

引用格式: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.

Citation: 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.

考虑微地形的配电系统雨涝淹没停电 风险区划分方法

王 乐^{1,2}, 唐 捷^{1,2}, 黄远飞³, 王 珂³, 简曾鸿³

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室, 广西 南宁 530023;
3. 广西电网有限责任公司南宁供电局, 广西 南宁 530029)

摘要:受气候变化影响,暴雨内涝近年来呈增多增强趋势。供电半径小、选址灵活性不足的配电系统易受雨涝淹没影响引发大面积故障停电。分析指出由于内涝水位缺乏详实记录,使得配电系统规划建设在内涝防护上存在基准缺失的问题。为此,参照电力系统冰灾等灾害防护方法,在二维水动力模型暴雨淹没分析基础上,研究提出考虑微地形影响的配电系统雨涝淹没停电风险区划分与差异化规划方法。首先,根据极值分布模型推算不同重现期的极值降雨,再结合地理信息进行二维水动力仿真,得到 50 年一遇极值降雨的淹没范围及深度图;然后,结合配电变压器和开闭所等配电终端的建设标准,设定不同淹没深度对应的停电风险,进而绘制配电系统雨涝淹没停电风险等级图,为不同风险区配电终端差异化设定基础高度,以提升雨洪灾害抗灾能力;最后,基于南宁地区数据的仿真分析验证所提方法的有效性。

关键词:二维水动力模型;降雨模拟;暴雨内涝;极值 I 型分布;风险区;配电系统

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.010 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2024)04-0084-09

Risk zone assessment of rainstorm induced waterlogging associated outage of distribution system with consideration of micro-topography

WANG Le^{1,2}, TANG Jie^{1,2}, HUANG Yuanfei³, WANG Ke³, JIAN Zenghong³

(1. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Nanning 530023, China; 3. Guangxi Power Corporation, Nanining Power Supply Bureau Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: Influenced by climate change, heavy rainfall and waterlogging have shown an increasing trend in recent years. The distribution system with a small power supply radius and insufficient flexibility in location selection is prone to large-scale power outages caused by waterlogging. Analysis points out that due to the lack of detailed records of waterlogging levels, there is a benchmark missing problem in the planning and construction of distribution systems in terms of waterlogging protection. Therefore, referring to disaster prevention methods such as ice disasters in power systems, and based on the analysis of storm inundation using a two-dimensional hydrodynamic model, this study proposes a method for delineating and differentially planning power outage risk areas in distribution systems due to rainstorm and waterlogging, considering the impact of micro-topography. Firstly, extreme rainfall for different return periods is estimated based on the extreme value distribution model, and then combined with geographic information for two-dimensional hydrodynamic simulation to obtain inundation maps, including inundation scope and depth, for extreme rainfall with a 50-year return period. Secondly, considering the construction standards of distribution terminals such as distribution transformers and switch stations, power outage risks corresponding to different inundation depths are set, and then a risk level map of power outages in the distribution system due to rainstorm and waterlogging is drawn. This provides a basis for setting different foundation heights for distribution terminals in different risk areas,

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-02-27

基金项目: 广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20220107)

通信作者: 王 乐(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事输变电设备防灾减灾研究; E-mail: happywle@163.com

enhancing their resilience to rainstorm and flood disasters. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation analysis based on data from Nanning.

Key words: two-dimensional hydrodynamic model; rainfall simulation; waterlogging; extreme value distribution; risk area; distribution system

受气候变化影响,近年来全球极端天气事件频发^[1],对电力系统安全稳定运行带来极大挑战,气象灾害是大面积停电的重要肇因^[2-4]。国内外科技工作者围绕台风^[4-6]、雷暴^[7]、冰灾^[8-9]和山火^[10-11]的灾害预警和防护方法开展了大量研究,可为提高电网应急能力和开展避险调度提供有力支撑;为保障气象灾害条件下的可靠供电,科研人员还从储能优化配置等角度研究强化电网韧性^[12-13]。由于气象条件的极端程度对电网故障率有突出影响,因此,科学合理地设定防护标准是提高灾害天气下电网韧性的基础性措施。为经济有效地提高电网抗灾能力,电力行业一般按差异化防护思路^[14],根据电力设施所在区域气象条件的极端程度,差异化设定防护标准,并结合电网冰区、风区等气象灾害区域分布图^[15-16],根据对应等级标准进行设计选型。

极端降雨是对人类生活影响最直接和显著的气象灾害,但当前对其危害与防护尚缺乏深入研究。早期研究主要聚焦于暴雨伴生的其他灾害,围绕强风和暴雨组合对线路故障率的影响^[17]以及降雨引发的地质灾害(如滑坡、泥石流等)对电网的危害^[18]展开研究。实际上,随着极端降雨频率和强度的升高^[19],暴雨内涝本身即可直接形成严重的灾害后果。除 110 kV 乃至 220 kV 变电站或有水浸停运外,每年都有大量配电房和开闭所等配电终端因暴雨内涝浸水停运。如 2020 年 8 月 18 日,四川省因极端特大暴雨造成逾 200 万用户停电。既有研究主要从灾情预警和应急抢修角度展开研究,但配电终端数量庞大,极端灾害时大面积停运往往仅靠应急保障供电。科学合理地设定规划建设标准是提高配电系统雨洪灾害抗灾能力的关键。

传统上,电力系统要求 110 kV 及以下等级变电站、配电房按 50 年一遇洪涝水位或历史最高内涝水位设定标高^[20-21]。但内涝水位在微地形影响下有很强的局部性,一般没有详实记录,设定标高时没有可靠依据,是配电系统雨涝淹没停电的根本原因;而供电半径小、选址灵活性弱,是配电系统雨涝淹没停电的直接原因。在实践中,只能凭经验将低洼位置配电终端就近部署于地势相对较高处,单凭个体主观经验很难有效防护雨涝淹没停电风险。

为防范雨洪灾害造成配网大面积停电,文献^[19]

利用 FloodArea 进行城市暴雨内涝分析,评估淹没低洼位置配电终端造成停电事故的临界降雨强度;文献^[22]在暴雨淹没分析的基础上,构建了暴雨灾害下配电设备的时变失效模型,可借助混合蒙特卡罗抽样法评估多种指标下的风险,为应急抢险提供决策支持。需要指出的是,以上工作主要服务于故障预警和应急抢修,与规划建设要求存在明显差异,如实际电网运行中为保障供电安全,往往在积水淹没超过配电终端基础时主动拉停线路。

为满足从规划层面加强雨涝抗灾设计的需求,本文根据冰灾等气象灾害的风险分区方法,提出设定雨涝淹没风险区并对不同风险区执行差异化设计标准。针对缺乏可信的历史最高内涝水位问题,提出按 50 年一遇极值降雨进行雨涝淹没分析,进而设定不同风险区等级划分标准,对不同风险区采取差异化设计,以经济高效地提高配电系统防涝能力。

1 基于淹没仿真的配电雨涝风险分区

电力系统现行规范要求配电系统按历史最高内涝水位确定防涝标准^[20-21]。但内涝水位没有准确记录,往往缺乏可信依据,只能就近布置于地势较高处,容易造成低洼地区用户淹没停电事故。传统上,主要结合周边地形和历史经验判断雨涝淹没高风险区,但大量新城缺乏暴雨内涝历史经验,而地形变化平缓的区域很难凭经验准确判断。针对该问题,结合水利领域二维水动力模型和配电终端结构特征所决定的淹没停电特性,提出基于淹没仿真的配电系统雨涝风险分区方法,流程如图 1 所示。

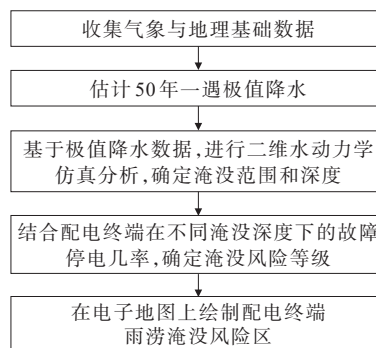


图 1 基于雨涝仿真的配电雨涝风险区划分流程
Figure 1 Flood risk area division of power distribution based on flood simulation

具体步骤:①收集淹没分析所需的地理信息和历史气象数据;②基于历史气象数据进行50年一遇降雨极值估计;③根据极值降雨数据进行二维水动力学分析,确定仿真过程最大淹没深度和淹没范围;④结合配电终端的结构形式,分析其在不同淹没深度下的故障停电几率和淹没停电风险等级;⑤基于淹没深度风险等级,在电子地图上绘制配电终端的雨涝淹没风险分区图。

2 二维水动力模型与仿真模拟

FloodArea是城市暴雨研究中常用的二维非恒定流水动力模型,近20年来已在多个国家的暴雨、防洪等领域得到推广应用^[23-25]。该模型基于水动力原理,将地面等效为栅格,考虑每一栅格周围的8个单元,使用Manning-Strickler流量公式计算从栅格单元到相邻单元的排放量:

$$V = K_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (1)$$

式中, V 为水量; K_{st} 为地表粗糙情况对水流影响的系数; r_{hy} 为水力半径; I 为地形坡度。

水流深度由单元之间的最低水位和最高地形高程之间的差所决定:

$$F_{depth} = W_{level} - E_a \quad (2)$$

式中, F_{depth} 为水流深度; W_{level} 为最低水位; E_a 为最高地形高程。

淹没过程的水流方向由地形坡向决定。对每一个单元都进行计算,即可确定特定时间下的淹没范围和积水深度^[23]。

FloodArea根据水进入模型的差异分为暴雨模式、洪水漫过河堤的漫顶式和洪水从河堤溃口涌出的溃口式3类,其中暴雨模式是由区域面降雨导致的积水淹没^[19]。本文采用暴雨模式进行城市配电网的雨涝淹没模拟,模拟过程如图2所示。

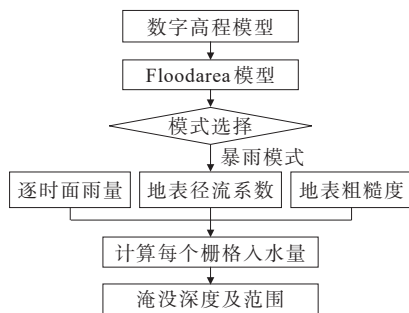


图2 二维水动力模型暴雨模式模拟过程

Figure 2 Two-dimensional hydrodynamic model for heavy rainfall simulation

在FloodArea二维水动力模型导入数字高程数据后,设置降雨过程的逐时雨量数据、地面雨水汇流有关的径流系数和粗糙度参数,按照暴雨模式进行降雨淹没过程的仿真分析,在逐时递推求得每个栅格的入水量之后,即可确定仿真区域各时段的淹没范围和深度。

3 暴雨内涝淹没数据及预处理

3.1 研究区概况

南宁地处广西南部偏西,介于东经107°45′~108°51′和北纬22°13′~23°32′之间,年均相对湿度79%,属于湿润的亚热带季风气候,年均降雨量为1300mm且时空分布极不均匀。受海洋暖气团影响,每年从5月开始出现暴雨,8月开始受台风影响易发生极端强降雨,4月—9月降雨量占全年八成左右,容易发生城市内涝。南宁数字高程模型如图3所示,其中部平坦四周环山,市区位于盆地腹部框内,被邕江分为南、北两部分,江北地势为北高南低,江南地势则相反。市区配电终端密集分布,周边区域降雨汇集于此,使得低洼地段积水发生内涝,显著提升配电设备雨涝淹没停运风险。

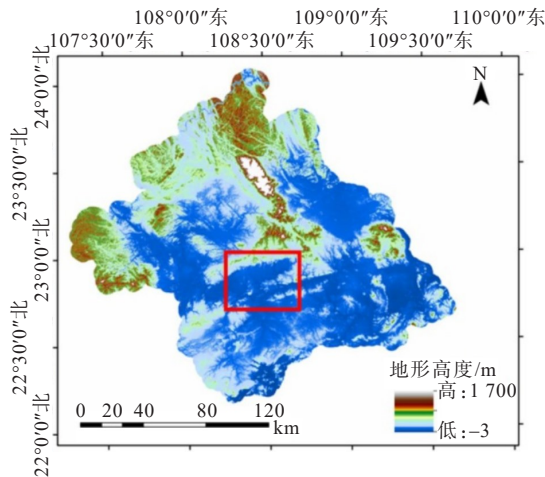


图3 南宁数字高程模型

Figure 3 Digital elevation model of Nanning

3.2 降雨数据处理

电力系统对灾害性极端天气主要考虑极端场景,需要按多年一遇极值确定电力设施规划建设标准。一般认为暴雨服从一定的极值分布,需要根据每年的日极值降雨时间序列,进行极值分布模型的参数估计,进而基于模型参数计算不同重现期下的极值降雨水平^[26-27]。由于降雨的极值分布特性存在地域差异,世界各地采取的降雨极值分布不尽相同,中国水文领域常用的主要是极值I型分布。

极值I型分布中取 X_1, X_2, \dots, X_n 为每年的日最

大值降雨量,极大值 x 的分布函数计算公式为

$$F(x_p) = f(x < x_p) = \exp\{-\exp[-\alpha(x_p - u)]\} \quad (3)$$

式中, x_p 为实数,降雨重现期计算中为历年的日极值降雨量,求出 x_p 即可获得重现期的计算结果, p 为重现期对应年数的倒数,如计算 50 年一遇重现期时 p 取 1/50; α 、 u 分别为尺度、位置参数^[28]。

水文学中常用超过频率来表征设计频率,即

$$f = f(x \geq x_p) = 1 - F(x_p) \quad (4)$$

对式(4)两边取 2 次对数:

$$x_p = u - \frac{1}{\alpha} \ln(-\ln(1 - f)) \quad (5)$$

此处计算得出的 x_p 即为不同重现期的降水量, α 、 u 由样本平均值和均方差 σ 推算如下:

$$\alpha = \pi/\sigma\sqrt{6} \quad (6)$$

$$u = \bar{x} - 0.5772\sigma\sqrt{6}/\pi \quad (7)$$

根据南宁气象站 1951 年—2021 年的逐小时降雨数据,统计得到每年的日极值降雨数据后将其绘制如图 4 所示。根据年极值降雨数据估计极值 I 型分布的模型参数后,计算得到南宁市 5、10、20 和 50 年一遇日降雨数据,如表 1 所示。

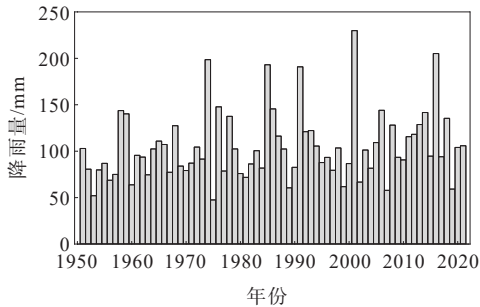


图 4 南宁市历年日极值降雨量

Figure 4 Historical maximum daily rainfall in Nanning

表 1 南宁市 24 h 历时不同极值重现期降雨量

Table 1 Daily precipitation for different recurrence

重现期/a	降雨量/mm	重现期/a	降雨量/mm
5	128.52	20	173.14
10	150.71	50	203.91

FloodArea 模型的降雨模式要求输入的降雨数据为逐小时面雨量,需要提前给定小时频率下的降雨时间序列数据,序列长度与 FloodArea 仿真小时数相同。根据南宁市历史某年降雨日极值总量以及对应 24 h 日降雨时间序列与 GEV 模型所得重现期降水量比值,计算得到的多年一遇降水重现期日降水序列如图 5 所示,选用此降水序列作为输入,采用 Floodarea 仿真日极值雨量 24 h 的淹没情况。

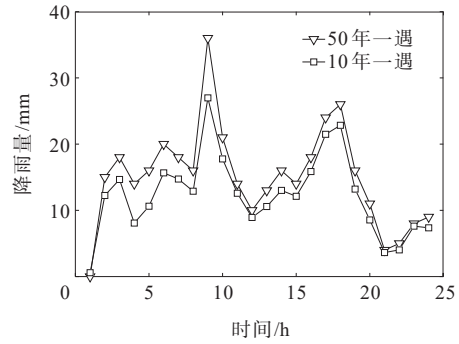


图 5 极值雨量时间序

Figure 5 Time series of extreme precipitation

3.3 地表粗糙度与径流系数

降雨在地表产生积水后会在崎岖地形上流动。不同土地类型的地表粗糙度不一样,对应积水流动的速度和流量也不同。地表粗糙度是流体力学中衡量边壁形状不规则性和粗糙程度影响的综合性系数,其表达式为

$$K_{st} = 1/n \quad (8)$$

其中, n 为各类地物的曼宁糙率系数,是反映对地表水流阻力影响的综合性无量纲数。表面越光滑糙率越小,反之则越大。

土地利用类型主要包含林地、耕地及人造路面等,受自然因素和人类活动的双重影响,反映了土地的质地和利用形式。裁剪得到的南宁市地表覆盖数据如图 6 所示,其中将土地分为耕地、草地、林地、水体和城建地等 5 种类型。水力学领域根据长期的工程实践和实验资料制定了不同地表的粗糙度表^[29]。根据南宁市的实际情况,可参考相关资料设定不同类型地表的粗糙度,如表 2 所示。利用 ArcGIS 可将地表覆盖数据转换成二维水动力模型分析所需的地表粗糙度分布图。

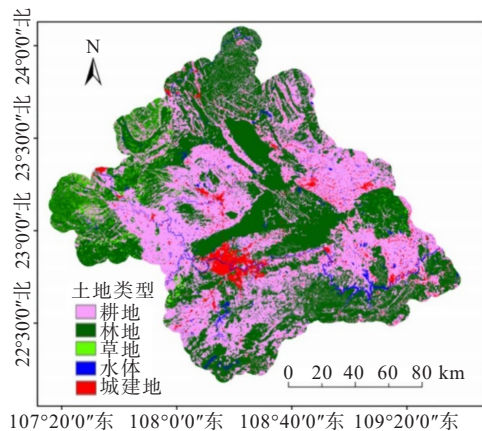


图 6 南宁地表覆盖数据

Figure 6 Surface coverage data of Nanning

表2 地表粗糙度

Table 2 Surface roughness

地表类型	粗糙度	地表类型	粗糙度
耕地	20	水体	35
林地	16	城建地	12
草地	25		

除地表粗糙度以外,降雨在地表上的汇流过程还受到地表径流系数的影响。地表径流系数是任意时段内的径流深度与降水总量的比值,说明降雨转化为径流量的比例,可综合反映流域内自然地理要素对降水转换为径流关系的影响^[30]。径流系数越接近1,表明土地下垫面的土地蓄水能力和渗透能力越差。

采用美国农业部水土保持局开发的SCS模型计算地表径流系数。该模型能依据土壤含水量、地表下垫面性质和土壤类型计算地表径流系数,具有结构简单、所需参数较少、模拟结果准确度较高,能够客观反映土壤类型、土地利用方式及土壤含水量对降雨径流影响等特点,是应用较广泛的一种水文模型^[23]。计算公式为

$$S = 25400/C_N - 254 \quad (9)$$

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (10)$$

$$K = Q/P \quad (11)$$

式(9)~(11)中, Q 为实际地表径流深度, P 为降雨量, K 为地表径流系数; S 为最大潜在蓄水量,可衡量区域吸收和截留暴雨降雨能力,一般引入无量纲的参数 C_N 来推求。

C_N 取决于土地利用现状、土壤类型及水文等,理论取值范围为0~100, $C_N=0$ 时 S 趋近于无穷大,表明降水全部下渗,地表无流水; $C_N=100$ 时降水全部转化为地表径流。参照文献^[30]的研究,可以查表确定 C_N ,计算得出南宁市地表径流系数,如表3所示,将地表覆盖数据转换为地表径流系数。

表3 地表径流系数

Table 3 Surface runoff coefficient

地表类型	C_N	径流系数	地表类型	C_N	径流系数
耕地	73	0.35	水体	98	0.92
林地	62	0.20	城建地	80	0.80
草地	56	0.40			

4 雨涝淹没仿真与停电风险分区

在水利和市政领域已大量应用二维水动力模型对暴雨淹没的仿真^[23],在仿真获得淹没深度分布

图的基础上,结合配电终端结构特征,可以产生雨涝淹没停电风险等级分区图。

4.1 暴雨内涝淹没仿真

在二维水动力模型中,输入南宁市数字高程地图数据、地表粗糙度、径流系数以及不同重现期的降雨数据,按暴雨模式进行降水仿真模拟,选择仿真过程淹没最严重时段数据,可得到对应重现期下的淹没范围深度图。10年一遇极值降水下淹没仿真结果如图7所示。

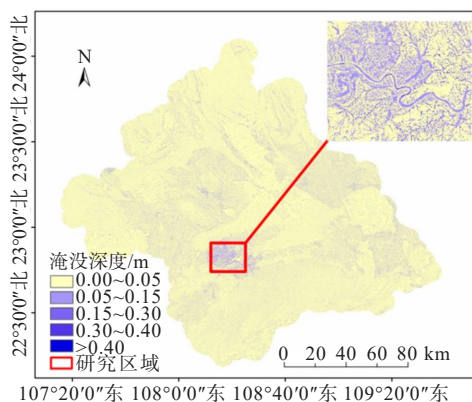


图7 南宁10年一遇降雨积水模拟结果

Figure 7 Depth map of waterlogging with rainstorm of 10-year recurrence in Nanning

排水是城市积涝过程模拟的重要环节,本文通过对模拟结果进行调整来体现排水对积涝过程的影响,其基本思想是,通过城市建设雨水管网的设计重现期计算该重现期下的积涝结果,以此模拟结果作为排水量,将日常降雨量模拟后得到的积涝结果减去设计重现期下的积涝结果,得到最终的积涝模拟结果。

根据相关规程规范,南宁等城区常住人口在500万以上的小城市按5年一遇标准设计排水管网^[31],因此,将5年重现期得到的积涝结果作为管网最大排水能力。排水量会受降雨量以及河道水位影响,因此排水量不是固定的,当降雨量小于5年重现期降雨量,河道水位低于警戒水位,排水量为最大排水能力排出的量,随着降雨量增大,河道水位上涨,排水量先增大后减小^[24]。

对比图7可见,地势较高的北端和西端的积水范围较少,淹没较广区域多集中在城区低洼位置。由于郊县一般采用杆上配变,而城区一般采用箱变,城区是容易因暴雨内涝造成淹没停电的核心区域。将图7矩形区域的50年一遇降水淹没深度绘制如图8所示。

由于城区淹没图覆盖区域宽泛而难以直观呈现淹没细节,故只截取邕江江南部分新城区(图 8 虚线框中),分别将该区域 5、10、20 和 50 年一遇淹没仿真得到的淹没深度图叠加城市电子地图,再绘制如图 9 所示。

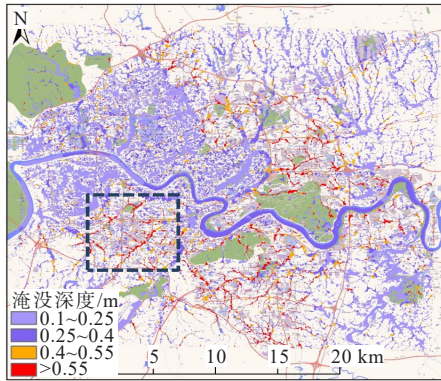


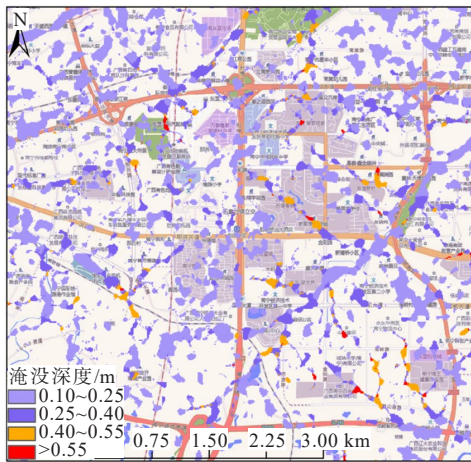
图 8 南宁城区 50 年一遇极值降雨淹没深度分布
Figure 8 Distribution of submergence depth of extreme rainfall in Nanning city proper

为清晰标识淹没深度,将淹没深度在 0.1 m 以下区域设置为无色透明。淹没深度在 0.1 m 以上按 0.15 m 为间隔,设置 4 个淹没等级(0.10~0.25 m 为一级,0.25~0.40 m 为二级,0.40~0.55 m 为三级,超过 0.55 m 为四级)并分别标识不同颜色。

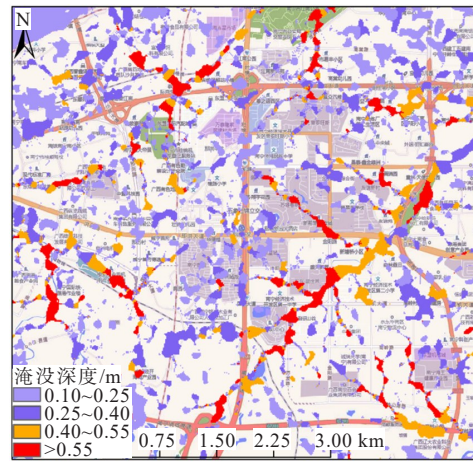
由图 9 可见,当降雨重现期为 5 年一遇时,对应区域基本未出现 0.4 m 深度以上积水;降雨升高至 10 年一遇水平时开始出现 0.40 及 0.55 m 以上带状积水区域;当降水达到 20 年一遇极值时,积水区域积水深度进一步升高且面积有所增长;当达到 50 年一遇极值时,淹水区域范围未发生明显变化,但易涝地区积水深度有所增长。

淹水区域以正中的十字路口为界,大致可分为 4 个区域,每个区域各有 1 条淹没带,分别说明如下:

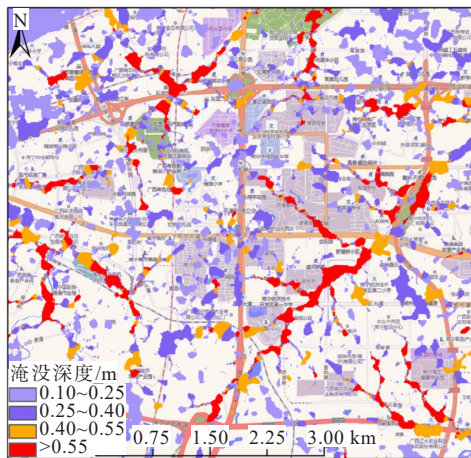
1) 右下角有一条从西南斜向东北地注入邕江的小型河涌,极值降水时将汇聚大量雨水形成长条淹没带;



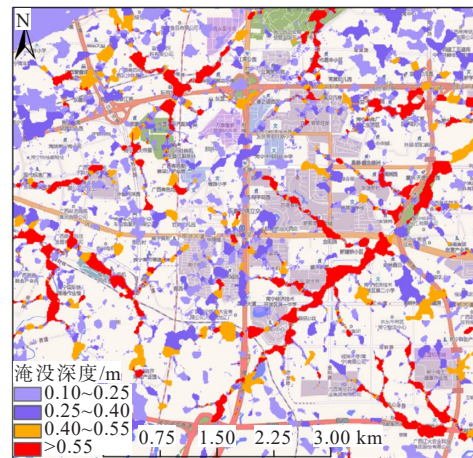
(a) 5 年一遇



(b) 10 年一遇



(c) 20 年一遇



(d) 50 年一遇

图 9 不同重现期降雨积水模拟结果

Figure 9 Depth map of waterlogging with rainstorm of different recurrences

2) 左下角为铁路货运场站,场站两侧各有一条凹陷带,极值降雨时会形成0.55 m以上淹没区;

3) 左上角2个立交桥之间道路上方为下穿铁道,由于地势低洼,因此会沿路轨形成较深积水区;

4) 右上角2个立交桥之间道路上方为公园,园内有注入邕江的小型河涌,因而也会在极值降雨时形成0.55 m以上积水区。

在以上淹没区,2条河涌和铁路因为地形明显有别于周边,可直观判断其在极值降水时易形成内涝;而铁路货运场站内有围墙和仓库阻挡视线,凭经验难以准确判断高风险淹水区。

4.2 配电系统雨涝淹没风险区划分

中国城市多采用电缆接入箱变或配电房,但布设于地面的配电终端易受内涝影响,存在大面积淹没停运风险。运维部门为保障供电安全,在淹没深度超过配电终端基础时会主动拉停。结合工程实际进行淹没深度的风险等级指标定义。根据典型设计,配电终端基础高度为0.3~0.5 m^[20],淹没深度0.4 m以下不会造成停运。设定淹没深度小于0.1 m时为无风险,淹没深度低于0.3 m时为低风险;考虑配电终端内部电缆接头高于基础平面0.7 m,可认为淹没深度超过典型设计中基础最大高度0.5 m,达到0.6 m以上时为高风险,而小于0.6 m时为中风险,对应风险划分如表4所示。

表4 配电终端淹水停电风险分级

Table 4 Flood induced outage risk of distribution terminals

淹没深度/m	10 kV 配电终端淹水风险
0.0~0.1	无风险
0.1~0.3	低风险
0.3~0.6	中风险
>0.6	高风险

根据按50年一遇极值降雨仿真得到的城区淹没范围与深度分布数据,结合表4可绘制城区配电终端淹没停电风险分级地图,如图10所示。因城区全景图难以呈现细节,将前述局部易涝区放大绘制,如图11所示,采用不同颜色标识高风险、中风险和低风险淹没停电区,该图可清晰标识暴雨内涝时存在配电终端淹没停电的中、高风险区。不同风险等级下的淹没面积如表5所示,可知高、中风险从50年到5年一遇的淹没面积逐渐降低。进行配电网规划建设时可参考该图进行配电终端防涝选址;对于只能布设在中、高风险区的配电终端,可采用差异化的基础高度防涝。

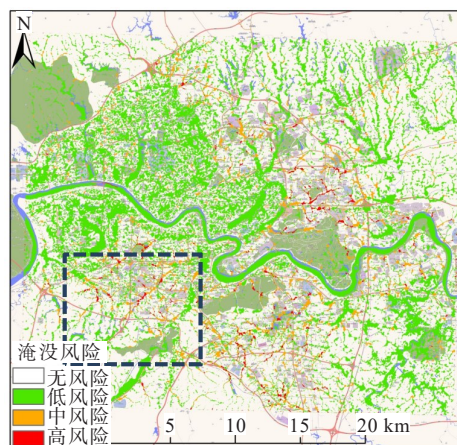


图10 南宁城区50年一遇极值降雨配电终端淹没风险等级

Figure 10 Risk level of distribution terminal flooding in Nanning city proper with precipitation of 50-year recurrence

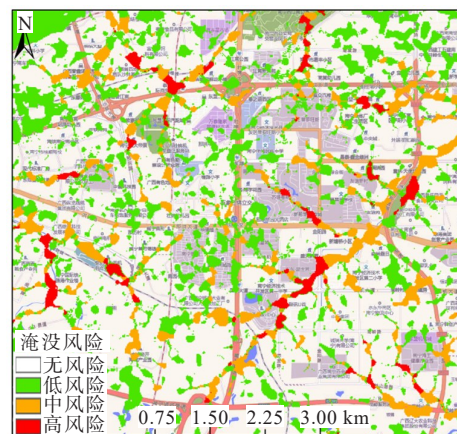


图11 50年一遇降雨的电网配电终端淹没停电风险分级

Figure 11 Flood induced outage risk level of distribution terminals with precipitation of 50-year recurrence

表5 不同风险等级面积

Table 5 Area of different risk levels

风险等级	淹没面积/m ²			
	50年一遇	20年一遇	10年一遇	5年一遇
低	3 580 312.50	3 678 593.75	3 957 187.50	5 309 843.75
中	2 585 312.50	2 510 625.00	2 403 281.25	897 500.00
高	1 406 093.75	1 067 031.25	761 406.25	32 968.75

5 结语

针对配电终端易遭暴雨内涝侵袭造成大面积停运的问题,本文提出了考虑微地形的配电系统雨涝淹没停电风险区划分和差异化防涝方法。

1) 分析指出电力系统现有防涝规程要求按50年一遇的洪水水位或历史最高内涝水位设定配电系统防涝标准,但内涝水位并没有准确记录,使得

配电终端防涝在规划设计层面就缺乏参考依据,是配电系统雨涝灾害淹水停电的根本原因。配电终端供电半径小,只能在用户近旁选择地势较高处布置,是配电系统雨涝灾害淹水停电的直接原因。

2) 在二维水动力模型淹没分析基础上,提出考虑微地形影响的配电系统雨涝淹没停电风险区划分方法;可将配电终端防涝标准从无据可查的历史最高内涝水位,替换为由50年一遇极值降雨时淹没深度决定的停电风险等级。

3) 基于南宁地区历史降雨数据和地理数据,进行二维水动力仿真分析,得到城市淹没深度图;结合配电终端结构特征分析设定不同淹没深度的停电风险等级,绘制了50年一遇降雨的南宁市区淹没停电风险分级地图。所提方法可直观呈现复杂地形、视野遮蔽条件下凭人工经验难以准确判断的内涝淹没停电高风险区。

致谢:本文在撰写过程中得到长沙理工大学苏盛老师和李彬博士帮助,特此感谢!

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[R]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2021: 193-194.
- [2] HINES P, APT J, TALUKDAR S. Large blackouts in North America: historical trends and policy implications [J]. Energy Policy, 2009, 37: 5249-5259.
- [3] DUAN X, SU S. Self-organized criticality in time series of power systems fault, its mechanism, and potential application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1857-1864.
- [4] 焦嘉凝, 柳璐, 张天宇, 等. 台风灾害下多阶段协同的受端电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 9-18.
JIAO Jianing, LIU Lu, ZHANG Tianyu, et al. Resilience enhancement strategy with multi-stage collaboration for receiving-end grid under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 9-18.
- [5] 周毅, 秦康平, 孙近文, 等. 台风气象环境电网设备风险量化预警及其 $N-m$ 故障处置预案在线生成方法[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(2): 22-30.
ZHOU Yi, QIN Kangping, SUN Jinwen, et al. Real-time risk evaluation method of power system equipment and $N-m$ fault contingency plan generation under typhoon meteorological environment[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(2): 22-30.
- [6] 王振浩, 罗剑潇, 成龙, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 34-48.
WANG Zhenhao, LUO Jianxiao, CHENG Long, et al. Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 34-48.
- [7] 鲍捷, 王昕, 张峰, 等. 基于雷电定位数据驱动的紧密输电通道连续雷击跳闸预警方法[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1194-1205.
BAO Jie, WANG Xin, ZHANG Feng. Data-driven early warning for continuous lightning trip-out of compact power corridors based on lightning location data[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1194-1205.
- [8] 胡建平, 陆佳政, 方针, 等. 自然环境下输电导线同时带电压和电流覆冰试验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 760-767.
HU Jianping, LU Jiazheng, Fang Zhen, et al. Experimental study on icing accretion of transmission conductor with simultaneous voltage and current under natural environment[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 760-767.
- [9] 马富齐, 王波, 董旭柱, 等. 面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2161-2169.
MA Fuqi, WANG Bo, DONG Xuzhu, et al. Receptive field vision edge intelligent recognition for ice thickness identification of transmission line[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2161-2169.
- [10] 黄道春, 范建斌, 王平, 等. 极端环境条件下输变电设备空气间隙绝缘特性研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1892-1906.
HUANG Daochun, FAN Jianbin, WANG Ping, et al. Current status and future prospects of transmission and transformation equipment air gap insulation characteristics under extreme natural environmental conditions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1892-1906.
- [11] 艾欣, 周志宇. 山火灾害下电网输电线路关键性评估方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2433-2441.
AI Xin, ZHOU Zhiyu. Key transmission-line evaluation method for power grid under wildfire disasters[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2433-2441.
- [12] 李丹, 贾伯岩, 马天祥, 等. 考虑弹性提升的城市电—气互联能源系统扩展规划[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 35-45.
LI Dan, JIA Boyan, MA Tianxiang, et al. Expansion planning of urban power-gas interconnection energy system considering resilience enhancement[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 35-45.
- [13] MA S, CHEN B, WANG Z. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather

- events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [14] 黎灿兵,梁锦照.电网差异化规划新方法[J].电力系统自动化,2009,33(24):11-15.
LI Canbing, LIANG Jinzhao. A novel method of power grid differential planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 11-15.
- [15] 国家电网公司.国家电网公司电网风区分布图(2020年版)[M].北京:中国电力出版社,2021:61.
State Grid Corporation of China. Extreme wind map of SGCC (2020 edition) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021: 61.
- [16] 国家电网公司.国家电网公司电网冰区分布图(2020年版)[M].北京:中国电力出版社,2021:40.
State Grid Corporation of China. Extreme icing map of SGCC (2020 edition) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021: 40.
- [17] 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.
- [18] 邓创,刘友波,刘俊勇,等.考虑降雨诱发次生地质灾害的电网风险评估方法[J].电网技术,2016,40(12):3825-3834.
DENG Chuang, LIU Youbo, LIU Junyong, et al. A risk assessment method of power grid considering secondary geological hazards caused by rainfall weather[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3825-3834.
- [19] 吴颖晖,徐硕,丁宇海,等.基于FloodArea的台州10 kV配网设施暴雨灾害临界雨量研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(20):129-136.
WU Yinghui, XU Shuo, DING Yuhai, et al. Flash flood critical rainfall research of 10 kV electric distribution network infrastructure based on FloodArea model in Taizhou[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 129-136.
- [20] 刘振亚.国家电网公司配电网工程典型设计10 kV配电站房分册[M].北京:中国电力出版社,2016:287-288.
LIU Zhengya, State grid corporation distribution network project typical design 10 kV distribution station room sub-book[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 287-288.
- [21] DL/T 5630—2021.输变电工程防灾减灾设计规程[S].
DL/T 5630—2021. Code for design of disaster prevention and mitigation of power transmission and transformation projects[S].
- [22] 梁振锋,闫俊杰,李江锋,等.极端暴雨灾害下城市配电网风险评估方法[J].电网技术,2023,47(10):4180-4190.
LIANG Zhenfeng, YAN Junjie, LI Jiangfeng, et al. Risk assessment method of urban distribution network under extreme rainstorm disasters[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4180-4190.
- [23] 张晓涵,桑国庆.SCS-CN模型在小流域产流计算中的应用[J].人民黄河,2022,44(5):35-39+45.
ZHANG Xiaohan, SANG Guoqing. Application of SCS-CN model in runoff calculation of small watershed[J]. Yellow River, 2022, 44(5): 35-39+45.
- [24] 薛丰昌,朱一晗,顾人颖,等.Floodarea模型的城市内涝可视化数值模拟[J].测绘科学,2020,45(8):181-187+198.
XUE Fengchang, ZHU Yihan, GU Rengying, et al. Visual numerical simulation of urban waterlogging based on Floodarea model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(8): 181-187+198.
- [25] TYRNA B, ASSMANN A, FRITSCH K, et al. Large scale high resolution pluvial flood hazard mapping using the raster-based hydrodynamic two dimensional model FloodArea HPC[J]. Journal of Flood Risk Management, 2018, 11: S1024-S1037.
- [26] 丁裕国,江志红.极端气候研究方法导论:诊断及模拟预测[M].北京:气象出版社,2009:183-192.
DING Yuguo, JIANG Zhihong. Introduction to extreme climate research methods: diagnosis and simulation and prediction[M]. Beijing: Meteorological Press, 2009: 183-192.
- [27] 宋明明,张建云,刘艳丽,等.南方典型城市化流域降雨极值及概率特征研究[J].水力发电学报,2021,40(9):1-13.
SONG Mingming, ZHANG Jianyun, LIU Yanli, et al. Evolution and probability distribution of precipitation extreme values in typical urbanized basin in southern China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(9): 1-13.
- [28] 李宏男,王杨,伊廷华.极值风速概率方法研究进展[J].自然灾害学报,2009,18(2):15-26.
LI Hongnan, WANG Yang, YI Tinghua. Advance in research on extreme wind speed models[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(2): 15-26.
- [29] 刘敏,方如康.现代地理科学词典[M].北京:科学出版社,2009:182-183.
LIU Min, FANG Rukang. Dictionary of modern geographical sciences[M]. Beijing: Science Press, 2009: 182-183.
- [30] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013:10.
ZHOU Jianmin, SHEN Renfang. Dictionary of soil science[M]. Beijing: Science Press, 2013: 10.
- [31] GB 50014—2021.室外排水设计标准[S].
GB 50014—2021. Outdoor drainage design standard[S].