

1-30-2024

A random fuzzy-based risk assessment method for outages in distribution networks

Xiaoguang MA

*School of Electrical & Information Engineering , Changsha University of Science & Technology ,
Changsha 410114, China*

Rui MA

*School of Electrical & Information Engineering , Changsha University of Science & Technology ,
Changsha 410114, China, marui818@126.com*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

MA, Xiaoguang and MA, Rui (2024) "A random fuzzy-based risk assessment method for outages in distribution networks," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 6, Article 13.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.013

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss6/13>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

基于随机模糊的配电网故障停电风险评估方法

马晓光, 马 瑞

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:针对配电网结构日趋复杂导致的故障原因多样性与随机不确定性问题,提出一种基于随机模糊的配电网故障停电风险评估方法。相对于传统的配电网故障停电风险评估,该方法从数据驱动的维度通过对参数模型的随机模糊化更真实客观地描述一定区域内的故障累计概率;并针对电力用户日益增长的供电可靠性期望,通过熵权法综合考虑停电事故的故障等级、停电时长、敏感用户数和影响用户数等因素,对配电网故障进行风险评估。结果表明,采用随机模糊理论计算的故障次数概率分布可实现对配电网故障问题更加科学和全面的分析;通过熵权法确定的风险评估指标权重可为制定合理有效的故障抢修策略提供支撑,可为敏感用户制定应对方案,提高电力用户归属感。

关 键 词:随机模糊;配电网停电概率;风险评估;熵权法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.013

中图分类号: TM863

文章编号: 1673-9140(2023)06-0123-09

A random fuzzy-based risk assessment method for outages in distribution networks

MA Xiaoguang, MA Rui

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the problem of the diversity of fault causes and the random uncertainty caused by the increasingly complex distribution network structure, a random fuzzy-based distribution network failure risk assessment method is proposed. Compared with the traditional risk assessment of power outages in distribution networks, this method describes the cumulative probability of failures in a certain area from a data-driven dimension through random fuzzification of parameter models. In response to the increasing power supply reliability expectations of power users, the entropy weight method is used to comprehensively consider factors such as the fault level of the power outage accident, the length of the power outage, the number of sensitive users and the number of affected users, and conduct risk assessment of the distribution network failure. The results show that the probability distribution of the number of failures calculated by using the random fuzzy theory can realize a more scientific and comprehensive analysis of the distribution network failures. The weight value of the risk assessment index determined by the entropy weight method can provide support for formulating reasonable and effective fault repair strategies, formulate response plans for sensitive users and increase the degree of power user ownership.

Key words: random fuzzy; outage probability of distribution network; risk assessment; entropy method

收稿日期: 2021-05-04; 修回日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(51977012)

通信作者: 马 瑞(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统运行与控制研究; E-mail: marui818@126.com

随着中国经济的快速发展和国民生活水平的日益提高,电力用户对电能供应的稳定性期望值日益提高。各地区配电网受各类因素影响,拓扑机构、故障机理以及风险大小都不尽相同,而既有的针对配电网故障分析的研究中,对故障机理的概括与描述^[1-2]是无法穷尽的。因此,从数据驱动维度对配电网故障进行统计分析是配电网可靠性分析的重要组成部分,采用传统解析法研究时可以有效避免复杂建模过程中所产生的维数灾等问题,可以有效避免产生的维数灾等问题,进一步简化对配电网故障的评估过程,使评估结果与实际情况更加匹配^[3]。

当前,在配电网风险评估问题上,一般采用确定性评估和概率评估方法。文献[4]提出一种利用熵权法确定权重的模糊评价方法,用以评估新能源高渗透下的送端电网风险;文献[5]根据居民、商业及工业的不同日负荷特性,提出一种基于蒙特卡洛模拟算法的用户用电特性的时序负荷模型;文献[6-8]建立了不同场景下天气因素影响的线路停电模型;文献[9]采用 TLS(t-location scale)分布对风电出力预测过程中产生的误差进行描述,提出了一种考虑风电出力预测误差的风险评估模型;文献[10]提出了一种配电网停电风险预测的模糊逻辑方法,它能让调度人员实现更加精确的停电预测并对当天的配电计划进行优化,此外还可以利用部分气象数据的特征减少故障点定位时间;文献[11]通过对历史事故进行数学统计,提出一种综合线路过负荷、母线低电压以及负荷点停电的综合风险指标;文献[12]考虑风电出力的不确定性以及线路断开导致事故发生的严重性,建立了线路过载风险评估指标;文献[13]将停电风险指标和电压骤降风险指标作为电网运行中的风险评估指标。综上,既有的参考文献与相关研究主要在概率风险、非电气类因素与停电事件的配对关联等方面。

因此,本文从数据驱动维度进一步考虑配电网故障的随机性与模糊性,对中国某省供电可靠性及故障概率分布进行客观描述;同时,根据电力用户对供电可靠性日益增长的需求,综合考虑停电事故的故障等级、停电时长、敏感用户数和影响用户数等因素,对配电网故障进行风险评估,为不同地区的配电网供电服务提供更有针对性的建议。

1 配电网故障特征及其分析方法

1.1 配电网故障特征

某省故障停电主要发生在夏、秋两季,原因是该地区夏季炎热、冬季寒冷,夏、秋季节雨水较少,秋、冬季节干旱。该地区夏季温度为 28~30℃,最高温度达 35℃,这种天气情况一般可达 30 d 以上。

本文选取该省 2017 年 7 月至 2018 年 6 月配电抢修指挥应用平台汇总的停电抢修工单原始数据,此数据包含各地市公司及所辖的县公司和区供电所等故障地点信息、故障时间和修复时间等时间信息、影响人数与敏感用户数等风险类信息。对已有的 80 458 条原始数据进行统计分析,该地区配电网停电事件及原因统计情况如图 1 所示。

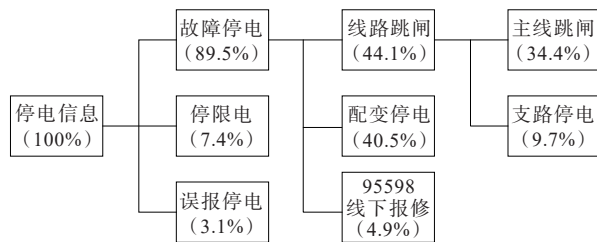


图1 配电网停电事件及原因统计

Figure 1 Statistics of power outages and causes in distribution networks

根据图1,由实际工单信息导出的停电故障信息主要为故障停电、停限电和误报停电3类。其中,停限电和误报事件主要受人力因素影响,属于可预见停电事故与数据误差,在本次研究中暂时不予考虑。在不可预见的故障停电事件中,线路跳闸和配变停电分别占总停电事件的44.1%和40.5%,其中除了过负荷等电气类因素外,还包含外力撞线、雷击等非电气类因素。

1.2 配电网故障数据的研究方法

由经典可靠性理论可知,线路、台区故障等停电事件之间为相互独立事件,大致服从泊松分布,因此,单位时间内故障情况可以用指数分布进行描述^[13-17]。

指数分布的累积概率函数可表示为

$$P(X \leq x) = 1 - e^{-Dx} \quad (1)$$

移项后两边取双对数,可得:

$$\lg [P(X > x)] = -Dx \quad (2)$$

可见单对数坐标下指数分布呈斜率为 $-D$ 的直线状。

除此以外,在电网故障受某些强关联度影响因素的作用下,往往会呈现不同的数学分布模型,如某地区故障分布在强度具有幂特性的降水相关极端事件作用下会呈现幂律特性^[13-14]。

本文采用幂分布描述电网故障数据概率,其累积概率为

$$P = cr^{-D'} \quad (3)$$

式中, c 为待定参数; r 为电网故障数据中的日故障次数; D' 为分形维值,即幂律值。

将式(3)两边进行双对数变换,可得:

$$\lg P = \lg c - D' \lg r \quad (4)$$

利用式(1)~(4)从数据驱动维度对配电网故障特征进行分析。

1.3 配电网日故障次数概率分布特性分析

本文所选取的数据样本取自某省2017—2018年归档工单信息。在以地级市为行政单位的划分情况下,不同城市在经济发展水平、配电网规划建设等社会因素方面存在差异,不同维度的城市间气候也有不同。因此,在进行数据统计时,为确保其他无关变量保持一致或相对变化较小,同时满足样本数充足、避免极值影响误差较大,本文选取该省Y市作为研究对象,进行相关描述与分析。Y市2017—2018年配网日故障次数概率统计如表1所示。

表1 Y市2017—2018年配网日故障次数概率统计

Table 1 Probability statistics of the number of daily failures in the distribution network from 2017 to 2018 in Y city

r	频数/次	P	r	频数/次	P
≥ 1	360	0.986	≥ 18	32	0.087
≥ 6	145	0.397	≥ 20	20	0.055
≥ 10	83	0.227	≥ 24	12	0.033
≥ 14	59	0.161	≥ 26	6	0.016
≥ 16	44	0.121	≥ 29	2	0.005

通过拟合工具分别在单、双对数坐标下对日故障概率进行拟合,如图2所示,可知双对数坐标下日故障概率对数分布拟合直线与实际故障统计点差距较大,而单对数坐标下日故障概率拟合直线则与实际故障统计点基本吻合,故本文采用单对数坐标

轴计算日故障次数概率。然而,由于本文选择的样本数为Y市全年数据,误差结果难以完全避免,因此拟合结果仍不理想,后续研究将在加大样本数的同时提升样本多样性,争取最大程度减少统计误差。

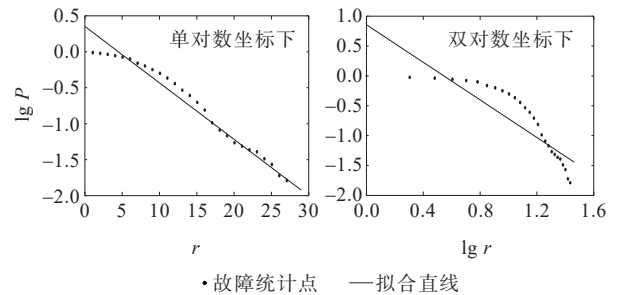


图2 单、双对数坐标下日故障概率对数分布拟合结果

Figure 2 Fitting results of exponential distribution of daily failure probability in single and double logarithmic coordinates

由文献[15-16]中结论可知,Y市全年停电故障分布符合指数分布,降水量等呈现幂律分布特征的非电气类因素对停电事件影响较小,且全年无重大停电事故,与Y市实际情况相符。因此,后续将采用单对数坐标日故障次数拟合模型对日故障概率进行数学描述。单对数坐标下日故障概率拟合模型的线性关系如下:

$$\lg P = 0.352 - 0.785r \quad (5)$$

根据拟合结果可以看出,均方根误差(root mean square error, RMSE)为0.519 2,决定系数 R^2 为0.959 2,拟合直线与原始故障统计点差距较小,故可认为 $\lg P$ 和 r 呈显著的线性关系。同样地,以春、夏、秋、冬四季分别对Y市日故障概率分布进行指数拟合分析,如图3所示。

将日故障次数按照多时间尺度进行分区统计,根据图3,直线斜率 D 为指数值,截距 c 为待定参数。统计给定周期内春、夏、秋、冬季的日故障次数指数分布的指数值、截距值、决定系数与均方根误差,如表2所示,可知4个季节的故障概率都能够得到很好的拟合,进一步论证了该地区配电网日故障次数近似服从指数分布的规律性;同时,基于前期数据统计结果,初步验证了冬、夏两季发生故障次数较多、对应 D 值相对较大的规律。

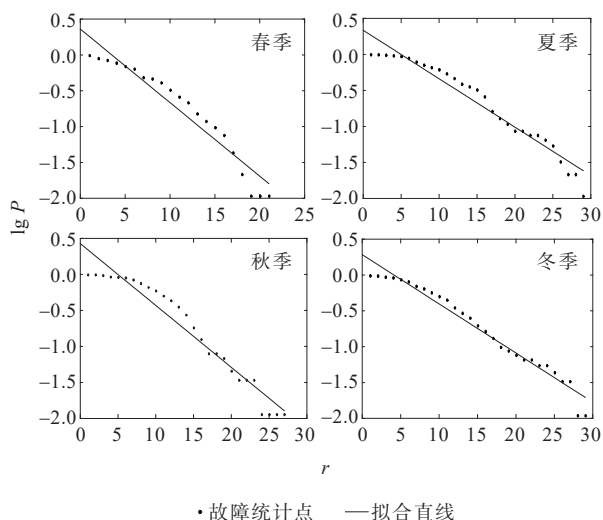


图3 单对数坐标下春、夏、秋、冬季日故障概率分布拟合结果

Figure 3 Fitting results of daily failure probability distribution in single logarithmic coordinate in spring, summer, autumn and winter

表2 Y市不同季节日故障次数指数参数估计值及误差

Table 2 Estimated values and errors of index parameters of daily failure times in different time periods in Y city

季节	D	c	R^2	RMSE
春季	-0.102 6	0.360 5	0.919 0	0.605 7
夏季	-0.067 2	0.334 6	0.943 9	0.525 9
秋季	-0.085 9	0.427 3	0.937 7	0.638 4
冬季	-0.068 6	0.283 4	0.961 6	0.439 7

2 配电网台区日故障次数的随机模糊不确定性分析

2.1 配电网台区日故障次数的随机模糊模型

由于配电网台区故障次数受多种因素影响,具有较强的不确定性,因此,通过随机模糊模拟技术^[18-20]获取台区故障次数随机模糊函数,实现对故障次数概率分布预测,可以客观有效地对配电网故障停电进行风险评估。基于文1.3中不同季节日故障次数概率分布拟合结果可知,故障次数受多种因素影响,且具有较强的不确定性,因此,可以采用随机模糊理论对日故障次数进一步建模。将该省某年内配电网故障指数分布参数进行统计分析,发现日故障次数概率分布参数 c 可采用梯形模糊变量 $\xi_c=(0.28, 0.33, 0.36, 0.43)$ 表示,日故障次数概率分布指数 D 可采用三角形模糊变

量 $\xi_D=(-0.100, -0.086, -0.067)$ 表示,其相应隶属函数分别为

$$\mu(c)=\begin{cases} \frac{c-0.28}{0.33-0.28}, & 0.28 \leq c \leq 0.33 \\ 1, & 0.33 \leq c \leq 0.36 \\ \frac{0.43-c}{0.43-0.36}, & 0.36 \leq c \leq 0.43 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$u(D)=\begin{cases} \frac{D-(-0.100)}{-0.086-(-0.100)}, & -0.100 \leq D \leq -0.086 \\ \frac{-0.067-D}{-0.067-(-0.086)}, & -0.086 \leq D \leq -0.067 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

采用随机模糊变量 ξ_r 表示日故障次数 r ,其概率分布机会测度函数为

$$F(\xi_r)=\text{Ch}(r < \xi_r)=\xi_c \cdot \xi_r^{-\xi_D} \quad (8)$$

2.2 配电网台区日故障次数概率分布随机模糊建模步骤

配电网台区日故障次数概率分布随机模糊建模步骤如下:

1) 对配电网故障抢修原始数据进行质量评估,并对数据进行相应的处理;

2) 考虑该地区配电网日故障次数多时间尺度变化特征,考虑某年多季度日故障次数概率分布分析及特征提取;

3) 通过数学工具深度挖掘日故障次数概率分布参数的模糊性特征,并提取该参数的隶属函数特征;

4) 应用随机模糊理论模拟日故障次数,根据式(8)建立该地区配电网考虑随机模糊性的日故障次数概率分布模型。

2.3 配电网台区故障次数的随机模糊不确定性分析

故障次数随机模糊概率分布模拟方法如下:

1) 在置信区间内抽取 N 个满足 $\text{Pos}\{\cdot\} \geq \epsilon$ 的参数 c 和 D ,其中 ϵ 定义为充分小的正数;

2) 对抽取的 c 和 D 按数值从小到大进行排列,并对应形成一个组合,其中,在区间 $[0, 1]$ 内随机生成 N 个 $\text{Pos}\{\cdot\} \geq \epsilon$ 数值,并选取该数值所对应的 c 和 D 作为其中一组的概率分布参数;

3) 对机会测度分布函数进行逆变换,得到随机

模糊变量故障次数测度为 $\text{Pos}\{\cdot\} \geq \epsilon$, 其中, 该故障次数出现的可能性即为 c 和 D 组合的可能性测度 $\text{Pos}\{\cdot\}$ 。

通过随机模糊模拟技术获取 100 组 c 、 D 值。置信区间内 c 、 D 取值对应的隶属度曲线如图 4 所示。

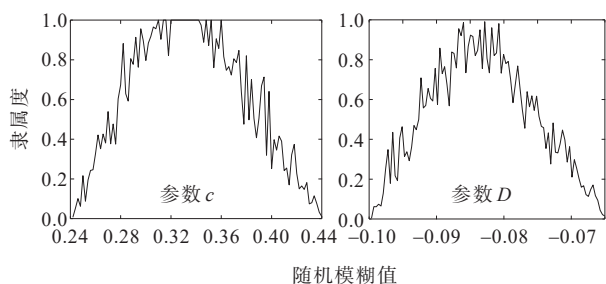


图4 置信区间内 c 、 D 取值对应的隶属度曲线

Figure 4 The membership curve corresponding to the value of c and D in the confidence interval

采用随机模糊模拟生成的 100 组日故障次数随机模糊概率分布曲线如图 5 所示, 并将随机模拟曲线与历史故障统计点及拟合曲线进行对比。仿真结果表明, 通过随机模糊模拟的日故障次数概率分布曲线与历史统计曲线相似, 可以有效用于日故障次数仿真。由图 5 还可以看出, 基于随机模糊理论模拟的单对数坐标下概率分布曲线兼具不确定性和断面波动性, 这对于日故障次数的相关研究更加科学、更加全面。

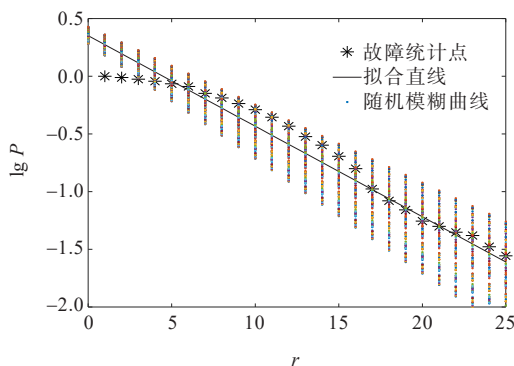


图5 单对数坐标下日故障次数随机模糊概率分布曲线

Figure 10 Random fuzzy probability distribution curve of daily failure times in single logarithmic coordinate

3 配电网故障停电的风险分析与评估

3.1 故障停电时长分布的特征分析

对 Y 市全年内配电网停电故障的影响人数进行统计, 开展配电网故障停电时长分布的特征分

析。故障总停电、配变故障停电以及线路跳闸停电时长拟合分布如图 6 所示, 均符合多项式分布, 分布关系分别为

$$M_1 = -5.569e^{-21}x^8 + 3.430e^{-17}x^7 - 8.729e^{-14}x^6 + 1.183e^{-10}x^5 - 9.145e^{-8}x^4 + 4.000e^{-5}x^3 - 0.009x^2 + 0.740x + 20.90 \quad (9)$$

$$M_2 = -1.806e^{-21}x^8 + 1.134e^{-17}x^7 - 2.941e^{-13}x^6 + 4.055e^{-10}x^5 - 3.189e^{-7}x^4 + 1.417e^{-5}x^3 - 0.003x^2 + 0.289x + 3.618 \quad (10)$$

$$M_3 = -2.258e^{-21}x^8 + 1.402e^{-17}x^7 - 3.602e^{-14}x^6 + 4.933e^{-11}x^5 - 3.864e^{-8}x^4 + 1.713e^{-5}x^3 - 0.004x^2 + 0.3161x + 13.56 \quad (11)$$

式(9)~(11)中, x 为故障时长; M_1 、 M_2 、 M_3 分别为 Y 市总停电、配变停电和线路跳闸停电事件。

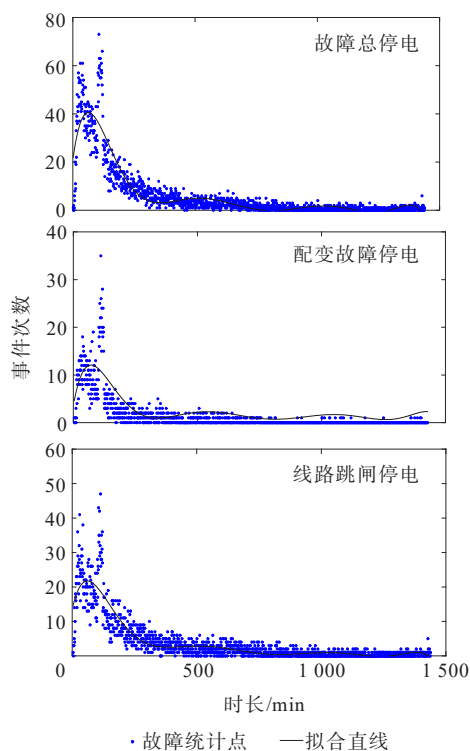


图6 总停电、配变停电及线路跳闸停电时长拟合分布

Figure 6 Fitting distribution of total failure time, distribution transformer failure time and line trip time

Y 市不同故障停电时长对应的频数统计数据如表 3 所示; 采用 R^2 、RMSE 这 2 个指标对 Y 市总停电、配变故障停电及线路跳闸停电时长的拟合程度进行描述, 如表 4 所示。由图 6 可知, 拟合曲线能够解释实际数据的产生; 由表 4 可知 R^2 均在 0.8 左右, 拟合程度较好。

表3 Y市不同故障停电时长对应的频数统计

Table 3 Statistical data of frequency corresponding to different failure outage duration in Y city

总停电		配变故障停电		线路跳闸停电	
时长/min	频数/次	时长/min	频数/次	时长/min	频数/次
≥20	8 815	≥20	3 623	≥20	5 285
≥80	6 280	≥80	2 926	≥80	3 947
≥160	3 640	≥160	2 063	≥160	2 479
≥320	1 919	≥320	1 580	≥320	1 352
≥400	1 505	≥400	1 438	≥400	1 086
≥600	833	≥600	1 061	≥600	634
≥800	402	≥800	800	≥800	328
≥1 000	246	≥1 000	583	≥1 000	192
≥1 200	129	≥1 200	288	≥1 200	101
≥1 400	35	≥1 400	71	≥1 400	26

表4 Y市不同故障停电时长拟合效果分析

Table 4 Fitting results analysis of different failure outage duration in Y city

拟合效果	R^2	RMSE
总停电时长	0.819 5	5.069
配变故障停电时长	0.784 5	4.891
线路跳闸停电时长	0.789 5	3.023

3.2 配电网故障停电影响人数分布的特征分析

对Y市全年内配电网停电故障的影响人数进行统计,开展配电网故障停电影响人数分布的特征分析。Y市不同故障停电影响人数对应的频数统计如表5所示。

表5 Y市不同故障停电影响人数范围对应的频数统计

Table 5 Statistical data of frequency corresponding to the user number segments affected by different power outages in Y city

影响人数	频数/次	影响人数	频数/次	影响人数	频数/次
>100	1 992	>500	32	>700	3
>200	721	>600	19	>800	2
>300	252	>620	13	>900	1
>400	86				

利用CFtool工具箱对数据进行拟合,发现配电网停电影响人数拟合符合多项式分布,拟合曲线如图7所示, R^2 为0.767 8, RMSE为3.666,拟合结果较好。分布关系近似为

$$f_1 = -2.156e^{-20}x^8 - 9.667e^{-17}x^7 - 1.806e^{-13}x^6 + 1.821e^{-10}x^5 - 1.072e^{-7}x^4 + 4.000e^{-5}x^3 - 0.007x^2 + 0.532x + 6.111 \quad (12)$$

式中, x 为影响人数; f_1 为故障停电影响人数为 x 的事件次数。

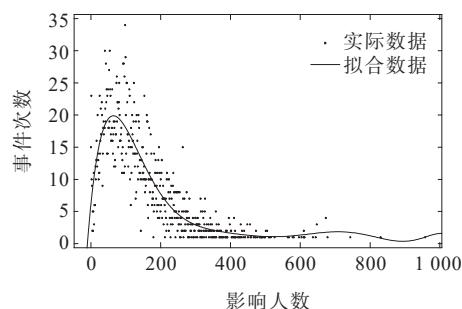


图7 故障停电影响人数拟合分布

Figure 7 Fitting distribution of the number of users affected by power failure

3.3 配电网故障停电影响敏感用户数分布的特征分析

对Y市全年内配电网故障停电的敏感用户数进行统计,开展配电网故障停电敏感用户数分布的特征分析。Y市不同故障停电敏感用户数对应的频数统计如表6所示。

表6 Y市不同故障停电敏感用户数对应的频数统计

Table 6 Statistical data of frequency corresponding to users sensitive to different power outages segments in Y city

敏感用户数	频数/次	敏感用户数	频数/次	敏感用户数	频数/次
>10	219	>45	24	>96	1
>18	114	>80	3	>130	1
>27	75	>88	2	>135	1
>36	39				

利用CFtool工具箱对数据进行拟合,发现配电网故障停电影响敏感用户数拟合符合正态分布,拟合曲线如图8所示, R^2 为0.998 9, RMSE为0.048 4,拟合结果较好。分布关系近似为

$$f_2 = 2190e^{-1.167x} + 387.4e^{-0.2825x} \quad (13)$$

式中, x 为敏感用户数; f_2 为故障停电敏感用户数为 x 的事件次数。

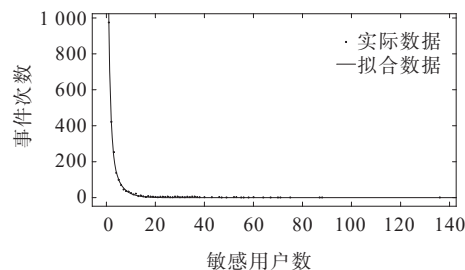


图8 故障停电敏感用户数拟合分布

Figure 8 Fitting distribution of the number of users sensitive to power failure

3.4 配电网故障停电的风险评估

为全面、客观及合理地对配电网故障停电风险进行评价,就必须选取一系列指标来反映其内部结果。配电网停电并不仅仅只对配电网产生影响,也会降低电力用户的实际用电体验及归属感。为此,基于故障等级、停电时长、影响人数和敏感用户拟合分布结果,避免赋权的人为主观性,采用熵权法^[3]进行配电网风险评估,全面衡量配电网故障停电风险,对配电网故障抢修工单进行分析。配电网故障停电风险指标体系如表7所示。

表7 配电网故障停电风险指标体系

Table 7 Risk index system of power distribution network failure and outage

目标层	指标层	定义层
配电网 风险评 估	故障等级	按照严重性程度将故障等级划分为主 线跳闸、支路跳闸、配变跳闸和配电重 过载4类,分别用数字4、3、2、1表示
	停电时长	停电故障修复时间—故障发生时间
	影响人数	此次故障停电影响的人数
	敏感用户数	对此次停电进行故障投诉等 一系列行为的人数

基于熵权法的配电网停电风险评估的具体步骤如下。

1) 构建配电网风险数据矩阵。

$$A = \begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} \end{pmatrix}_{i \times j} \quad (14)$$

式中, X_{ij} 为第 j 个指标的第 i 个数据。

2) 利用极差变换法对具体指标进行无量纲化处理。正向、负向指标分别为

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})} \quad (15)$$

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})} \quad (16)$$

3) 计算第 j 个指标的第 i 个数据占该指标的比重。

$$P_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij}, j = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

4) 计算第 j 个指标的熵值。

$$e_j = -k \cdot \sum_{i=1}^n P_{ij} \log P_{ij} \quad (18)$$

其中, k 为常数, $k > 0$, 自然对数时可得 $e_j \geq 0$ 。目前已知 k 与样本数 m 相关, 一般令 $k = 1/\ln m$, 则此种情况下熵值范围为 $0 \leq e_j \leq 1$ 。

5) 计算第 j 个指标的差异系数 g_j 。 $g_j = 1 - e_j$, 对于第 j 个指标, 指标值 X_{ij} 的差异越大, 对指标评价的作用越大, g_j 越大, 指标越重要。

6) 根据差异系数计算各个指标的权重。

$$W_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j, j = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

7) 利用加权平均法计算得到配电网风险指数。

$$S_i = \sum_{j=1}^m W_j \cdot P_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

选取 500 个配电网故障抢修记录数据, 对数据进行相应处理。配电网风险评估各指标权重如表 8 所示, 可知风险评估指标权重顺序为敏感用户数 > 影响人数 > 故障等级 > 停电时长, 权重越大, 对配电网的影响越大。部分配电网风险评估指标数据及评估分值如表 9 所示。

表8 配电网风险评估指标权重

Table 8 The weights of each index in the risk assessment of the distribution network

指标	权重	指标	权重
故障等级	0.103 7	敏感用户数	0.379 8
停电时长	0.280 9	影响用户数	0.235 5

表9 部分配电网风险评估指标数据及评估分值

Table 9 Risk assessment index data and assessment scores of partial distribution network

序号	故障等级	停电时长/min	敏感用户数	影响人数	评估分值
1	4	9	1	1 564	0.071 7
2	2	60	1	184	0.019 5
3	4	407	71	6 067	1.479 2
4	4	90	31	4 715	0.689 3
5	2	174	1	247	0.036 3
6	3	554	1	152	0.100 5
7	4	652	1	61	0.126 5
8	4	487	31	4 715	0.743 2
9	4	13	1	71	0.039 9
10	2	77	1	135	0.020 7
11	4	23	3	3 205	0.145 1
12	4	64	3	274	0.087 1
13	4	236	2	2 980	0.151 3
14	2	381	5	163	0.134 4
15	2	844	2	269	0.145 8
...	...	...	...	...	...

归一化配电网风险评估数值对比如图9所示。根据表9、图9可知,故障等级指标一定程度上会影响人数指标产生影响,因为故障等级越高,其对应故障停电范围越大,影响人数也越多;影响人数指标一定程度上会影响敏感用户数指标,因为影响人数指标基数大,受到停电影响的电力用户越有可能进行投诉,导致敏感用户数越大;停电时长指标并不受到故障等级指标的影响。

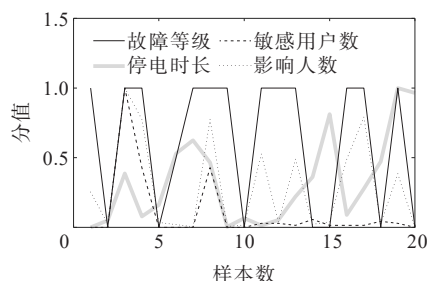


图9 归一化配电网风险评估数值对比

Figure 9 Comparison of normalized distribution network risk assessment values

配电网故障风险评估分值如图10所示。根据表9、图10可知,故障等级等4个指标越大,对应的配电网评估分值越高,其中故障等级和影响人数为先天因素,无法控制,应缩短停电时长,针对不同的敏感用户制定相应的安抚策略,避免发生投诉。

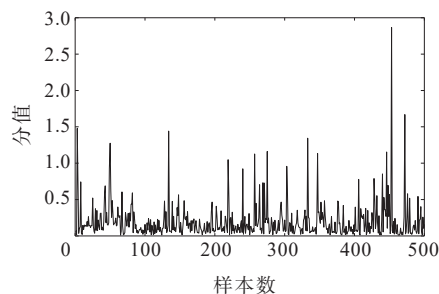


图10 配电网风险评估分值

Figure 10 Distribution network risk assessment scores

与现有方法相比,本文所提策略能够更加客观清晰地反映故障停电次数、时长、等级对电力用户的影响程度,并且本文所用方法使得仿真结果更加全面、更具说服力。

4 结语

本文利用2017—2018年某省Y市故障停电抢修数据,开展配电网故障特征分析、配电网日故障次数的随机模糊不确定性分析以及配电网故障停

电风险分析与评估。

1) Y市春、夏、秋、冬季的日故障次数及其累计概率在单对数坐标上呈直线,服从指数分布,具有自相似性。

2) 通过对故障次数概率分布参数的随机模糊处理,得到相应概率分布函数。结果显示,采用随机模糊理论计算的故障次数概率与历史统计结果相近,可以对配电网故障问题进行更加科学与全面的分析。

3) 开展故障停电总时长、影响人数和敏感用户数分布的特征分析。故障停电总时长、配变故障停电时长和线路跳闸停电时长与事件次数均呈现多项式分布,影响人数和敏感用户与事件次数也呈现多项式分布,具有自相似性。

4) 开展配电网停电的风险评估,构建包含故障等级、停电时长、敏感用户数以及影响用户数的配电网停电风险评估指标体系;采用熵权法对配电网风险进行评估。结果表明,风险评估指标权重顺序为敏感用户数>影响人数>故障等级>停电时长。

本文当前只针对停电故障对用户的影响进行详细分析,后续可基于本文研究成果制定更科学、更合理有效的故障抢修策略,制定敏感用户应对方案,提高电力用户归属感。

参考文献:

- [1] 黄志鹏,李黄强,舒征宇,等.基于配电自动化故障管理的配电网扩展规划方法[J].智慧电力,2022,50(4):66-72.
HUANG Zhipeng, LI Huangqiang, SHU Zhengyu, et al. Expansion planning method of distribution system based on distribution automation fault management[J]. Smart Power, 2022, 50(4): 66-72.
- [2] 郑重,苗世洪,李超,等.面向微型能源互联网接入的交流配电网协同优化调度策略[J].电工技术学报,2022, 37(1):192-207.
ZHENG Zhong, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Coordinated optimal dispatching strategy of ac/dc distribution network for the integration of micro energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 192-207.
- [3] 郝如海,智勇,祁莹,等.基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J].电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 73-78.
HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable

- energy penetration power grid at sending end[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 73-78.
- [4] 苗友忠, 李顺昕, 雷为民, 等. 考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 93-99.
- MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 93-99.
- [5] 徐浩, 姜新雄, 刘志成, 等. 基于概率预测的电网静态安全运行风险评估及主动调控策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 182-191.
- XU Hao, JIANG Xinxiong, LIU Zhicheng, et al. Probability prediction based risk assessment and proactive regulation and control strategy for static operation safety of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 182-191.
- [6] 蔡舒平, 闫静, 刘国海, 等. 基于Fisher信息和在线SVR的智能电网气象敏感负荷预测动态建模技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3441-3452.
- CAI Shuping, YAN Jing, LIU Guohai, et al. A dynamic modeling methodology based on fisher information and on-line SVR for smart grids weather sensitive load forecasting [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3441-3452.
- [7] GUIKEMA S D, NATEGHI R, QUIRING S M, et al. Predicting hurricane power outages to support storm response planning[J]. IEEE Access, 2017, 2: 1364-1373.
- [8] 黎静华, 左俊军, 汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3503-3513.
- LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power Integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503-3513.
- [9] CHEN P, KEZUNOVIC M. Fuzzy logic approach to predictive risk analysis in distribution outage management [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2827-2836.
- [10] 孔飘红, 蒋正威, 杨力强, 等. 基于风氢耦合的氢储能系统参与电力市场机制与风险量化模型设计[J]. 供用电, 2022, 39(1): 31-39.
- KONG Piaohong, JIANG Zhengwei, YANG Liqiang, et al. Mechanism and risk quantification model design of hydrogen storage system participation in power market[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 31-39.
- [11] MIAO F, VITTAL V, RAJA A. Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2251-2261.
- [12] 郭磊, 郭创新, 曹一家, 等. 考虑断路器在线状态的电网风险评估方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 20-24+30.
- GUO Lei, GUO Chuangxin, CAO Yijia, et al. Power transmission risk assessment considering breaker online status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 20-24+30.
- [13] 王建雄, 肖麟祥, 唐海国, 等. 配电网故障时空特征及形成机理分析[J]. 现代电力, 2018, 35(5): 88-94.
- WANG Jianxiong, XIAO Linxiang, TANG Haiguo, et al. The feature and formation mechanism analysis of the distribution network fault in time and space[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(5): 88-94.
- [14] 晁岱峰, 杨军选, 苏盛, 等. 濮阳配电网故障的自组织临界性及其诱因[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 72-75.
- CHAO Daifeng, YANG Junxuan, SU Sheng, et al. Self-organized criticality and its cause of faults in puyang distribution system[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 72-75.
- [15] 陈海东, 蒙飞, 赵磊, 等. 利用分布式电源注入信号的配电网故障性质识别技术[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 123-129+146.
- CHEN Haidong, MENG Fei, ZHAO Lei, et al. Fault identification technology for distribution line based on distributed generation injection signal[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 123-129+146.
- [16] 李孝杰, 陈兴宇. 张家界电网故障的统计分布特性及其机理分析[J]. 华中电力, 2011, 24(3): 39-42.
- LI Xiaojie, CHEN Xingyu. Statistics of faults in Zhangjiajie power grid and its mechanism[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(3): 39-42.
- [17] 钟庆, 张哲, 许中, 等. 广州配电网故障停电事故的自组织临界特征[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 109-113+121.
- ZHONG Qing, ZHANG Zhe, XU Zhong, et al. SOC characteristics of power-supply failure of Guangzhou distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 109-113+121.
- [18] 马瑞, 张强, 吴瑕, 等. 日风速随机模糊不确定模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6351-6358.
- MA Rui, ZHANG Qiang, WU Xia, et al. Random fuzzy uncertain model for daily wind speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6351-6358.
- [19] 左剑, 汤吉鸿, 钟伟, 等. 考虑输配交互的含风电场电力系统多目标动态随机模糊最优潮流[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 50-60.
- ZUO Jian, TANG Jihong, ZHONG Wei, et al. Multiobjective dynamic random fuzzy optimal power flow of wind integrated power system considering the interaction of transmission distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 50-60.
- [20] 马瑞, 李文晔, 李晷, 等. 分布式冷热电联供系统负荷随机模糊建模[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 53-58.
- MA Rui, LI Wenye, LI Xuan, et al. Random fuzzy model for load of distributed combined cooling, heating and power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 53-58.