对中等杆进行加固等3种加固措施。总加固预算为10万元,同样采用方案1的抢修策略。

3) 加固策略2。

在该场景下,采用植被修剪管理及用高等级杆替换旧杆、中等杆2种加固措施。总加固预算为10万元,同样采用方案1的抢修策略。

4.5 结果讨论

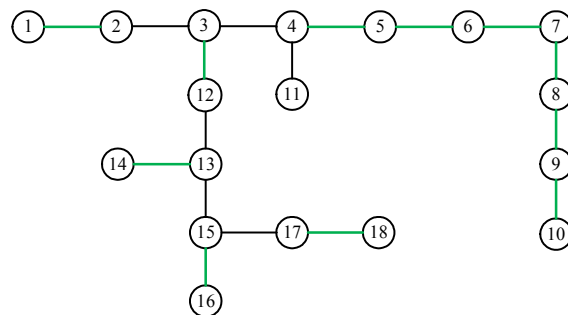
按照图2所示求解方法对3个不同的方案进行求解,结果如表3所示。方案2、3中的支路加固策略分别如图5(a)、(b)所示,其中绿色、红色线路分别表示方案2、3中需要进行加固的线路。

从表3可以看出,方案2相较于方案1,VoLL损失降低约40%,平均电杆损坏数减少约19%,平均停电时间缩短约8.4%;方案3相较于方案1,VoLL损失降低约60%,平均电杆损坏数减少约47%,平均停电时间缩短约24.3%。因此,进行

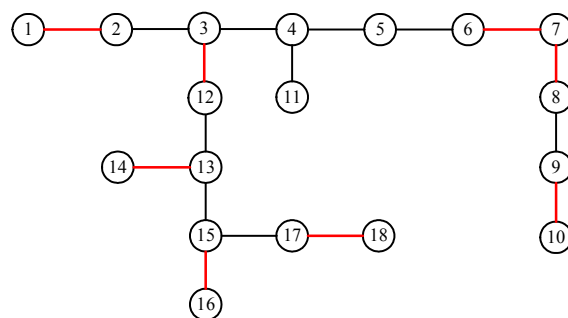
表3 3个方案的计算结果

Tab.3 Calculation results of three schemes

项目	方案1	方案2	方案3
VoLL/万元	148.4	88.9	59.5
平均停电时间/h	137.8	126.2	104.3
平均电杆损坏数/根	21	17	11
加固成本/万元	0	9.35	9.88
加固的支路数	—	11	8



(a) 方案2



(b) 方案3

图5 支路加固策略

Fig.5 Branch reinforcement strategy

配电网基础设施加固,可以有效提升配电网面对台风等极端天气灾害的抵抗能力,提高社会效益。与方案2相比,方案3具有更佳的效果,其VoLL损失降低约33%,平均电杆损坏数减少约35%,平均停电时间缩短约17.4%,表明替换更高等级的电杆对抗灾性能的提升效果更加显著。同时,其成本仅增加约5.7%,这是因为系统总加固预算有限。因此可以通过针对性研发抗台风能力更强的电杆,达到大规模生产与运用,从而尽量降低成本。此外,考虑到加固预算限制,配电网运营商可以通过选用更合适的投资策略,以近似相等的成本实现配电网抗灾能力的更优提升。

从图5可以看出,2个方案基本都对线路1—2与3—12等靠近上级母线的线路进行了加固,因为配电网一般按照“闭环设计,开环运行”的原

则进行规划,若辐射状运行的配电网中临近上级母线的线路遭到破坏,会使得配电网脱离上级电网的区域扩大,因此需重点提高此类支路的防风抗灾能力,以更加有效地提升整个配电网的防风抗灾能力。

5 结论

针对以台风为代表的极端天气会造成配电网基础设施故障并引发大规模停电的问题,提出一种对配电网关键基础设施加固方案进行优化决策的方法,以指导实际配电网的防风抗灾规划,提高配电网防风抗灾能力。所制定的不同加固方案的数值求解结果表明:加固基础设施能够提升配电网的防风抗灾能力,且同时采用植被修剪管理与高等级电杆替换2种加固措施的提升效果最为显著。但高性能电杆的推广使用仍受限于其高昂的成本,对相关材料研发与制备水平的提高将是今后工作的重点问题。

参考文献

- [1] 别朝红,林超凡,李更丰,等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
BIE Z H, LIN C F, LI G F, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [2] 孙明,苏毅方,邵先军,等. 基于数据挖掘的配电网线路台风故障影响分级评价[J]. 浙江电力, 2019, 38(10): 78-83.
SUN M, SU Y F, SHAO X J, et al. Grading evaluation of typhoon fault impact on distribution lines based on data mining[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(10): 78-83.
- [3] 李更丰,邱爱慈,黄格超,等. 电力系统应对极端事件的新挑战与未来研究展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 1-11.
LI G F, QIU A C, HUANG G C, et al. New challenges and future research prospects in power system against to extreme events[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 1-11.
- [4] MAHZARNIA M, MOGHADDAM M P, BABOLI P T, et al. A review of the measures to enhance power systems resilience[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4059-4070.
- [5] MA S S, SU L, WANG Z Y, et al. Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4842-4853.
- [6] BROWN R E. Hurricane hardening efforts in Florida [C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE, 2008: 1-7.
- [7] 何嘉兴,张行,王红斌,等. 极端灾害下考虑应急转供的配网停电过程仿真方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 104-111.
HE J X, ZHANG H, WANG H B, et al. Simulation method of distribution network outages process considering emergency transfer under extreme disaster [J]. Smart Power, 2020, 48(4): 104-111.
- [8] 张秀钊,陈姝敏,钱纹,等. 含分布式电源配电网抗灾害特性评估方法[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 51-56.
ZHANG X Z, CHEN S M, QIAN W, et al. Evaluation method for anti-disaster characteristic of power distribution network with distributed generation [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 51-56.
- [9] 姜心怡,陈健,司凯伦,等. 考虑动态交通网络的综合能源配电网灾后应急响应策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 31-37.
JIANG X Y, CHEN J, SI K L, et al. Emergency response strategy of integrated energy distribution network considering dynamic transportation network [J]. Smart Power, 2020, 48(8): 31-37.
- [10] SALMAN A M, LI Y, STEWART M G. Evaluating system reliability and targeted hardening strategies of power distribution systems subjected to hurricanes [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 144: 319-333.
- [11] KUNTZ P A, CHRISTIE R D, VENKATA S S. Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 1164-1169.
- [12] 方伟,曾博,徐富强,等. 极端灾害下基于智能楼宇分布式电源的配电系统负荷恢复力评估分析[J]. 发电技术, 2019, 40(5): 440-447.
FANG W, ZENG B, XU F Q, et al. Evaluation on load restoration of distribution system based on distributed generation in smart buildings after extreme disasters [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(5): 440-447.
- [13] MA S S, CHEN B K, WANG Z Y. Resilience

- enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(2): 1442-1451.
- [14] YUAN W, WANG J H, QIU F, et al. Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2817-2826.
- [15] KENARI M T, SEPASIAN M S, NAZAR M S. Probabilistic assessment of static voltage stability in distribution systems considering wind generation using catastrophe theory[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(13): 2856-2865.
- [16] KHOMAMI M S, JALILPOOR K, KENARI M T, et al. Bi-level network reconfiguration model to improve the resilience of distribution systems against extreme weather events[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(15): 3302-3310.
- [17] 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.
- ZHOU X M, GE S Y, LI T, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.
- [18] 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.
- [19] OUYANG M, DUENAS-OSORIO L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems[J]. Structural Safety, 2014, 48: 15-24.
- [20] TARI A N, SEPASIAN M S, KENARI M T. Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106414.
- [21] 许寅, 和敬涵, 王颖, 等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.
- XU Y, HE J H, WANG Y, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
- [22] OVAERE M, HEYLEN E, PROOST S, et al. How detailed value of lost load data impact power system reliability decisions[J]. Energy Policy, 2019, 132: 1064-1075.
- [23] GRADY W M, SAMOTYJ M J, NOYOLA A H. The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1379-1386.

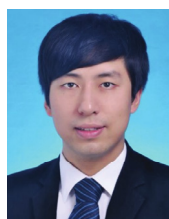
收稿日期: 2021-01-03。

作者简介:



高鑫

高鑫(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网抗灾能力提升、电力系统运行与控制, gx.eea@whu.edu.cn;



唐飞

唐飞(1982), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统通信等, 本文通信作者, tangfei@whu.edu.cn;



张童彦

张童彦(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;



李宇

李宇(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。

(责任编辑 尚彩娟)