

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211536

恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合

王建¹, 姚江宁¹, 刘泽青², 欧阳金鑫¹, 熊小伏¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 广东电网有限公司广州供电局, 广东 广州 510620)

摘要: 为了提升配电网防灾减灾决策的科学性, 需要准确掌握配电网的故障统计参数。为此, 采用时间和环境相依的配电网故障统计分析方法, 按不同月份、不同天气条件、不同线路类型, 计算配电网故障率、停运率等参数在历史同期月份的时间分布特征。针对不同天气下的故障停运时间, 提出了概率密度分布拟合方法。对南方沿海地区某大型配电网的实例分析表明: 电缆故障的月际分布不明显, 受天气影响较小。架空线路的故障受雷雨天气影响较大, 分布集中在5—9月, 呈现明显的单峰特性, 可用高斯分布拟合。雷雨天气下的故障率和停运率明显高于基础故障率和停运率, 并且停运持续时间更长, 强迫停运时间可用威布尔或伽马分布拟合。所提方法对配电网精细化故障率统计分析具有借鉴意义, 可用于指导配电网规划、运行风险评估和恶劣天气下的故障恢复策略优化。
关键词: 恶劣天气; 配电网; 时变故障率; 强迫停运时间; 概率分布拟合

Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions

WANG Jian¹, YAO Jiangning¹, LIU Zeqing², OUYANG Jinxin¹, XIONG Xiaofu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: To improve the scientific basis of distribution network disaster prevention and mitigation decisions, accurate fault statistics parameters of the network are needed. To this end, weather- and time-related fault statistical analysis methods for distribution networks are used. Distribution network fault parameters such as failure and outage rates in the same historical period are calculated according to the different months and weather conditions as well as different line types. The probability density distribution fitting method is proposed for the forced outage time in different weather conditions. The case study of a large distribution network in the southern coastal area of China shows that the monthly distribution of cable faults is not obvious, and the cable faults are less affected by weather. Overhead line faults are greatly affected by thunderstorms and rainstorms, and their distribution is concentrated in May to September, showing obvious single-peak characteristics, and it can be fitted by a Gaussian distribution. The failure and outage rates in thunderstorms and rainstorms is significantly higher than the basic failure and outage rates; and the forced outage time is longer, and can be fitted by Weibull or Gamma distributions. The proposed method has implications for refined fault rate statistical analysis of distribution networks. It can guide the planning and operational risk assessment of distribution networks, and the optimization of fault recovery strategies in adverse weather.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51707018).

Key words: adverse weather; power distribution network; time-varying failure rate; forced outage time; probability distribution fitting

0 引言

配电网是连接用户与电力系统的重要环节, 其

安全运行关系到用户电力供应的可靠性。相对于输电网来说, 配电网设计时考虑的风速、冰厚、降雨等极值水平较低^[1], 其结构可靠性和绝缘水平更低, 加之配电网运行环境日趋复杂, 因此在恶劣天气时, 极易发生故障。此外, 随着分布式新能源大量并入配电网^[2], 其出力也受气象条件影响。因此, 对于

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51707018); 重庆市出站留(来)渝博士后择优项目资助(2020LY23)

恶劣天气下配电网故障统计分析和运行风险评估的研究显得愈发重要^[3-4]。

近年来对配电网运行风险的研究从传统的可靠性评估,逐步发展到运行可靠性评估^[5-6]和极端天气下配电网的弹性和恢复力评估^[7-9]。开展恶劣天气下配电网的风险评估,需要对配电网元件的故障率进行分析,进而生成系统的故障集以模拟整个系统的运行状态,最后计算风险指标^[10-11]。无论采用哪种风险评估方法,所考虑的故障场景和配电网的故障基础参数(故障率、停运率、修复率等)^[12],对评估结果及其应对措施有很大的影响。

配电网的主要元件包括馈线(架空线、电缆或混合线)、开关、配电变压器等,其中配电线路占主要部分。分析配电线路故障率的方法主要有两种:一种是通过某种天气条件下元件结构和绝缘失效的物理模型评估的短时故障率^[5,13-14],以下简称条件故障率;另一种是基于长期故障统计得到的平均值故障率^[12,15-19],以下简称统计故障率。

在具体天气条件下关于结构可靠性和绝缘失效物理模型评估故障率方面,文献[5]构建了线路覆冰条件下的受力模型,结合线路的载荷能力模型,得到覆冰条件下的线路故障率模型;文献[13]结合杆线强度概率模型,构建了台风条件下的配电线路故障率模型;文献[14]采用雷电定位实时数据对雷击区域进行动态分区,结合杆塔和导线的耐雷水平,生成动态雷击跳闸模型。以上文献构建的故障率模型需要大量的设备参数和具体的天气预报数据,比较适合于某条线路的故障反演,但在配电网规划和运行风险评估中难以实际应用。

相比之下,配电网统计故障率则好获取得多。如文献[15]分析的那样,气象灾害具有长程相关性,受气象灾害及其衍生灾害影响的电网故障事件,也表现出统计上的时空分布规律。在分析计及恶劣天气影响的故障率时,一种简单的做法是对天气条件划分状态,例如文献[16]采用了三状态模型计算元件故障率,然而天气条件的划分标准比较模糊^[17]。文献[18]以某电力公司2014年与2015年的故障修复数据对该地区配电网的故障修复时长进行了统计与分析,但未给出概率密度分布拟合。文献[19]通过对南昌电网2006—2009年的日故障信息进行分析,发现该地区配电网的日故障次数呈现幂律分布,并且去除故障极值日数据后,故障累计分布呈现指数分布特性。以上研究还很少涉及具体天气条件下配电网故障率的典型参数值和停运时间分布特征的报道。

为了开展具体天气下的配电网运行风险或弹

性评估,在统计故障率的基础上,按天气条件开展故障率回归拟合也不失为一种好的选择,既避免了评估故障率对具体天气条件(例如准确的风速、风向、降雨量等)的依赖,也能够反应不同灾害天气下线路故障率的显著差异^[20]。例如,文献[21]利用广义线性模型,通过回归方法构建台风天气下的输电线路故障模型;文献[22]采用负二项回归方法构建输电线路故障模型;文献[23]通过天气预报预测覆冰厚度,进而采用指数函数拟合冰雪灾害下导线覆冰厚度、杆塔荷载与故障率的关系。但上述文献采用的恶劣气象灾害数据样本都较小,且多为高压输电线路,拟合函数选择也较为主观,缺少对拟合模型的假设检验。

鉴于此,本文以南方沿海地区某大型配电网为研究对象,采用时间和环境相依的配电网故障统计分析方法,按不同月份、不同天气条件、不同线路类型,计算配电网故障率、停运率等参数在历史同期月份的时间分布特征,并给出分布拟合参数;针对配电网故障停运时间,按不同元件、正常和恶劣天气下的概率分布特征进行拟合。本文所提方法对于其他地区开展配电网精细化故障率统计分析具有借鉴意义,所得配电网故障基础数据及其拟合参数,可用于指导配电网规划、运行风险评估和灾害性天气下的故障恢复策略优化。

1 南方某地配电网故障特点

本文对南方某地配电网2019年至2021年8月的配电线路(含电缆、架空线和混合线)故障进行统计分析,共记录了8799次故障跳闸事件,统计结果见图1。其中,配电线路的故障停运主要受到绝缘损坏、外力破坏、自然灾害等多种因素的影响。

如图1所示,在绝缘损坏、外力破坏、自然灾害3种主要原因中,自然灾害导致的故障在所有故障中约占15.63%,其中雷击又占自然灾害的绝大多数(98.4%),约占所有故障的15.4%。外力破坏导致的故障占比为40.11%,主要形式有触树、异物与施工作业,其中,雷雨天气下触树、异物导致的故障占比较大,约占外力破坏故障的30.89%。绝缘损坏导致的故障占比为19.73%,其中主要原因为设备绝缘老化,约占绝缘损坏故障的42.57%,占有故障的8.4%。此外,由于中压配电网线路走廊的复杂性、故障原因的多样性,以及运维管理方面等问题,还有大约24.5%的故障原因不明。

进一步按线路类型分析,电缆故障中绝缘损坏、外力破坏和自然灾害分别占38.62%、40.57%和5.78%,表明自然灾害对电缆影响较小。架空线故



图1 配电网故障原因统计图

Fig. 1 Statistical diagram of fault causes of the distribution network

障中绝缘损坏、外力破坏和自然灾害分别占 16.69%、42.44%和 22.13%，表明雷雨大风天气下的触树、异物类外力破坏和自然灾害对架空线的影响较大，发生在恶劣天气下的故障占 47%，直接由雷雨大风造成的故障占 28.01%。混合线故障中绝缘损坏、外力破坏和自然灾害分别占 15.53%、38.11%和 13.96%，受天气影响也较大。关于 4 种故障原因发生时的天气状况(正常天气和恶劣天气)，绝缘损坏和外力破坏受天气影响较小，发生在正常天气和恶劣天气下的故障次数相差不大。自然灾害导致的故障中，有 90.33%发生在雷雨大风天气，9.67%发生在正常天气(主要为山火导致的故障)。

其中，该地区配电网故障主要发生在暴雨、雷雨大风和台风天气下，主要的表现形式是雷击故障、树枝和异物引起放电(归入外破)，因此将暴雨、雷雨大风和台风天气统称为雷雨天气，其多年统计的平均各月雷雨天气日数和占比如图 2 所示。

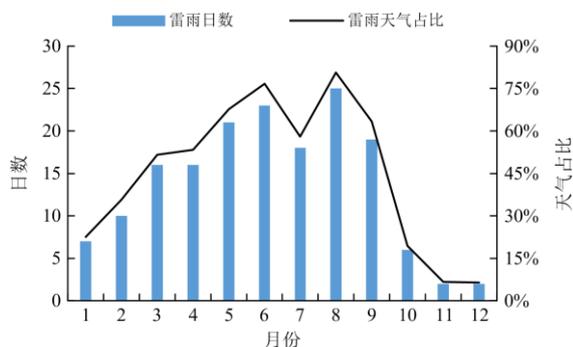


图2 历史同期各月雷雨天气日数和占比

Fig. 2 Number of days and proportion of thunderstorm and rainstorm weather in the historical period

以上统计图和数据分析较为宏观地反映了配电网线路类型、故障原因与天气状况的关系，而用于

配电网风险评估，还需要更加精细化的时间和环境相依的故障统计数据。

2 时间和环境相依的故障统计方法

文献[15]指出电网故障与灾害性天气具有较强的时间相关性，气象灾害具有明显的季节性特征，电网风险也具有时间波动性。因此，在描述电网元件故障参数时，需要从原来一维横向连续时间下的年均值模型，拓展到考虑历史同期(纵向)时间和导致故障的因素，特别是外部气象环境因素，以描述时间和环境相依的故障率。

2.1 配电网故障率统计方法

在配电线路故障率等基础参数收集和分析方面[24]，当前的 DL/T 837-2012《输变电设施可靠性评价规程》对线路的故障率与强迫停运率作出了明确的规定，其中单条线路强迫故障率计算公式为

$$\lambda = \frac{\text{故障次数}}{\text{统计}100 \text{ km} \cdot \text{年数}} \text{ 次}/(100 \text{ km} \cdot \text{年}) \quad (1)$$

使用该统计方法可计算配电线路的故障率，但考虑到配电线路长度一般都在几百米至几千米，因此可用式(2)计算配电线路的故障率。

$$\lambda_i = \frac{N_i}{L_i n} \quad (2)$$

式中： λ_i 为第 i 条线路的故障率，次/(km·年)； N_i 为该条线路在统计年限内的故障次数； L_i 为该条线路的长度，km； n 为统计年数，年。

假设某电压等级线路共有 k 条，该电压等级线路故障率计算公式为

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i L_i n_i}{\sum_{i=1}^k L_i n_i} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i}{\sum_{i=1}^k L_i n_i} \quad (3)$$

式中： λ 为该电压等级线路故障率，次/(km·年)； n_i 为第 i 条线路的统计年数，年。

借鉴文献[25]的思路，可以按历史同期的月份进行故障率统计，计算公式为

$$\lambda(x) = \frac{1}{T_x} \frac{\sum_{i=1}^k N_{xi}}{\sum_{i=1}^k L_i} \quad x=1,2,L,12 \quad (4)$$

式中： $\lambda(x)$ 为历史同期第 x 月的故障率，次/(km·月)； T_x 为历史同期第 x 个月的时间； N_{xi} 为统计的 n 年内第 i 条线路在第 x 月中的故障次数。

不同天气条件下故障率的计算公式为

$$\lambda_a(x) = \frac{1}{T_{ax}} \frac{\sum_{i=1}^k N_{axi}}{\sum_{i=1}^k L_i} \quad (5)$$

式中： $\lambda_a(x)$ 为 a 类天气下的故障率，次/(km·月)； T_{ax} 为历史同期第 x 个月内 a 类天气持续的时间； N_{axi} 为统计的 n 年内第 i 条线路在第 x 月中因 a 类天气导致的故障次数。

配电网广泛采用重合闸或强送电，以减少瞬时性故障造成的供电中断，因此有必要统计线路的故障停运率^[24]，即单位长度的线路在单位时间内因故障造成停运的次数，简称停运率。同理，某电压等级线路的故障停运率的计算公式为

$$\lambda_T = \frac{\sum_{i=1}^k F_i}{\sum_{i=1}^k L_i n_i} \quad (6)$$

式中： λ_T 为该电压等级线路的停运率，次/(km·年)； F_i 为第 i 条线路的故障停运次数；其他参数同式(2)和式(3)。

类似地，可以按历史同期的月份和不同天气条件计算线路的停运率，计算方法只需将式(4)和式(5)中的故障次数换成停运次数，此处不再赘述。

2.2 故障时间特征分布模拟方法

架空线路和混合线路受天气影响较大，其故障率和停运率在历史同期各月具有显著的差异，呈现出夏季高、冬季低的单峰特性。本文在文献[25]的基础上，使用规范化的故障率函数来反映故障率的逐月时间分布特征，故障率规范化值计算公式为

$$f(x) = \frac{\lambda(x)}{\lambda_{ave}} = \frac{\lambda(x)}{12\lambda'_{ave}} \quad x=1,2,L,12 \quad (7)$$

式中： $\lambda(x)$ 为配电线路在历史同期第 x 个月的平均故障率，次/(km·月)； λ_{ave} 为配电线路多年统计的平均故障率，次/(km·年)； λ'_{ave} 为归算到月的平均故障率，次/(km·月)。

同样使用傅里叶分布函数和高斯分布函数，对架空线路和混合线路的故障时间逐月分布特征进行拟合分析，其中傅里叶分布表达式为

$$f(x) = a + b\cos(\omega x) + c\sin(\omega x) \quad (8)$$

式中， a 、 b 、 c 、 ω 为拟合待定系数。

高斯分布表达式为

$$f(x) = A \exp\left[-\left(\frac{x-B}{C}\right)^2\right] \quad (9)$$

式中， A 、 B 、 C 为拟合待定系数。

2.3 强迫停运时间概率分布估计方法

对于可修复元件，修复率和强迫停运时间有关，确定强迫停运时间及其概率密度分布，对于配电网风险评估具有重要意义。配电线路强迫停运时间的统计方法为

$$t_i = t_{ri} - t_{fi} \quad (10)$$

式中： t_i 表示第 i 次停运时间； t_{fi} 表示第 i 次故障的跳闸时刻； t_{ri} 表示第 i 次故障的恢复时刻。

按照公式(10)可以计算出一组配电线路强迫停运时间样本集，可进一步确定其概率密度分布，用于风险评估中的强迫停运时间概率抽样。常用的故障停运时间概率密度函数有指数分布、威布尔分布、伽马分布和对数正态分布等，具体如下。

指数分布的表达式为

$$f(t|\mu) = \frac{1}{\mu} \exp\left(-\frac{t}{\mu}\right) \quad (11)$$

式中： t 表示停运时间，下同； μ 表示均值，其方差为 μ^2 。

威布尔分布的表达式为

$$f(t|\alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (12)$$

式中： α 为尺度参数； β 为形状参数。

伽马分布的表达式为

$$f(t|\gamma, \kappa) = \frac{1}{\kappa^\gamma \Gamma(\gamma)} t^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{t}{\kappa}\right) \quad (13)$$

式中： γ 为形状参数； κ 为尺度参数； $\Gamma(\cdot)$ 表示伽马函数，即

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt \quad (14)$$

对数正态分布的表达式为

$$f(t|\nu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \nu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (15)$$

式中： ν 表示对数均值； σ 表示对数标准差。

3 实例分析

本文以南方某地配电网的 8799 次故障跳闸事件为样本集，进行时间和环境相依的故障统计与参数估计分析。

3.1 时间和天气相依的故障率统计结果

采用 2.1 节的指标和计算方法，计算该地区配电线路的故障率和停运率，结果见表 1。

按历史同期各月，并根据雷雨天气情况，分别统计电缆、架空线和混合线路逐月的故障率和停运率，结果如表 2、表 3 和图 3、图 4 所示。

表 1 某配电网的故障参数统计结果

Table 1 Statistical results of the fault parameters of a distribution network

统计指标/ [次/(km 年)]	电缆	架空线	混合线	不分线 路类型
故障率(不区分天气)	0.0386	0.1319	0.1177	0.0869
故障率(正常天气)	0.0023	0.0106	0.0091	0.0053
故障率(雷雨天气)	0.0419	0.1418	0.1274	0.0963
停运率(不区分天气)	0.0126	0.0229	0.0203	0.0177
停运率(正常天气)	0.0007	0.0016	0.0015	0.0010
停运率(雷雨天气)	0.0125	0.0263	0.0207	0.0185
重合闸成功率	65.94%	82.91%	83.47%	79.64%
重合闸成功率(雷雨天气)	68.64%	82.08%	83.31%	80.48%

表 2 配电线路历史同期各月的故障率和停运率

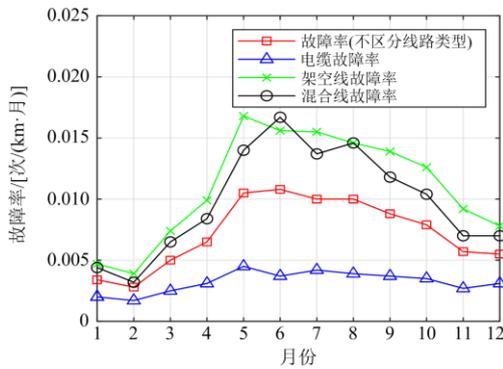
Table 2 Monthly failure and outage rates of the distribution lines in the historical period

月份	故障率 λ [次/(km 月)]				停运率 λ_F [次/(km 月)]			
	不区分线路类型	电缆	架空线	混合线	不区分线路类型	电缆	架空线	混合线
1	0.0034	0.0020	0.0047	0.0044	0.0009	0.0009	0.0010	0.0009
2	0.0028	0.0017	0.0039	0.0032	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
3	0.0050	0.0025	0.0074	0.0065	0.0012	0.0010	0.0014	0.0014
4	0.0065	0.0031	0.0099	0.0084	0.0018	0.0014	0.0023	0.0019
5	0.0105	0.0045	0.0168	0.0140	0.0021	0.0012	0.0032	0.0025
6	0.0108	0.0037	0.0156	0.0167	0.0025	0.0015	0.0031	0.0032
7	0.0100	0.0042	0.0155	0.0137	0.0019	0.0014	0.0025	0.0020
8	0.0100	0.0039	0.0146	0.0146	0.0016	0.0010	0.0019	0.0020
9	0.0088	0.0037	0.0139	0.0118	0.0017	0.0010	0.0024	0.0021
10	0.0079	0.0035	0.0126	0.0104	0.0012	0.0009	0.0016	0.0014
11	0.0057	0.0027	0.0092	0.0070	0.0010	0.0008	0.0012	0.0010
12	0.0055	0.0031	0.0078	0.0070	0.0012	0.0009	0.0017	0.0013
月均值	0.0072	0.0032	0.0110	0.0098	0.0015	0.0011	0.0019	0.0017
标准差	0.0027	0.0008	0.0042	0.0042	0.0005	0.0003	0.0008	0.0007

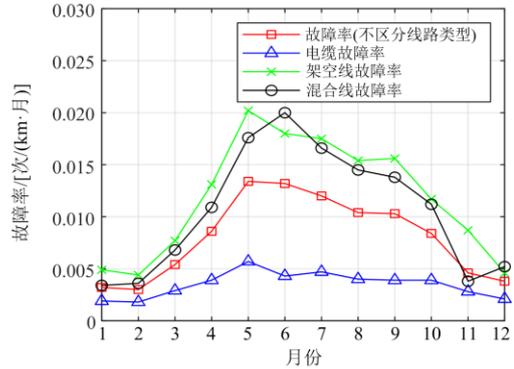
表 3 雷雨天气下配电线路历史同期各月的故障率和停运率

Table 3 Monthly failure and outage rates of the distribution lines in the historical period during thunderstorm and rainstorm weather

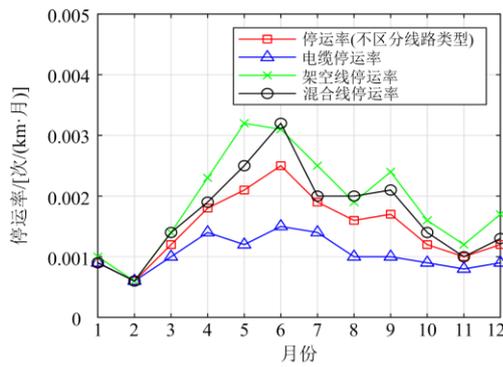
月份	故障率 λ [次/(km 月)]				停运率 λ_F [次/(km 月)]			
	不区分线路类型	电缆	架空线	混合线	不区分线路类型	电缆	架空线	混合线
1	0.0032	0.0019	0.0049	0.0034	0.0011	0.0008	0.0015	0.0010
2	0.0030	0.0018	0.0044	0.0036	0.0009	0.0006	0.0010	0.0011
3	0.0054	0.0029	0.0077	0.0068	0.0012	0.0010	0.0013	0.0013
4	0.0086	0.0039	0.0131	0.0109	0.0025	0.0017	0.0034	0.0028
5	0.0134	0.0057	0.0202	0.0176	0.0023	0.0012	0.0036	0.0028
6	0.0132	0.0043	0.0180	0.0200	0.0027	0.0016	0.0033	0.0036
7	0.0120	0.0047	0.0175	0.0166	0.0021	0.0015	0.0031	0.0022
8	0.0104	0.0040	0.0154	0.0145	0.0016	0.0010	0.0021	0.0019
9	0.0103	0.0039	0.0156	0.0138	0.0017	0.0012	0.0021	0.0021
10	0.0084	0.0039	0.0117	0.0112	0.0007	0.0005	0.0016	0.0005
11	0.0046	0.0028	0.0087	0.0038	0.0005	0.0006	0.0010	0.0004
12	0.0038	0.0021	0.0046	0.0052	0.0012	0.0008	0.0023	0.0010
月均值	0.0080	0.0035	0.0118	0.0106	0.0015	0.0010	0.0022	0.0017
标准差	0.0037	0.0012	0.0054	0.0057	0.0007	0.0004	0.0009	0.0010



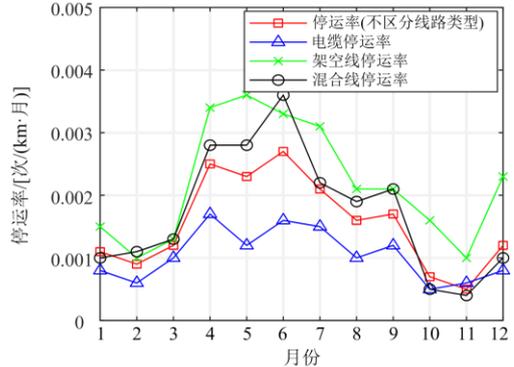
(a) 配电线路故障率逐月分布



(a) 配电线路故障率逐月分布



(b) 配电线路停运率逐月分布



(b) 配电线路停运率逐月分布

图 3 不同类型的配电线路故障率和停运率的逐月分布图
Fig. 3 Monthly distribution diagram of failure and outage rates of different distribution line types

图 4 雷雨天气下配电线路故障率和停运率的逐月分布图
Fig. 4 Monthly distribution diagram of failure and outage rates of distribution lines during thunderstorm and rainstorm weather

由以上统计结果可见：

1) 由图 3 可以看出，电缆的故障率在全年中变化不大，最高出现在 5 月，最低出现在 2 月，月均值为 0.0032 次/(km·月)，标准差为 0.0008 次/(km·月)，标准差较小。可见电缆使用年均值故障率、停运率对时变风险评估的结果影响不会太大。即使单独统计雷雨天气下电缆的故障率，如表 3 的第 3 列，月均值为 0.0035 次/(km·月)，仅比不考虑天气影响高 9.4%。

2) 架空线的故障率在全年的变化较大，长夏季(5—9 月)故障率高，冬季(11 月至次年 2 月)故障率低，呈现明显的单峰特性，月均值为 0.0110 次/(km·月)，月标准差为 0.0042 次/(km·月)，分散性较大，这与南方以夏季雷雨气象灾害为主有很大关系。

3) 雷雨天气下架空线的平均故障率为 0.0118 次/(km·月)，与正常天气下的平均故障率 0.0106 次/(km·月)相比，平均高出 11.3%；但在夏季最高时[5 月，0.0202 次/(km·月)]，比正常天气下故障率高出 90.6%。雷雨天气下架空线的平均停运率为 0.0022

次/(km·月)，与正常天气下的平均停运率 0.0016 次/(km·月)相比，平均高出 37.5%；但在夏季最高时[5 月，0.0036 次/(km·月)]，比正常天气下停运率高出 125%。

4) 混合线与架空线的情况类似，雷雨天气下混合线的平均故障率为 0.0106 次/(km·月)，和正常天气下的平均故障率 0.0091 次/(km·月)相比，平均高出 16.5%；但在夏季最高时[6 月，0.0200 次/(km·月)]，比正常天气下故障率高出 120%。雷雨天气下混合线的平均停运率为 0.0017 次/(km·月)，与正常天气下的平均停运率 0.0015 次/(km·月)相比，平均高出 13.3%；但在夏季最高时[6 月，0.0036 次/(km·月)]，比正常天气下停运率高出 140%。

此外，配电网运维人员根据天气预报和气象灾害预警，采用各种降风险调度措施和应急处置预案也逐渐受到重视。因此，在不同气象灾害预警等级下，配电网故障率水平如何，也是配网运维人员关注的问题。为此，本文根据当地气象局发布的故障预警信号等级及其持续时间(按小时计算)，进行故

障率关联统计,得到不同灾害预警等级下的故障率、停运率水平(单位为次/(km h)),结果如表 4 所示。需要说明的是,各气象灾害等级虽然有红、橙、黄、蓝 4 个等级(台风还多一个白色预警),但研究时段内的历史气象灾害预警并非全部包含。

表 4 不同灾害预警等级下的配电线路故障率 λ 与停运率 λ_F
Table 4 Failure rate λ and outage rate λ_F of the distribution lines under different meteorological disaster warning levels

灾害类型		架空线 λ	混合线 λ	架空线 λ_F	混合线 λ_F
雷雨	黄色	1.39×10^{-4}	1.52×10^{-4}	1.90×10^{-5}	2.33×10^{-5}
	橙色	4.14×10^{-4}	2.71×10^{-4}	1.04×10^{-4}	4.72×10^{-5}
大风	不分等级	1.50×10^{-4}	1.56×10^{-4}	2.24×10^{-5}	2.41×10^{-5}
	黄色	9.64×10^{-5}	1.01×10^{-4}	1.29×10^{-5}	1.26×10^{-5}
暴雨	橙色	1.13×10^{-4}	1.04×10^{-4}	9.59×10^{-6}	8.96×10^{-6}
	红色	3.65×10^{-4}	3.68×10^{-4}	3.68×10^{-6}	3.55×10^{-6}
台风	不分等级	1.20×10^{-4}	1.27×10^{-4}	2.05×10^{-5}	1.98×10^{-5}
	不分等级	1.49×10^{-5}	1.81×10^{-5}	3.19×10^{-6}	3.62×10^{-6}

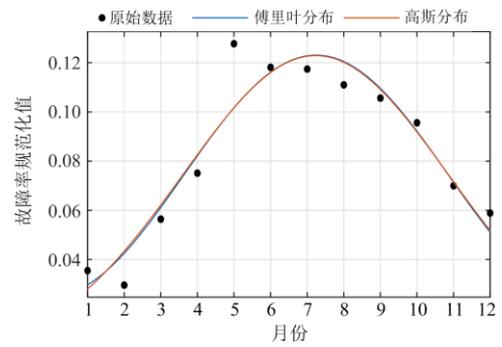
在表 4 中,以雷雨大风天气下的架空线路为例,其故障率为 1.50×10^{-4} 次/(km h),停运率为 2.24×10^{-5} 次/(km h),而正常天气下的架空线的故障率仅为 1.21×10^{-6} 次/(km h),停运率仅为 1.83×10^{-7} 次/(km h),二者相差 2 个数量级。此外,气象灾害等级越高,故障率越大。其中需要说明的是,台风天气由于故障样本较少,统计值比雷雨大风小,且该地区并非直接临海,所受影响也主要是台风登录后的大风和暴雨。可见,仅在灾害持续的几个小时内(统计均值为 2.32 h),无论是架空线还是混合线,其故障率和停运率远远高于正常天气下的故障率和停运率。

综上所述,配电网电缆的故障率和停运率在全年中各月的分布并不明显,受天气条件影响也相对较小;而对于架空线路和混合线路,既要考虑故障率和停运率的逐月时间分布特征,又要考虑主导气象灾害(雷雨天气)的影响,需要使用时间和气象环境相依的故障率和停运率参数拟合方法。

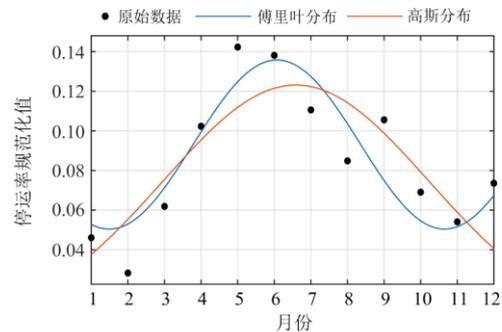
3.2 配电线故障逐月分布特征拟合结果

对于元件可靠性参数及其概率分布的拟合与参数估计,可参照文献[26]第 3 节的方法进行分析。本文使用 Matlab 统计工具包进行参数拟合和概率密度函数的参数估计。

架空线故障率和停运率的逐月分布拟合图见图 5,拟合参数见表 5。从结果来看,故障率逐月时间分布函数的拟合优度在 0.9 以上,拟合效果较好;而停运率的逐月时间分布函数拟合优度仅为 0.7~0.8,拟合效果也较好。



(a) 架空线故障率逐月分布拟合



(b) 架空线停运率逐月分布拟合

图 5 架空线故障率和停运率的逐月分布拟合

Fig. 5 Monthly distribution fitting of the overhead line failure and outage rates

表 5 架空线故障率和停运率逐月拟合分布结果

Table 5 Overhead line failure and outage rate monthly distribution fitting results

拟合函数	参数拟合值	拟合优度
高斯函数 (故障率)	$A=0.1229$	$R_{\text{square}}=0.9033$ $\delta_{\text{RMSE}}=0.0116$
	$B=7.233$	
	$C=5.127$	
傅里叶函数 (故障率)	$a=0.07410$	$R_{\text{square}}=0.9070$ $\delta_{\text{RMSE}}=0.0120$
	$b=-0.0490$	
	$c=0.0001$ $\omega=0.4332$	
高斯函数 (停运率)	$A=0.1231$	$R_{\text{square}}=0.6807$ $\delta_{\text{RMSE}}=0.0224$
	$B=6.592$	
	$C=5.136$	
傅里叶函数 (停运率)	$a=0.0931$	$R_{\text{square}}=0.7950$ $\delta_{\text{RMSE}}=0.0190$
	$b=-0.0222$	
	$c=-0.0364$ $\omega=0.6859$	

混合线故障率和停运率的逐月分布拟合图见图 6,拟合参数见表 6,拟合效果也较好。

3.3 强迫停运时间概率分布参数估计结果

本文所研究的配电网,其配电线路的强迫停运

时间统计均值如表 7 所示。与文献[25]的输电线路的平均停运时间 8.1207 h 相比, 配电线路的平均强迫停运时间要短得多, 以架空线为例, 不区分天气条件的平均强迫停运时间为 3.38 h, 仅为输电线路的 41.6%, 这可以解释为配电线路普遍较短, 更有利于查找和恢复故障。

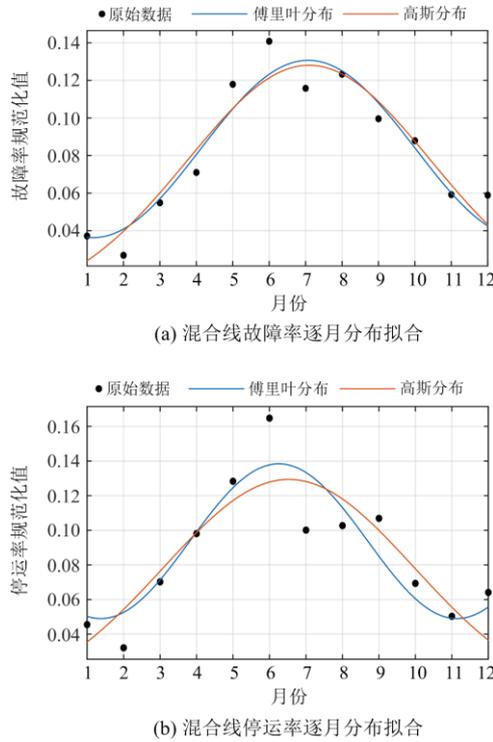


图 6 混合线故障率和停运率的逐月分布拟合

Fig. 6 Monthly distribution fitting of mixed line failure rates and outage rates

表 6 混合线路故障率和停运率逐月拟合分布结果
Table 6 Mixed distribution line failure and outage rate monthly distribution fitting results

拟合函数	参数拟合值	拟合优度
高斯函数 (故障率)	$A = 0.1281$	$R_{\text{square}} = 0.8951$ $\delta_{\text{RMSE}} = 0.0132$
	$B = 7.095$	
	$C = 4.709$	
傅里叶函数 (故障率)	$a = 0.0835$	$R_{\text{square}} = 0.9095$ $\delta_{\text{RMSE}} = 0.0130$
	$b = -0.0384$	
	$c = -0.0275$	
	$\omega = 0.5322$	
高斯函数 (停运率)	$A = 0.1294$	$R_{\text{square}} = 0.7448$ $\delta_{\text{RMSE}} = 0.0212$
	$B = 6.531$	
	$C = 4.862$	
傅里叶函数 (停运率)	$a = 0.0937$	$R_{\text{square}} = 0.8093$ $\delta_{\text{RMSE}} = 0.0195$
	$b = -0.0283$	
	$c = -0.0346$	
	$\omega = 0.6436$	

表 7 配电线路强迫停运时间统计值

Table 7 Statistics of forced outage time of distribution lines

天气条件	正常天气	雷雨天气	不区分天气
电缆	—	—	2.52 h
架空线	3.11 h	4.16 h	3.38 h
混合线	2.99 h	3.46 h	3.07 h

本文采用文献[25]的方法对停运时间概率密度函数进行分布拟合检验。其中, 分布拟合采用极大似然估计法, 拟合检验采用 0.01 显著性水平的卡方检验法。

1) 电缆强迫停运时间概率分布拟合

针对配电网中的电缆, 由第 3.1 节统计分析可知, 其故障受天气影响较小, 因此对其单独分析强迫停运时间。电缆强迫停运时间概率分布和参数拟合结果分别如图 7 和表 8 所示。从结果来看, 虽然这 4 种分布均通过了假设检验, 但威布尔分布和伽马分布的拟合结果最好。

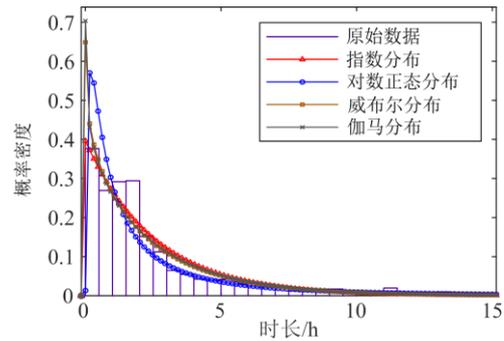


图 7 电缆强迫停运时间概率分布

Fig. 7 Probability distribution of the forced outage time for power cables

表 8 电缆停运时间概率密度函数拟合结果

Table 8 Probability density function fitting results of the forced outage time for power cables

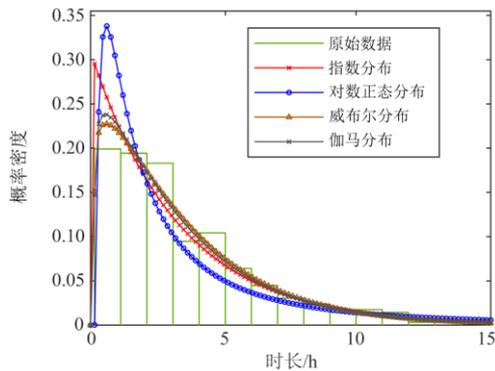
拟合函数	参数拟合值	拟合优度	卡方检验
指数分布	$\mu = 2.52$	$E_{\text{mean}} = 2.52$	接受
		$\delta_{\text{var}} = 6.35$	
		$\ln L = -1542.92$	
威布尔分布	$\alpha = 2.41$ $\beta = 0.91$	$E_{\text{mean}} = 2.52$	接受
		$\delta_{\text{var}} = 7.61$	
		$\ln L = -1537.21$	
伽马分布	$\gamma = 0.88$ $\kappa = 2.88$	$E_{\text{mean}} = 2.52$	接受
		$\delta_{\text{var}} = 7.23$	
		$\ln L = -1538.27$	
对数正态分布	$\nu = 0.26$ $\sigma = 1.37$	$E_{\text{mean}} = 3.31$	接受
		$\delta_{\text{var}} = 61.20$	
		$\ln L = -1596.60$	

2) 架空线强迫停运时间概率分布拟合

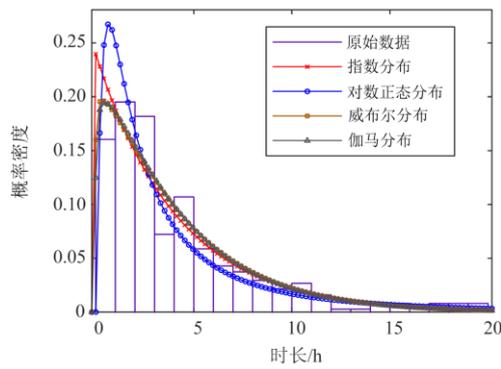
针对配电网中的架空线和混合线, 其故障受天气影响较大, 因此对其单独分析强迫停运时间。架空线的强迫停运时间概率分布和参数拟合结果分别如图 8 和表 9 所示。从拟合检验结果来看, 这 4 种分布均通过了假设检验, 其中威布尔分布和伽马分布的拟合结果最好。从统计数据可见, 雷雨天气下架空线路的平均停运时间(均值 4.16 h)比正常天气时的平均停运时间(均值 3.11 h)高 33.8%, 说明恶劣天气下配电网线路修复时间更长。

3) 架空线强迫停运时间概率分布拟合

对于混合线路, 其强迫停运时间概率分布和参数拟合结果分别如图 9 和表 10 所示。从拟合检验结果来看, 这 4 种分布均通过了假设检验, 其中威布尔分布和伽马分布的拟合结果最好。从统计数据可见, 混合线路的平均停运时间(均值 3.07 h), 介于架空线(均值 3.38 h)和电缆(均值 2.52 h)之间; 在雷雨天气下混合线路的平均停运时间(均值 3.46 h)比正常天气时(均值 2.99 h)高 15.7%, 统计和拟合结果符合配电网运维的实际情况。



(a) 不区分天气条件强迫停运时间概率分布



(b) 雷雨天气下强迫停运时间概率分布

图 8 架空线强迫停运时间概率密度分布

Fig. 8 Probability distribution of the forced outage time for overhead lines

表 9 架空线强迫停运时间概率密度函数拟合结果

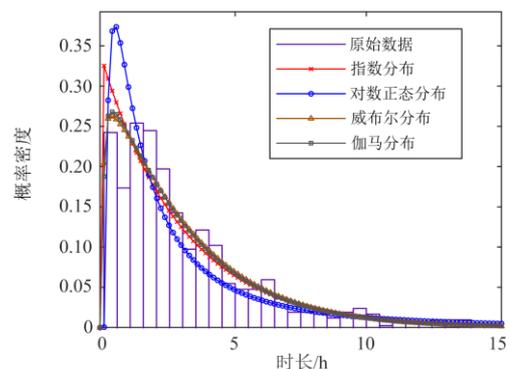
Table 9 Probability density function fitting results of the forced outage time for overhead lines

拟合函数	不区分天气条件		雷雨天气		
	参数拟合值	拟合优度	参数拟合值	拟合优度	
指数分布	$\mu=3.38$	$E_{\text{mean}}=3.38$ $\delta_{\text{var}}=11.44$ $\ln L=-1382.06$	$\mu=4.16$	$E_{\text{mean}}=4.16$ $\delta_{\text{var}}=17.36$ $\ln L=-907.70$	
	威布尔分布	$\alpha=3.51$ $\beta=1.11$	$E_{\text{mean}}=3.38$ $\delta_{\text{var}}=9.26$ $\ln L=-1376.87$	$\alpha=4.27$ $\beta=1.07$	$E_{\text{mean}}=4.16$ $\delta_{\text{var}}=15.26$ $\ln L=-906.39$
		伽马分布	$\gamma=1.13$ $\kappa=2.97$	$E_{\text{mean}}=3.38$ $\delta_{\text{var}}=10.06$ $\ln L=-1378.93$	$\gamma=1.13$ $\kappa=3.68$
对数正态分布	$\nu=0.72$ $\sigma=1.24$		$E_{\text{mean}}=4.42$ $\delta_{\text{var}}=71.16$ $\ln L=-1464.51$	$\nu=0.92$ $\sigma=1.16$	$E_{\text{mean}}=4.93$ $\delta_{\text{var}}=68.88$ $\ln L=-930.83$

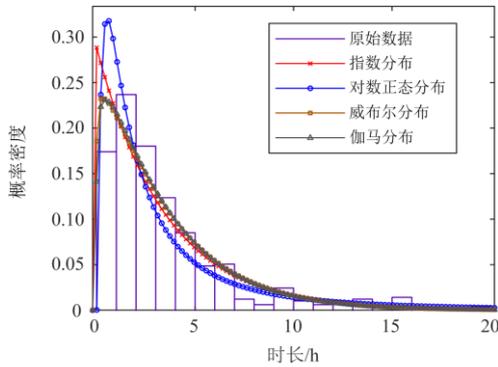
表 10 混合线强迫停运时间概率密度函数拟合结果

Table 10 Probability density function fitting results of the forced outage time for mixed power lines

拟合函数	不区分天气条件		雷雨天气		
	参数拟合值	拟合优度	参数拟合值	拟合优度	
指数分布	$\mu=3.07$	$E_{\text{mean}}=3.07$ $\delta_{\text{var}}=9.42$ $\ln L=-1786.55$	$\mu=3.46$	$E_{\text{mean}}=3.46$ $\delta_{\text{var}}=11.98$ $\ln L=-1107.51$	
	威布尔分布	$\alpha=3.15$ $\beta=1.07$	$E_{\text{mean}}=3.07$ $\delta_{\text{var}}=8.11$ $\ln L=-1782.78$	$\alpha=3.56$ $\beta=1.08$	$E_{\text{mean}}=3.46$ $\delta_{\text{var}}=10.38$ $\ln L=-1105.3$
		伽马分布	$\gamma=1.11$ $\kappa=2.76$	$E_{\text{mean}}=3.07$ $\delta_{\text{var}}=8.49$ $\ln L=-1783.7$	$\gamma=1.14$ $\kappa=3.02$
对数正态分布	$\nu=0.61$ $\sigma=1.23$		$E_{\text{mean}}=3.92$ $\delta_{\text{var}}=54.42$ $\ln L=-1881.07$	$\nu=0.74$ $\sigma=1.18$	$E_{\text{mean}}=4.21$ $\delta_{\text{var}}=52.84$ $\ln L=-1149.26$



(a) 不区分天气条件强迫停运时间概率分布



(b) 雷雨天气下强迫停运时间概率分布

图9 混合线强迫停运时间概率密度分布

Fig. 9 Probability distribution of the forced outage time for mixed power line

此外，有关概率分布函数的选取，对比可见：无论哪种类型的配电线路，威布尔分布和伽马分布均可较好地模拟配电线路的停运时间；对数正态分布拟合的均值和方差，都与统计样本的均值、方差有较大差异，虽然在大样本时也能通过卡方检验，但参数估计值最差；由于指数分布只需估计参数的均值，因此在缺乏大量统计样本时，可使用指数分布描述配电线路的停运时间概率分布。

4 结论

针对恶劣天气下的配电线路故障率基础参数统计和概率分布拟合研究，本文以南方沿海地区某大型配电网为研究对象，采用时空环境相依的配电网故障统计分析方法，按不同月份、不同天气条件、不同线路类型，计算配电网故障率、停运率等参数在历史同期月份的时间分布特征，并给出分布拟合参数；针对配电网故障停运时间，按不同元件、正常和恶劣天气分析了停运时间的概率分布特征。经过研究，得出如下结论：

1) 配电网中电缆的故障原因主要有施工等外力破坏和绝缘损坏，电缆故障率和停运率在历史同期月份的分布并不明显，受天气条件影响也相对较小。

2) 对架空线路和混合线路，既要考虑故障率和停运率的逐月时间分布特征，又要考虑主导气象灾害(雷雨天气)的影响，需要使用时间和气象环境相依的故障率和停运率统计模型。统计表明，仅在气象灾害预警持续的几个小时内，故障率和停运率比正常天气下要高2个数量级；对于夏季雷雨天气主导的单峰型故障逐月时间分布，可使用高斯函数或者傅里叶函数进行模拟。

3) 配电线路的平均停运时间，电缆最低(2.52 h)，

混合线路(3.07 h)次之，架空线(3.38 h)最高；雷雨天气下平均停运时间更长，架空线比其平均值高33.8%，混合线比其平均值高15.7%；配电线路强迫停运时间的概率分布使用威布尔分布和伽马分布拟合效果较好，缺乏大量统计样本时，可使用仅需一个均值参数的指数分布进行统计描述。

参考文献

[1] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
WANG Jian. Research on meteorological disaster risk analysis and fault early warning methods for overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[2] MOUSAVIZADEH S, ALAHYARI A, GHODSINYA S R M, et al. Incorporating microgrids coupling with utilization of flexible switching to enhance self-healing ability of electric distribution systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 300-310.

[3] 万国成, 邓丰强, 张勇军. 特大城市两种高压配网典型接线可靠性比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 174-180.
WAN Guocheng, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun. Comparative research on typical wiring reliability of two high voltage distribution networks in a megacity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 174-180.

[4] 宋耐超, 王瑞琦, 李明明, 等. 多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 65-71.
SONG Naichao, WANG Ruiqi, LI Mingming, et al. Risk assessment of overhead transmission lines under multiple natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 65-71.

[5] 张东飞, 马瑞, 鲁海威, 等. 冰冻灾害条件下基于气象参数连续性的配电网可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 51-56.
ZHANG Dongfei, MA Rui, LU Haiwei, et al. A method of evaluating the distribution system reliability under freezing disaster weather based on the continuity of meteorological parameters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 51-56.

[6] 苏海锋, 姜小静, 梁志瑞. 考虑多种影响因素的配电网运行风险评估[J]. 电测与仪表, 2014, 51(6): 34-38.
SU Haifeng, JIANG Xiaojing, LIANG Zhirui. Distribution network operation risk assessment considering various influencing factors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(6): 34-38.

[7] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513.
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.

- [8] 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.
- [9] LIN Chaofan, LIU Fei, ZHANG Liyin, et al. An online data-driven risk assessment method for resilient distribution systems[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(2): 136-144.
- [10] 姚忠胜, 钱虹, 吴文军, 等. 基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 28-34.
YAO Zhongsheng, QIAN Hong, WU Wenjun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 28-34.
- [11] 张璞, 张波, 王建, 等. 计及主设备时变状态的变电站短时风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 73-81.
ZHANG Pu, ZHANG Bo, WANG Jian, et al. Short-term risk assessment for a power substation considering the time-varying operation conditions of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 73-81.
- [12] 万凌云, 王主丁, 庞祥瑞, 等. 中压配电网可靠性评估参数收集及其规划应用[J]. 供用电, 2017, 34(6): 38-43.
WAN Lingyun, WANG Zhuding, PANG Xianglu, et al. Parameter collection and planning application of medium voltage distribution system reliability assessment[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(6): 38-43.
- [13] 尹超雄, 唐武勤, 温灵锋, 等. 台风天气下配电网可靠性的新型评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 138-143.
YIN Chaoxiong, TANG Wuqin, WEN Lingfeng, et al. A new method for reliability evaluation of distribution network considering the influence of typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 138-143.
- [14] 谢云云, 薛禹胜, 王昊昊, 等. 电网雷击故障概率的时空在线预警[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 44-51.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WANG Haohao, et al. Space-time early-warning of power grid fault probability by lightning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 44-51.
- [15] 熊小伏, 王建. 电网气象关联风险分析方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [16] 董雷, 赵灿, 陈乃仕, 等. 配电系统短期可靠性评估方案[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 15-20.
DONG Lei, ZHAO Can, CHEN Naishi, et al. Short-term reliability assessment scheme for distribution system[J]. Electric Power, 2016, 49(12): 15-20.
- [17] SARWAT A I, AMINI M, DOMIJAN A, et al. Weather-based interruption prediction in the smart grid utilizing chronological data[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2016, 4(2): 308-315.
- [18] 刘专, 郭泉辉, 刘娟, 等. 基于统计数据的配网故障修复时长分析[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 84-87.
LIU Zhuan, GUO Quanhui, LIU Juan, et al. Analysis on distribution network fault repair time based on statistical data[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 84-87.
- [19] 谭米, 苏盛, 易文韬. 配电网故障统计特性及其形成机理分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 1-4, 12.
TAN Mi, SU Sheng, YI Wentao. Statistical distribution of power system fault in power grid and analysis of its mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(1): 1-4, 12.
- [20] WANG Jian, XIONG Xiaofu, ZHOU Ning, et al. Time-varying failure rate simulation model of transmission lines and its application in power system risk assessment considering seasonal alternating meteorological disasters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(7): 1582-1588.
- [21] LIU H, DAVIDSON R A, APANASOVICH T V. Spatial generalized linear mixed models of electric power outages due to hurricanes and ice storms[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(6): 897-912.
- [22] LIU H, DAVIDSON R A, ROSOWSKY D V, et al. Negative binomial regression of electric power outages in hurricanes[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(4): 258-267.
- [23] 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.
- [24] 王主丁. 高中压配电网可靠性评估——实用模型、方法、软件和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [25] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109-114.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Time distribution of weather-related transmission line failure and its fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 109-114.
- [26] 李文沅. 电力系统风险评估——模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

收稿日期: 2021-11-16; 修回日期: 2022-03-02

作者简介:

王建(1986—), 男, 通信作者, 博士(后), 副教授, 博士生导师, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警、电力系统保护与控制; E-mail: wangrelay@foxmail.com

姚江宁(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警;

刘泽青(1990—), 硕士, 主要从事配网运行维护工作。

(编辑 许威)