

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201141

考虑复杂环境特性的电网线路脆弱性综合评估与结构优化分析

丁梁^{1,2}, 黄建杨^{1,2}, 徐恩², 黄顺勇³, 鲁海亮³, 文习山³

(1. 国网浙江诸暨市供电有限公司, 浙江 诸暨 311800; 2. 绍兴大明电力设计有限公司诸暨分公司, 浙江 诸暨 311800; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 现代电网中存在的薄弱环节会造成偶然事故的扩大发展, 对电网及其元件的脆弱性评估对于防范大规模停电事故有重要意义。围绕电网线路脆弱性评估的问题, 建立了综合考虑结构脆弱性、状态脆弱性和环境脆弱性的线路脆弱性综合评估体系。环境脆弱性部分选择具有代表性的雷击、覆冰、强风、污秽、山火和外力破坏作为脆弱性指标。随后基于 IEEE39 节点系统计算得到线路脆弱性评估的结果, 并与其他文献方法的计算结果进行对比, 验证了所构建评估方法的合理性。最后基于线路脆弱性的评估结果, 进一步分析了网络结构均匀性的问题。结果表明, 采用单一指标对线路进行脆弱性分析时会遗漏某些脆弱单元。综合考虑结构特性、状态特性和环境特性构建的综合指标能更好地对线路进行脆弱性评估。网络的拓展与演化存在“择优连接”的特性, 高介数的线路、节点也必然形成, 可以通过采用“反择优连接”, 比如降低节点度的最大值来促进网络结构更加均匀。

关键词: 脆弱性评估; 环境特性; 基尼系数; 均匀系数; 结构优化

Comprehensive vulnerability assessment and structure optimization analysis of power grid lines considering complex environmental characteristics

DING Liang¹, HUANG Jianyang^{1,2}, XU En², HUANG Shunyong³, LU Hailiang³, WEN Xishan³

(1. State Grid Zhejiang Zhuji Power Supply Co., Ltd., Zhuji 311800, China; 2. Zhuji Branch of Shaoxing Daming Electric Power Design Co., Ltd., Zhuji 311800, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The weak links in modern power grids will cause the expansion and development of accidents. The vulnerability assessment of the power grid and its components is of great significance for preventing large-scale power outages. This paper focuses on the vulnerability assessment of power grid lines, and establishes a comprehensive assessment system of line vulnerability that considers structural vulnerability, state vulnerability and environmental vulnerability. The environmental vulnerability part selects representative lightning strikes, icing, strong winds, pollution, wildfires and external damage as indicators of vulnerability. Then, based on the IEEE 39-bus system calculation, the result of the line vulnerability assessment is obtained, and compared with the calculation result of the existing method, the rationality of the constructed assessment method is verified. Finally, based on the evaluation results of the vulnerability of the line, the uniformity of the network structure is further analyzed. The results show that when a single index is used to analyze the vulnerability of the line, some vulnerable units will be omitted. The comprehensive index constructed by considering the structural characteristics, state characteristics and environmental characteristics can better evaluate the vulnerability of the line. The expansion and evolution of the network has the characteristic of "preferred connection", and high betweenness lines and nodes will inevitably form. By adopting "anti-optimal connection", for example, reducing the maximum value of the node degree can promote a more uniform network structure.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China "Research on the Influence of Large-area Power Network on Buried Metal Pipeline Network Energy Safety Transmission and its Defense (No. 52170219001D).

Key words: vulnerability assessment; environmental characteristics; Gini coefficient; uniformity coefficient; structural optimization

0 引言

现代电网的规模越来越大,其安全稳定运行需要更进一步降低大停电风险^[1-3]。大规模停电的根本原因是偶然的、局部的故障导致的连锁反应^[4-6],往往是由于电网中存在一些脆弱单元,这些单元在系统受到干扰后成为破坏电网安全稳定运行的根源。

电力网络的脆弱性由 Fouad 等提出^[7],随后基于复杂网络理论的电网脆弱性研究迅速发展。早期的结构脆弱性评估大多基于纯粹拓扑结构和网络信息不可分的前提,采用最短路径及相关改进指标^[8-9]。如文献[10]研究网络的拓扑结构的统计性参数,认为介数指标能较好描述网络元件的脆弱性,随后的研究主要以电气介数及相关改进指标作为评估指标^[11-12]。在状态脆弱性评估方面,主要通过构造一些表征电力系统当前运行状态及可能变化趋势的指标来进行评估^[13],文献[14]基于电力系统传输信息量的特点对已有信息熵指标进行改进,构建了考虑节点注入功率扰动的网络元件脆弱性评估方法并应用于网络中元件脆弱性评估,文献[15]定义极限情况下负荷对应的电源无功出力增加最大的方向作为评估指标,基于此来评估网络节点的脆弱程度。文献[16]构建电压稳定裕度指标,并在分布式电源接入前后对系统节点的状态脆弱性进行评估。

电力系统不是孤立元件的简单叠加,而是一个元件之间相互影响的整体,综合考虑系统的结构特性和运行特性进行脆弱性评估能得到更精确的结果。文献[17]将负荷经济因子作为结构脆弱性指标,将灵敏度设为状态脆弱性指标,对线路节点进行评估并得到网络中的薄弱区域。文献[18]则提出了一种考虑薄弱成因的电网脆弱线路类别辨识方法,从电网拓扑结构和运行状态两个角度实现对脆弱线路的类别辨识。

基于此,本文选择有代表性的雷击、覆冰、强风、污秽、山火和外力破坏作为线路环境脆弱性指标,电气介数作为线路结构指标,功率水平系数、冲击转移比值、电压偏移率作为线路状态脆弱性指标,综合考虑结构特性、运行特性和环境特性3个方面,建立电网线路脆弱性综合评估体系。并基于IEEE 39节点系统进行线路的脆弱性评估并得到评估结果,最后分析了网络结构均匀性的问题。

1 考虑多种环境因素的线路脆弱性综合评估体系

1.1 电网线路的环境脆弱性指标

电力系统规模庞大,设施分布广泛,各种气象

变化、地质活动和人类活动均可能引发电力系统故障,历史数据显示,对电网造成较大影响的自然灾害有:雷电活动、雨雪冰冻、强风暴、污秽闪络和山火灾害等,人类活动引发电力系统故障的主要原因为外力破坏。选择具有代表性的雷击、覆冰、强风、污秽、山火和外力破坏作为线路环境特性脆弱性指标,分别对各个子指标进行详细建模分析。

1) 雷击脆弱性

雷电活动是输电线路跳闸的重要原因,对于装设防雷措施的主网而言,直击雷导致的雷击跳闸率是关注重点,直击雷跳闸率的计算包括雷击杆塔和雷绕击于导线,将线路的雷击跳闸率计算结果作为线路环境特性中的雷击脆弱性指标,计算如式(1)^[19]所示。

$$n = n_1 + n_2 = N \cdot g \cdot P_1 \cdot \eta + N \cdot P_a \cdot P_2 \cdot \eta = N \cdot \eta (g \cdot P_1 + P_a \cdot P_2) \quad (1)$$

式中: n 为线路直击雷跳闸率; n_1 为雷击杆塔跳闸率; n_2 为雷绕击导线跳闸率; N 为雷暴日40天的地区每100 km线路年落雷次数; g 为击杆率; P_1 为雷电流超过雷击杆塔时线路耐雷水平 I_1 的概率, I_1 随雷击时刻系统工作电压不同而变化; P_a 为线路的绕击率; P_2 为雷电流超过雷绕击线路时线路耐雷水平的概率; η 为冲击闪络转变为稳定工频电弧的概率。

2) 覆冰脆弱性

绝缘子覆冰后电弧爬电距离减小,导线和杆塔覆冰后重量增加,轻则引起闪络,重则引起线路断裂等严重事故。国内外研究人员根据线路覆冰机理提出了多种覆冰预测模型,其中 Makkonen 模型基于热平衡过程对导线表面覆冰的干湿增长过程进行建模,该模型计算得到的覆冰增加数值与实际测量的数据较为接近,建立的热平衡方程为^[20]

$$\Phi_f + \Phi_k + \Phi_v + \Phi_a + \Phi_n = \Phi_c + \Phi_e + \Phi_l + \Phi_s + \Phi_i \quad (2)$$

式中: Φ_f 为过冷却水在导线覆冰过程中释放的潜热; Φ_k 为过冷却水的动能; Φ_v 为空气传给导线的热量; Φ_a 为导线表面温度下降时释放的热量; Φ_n 为导线在短波辐射中获得的能量; Φ_c 为覆冰表面与空气之间接触而所散失的热量; Φ_e 为覆冰表面蒸发而散失的热量; Φ_l 为过冷却水被加热时需要的热量; Φ_s 为导线在长波辐射中损失的热量; Φ_i 为导线表面在导热中带起的热量。

基于 Makkonen 模型计算线路的覆冰增长情况,以此作为线路的环境特性中覆冰脆弱性指标。

3) 强风脆弱性

导线与杆塔是典型的风振敏感结构。根据线路

在强风环境中的实际情况分析其故障的概率问题, 提出了计算导线承受的风载荷的方法, 本章将线路的风力载荷计算作为线路的环境特性中的强风脆弱性指标, 计算如式(3)^[21]所示。

$$F_w(t) = \alpha \frac{v^2(t)}{1600} \mu_z \mu_{sc} \beta_c d l_h B \sin^2 \theta \quad (3)$$

式中: α 为风压不均系数; $v(t)$ 为高度 10 m 处的风速; μ_z 为风压高度变化系数, 与地表粗糙度和线路海拔高度相关; μ_{sc} 为导线体形系数; β_c 为风荷载调整系数, 在 500 kV 和 750 kV 的情况下为 1.25, 其他电压等级的线路为 1; d 为导线外径, 分裂导线情况下该参数为所有子导线外径总和数值; l_h 为杆塔的水平档距; B 为线路覆冰增大系数, 该参数与线路覆冰的厚度有关; θ 为导线与风向之间的夹角。

4) 污秽脆弱性

目前对于表征绝缘子污秽状态的参数仍然没有一个统一的方法, 使用较多的参数是等值附盐密度 (ESDD), 我国依据等值附盐密度参数制定了相关标准, 将绝缘子污秽等级分为大气清洁地区、轻度污染地区、中等污染地区、污染较严重地区和特别严重地区五个等级^[22]。本文将等值附盐密度 (ESDD) 作为线路环境特性中污秽脆弱性指标。

5) 山火脆弱性

输电线路在跨越植被茂盛的地区时常常面临山火的危害, 目前山火灾害的预防监测主要通过卫星遥感技术与电力系统运维人员的运检。本文采用输电线路山火跳闸计算模型作为线路环境特性中的线路山火脆弱性指标, 计算公式如式(4)^[23]所示。

$$PR = D_R \cdot D_B \cdot D_F \cdot P_V \quad (4)$$

式中: PR 为线路山火脆弱性指标; D_R 为山火跳闸降水量系数; D_B 为线路所在区域植被系数; D_F 为山火蔓延系数; P_V 为山火情况下线路间隙击穿系数。

其中线路所在区域的降水量系数计算方法为: 当线路附近的 3 h 降水量不低于 2 mm 时, D_R 为 0, 表示降水量大, 使山火发生的概率为 0; 当线路附近的 3 h 降水量小于 2 mm 时, D_R 为 1, 此时认为较低的降水量不能对山火产生有效的抑制作用。区域植被系数计算方法为: 当线路附近的区域为不可燃烧环境时, D_B 为 0; 否则 D_B 为 1。

山火蔓延系数为

$$D_F = \begin{cases} 0, & L_f > R \cdot \Delta T + 100 \\ \frac{L_f - R \cdot \Delta T}{200} + 0.5, & R \cdot \Delta T < L_f \leq R \cdot \Delta T + 100 \\ 1, & L_f \leq R \cdot \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_f 为山火着火点与警告杆间距; R 为山火蔓延速度; ΔT 为卫星扫描时间。

山火情况下线路间隙击穿系数为

$$P_V = \begin{cases} P_g, & U < 220 \\ 1 - (1 - P_g)(1 - P_p), & U \geq 220 \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_g 为线路对地放电概率; P_p 为线路相间击穿概率; U 为线路运行相电压。

6) 外力破坏脆弱性

外力破坏是近年威胁输电线路安全运行的重要原因, 以 2010—2016 年吉林电网 220 kV 线路的外力破坏类型为例进行统计分析, 结果如表 1^[24]所示。

表 1 线路外力破坏统计

Table 1 Statistics of line external force damage

故障原因	故障数量/(条·次)	占比/%
施工(机械)破坏	50	52.94
异物短路	40	39.22
树竹砍伐	6	5.88
其他	2	1.96

电力系统不同区域发生外力破坏的类型与频率区别较大, 主要通过历史统计数据进行分析, 根据历史统计数据计算一年内线路遭受外力破坏次数, 对所有线路的外力破坏次数进行归一化处理, 作为线路的环境特性中外力破坏脆弱性指标。

1.2 线路脆弱性综合评估指标

电气介数参数反映电源-负荷节点对之间电能传输在线路上的分布情况, 本文将其作为线路的结构脆弱性指标。并选择功率水平系数、冲击转移比值、电压偏移率三个参数作为线路的状态脆弱性评价指标。综合考虑网络中线路的结构脆弱性、状态脆弱性和环境脆弱性, 计算确定各指标的权重, 建立电网线路脆弱性综合评估体系。

利用 AHP(层次分析)-熵权法确定各个指标的权重, AHP 是一种常见的多目标综合评价方法, 采用 AHP 计算得到每个影响因素的权重, 将线路脆弱性排序定为总目标, 准则层为对应的影响因素, 并引入熵权法^[25]改善 AHP 主观性强的缺点。

使用 AHP 的主要步骤如下。

建立递阶层次结构: 目标层、决策层、方案层;

建立准则层判断矩阵 A , 其元素为影响因素之间的重要程度比值;

求解判断矩阵最大特征值及对应的特征向量;

进行一致性检验;

若通过检验则可用判断矩阵的特征向量代替权重向量作为权重, 否则修改判断矩阵 A 中的元素。

在计算得到每条线路的所有子评估指标数值后,若有 m 个评估对象, n 个评估指标,则形成 $m \times n$ 阶矩阵 \mathbf{R}_0 , 需要对 \mathbf{R}_0 进行标准化处理。

标准化处理后的矩阵 \mathbf{R} , 若有 m 个评估对象, n 个评估指标, 得到任一指标 j 的熵, 如式(7)所示。

$$E_j = -\frac{\sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}}{\ln m} \quad (7)$$

式中: E_j 为指标 j 的熵; r_{ij} 为矩阵 \mathbf{R} 中的元素。

于是基于熵值计算得到指标的熵权 μ_j 如式(8)所示。

$$\mu_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (8)$$

利用计算得到的熵权 μ_j 修正 AHP 得到的权重 α_j , 于是得到修正后的权重系数 θ_j 如式(9)所示。

$$\theta_j = \frac{\mu_j \alpha_j}{\sum_{i=1}^n \mu_j \alpha_j} \quad (9)$$

将 AHP 得到的权重 α_j 与修正后得到的权重 θ_j 进行组合, 得到 AHP-熵权法综合权重 W_j , 即

$$W_j = \rho \alpha_j + (1 - \rho) \theta_j \quad (10)$$

式中: W_j 为最终权重; ρ 为偏好系数, 通常取 0.5。

最终得到综合脆弱性的结果如式(11)所示。

$$B_i = W_1 B_e + W_2 (\beta_1 L_i + \beta_2 G_i + \beta_3 \Delta U\%) + W_3 (\gamma_1 N_i + \gamma_2 \Phi_i + \gamma_3 F_i + \gamma_4 ESDD_i + \gamma_5 PR_i + \gamma_6 FD_i) \quad (11)$$

式中: B_i 为线路脆弱度综合评估指标; B_e 为线路的电气介数脆弱性指标; L_i 为线路的功率水平系数脆弱性指标; G_i 为线路的冲击转移比值脆弱性指标; $\Delta U\%$ 为线路的电压偏移率脆弱性指标; N_i 为线路的雷击跳闸率脆弱性指标; Φ_i 为线路覆冰脆弱性指标; F_i 为线路强风脆弱性指标; $ESDD_i$ 为线路污秽脆弱性指标; PR_i 为线路山火脆弱性指标; FD_i 为线路外力破坏脆弱性指标; $W_1 - W_3$ 、 $\beta_1 - \beta_3$ 、 $\gamma_1 - \gamma_6$ 为相应指标的权重系数。

2 线路综合脆弱性的算例计算与分析

采用 IEEE39 节点系统作为算例, 该系统包含 10 个电源节点和 19 个负荷节点, 一共 46 条线路, 系统的接线图如图 1 所示。

计算每条线路脆弱性的各个子指标, 再计算得到每个指标的权重, 并最终计算得到每条线路的综合脆弱性结果。

1) 结构脆弱性指标结果

通过线路的结构脆弱性结果如图 2 所示。

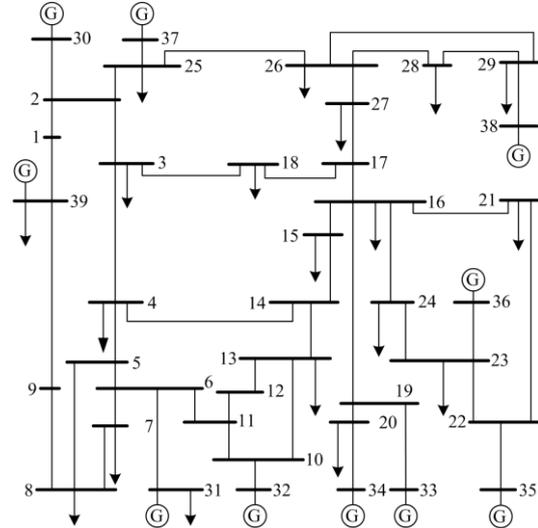


图 1 IEEE39 节点系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the IEEE39-bus system

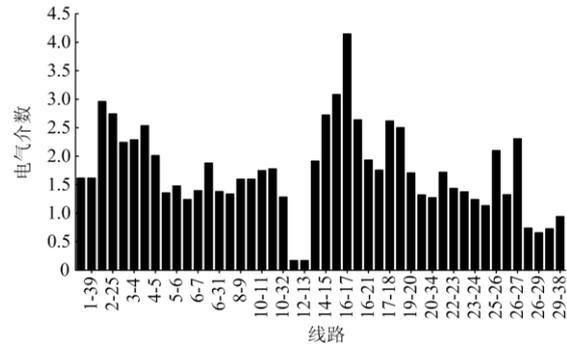


图 2 线路的电气介数计算结果

Fig. 2 Calculation result of the electrical betweenness of the line

从图中可看出多数线路的电气介数结果较小,少数线路的电气介数结果较大,线路 15-16 和 16-17 的电气介数最大,其结构脆弱度最高,是因为这两条线路处于关键的输电通道上,从图 1 看出,断开这两条线路整个网络将一分为二,故线路 15-16 和 16-17 电气介数很大。由于节点 2 和 16 处于连接线路最多的关键位置,所以与之相连的线路电气介数一般也较大,比如线路 16-19 和 16-21。

2) 状态脆弱性指标结

线路状态脆弱性指标计算结果如图 3 所示。从图中可见线路的不同指标结果相差较大,但很少有线路的三个指标同时很大,以线路 10-13 为例,线路 10-13 承担着电源节点 32 向以节点 16 和节点 26 为中心的负荷密集区输送功率的任务,断开该线路会导致其承担的功率向线路 10-11 转移,通过线路 10-11 向节点 5、6、7、8 区域传输,再向以节点 16

和 26 为中心的负荷密集区输送功率, 引起功率的大规模转移, 所以线路 10-13 的运行指标中功率水平系数和冲击转移比值很大。线路 10-11 也是类似的原因, 不过其功率水平系数较小, 所以相对于线路 10-13 脆弱度较低。从电压偏移率指标结果来看, 电源出线及附近线路的电压偏移率较大, 这是由于线路电压水平随着与电源距离的增加而下降, 所以电源出线及附近线路的电压水平偏离参考电压的水平也会较大, 导致这些线路电压偏移率较大。

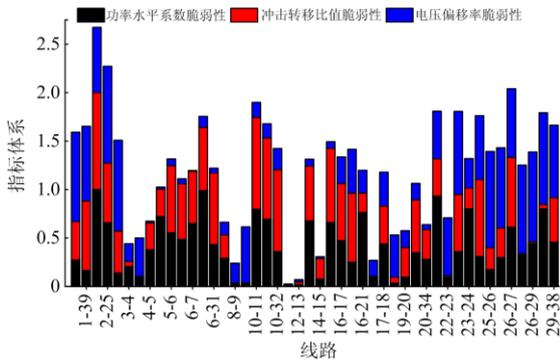


图 3 线路的状态脆弱性计算结果

Fig. 3 Result of the state vulnerability of the line

3) 环境脆弱性指标结果

实际对线路的环境脆弱性进行计算时应采用计算、统计等获得实际的环境参数, 但是由于 IEEE 39 系统未提供相关的环境参数, 所以本节的环境参数通过生成随机数的办法得到。国网电科院对南方 10 个供电公司的不同等级的输电线路的雷击跳闸率做了详细的统计, 结果如表 2 所示。

表 2 我国输电线路雷击跳闸率标准值、目标值及实际运行统计值表

Table 2 Standard value, target value and actual operation statistics of lightning trip rate of transmission lines in China

电压等级/kV	DL/T620 标准值	国网运营部 期望值	各地运行实际值
110	1.18~2.01	0.525	0.480(平原)(湖北)
			0.940(山区)(福建)
			0.280(双避雷线)
220	0.43~0.95	0.315	0.360(单避雷线, 平原)
			1.160(单避雷线, 山区)
330	0.27~0.60	0.200	0.213(陕西)
			0.170(330 kV 系统)
500	0.17~0.42	0.140	0.110(华中电网)
			0.377(天平 I、II回)

330 kV 等级的线路与 IEEE 39 节点系统的运行线路最为接近, 从表 1 可见 330 kV 等级的线路 DL/T620 标准值下的雷击跳闸率为[0.27 0.60], 所

以随机生成线路的雷击跳闸率数据时所有线路的雷击跳闸率均在该区间, 生成的数据如图 4 所示。

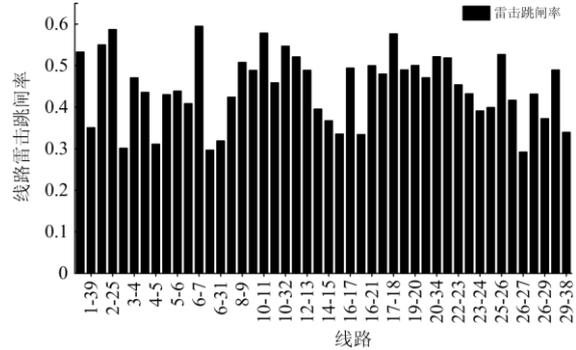


图 4 线路的雷击跳闸率结果

Fig. 4 Lightning strike trip rate results of the line

获得线路的雷击跳闸率数据后, 对数据进行归一化处理, 归一化处理的具体方式如式(12)所示。

$$N_i = \frac{n_i}{n_{i\max}} \quad (12)$$

式中: N_i 为线路的雷击脆弱性指标结果; n_i 为线路的雷击跳闸率; $n_{i\max}$ 为线路的雷击跳闸率的最大值。

通过归一化得到线路雷击脆弱性指标结果。本文评估重点在于指标数据怎么用, 如何获取数据不是重点。因此其余指标也通过类似方法计算, 最终获得每个环境脆弱性指标结果。结果如图 5 所示。

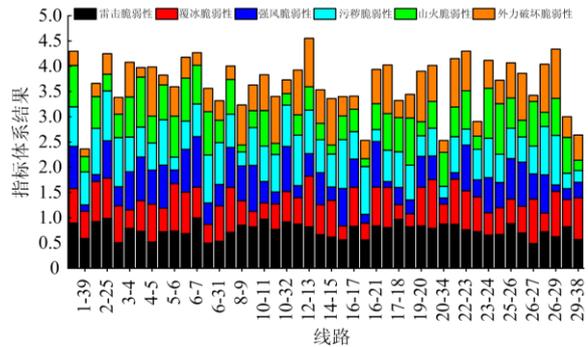


图 5 线路的环境脆弱性计算结果

Fig. 5 Results of environmental vulnerability of transmission lines

从图 5 中可见, 不同线路的各个子指标差异性较大, 为所有的子指标赋予权重, 最终得到电网线路的环境脆弱性指标。

4) 电网线路综合脆弱性指标结果

首先通过 AHP 法为环境脆弱性的 6 个子指标赋予权重, 认为这 6 个因素同等重要, 即各子指标的 AHP 权重均为 0.1667。基于熵权法的计算结果为 (0.1855, 0.1726, 0.1469, 0.1622, 0.1566, 0.1762)。所

以计算得到 AHP-熵权法综合权重为(0.1761, 0.1697, 0.1568, 0.1645, 0.1616, 0.1758), 即为雷击、覆冰、强风、污秽、山火和外力破坏这 6 个子指标的综合权重。通过该权重计算环境脆弱性综合结果如图 6 所示的蓝色柱状图部分。

完成三个方面指标的计算后, 再次利用 AHP-熵权法进行权重计算, 得到综合权重(0.3763, 0.3490, 0.2747), 最终得到线路综合脆弱性结果如图 6 中折线图所示。

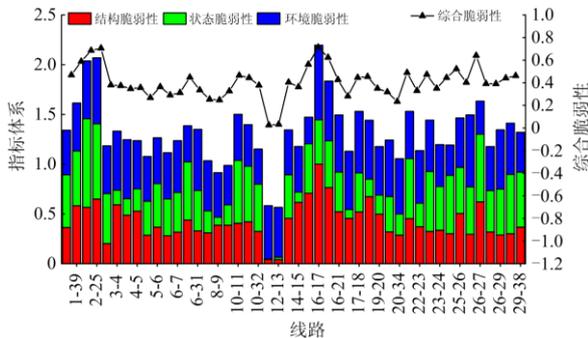


图 6 线路的综合脆弱性结果

Fig. 6 Comprehensive vulnerability results of the line

由图 6 可以看出, 单一指标对线路脆弱性的评估结果互相之间有较大差别, 且与基于综合指标的评估结果也存在较大差异, 说明采用单一指标的评估方式会忽略很多脆弱性信息, 综合考虑结构脆弱性、运行脆弱性和环境脆弱性构建的综合指标能更准确地进行电网线路的脆弱性评估。

提取结果中最大的 15 条线路的每个指标的详细结果如表 3 所示。

将本文计算得到的脆弱性最大的前 10 条线路与文献中计算得到的脆弱性程度最高的前 10 条线路的结果对比如表 4 所示。

从综合脆弱性的排序结果来看, 节点 16、节点 2 附近的线路综合脆弱性较高, 基于电气介数^[26]和基于容量介数^[23]计算也有类似结论, 这也验证了本文方法的有效性。由于这些线路的位置在网络中较为关键, 导致其结构脆弱程度较高, 而其余的子指标也较大, 最终导致这些线路的综合脆弱性较大。断开线路 15-16 会导致电源 33-36 功率外送通道大为减少, 导致网络结构和功率分布情况改变较大, 即使不会引起系统失稳, 也会为系统接下来可能发生的故障以及故障的扩大带来极大的隐患, 在这一点上与文献[26-28]的结果一致, 即类似 15-16 这样的线路, 即使其故障不会直接导致系统失稳等问题, 但是会导致电源 33-36 节点成为辐射状输电的端部, 为系统积累极大的故障隐患。

表 3 前 15 线路脆弱性指标详细计算结果

Table 3 Detailed calculation results of the top 15 line vulnerability indicators

线路	指标 1		指标 2		指标 3		综合脆弱性
	结构脆弱性	排序	运行脆弱性	排序	环境脆弱性	排序	
16-17	1.000	1	0.494	22	0.756	7	0.713
2-25	0.650	5	0.940	2	0.307	28	0.706
2-3	0.566	10	1.000	1	0.388	24	0.686
26-27	0.621	6	0.812	3	0.500	17	0.641
16-19	0.764	2	0.580	16	0.672	11	0.624
1-39	0.582	9	0.730	6	0.791	5	0.589
15-16	0.707	3	0.498	21	0.522	15	0.563
25-26	0.504	14	0.664	11	0.301	29	0.522
21-22	0.453	19	0.649	13	0.150	37	0.490
22-35	0.324	32	0.778	4	0.070	41	0.473
1-2	0.363	28	0.716	8	0.004	42	0.469
10-11	0.406	22	0.650	12	0.094	40	0.465
29-38	0.367	27	0.694	10	0.300	30	0.462
17-27	0.673	4	0.266	35	0.420	21	0.454
6-11	0.438	20	0.564	19	0.260	33	0.449

表 4 线路脆弱度排序对比表

Table 4 Comparison table of line vulnerability ranking

脆弱性排序	方法 1 ^[26]	方法 2 ^[28]	方法 4 ^[27]	本章方法
1	15-16	16-17	2-3	16-17
2	16-17	15-16	16-17	2-25
3	14-15	16-19	4-5	2-3
4	16-19	17-27	16-19	26-27
5	2-3	14-15	14-15	16-19
6	13-14	26-27	15-16	1-39
7	16-24	2-25	4-14	15-16
8	2-25	17-18	3-4	25-26
9	4-5	3-18	17-27	21-22
10	17-18	2-3	5-8	22-35

综合来看本文方法评估得到的线路脆弱性结果与文献中结果有部分相同, 总体结果较为类似, 但是本章的评估方法包含的综合信息较高, 在个别线路及其脆弱性排序上有所不同。

3 基于均匀系数的网络结构优化分析

从线路脆弱性的计算结果可见, 评估线路的脆弱性采用单一指标时会遗漏某些脆弱单元, 综合指标能更准确地辨识出网络中的脆弱单元。在线路的脆弱性评估中可见网络中位于关键位置的线路的电气介数很大, 而且这些线路所连接的节点的度数一般很大, 实际上这是复杂网络的基本特性, 即网络存在“择优连接”, 网络的“择优连接”是以实现网络功能为目的而形成的结果, 但是这种特性也加剧

了网络结构的不均匀性, 接下来分析网络结构均匀性问题, 通过引用经济学中衡量居民收入均匀度的基尼系数来描述电网结构的均匀程度。

3.1 网络结构均匀系数

经济学中基尼系数将居民收入按照从低到高排序, 按收入从低到高排列的累计人口数占总人口的比例为自变量, 对应该比例累计人口所拥有财富占社会总财富的比例为因变量。则基尼系数为

$$G = \frac{A}{A+B} \quad (13)$$

式中: A 和 B 为图 7 中所示区域的面积; G 为基尼系数, 数值越大, 表示收入越不均匀, 最大值为 1, 此时居民收入即为绝对不均匀情况, 最小为 0, 此时实际居民收入即为绝对均匀情况。基尼系数计算示意图如图 7。

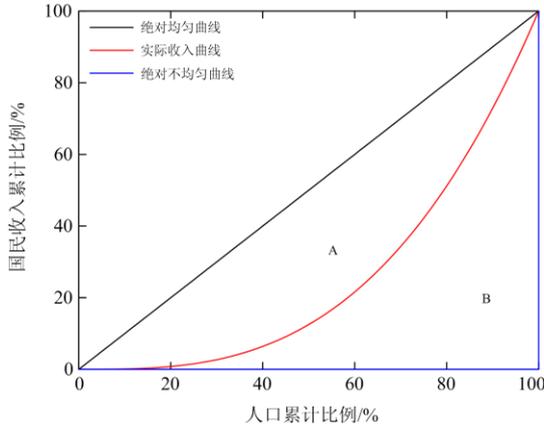


图 7 基尼系数计算示意图

Fig. 7 Diagram of Gini coefficient calculation

应用基尼系数定义网络结构均匀性的均匀系数, 计算方法相同, 居民收入和人口分别对应电气介数和线路, 网络结构均匀系数计算公式为

$$G_B = 1 - \frac{1}{n} \left(2 \sum_{i=1}^{n-1} G_{w_i} + 1 \right) \quad (14)$$

式中: G_B 为网络的均匀系数; n 为将线路均分组后获得的分组数; G_{w_i} 为第 1 组至第 i 组累计线路对应的电气介数占所有线路总电气介数的比例。

3.2 结构变化对网络均匀度的影响分析

基于前文的分析, 促进电气介数的均匀, 有利于降低电网线路的脆弱性, 但网络在演化过程中存在“择优连接”的问题, 所以要促进网络向更均匀的方向发展, 需要“反择优连接”, 即降低最大节点连接的线路, 对于 IEEE 39 节点系统, 分别通过改变一条线路的某一端的连接位置来优化或恶化网络结构, 并分析网络结构变化对网络均匀程度的影响。

计算原始网络、优化网络、恶化网络的电气介数及均匀系数, 均匀系数的结果如图 8 所示。

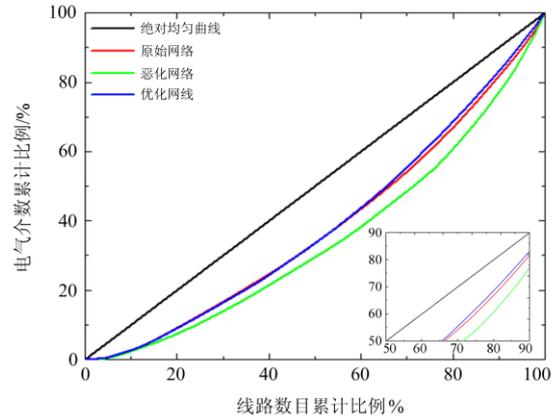


图 8 均匀系数计算结果图

Fig. 8 Calculation results of uniformity coefficient

原始网络、优化网络、恶化网络的电气介数及相关的统计参数、均匀系数具体数值如表 5 所示。

表 5 电气介数及相关统计参数和均匀系数具体数值表

Table 5 Specific values of electrical dielectric and related statistical parameters and uniformity coefficient

比较项目	恶化网络	原始网络	优化网络
最小值	0.078 8	0.168 2	0.166 5
最大值	4.328 1	4.146 3	3.238 6
平均值	1.532 7	1.733 2	1.785 0
方差	0.811 5	0.585 9	0.533 2
均匀系数	0.306 6	0.238 2	0.228 9

从表 5 的结果可见优化网络的均匀系数相较于原始网络下降 3.9%, 而恶化网络的均匀系数相较于原始网络上升 28.7%。从方差的角度也可以得到线路电气介数的数值差异的程度: 优化网络 < 原始网络 < 恶化网络。从图 8 中可见优化网络的电气介数累计分布曲线在累计比例接近 100% 时, 偏离原始网络电气介数累计分布曲线更多, 说明优化网络中较大电气介数的线路数量较少而且其中的最大值会小于原始网络, 这是由于优化网络使得网络结构更加均匀, 线路之间的电气介数的差异变小。所以优化网络结构可以促进网络结构更均匀, 有利于降低其结构脆弱性。

4 结论

1) 采用单一指标对线路进行脆弱性评估时会遗漏某些脆弱单元, 由此提出了一种考虑复杂环境特性的电网线路脆弱性综合评估方法, 结果表明综合考虑结构特性、状态特性和环境特性构建的综合

指标能更好地对线路进行脆弱性评估。

2) 对于脆弱性评估较低的线路, 可以信任其存在与演化; 对于脆弱性评估较高的线路, 如算例中节点 16、2 附近线路, 其结构脆弱度很高, 其余子指标也较大, 导致这些线路的综合脆弱性较大, 类似 16-17、2-25、16-19 这样的线路应该给予足够关注, 并根据实际情况采取相应的措施。

3) 网络的拓展与演化存在“择优连接”的特性, 这将直接导致网络的非均匀性, 可以通过“反择优连接”的方式来优化网络结构, 有助于降低网络线路的脆弱性。

参考文献

- [1] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 张帆, 杨翮, 商佳宜, 等. 考虑负荷损失最小的配网孤岛划分策略研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 181-188.
ZHANG Fan, YANG Xuan, SHANG Jiayi, et al. Study on island partition strategy of distribution network considering minimum load loss[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 181-188.
- [3] 任伟, 徐子立, 宋晓林, 等. 基于数据挖掘的配网数字化计量系统运行特性监测和评价方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 183-191.
REN Wei, XU Zili, SONG Xiaolin, et al. On-site monitoring and evaluation method of operation characteristics of MV distribution digital metering system based on data mining technique[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 183-191.
- [4] 牛博, 刘健, 申巍, 等. 配网柱上开关容性关合过程中电磁辐射干扰测试与仿真[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 11-16.
NIU Bo, LIU Jian, SHEN Wei, et al. Test and simulation of electromagnetic radiation interference during capacitive closing process of pole mounted switch in distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 11-16.
- [5] YAN J, TANG Y, HE H, et al. Cascading failure analysis with DC power flow model and transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 285-297.
- [6] SUN Q, SHI L, NI Y, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 19-28.
DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.
- [7] QIN Zhou, DAVIDSON J, FOUAD A A. Application of artificial neural network in power system security and vulnerability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 525-532.
- [8] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 89-92.
LIU Yaonian, ZHU Xi, KANG Kefei, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on the weighted reactance betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 89-92.
- [9] XU S Z, ZHOU H, LI C X, et al. Vulnerability assessment of power grid based on complex network theory[C] // 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, Wuhan, China.
- [10] 李运坤, 吕飞鹏, 蒋科, 等. 基于最短电气距离的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 24-27, 37.
LI Yunkun, LÜ Feipeng, JIANG Ke, et al. Method for power system operation mode combination based on shortest electrical distance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 24-27, 37.
- [11] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.
- [12] WANG Kai, ZHANG Buhuan, ZHANG Zhe, et al. An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load[J]. Physica A, 2011, 390: 4692-4701.
- [13] 魏明奎, 周全, 宋雨妍, 等. 基于 PageRank 算法的输电网连锁故障脆弱线路辨识[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 74-82.
WEI Mingkui, ZHOU Quan, SONG Yuyan, et al. Identification of transmission network chain fault lines based on PageRank algorithm[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 74-82.
- [14] 靳冰洁, 张步涵, 姚建国, 等. 基于信息熵的大型电力系统元件脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 61-68.
JIN Bingjie, ZHANG Buhuan, YAO Jianguo, et al. Large-scale power system components vulnerability assessment based on entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 61-68.

- [15] BORNARD E, CARPANETO E, CHICCO G, et al. Worst-load-increase direction method for fast identification of voltage-weakness indicators[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(1): 27-32.
- [16] 王志钢, 孙友群, 矫立新, 等. 吉林电网 220 kV 架空输电线路外力破坏故障研究[J]. 吉林电力, 2018, 46(4): 25-26, 30.
WANG Zhigang, SUN Youqun, JIAO Lixin, et al. Research on external damage of 220 kV overhead transmission line in Jilin Power Grid[J]. Jilin Electric Power, 2018, 46(4): 25-26, 30.
- [17] 倪良华, 闻佳妍, 张晓莲, 等. 基于受冲击与断开后果脆弱度的电网关键线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 81-87.
NI Lianghua, WEN Jiayan, ZHANG Xiaolian, et al. Critical lines identification in power grid based on vulnerability of line under impact and disconnection consequence[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 81-87.
- [18] 张颖, 顾雪平, 王涛, 等. 考虑薄弱成因的电网脆弱线路分类与类别辨识[J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 71-79.
ZHANG Ying, GU Xueping, WANG Tao, et al. Category identification of power grid vulnerable lines based on the vulnerable causes[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 71-79.
- [19] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 11-14.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Guojun, et al. A new integrative vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 11-14.
- [20] 李利娟, 吴军, 刘红良, 等. 计及新能源影响静态结合的电网脆弱节点辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 64-72.
LI Lijuan, WU Jun, LIU Hongliang, et al. Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 64-72.
- [21] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [22] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 44-47.
LIU Heyun, ZHOU Di, FU Junping, et al. A simple predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 44-47.
- [23] 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission lines: GB50545—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [24] 高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准: GB/T 16434—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
Classification of environmental pollution area and selection standard of external insulation for high voltage overhead lines, power plants and substations: GB/T 16434—1996[S]. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [25] 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.
- [26] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5, 31.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5, 31.
- [27] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 11-14, 55.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Guojun, et al. A new integrative vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 11-14, 55.
- [28] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.

收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2021-05-30

作者简介:

丁 梁(1977—), 男, 硕士, 高工, 主要从事输配电线路安全防护研究; E-mail: dingliang2k@163.com

鲁海亮(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要从事电力系统过电压、防雷与接地、变压器直流偏磁等方面的研究工作。E-mail: luhailiang@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)