

计及检修计划的智能配电网运行风险等级划分定量分析方法

刘科研[†], 贾东梨, 王帅

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:为解决计划检修导致配电网发生潮流越限和负荷损失等问题,提出了一种考虑检修计划的智能配电网运行风险等级划分定量分析方法.首先,分析了检修计划对配电网安全运行的影响,从运维因素、外部因素、设备因素等三个方面建立智能配电网风险评估指标体系;其次,引入区间算法,采用了主客观混合评估方法进行指标赋权,并结合权重因子得到组合权重;再次,基于风险评估指标及其所占权重,获得了智能配电网运行风险值,并划分了运行风险等级,实现了对故障发生概率和影响后果的综合风险量化评估;最后,结合天津电网的年度运行数据,采用Ada-DT算法对其运行风险等级进行了相关分析,验证了本文所提配电网运行风险评估指标体系及等级划分方法的有效性.结果表明,所提方法可有效划分智能配电网运行风险等级,辨识配电网薄弱环节并给出针对性防控措施,为计划检修人员提供参考.

关键词:检修计划;配电网;风险等级;风险评估;薄弱环节辨识

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A

Quantitative Analysis Method for Operation Risk Level Classification of Intelligent Distribution Network Considering Maintenance Schedule

LIU Keyan[†], JIA Dongli, WANG Shuai

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the problems of flow out-of-limit and load loss of distribution network caused by planned maintenance, this paper proposed a quantitative analysis method of operation risk classification of intelligent distribution network considering maintenance plan. Firstly, the influence of the maintenance plan on the safe operation of the distribution network was analyzed, and the risk assessment index system of the intelligent distribution network was established from three aspects: operation and maintenance factors, external factors, equipment factors, and so on; secondly, the interval algorithm was introduced, the subjective and objective mixed evaluation method was used to weight the indicators, and the combined weights were obtained by combining the weight factors; thirdly, based on the risk assessment index and its weight, the operation risk level was divided, so as to realize the comprehensive risk quantitative evaluation of the failure probability and impact consequences; finally, combined with the annual operation data of Tianjin power grid, the Ada-DT algorithm was used to predict

* 收稿日期:2022-08-16

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(3212038), Beijing Municipal Natural Science Foundation(3212038)

作者简介:刘科研(1978—),男,河南郑州人,中国电力科学研究院有限公司教授级高级工程师,博士

[†]通信联系人, E-mail:liukeyan@126.com

the risk level, and the operational risk assessment index system and classification method constructed in this paper were effectively verified. The case analysis results showed that the proposed method can effectively classify the operational risk level, identify the weak links of the distribution network and give targeted prevention and control measures, which could provide a reference for the maintenance personnel.

Key words: maintenance plan; distribution network; risk level; risk assessment; weakness identification

检修计划影响着配电网的停电范围与停电时长,是决定配电网运行风险等级评估准确性的关键因素^[1].确定配电网的运行风险等级,准确评估其中的薄弱环节并实施针对性维护措施,对提高电力系统的安全稳定性有着重大的影响.因此,建立配电网运行风险等级评估模型,同时兼顾反映配电网检修计划的影响,具有重要的理论价值和实际意义^[2].

检修计划是指在规定时间内和工作要求下,预先规划检修时间、检修顺序、检修人员以及检修设备等,目的是最大化检修成果^[3].在检修计划执行过程中,配电网相应设备会退出运行,电网拓扑结构会因此发生显著变化,可能引发潮流越限和损失负荷的风险^[4].同时,由于传统检修方法精准性、可靠性相对较低,单纯依靠停电检修计划可能导致重复停电^[5].因此,需要密切监视检修过程中电网运行状态,及时辨识配电网薄弱环节并向调度中心反馈,为调度中心调控指令的制定提供依据.

合理、准确、全面的配电网风险评估能够完善检修计划,有效避免重复检修、重复停电等问题,大幅降低检修工作费用,帮助运行调度人员制订科学合理的检修工作计划并降低运行风险^[6].为实现运行风险的定量评估,在确定相关评估指标后,需要进一步通过评估方法获知指标的赋权值.指标赋权方法主要有主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法^[7].按照评价方法的不同,主观赋权法大致分为层次分析法^[8]、区间层次分析法^[9]、德尔菲法、模糊综合评价法等,主观赋权法的优点是充分利用专家经验以获得更能反映实践经验的指标权重,但缺点是过于依赖专家的主观偏好,缺乏客观数据的支撑,可能导致评价结果偏颇.客观赋权法大致分为主成分分析法、变异系数法、熵权法^[10]等,其优点是基于数学理论,完

全依赖指标本身的数据信息获得权重,但缺点是过于依赖数据,权重会因数据的改变而产生较大的变化,结果稳定性差,缺少专家主观意见的修正.同时,不论层次分析法还是熵权法均是确定数的分析方法,对于指标两两比较的不确定和指标计算过程中数据准确度的不确定,无法表述.

文献[11]基于实践经验选取了25个基本指标,通过熵权和灰色关联度表征基本指标与配电系统风险之间的复杂关系.文献[12]利用综合层次分析法与专家知识构建了社区配电网风险水平评估指标体系,并利用模糊综合评估将评估指标体系与动态权重相结合得到评价结果.文献[13]利用从配电网检修经济性、运行经济性等方面构建了基于5G通信的配电网改造经济性评估体系,并利用客观赋权法和不确定层次分析法确定指标权重.当前国内外计及检修计划因素的配电网运行风险等级研究较少,且目前大多是从设备检修成本或实际检修方案方面开展配电网的风险评估,无法较好地完成计划检修与运行风险研判的互补配合.

为此,本文提出计及检修计划的智能配电网运行风险等级划分的定量分析方法,分析检修计划影响因素,全面考虑配电网风险状态评估因素.首先,考虑检修计划的影响和电网自身运行的安全经济需求,从运维因素、外部因素、设备因素三个方面构建了配电网运行风险评估的指标体系;其次,对故障发生概率和故障发生后果的综合风险程度进行量化评估,通过主观区间层次分析法和客观区间熵权法确定评价体系指标的不确定性区间主客观权重值,进一步引入权重因子以确定组合权重值;再次,基于配电网运行的综合风险分值,按照合理的划分方法,划分运行风险等级;最后,结合天津电网的年度运行数

据,利用 Ada-DT 算法进行风险等级的预测,以验证本文评估方法的有效性.

1 配电网风险评估

配电网的风险评估是制订事故预防计划和维护系统安全稳定的关键环节^[14]. 构建合理的风险评估模型,是准确评估风险等级的基础.

1.1 配电网的风险评估模型

配电网风险取决于故障概率和故障影响,它代表电网故障情况发生的可能性和严重性. 风险评估通过评定故障发生的可能性及其后果的严重性,确定故障影响整体系统运行的效果.

风险情况的发生概率及其与后果严重程度的乘积代表配电网的运行风险^[15],计算式为:

$$R(x) = \sum_{i \in A_x} P(i) \cdot S(i) \quad (1)$$

式中: $R(x)$ 表示系统在 x 情况时的风险值; $P(i)$ 表示出现风险事件 i 的概率; $S(i)$ 表示由风险事件 i 带来的损失程度; A_x 表示系统在 x 情况下可能发生的所有风险事件集合.

1.2 风险指标模型

由于配电网结构复杂、分布广泛,运行风险因素具有不确定性和随机性^[16],包括各元件的工作时长、设备污闪、天气变化、负荷类型、地理环境、动物攀爬、设备年限、可用修复资源或误操作等. 为有效提高风险评估的高效性和精确性,需要辨识与配电网故障相关度高的故障因素,剔除相关性低的故障因素,再根据可计算性、兼容性、科学性、合理性、层次性的指标筛选原则,筛选出配电网风险等级评价指标^[17].

基于上述指标筛选原则,本文主要从运维因素、外部因素、设备因素3个方面构建配电网安全风险评估的指标体系,指标体系构成如图1所示.

1.2.1 运维因素

1) 配电网检修风险 A_1

配电网检修风险包括计划失负荷损失风险和随机失负荷损失风险. 其中,计划失负荷损失风险与系统备用容量不足有关,随机失负荷损失风险与设备检修停运有关. 配电网检修风险 A_1 的计算式如式(2):

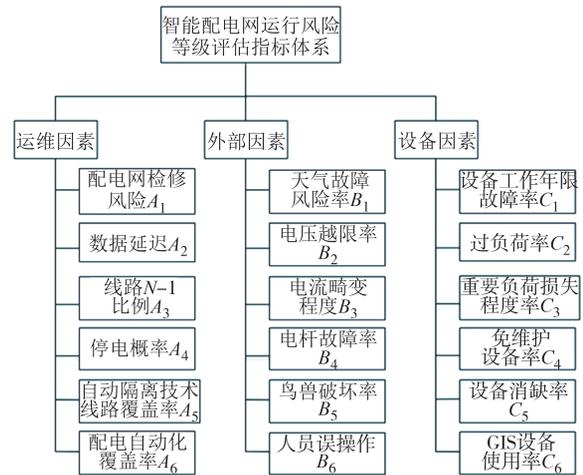


图1 风险指标体系框图

Fig.1 Block diagram of the risk indicator system

$$\left\{ \begin{aligned} A_1 &= \sum_{t=1}^{N_T} [R_{M1}(t) + R_{M2}(t) + R_{M3}(t)] \\ R_{M1}(t) &= \sum_{m \in \phi(t)} C_{m,a} \\ R_{M2}(t) &= P_{M2}(t)T_d C_p + D\gamma \\ R_{M3}(t) &= \sum_{i=1}^K L_i (U_{i,\phi(t)} - U_{i,0}) C_R \\ U_{i,\phi(t)} &= \sum_j^N (\lambda'_j r'_j + \lambda_j r_j) \\ U_{i,0} &= \sum_j^N \lambda_j r_j \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: N_T 表示在检修期间所划分时段的总数; $R_{M1}(t)$ 表示 t 时段内对设备进行检修的费用; $R_{M2}(t)$ 表示 t 时段内计划失负荷的总损失值; $R_{M3}(t)$ 表示 t 时段内随机失负荷的总损失值; $\phi(t)$ 表示 t 时段内所有检修设备; $C_{m,a}$ 表示利用 a 类检修方式对设备 m 进行检修的费用; $P_{M2}(t)$ 表示 t 时段内单位时间里由检修设备带来的失负荷总量; T_d 表示负荷停电总时长; D 表示检修期间是否进行开关操作,设定为0或1,1表示有操作,0表示无操作; γ 表示进行开关操作的费用; L_i 表示位于负荷点 i 的平均负荷; $U_{i,0}$ 表示 t 时段未检修设备时位于负荷点 i 的年平均停运时间; $U_{i,\phi(t)}$ 表示考虑检修设备集合 $\phi(t)$ 时位于负荷点 i 的年平均停运时间; K 表示负荷点总量; N 表示负荷点 i 与电源点最小路之间的设备总量; λ'_j 表示对设备 j 进行检修而导致设备停运的概率; r'_j 表示对设备 j 进行检修的平均时长; λ_j 表示由于故障原因导致设备 j 停运的概率; r_j 表示对设备 j 进行故障维修的时间; C_p 表示在计划失负荷下的单位电价; C_R 表示在随机

失负荷下的单位电价。

2) 数据延时 A_2

数据的实时传输决定了配电网运行的时效性,可以避免故障范围扩大,提高决策准确性和及时性。数据延时是指在配电网运行过程中,更新通信数据所需要的平均时间,计算式如式(3):

$$A_2 = T_x - T_n \quad (3)$$

式中: T_x 表示更新电力数据所需的时间; T_n 表示采集电力数据所需的时间。

1.2.2 外部因素

1) 天气故障风险率 B_1

天气类型可以划分为三类:正常天气、恶劣天气、大灾难天气。不同天气类型下的故障率计算式如式(4):

$$B_1 = \lambda(\omega_i) = \begin{cases} \frac{Z+S+Q}{Z} F_1, \omega_i = 1 \\ \frac{Z+S+Q}{S} F_2, \omega_i = 1.2 \\ \frac{Z+S+Q}{Q} F_3, \omega_i = 2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_i 表示不同天气状态,正常天气下 $\omega_i = 1$,恶劣天气下 $\omega_i = 1.2$,大灾难天气下 $\omega_i = 2$;Z表示正常天气数;S为恶劣天气数;Q为大灾难天气数; F_1 、 F_2 、 F_3 分别为正常天气、恶劣天气、大灾难天气故障次数与总故障次数的比值,其中 $F_1 + F_2 + F_3 = 1$ 。

2) 电压越限率 B_2

配电网节点电压越限是导致电力系统运行水平下降的重要原因之一,也是配电网运行风险评估的关键指标,计算式如式(5)(6):

$$B_2 = \sum_{i=0}^{N_p} \int_0^{T_w} P_{\text{node}}^{\text{lim}}(t) dt / (T_w N_p) \quad (5)$$

$$P_{\text{node}}^{\text{lim}}(t) = \begin{cases} [V_{i,\min} - V_i(t)] / V_{i,\min}, V_i(t) < V_{i,\min} \\ 0, V_{i,\max} \geq V_i(t) \geq V_{i,\min} \\ [V_i(t) - V_{i,\max}] / V_{i,\max}, V_i(t) > V_{i,\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V_{i,\max}$ 表示位于节点*i*处额定电压的最大值; $V_{i,\min}$ 表示位于节点*i*处额定电压的最小值; $V_i(t)$ 表示在*t*时刻节点*i*的电压值。

3) 电流畸变程度 B_3

电流畸变会极大地破坏电力系统装备的安全运行,从而引发过热、振动等异常现象,显著影响配电网用户用能质量。通常用各个节点处的谐波电流含量上限值表示电流畸变程度,计算式如式(7):

$$B_3 = \max_{1 \leq i \leq N_p} \left(\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{k,i}^2 / I_{1,i}} \right) \quad (7)$$

式中: $I_{1,i}$ 表示节点*i*处基波电流的有效值; $I_{k,i}$ 表示节点*i*处总谐波电流的有效值。

1.2.3 设备因素

1) 设备工作年限故障率 C_1

设备工作年限故障率与设备不同工作时长密切相关,计算式如式(8)~式(12):

磨合期:

$$C_1 = \lambda(t) = K_0 e^{-\beta t} \lambda_c \quad (8)$$

$$\beta = \ln K_0 / t_{\text{BI}} \quad (9)$$

磨损期:

$$C_1 = \lambda(t) = K e^{\gamma t} \lambda_c \quad (10)$$

$$K = e^{-\gamma(t_i - t_{w0})} \quad (11)$$

$$\gamma = \ln K_0 / t_{w0} \quad (12)$$

式中: t 表示设备的工作时长; K_0 表示影响因子的上限值(设为10); λ_c 表示故障率常数; t_L 表示设备寿命(设为30年); t_{BI} 表示设备的磨合期(设为2); t_{w0} 表示设备的磨损期(设为2)。

2) 过负荷率 C_2

设备过负荷是电力系统发生故障的诱因之一,过负荷率可以评估设备过负荷的风险,计算式如式(13):

$$C_2 = \int_{\gamma S_{\max}}^{\infty} p_a(S) dS \quad (13)$$

式中: $p_a(S)$ 表示设备负荷的分布概率; γ 表示安全系数(取0.8~0.9); S_{\max} 表示该台电气设备安全的最大值。

3) 重要负荷损失程度 C_3

重要负荷中断供电将造成人身伤亡事故或政治经济重大损失,因此需要考虑配电网重要负荷的损失程度,计算式如式(14):

$$C_3 = \left(\sum_{j=1}^m \omega_j P_j \right) / \left(\sum_{i=1}^n \omega_i P_i \right) \quad (14)$$

式中: m 表示重要负荷的数量; n 表示负荷的总数; ω 表示负荷的权重; P 表示总电量。

2 运行风险量化评估

本文综合考虑主客观赋权法的局限性,提出一种组合赋权法:引入区间算法,形成区间层次分析法和区间熵权法的有机结合,并通过权重因子将二者的计算结果整合,调节主客观权重系数以得到更贴合实际情况的组合权重值。

基于区间层次分析法和区间熵权法的风险量化评估流程如下:

1) 计算指标权重

①构建综合评估指标的层次.

②区间比例标度表.

依据区间 Satty 打分法打分,打分标准按照表 1 “区间比例标度表”^[18].任意两个指标的打分结果 a'_{ij} 由区间中点 a_{ij} 和区间宽度 μ 两部分组成,表示基于给定 a_{ij} 基数的区间变化范围.

$$a'_{ij} = [a_{ij}, \mu] \tag{15}$$

表 1 区间比例标度表

Tab.1 Interval proportion scale table

i 因素比 j 因素	区间中点量化值 a_{ij}	区间宽度 μ
同样重要	1	$0 < \mu < 1$
稍微重要	3	
较为重要	5	
十分重要	7	
特别重要	9	
两相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8	
指标 j 与 i 重要性的比值	倒数	

③确定区间判断矩阵 A .

逐个比较同级各个指标与上层各个指标的重要性之比 a'_{ij} ,得到判断矩阵 A .

④计算区间判断矩阵特征值的最大值 λ_{\max} 及特征向量 ξ .

⑤一致性检验.

若矩阵 A 的一致性检验系数 $C_R < 0.1$,则通过检验;若 $C_R \geq 0.1$,则未通过检验,退回第②步.其中:

$$\begin{cases} C_R = C_1/R_1 \\ C_1 = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \end{cases} \tag{16}$$

式中: C_1 为一致性指标; R_1 为自由度指标^[19],取值如表 2 所示.

表 2 自由度指标 R_1

Tab.2 Degree of freedom index R_1

维数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_1	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

⑥由 $A\xi = \lambda_{\max} w_{IAHP}$ 计算各个指标的主观权重值 w_{IAHP} .

⑦建立决策矩阵 \bar{B} .

第 i 次测量得到第 j 个指标的属性值构成区间数 $\bar{b}_{ij} = [b_{ij}^L, b_{ij}^U]$,得到区间数决策矩阵 \bar{B} .

⑧标准化数据矩阵 \bar{P} .

⑨计算指标熵值.

第 j 个指标 Q_j 的熵为:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \tag{17}$$

式中: $k = (\ln m) - 1$;并设 $p_{ij} = 0$ 时, $p_{ij} \cdot \ln p_{ij} = 0$.

⑩计算指标熵权.

指标区间熵值 $\bar{H}_j = [H_j^L, H_j^U], j = 1, 2, \dots, n$.第 j 个指标 Q_j 的区间熵权 \bar{w}_j 计算式为:

$$\bar{w}_j = (1 - \bar{H}_j)/(n - \sum_{j=1}^n \bar{H}_j), j = 1, 2, \dots, n \tag{18}$$

其中,

$$H_j^L = \min \left\{ -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \right\}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} p_{ij}^L \leq p_{ij} \leq p_{ij}^U, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m p_{ij} = 1 \end{cases} \tag{19}$$

$$H_j^U = \max \left\{ -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \right\}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} p_{ij}^L \leq p_{ij} \leq p_{ij}^U, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m p_{ij} = 1 \end{cases} \tag{20}$$

⑪熵权归一化.

对熵权进行归一化处理:

$$w_{IEN} = \bar{w}_j^L / \bar{w}_j^U, j = 1, 2, \dots, n \tag{21}$$

$$\begin{cases} \bar{w}_j^L = \max \{w_j^U | j = 1, 2, \dots, n\} \\ \bar{w}_j^U = [w_j^L, w_j^U] \end{cases} \tag{22}$$

⑫权重因子 θ .

为了兼顾区间层次分析法的主观优势和区间熵权法的客观优势,引入权重因子 θ ,得到综合区间权重 w :

$$w = \theta w_{IAHP} + (1 - \theta)w_{IEN}, 0 \leq \theta \leq 1 \tag{23}$$

综合区间权重 w 随着 θ 的改变而改变,且当 $\theta=1$ 或 0 时,分别对应于区间层次分析法和区间熵权法.综上所述,本文区间指标权重计算流程如图 2 所示.

2) 计算指标风险值

参考文献[20-21],根据实际情况调整并确定各指标实际取值.

3) 计算综合分值

按照前述步骤确定各指标的权重 W ,各指标风险值 y_i ,设 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, C 为综合分值,则有:

$$C = WY = \sum_{i=1}^n w_i y_i \tag{24}$$

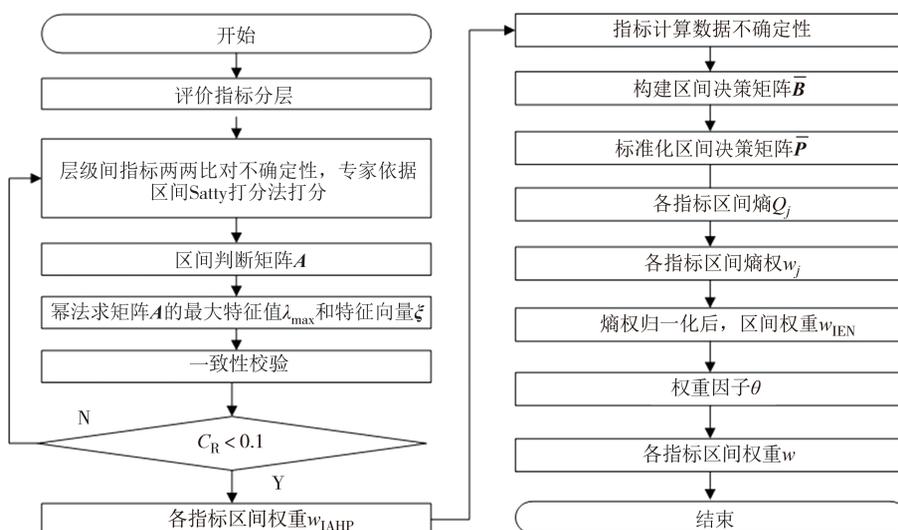


图2 区间指标权重计算流程图

Fig.2 Interval indicator weight calculation flowchart

3 运行风险等级划分

本文基于导致系统发生运行风险的各项因素累积次数历史数据,确定关键性影响指标因素,依据电气设备的运行状态、热备用状态、冷备用状态和检修状态,确定对应状态下关键性影响指标因素的最

大取值,并作为不同状态下的阈值.根据以上划分依据,最终得到相应的划分风险等级的综合分值 C ,可将风险等级划分为5个等级,包括1、2、3、4、5级,评估标准见表3.其中,5级是较低的风险等级,而1级则是最高的风险等级,也被称为不可接受的风险因素,3级及以上被称为薄弱环节,在实际风险评估中,大多忽略3级以下的风险因素.

表3 配电网风险等级

Tab.3 Risk level of distribution network

风险等级	风险定级依据	描述
1级	$C \geq 0.2$	关键设备量明显大于上限值,设备运行情况恶化,需要立刻进行故障处理
2级	$0.1 \leq C < 0.2$	部分关键设备量在上限值附近,且设备运行情况存在恶化的态势,需要立刻进行故障处理
3级	$0.05 \leq C < 0.1$	部分指标偏移额定值,需要密切监视,针对设备运行水平和供电能力当前的问题,安排检修、改进计划
4级	$0.02 \leq C < 0.05$	所有设备量均在上限内,但少数设备量存在超过上限值的态势,需要密切监视设备运行状态,进行计划性、针对性的检修和改造
5级	$C < 0.02$	各项指标均在规定的警示值内,可按规划、科研计划新建或改造

4 案例分析

为验证本文考虑检修计划的配电网运行风险评估方法的可行性与有效性,以天津市城区配电网12个月的线段区域月故障数据作为测试集.首先计算得到运行风险评估指标值,再对数据集进行平均处理并标准化,为避免指标量纲和变异波动范围带来影响,利用极差标准化法处理负相关指标,最终得到运维因素、外部因素、设备因素各指标风险数值,并通过层次分析法获得主观权重值、通过熵权法获得客观权重值,为消除赋权值的倾斜,取权重因子为

0.5,以平衡主客观赋权的权值,最终得到的组合权重值以及相关数据值如表4所示.

观察表4数据:客观权重分布较为均匀,不同指标间的权重波动较小,而主观权重的方差较大,取值范围相比客观权重更广,使用单一的赋权方法势必造成综合评估结果偏颇,组合赋权法有效避免了评估观点的倾斜.

自适应增强决策树算法(Adaptive Boosting-Decision Tree, Ada-DT)是机器学习的一种典型集成学习算法,该算法通过对同一个训练样本训练若干分类器,基于分类器的错误率设置权重值,再通过累计加权的方式将弱分类器组成一个强分类器,并使

表4 指标与权重结果

Tab.4 Metrics and weights results

指标	城区数据	主观权重	客观权重	组合权重
A ₁	0.883	0.200 69	0.055 83	0.128 26
A ₂	0.892	0.030 34	0.046 24	0.038 29
A ₃	0.625	0.028 25	0.076 48	0.052 37
A ₄	0.581	0.020 31	0.070 71	0.045 51
A ₅	0.473	0.025 53	0.049 22	0.037 38
A ₆	0.558	0.037 71	0.043 66	0.040 39
B ₁	0.911	0.143 38	0.036 92	0.090 15
B ₂	0.962	0.066 65	0.066 73	0.066 69
B ₃	0.762	0.120 01	0.055 32	0.087 67
B ₄	0.235	0.003 37	0.059 06	0.031 22
B ₅	0.281	0.007 27	0.046 91	0.027 09
B ₆	0.471	0.006 65	0.058 61	0.032 63
C ₁	0.871	0.103 92	0.066 72	0.085 32
C ₂	0.832	0.097 76	0.030 76	0.064 26
C ₃	0.842	0.062 21	0.058 65	0.060 43
C ₄	0.698	0.009 33	0.060 03	0.034 68
C ₅	0.671	0.030 07	0.060 07	0.045 07
C ₆	0.591	0.006 55	0.058 08	0.032 31

得最终组成的强分类器在分类效果上具备较高的准确率. Ada-DT算法能够从海量数据和众多故障特征中挖掘对配电网风险等级预测能力较强的特征, 本文利用文献[17]提出的Ada-DT算法, 基于故障历史数据进行风险等级预测. 天津市月平均故障分布情况如图3所示, 未考虑检修计划与考虑检修计划的配电网运行风险等级预测结果如表5、表6所示.

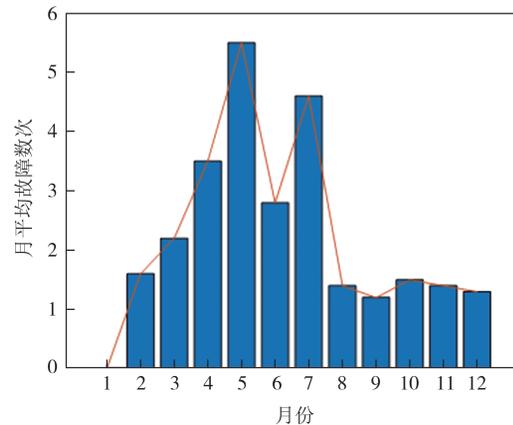


图3 月平均故障分布图

Fig.3 Monthly average failure distribution chart

表5 未考虑检修计划配电网运行风险等级预测结果

Tab.5 Prediction results of distribution network operation risk level without considering maintenance plan

预测时间	实际风险等级	预测为1级	预测为2级	预测为3级	该等级预测准确率/%	综合/%
12个月	1级	63	5	3	88.7	82.73
	2级	6	31	2	79.5	82.73
	3级	0	2	8	80.0	82.73

表6 考虑检修计划配电网运行风险等级预测结果

Tab.6 Prediction results of distribution network operation risk level considering maintenance plan

预测时间	实际风险等级	预测为1级	预测为2级	预测为3级	该等级预测准确率/%	综合/%
12个月	1级	68	3	0	95.8	86.8
	2级	5	33	1	84.6	86.8
	3级	0	2	8	80.0	86.8

对比表5、表6结果:考虑了检修计划影响因素的风险等级预测结果准确率更高,表明风险等级划分考虑检修计划因素的必要性.分析表6结果:三类风险等级评估结果的综合准确率均高于86%,验证了本文方法的正确性;在实际配电网运行过程中,3级风险等级的实际运行数据较少,导致预测准确率显著降低,如果增加3级的数据总量,该级预测准确率也会上升.同时,风险等级评估错误的偏差至多为一,反映了本文方法的鲁棒性较强.

为验证本文采用Ada-DT算法进行风险等级预测的优越性,本文选择了具有较强函数学习能力和收敛能力的预测算法进行对比:采用基于径向基核

函数的支持向量机(RBF-SVM)算法、小波神经网络(WNN)算法、BP神经网络算法进行风险等级预测,各等级预测准确率对比如表7所示.

分析表7可以得出:1)本文方法实现对配电网

表7 不同方法预测结果对比

Tab.7 Comparison of prediction results by different methods

预测方法	预测结果准确率/%			
	1级	2级	3级	综合
Ada-DT算法	95.8	84.6	80.0	86.8
RBF-SVM算法	92.6	82.0	78.8	84.5
WNN算法	87.3	81.7	77.2	82.1
BP神经网络算法	79.7	80.5	75.1	78.4

运行风险等级的定量分析,基于Ada-DT算法的预测准确率高于RBF-SVM算法、WNN算法和BP神经网络算法.验证了本文采用的预测算法对3类风险等级预测准确率较高、具有较好的适应性,能够在检修前对于在检修过程中可能出现的风险进行评估,大大加强配电网的运行可靠性.2)本文基于Ada-DT算法的预测方法可以针对不同区县的不同时间尺度进行更多类型的风险等级评估,适应配电网海量数据挖掘技术的发展和数据量的积累.

5 结论

本文从配电网风险评估角度出发,剖析了检修计划对配电网运行风险的影响,提出了一种科学合理的配电网运行风险评估方法.本文考虑到配电网运行风险影响因素繁多、部分因素无法量化或获得,构建了科学合理的风险评估指标体系,引入区间算法和权重因子,兼顾主客观因素,并利用Ada-DT算法进行风险等级预测,结果更贴近实际情况,为配电网处理高比例可再生能源、新型负荷接入带来的不确定问题奠定基础.同时,伴随着智能电网的发展,本文提出的配电网风险评估方法实现了对风险评估直观、清晰、量化的描述,对于加强风险预控和风险管理,找到薄弱环节并增强稳固来提高电网的整体可靠性具有重要现实意义.

参考文献

- [1] YANG F S, CAI G L, WANG L B, et al. Improvement of distribution system maintenance plan based on risk level [C]// 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2018: 252-255.
- [2] DU Y, LIU Y D, WANG X H, et al. Predicting weather-related failure risk in distribution systems using Bayesian neural network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 350-360.
- [3] SHANG Y W, WU W C, LIAO J W, et al. Stochastic maintenance schedules of active distribution networks based on Monte-Carlo tree search [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3940-3952.
- [4] 李亚国,白鹭,李冠良,等. 基于改进粒子群算法的配电网检修计划优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5): 97-103.
LI Y G, BAI L, LI G L, et al. Maintenance scheduling optimization method of distribution network based on the improved particle swarm optimization [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 97-103. (in Chinese)
- [5] 许易经,韩学山,杨明,等. 基于设备在线监测的电网状态检修决策模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 72-81.
XU Y J, HAN X S, YANG M, et al. Decision-making model of condition-based maintenance for power grid with equipment on-line monitoring [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 72-81. (in Chinese)
- [6] CAO G, GU W, LI P X, et al. Operational risk evaluation of active distribution networks considering cyber contingencies [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 3849-3861.
- [7] 杜岩,谢从珍,李彦丞,等. 基于加权马氏距离型TOPSIS算法的10 kV配电网雷害风险评估[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 108-116.
DU Y, XIE C Z, LI Y C, et al. Lightning risk assessment of 10 kV distribution line based on TOPSIS algorithm improved by weighted mahalanobis distance [J]. Electric Power, 2022, 55(4): 108-116. (in Chinese)
- [8] 李晨,殷自力,王晓辉,等. 基于层次分析法和熵权法的配电网调度评价[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(7): 81-87.
LI C, YIN Z L, WANG X H, et al. Assessment on distribution network dispatching based on analytic hierarchy process and entropy weight method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(7): 81-87. (in Chinese)
- [9] 周名煜,谢宁,王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137.
ZHOU M Y, XIE N, WANG C M. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 130-137. (in Chinese)
- [10] 王森,王蕾,陈飞,等. 大数据环境下基于影子价格的配电网综合评价方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 94-101.
WANG S, WANG L, CHEN F, et al. Comprehensive evaluation method of distribution network based on shadow price under big data environment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 94-101. (in Chinese)
- [11] LIN C F, LIU F, ZHANG L Y, 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.
- [12] 史运涛,朱翔,丁辉,等. 基于层次分析-贝叶斯网络的社区配电网风险动态综合评估方法[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(1): 111-117.
SHI Y T, ZHU X, DING H, et al. Dynamic comprehensive risk assessment method of community power distribution network based on analytic hierarchy process and Bayesian networks [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(1): 111-117. (in Chinese)
- [13] 张晖,余蕊,张宁池,等. 基于5G通信的智能配电网改造经济性综合评估方式[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10746-

- 10754.
- ZHANG H, SHE R, ZHANG N C, et al. Comprehensive evaluation method of economics of smart distribution network reconstruction based on 5G communication [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10746-10754. (in Chinese)
- [14] 王鹤, 余中枢, 李筱婧, 等. 基于主成分分析方法的多类型电动汽车接入配电网的综合风险评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 57-65.
- WANG H, YU Z S, LI X J, et al. Comprehensive risk assessment of multiple types of electric vehicles connected to distribution network based on principal component analysis method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 57-65. (in Chinese)
- [15] 王海宾, 宋占党, 白霄磊. 考虑电动汽车充放电影响的配电网风险评估方法[J]. 电气应用, 2021, 40(2): 31-37.
- WANG H B, SONG Z D, BAI X L. Risk assessment method for distribution system considering the influence of electric car charging and discharging [J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(2): 31-37. (in Chinese)
- [16] BEYZA J, YUSTA J M. Integrated risk assessment for robustness evaluation and resilience optimisation of power systems after cascading failures[J]. Energies, 2021, 14(7): 2028.
- [17] 吴俊利, 张步涵, 王魁. 基于Adaboost的BP神经网络改进算法在短期风速预测中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 221-225.
- WU J L, ZHANG B H, WANG K. Application of Adaboost-based BP neural network for short-term wind speed forecast [J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 221-225. (in Chinese)
- [18] 贾晓强. 基于多目标决策的时间序列数据挖掘算法[J]. 电子设计工程, 2021, 29(17): 45-49.
- JIA X Q. Time series data mining algorithm based on multi-objective decision [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(17): 45-49. (in Chinese)
- [19] 翟芸, 胡冰, 施端阳. 基于改进AHP-熵权法的雷达装备可靠性评估指标赋权方法[J]. 现代防御技术, 2022, 50(4): 148-155.
- ZHAI Y, HU B, SHI D Y. Reliability evaluation method of radar equipment based on improved AHP-entropy weight method [J]. Modern Defence Technology, 2022, 50(4): 148-155. (in Chinese)
- [20] 城市配电网运行水平和供电能力评估导则: Q/GDW 565—2010 [S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
- Guidelines for evaluating the operation level and power supply capacity of urban distribution networks: Q/GDW 565—2010 [S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2010. (in Chinese)
- [21] 供电系统用户供电可靠性评价规程: DL/T 836—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- Reliability evaluation code for customer service in power supply system: DL/T 836—2012 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012. (in Chinese)