

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.05.009

综合考虑系统与设备侧的节点电压暂降评估

邹泽宇, 刘文泽

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要:针对从供需两侧评估电网节点电压暂降水平的需求,提出考虑系统和设备侧的节点电压暂降严重程度评估方法。首先,根据系统与设备评估重点构建指标:基于累积/互补累积分布函数、严重性指标及暂降统计表定义节点平均电压暂降影响度指标,与电压暂降频度指标共同构建系统侧指标集;由节点综合电压耐受曲线及能量损失公式构造节点综合故障率作为设备侧指标,再形成兼顾系统和设备侧的综合评价指标集。其次,对指标集赋权,并采用基于马氏距离的逼近理想点(TOPSIS)法刻画节点电压暂降严重程度,在IEEE 30节点系统仿真,并使用所提方法评估节点电压暂降严重程度,实现了电压暂降薄弱环节的辨识。最后,通过模糊C均值聚类方法对不同组合指标进行评估合理性分析,结果证明文中所提方法能解决单一指标评价片面的问题。

关键词:电压暂降;严重程度评估;蒙特卡洛法;基于马氏距离的逼近理想点法;组合赋权;模糊C均值聚类

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)05-0063-08

0 引言

电压暂降并非新问题,但不容小觑。论及电网侧,电压暂降导致的不可传输电量造成资产损失^[1];对含敏感设备的产业而言,电压暂降所致的报废损失更甚于供电中断所致。准确地评估电网和节点的电压暂降严重程度,能指导薄弱环节挖掘和用户定址,大有裨益。

国内外关于电压暂降评估的研究成果颇丰,较典型的方法有数据监测法及随机估计法,数据监测法精度与监测周期、布点密度等因素相关。文献[2]结合层次分析法及权值函数法定义兼顾幅值和持续时间的电压暂降事件综合影响度,利用实测数据量化节点暂降严重度;文献[3]基于多属性集合和传统逼近理想点(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法评测电网变电站的电压暂降严重度。但上述文献未虑及敏感设备对电压暂降的响应,易高估暂降影响。文献[4]考量供需双侧,综合评估变电站节点对电压暂降的响应,但对求取综合指标时指标量纲、数量级不一的问题考虑欠妥。总之,数据监测法可真实反映节点暂降水平,但需付以较大时间、布点成本。随机估计法以蒙特卡洛法(Monte Carlo simulation, MCS)为典型,文献[5—6]采用MCS分别对城市电网和测试系统仿真分析,但仅用暂降幅值或持续时间期望作为薄弱判据和评价属性具有偏颇性;文献[7]建

立兼顾环境因素、线路属性的改进MCS概率模型,在PSD-BPA软件中仿真验证了模型优越性。目前已有研究针对MCS收敛性提出改进^[8],但MCS可以较好地模拟多维随机因素,计算速度受物理拓扑复杂性影响小,仍为主流随机估计法。除评估方法之外,合理的指标亦可提高评估结果的准确性。但如何建立指标集,使之兼顾系统、设备侧响应,全面且不冗余地量化节点电压暂降水平仍待研究。

文中首先构造了考虑系统与设备侧的节点暂降严重程度的综合评价指标集:基于累积/互补累积分布函数、严重性指标及暂降统计表定义了节点平均电压暂降影响度指标,与电压暂降频度指标共同形成系统侧指标集;建立节点综合电压耐受曲线,并结合能量损失计算节点综合故障率作为设备侧指标。然后,采用组合赋权和基于马氏距离的逼近理想点法反映节点暂降水平。最后,算例基于MCS对IEEE 30节点系统仿真,采用所提方法进行节点暂降严重程度评估,验证了方法的合理性。

1 系统侧评价指标集

系统侧评价指标集包含节点平均电压暂降影响度和电压暂降频度指标,通过幅值、持续时间和暂降频次等特征衡量节点电压暂降情况。

1.1 节点平均电压暂降影响度

累积分布函数常用于设备的暂降严重程度评估^[9],文中将其沿用于系统侧评估。节点平均电压暂降影响度指标的构建步骤简要阐述如下:

(1) 基于小样本数据,采用最大熵原理求取全网节点电压暂降幅值的互补累积分布函数、持续时

收稿日期:2021-04-15;修回日期:2021-06-28

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2017A0303132-88)

间的累积分布函数;

(2) 将累积/互补累积分布函数与严重性指标加权生成电压暂降电压幅值、持续时间影响度曲线,一定程度弥补数据偏态的缺陷;

(3) 结合电压暂降统计表的区间划分方式对电压暂降事件进行归类,将幅值影响度与持续时间影响度分别作为实部与虚部,求取其归一化方均根值作为事件归一化电压暂降影响度值,进一步定义节点平均电压暂降影响度指标。

1.1.1 基于最大熵原理的累积/互补累积分布模型

最大熵原理旨在求取最符合实际参数分布的概率分布模型。暂降事件特征参数包含幅值和持续时间,通过特征参数可反映暂降特征。在有一定数量暂降事件样本的基础上,可通过最大熵原理求取电压暂降特征参数的最大熵概率密度函数。文中通过样本频率直方图得到拟合数据点,并采用对数变换改进法和 Levenberg-Marquardt 算法求取参数向量^[10]。因随机变量边界选取不当易使概率密度函数尾部抬起,需根据样本取值确定边界,逐次修正至结果满意^[9]。

设持续时间、电压幅值的最大熵概率密度函数分别为 $f_T(T)$ 、 $f_U(U)$ 。再通过累积、互补累积计算^[10]求得累积、互补累积分布函数为 $F_T(T)$ 、 $F_U(U)$ 。 T, U 分别为暂降持续时间及幅值,其定义见式(1)和式(2), $P(\cdot)$ 为概率。

$$F_T(T = T_1) = P(T \leq T_1) \quad (1)$$

$$F_U(U = U_1) = P(U > U_1) \quad (2)$$

$F_U(U = U_1) = m\%$ 代表暂降事件样本中有 $m\%$ 的暂降事件的幅值低于 U_1 ; $F_T(T = T_1) = g\%$ 反映暂降事件样本中存在 $g\%$ 的暂降事件持续时间不长于 T_1 。因此,电压暂降特征参数概率分布情况可表征电压暂降的相对严重程度。对电压幅值最大熵概率密度函数进行互补累积计算是因为电压幅值越低,电压暂降越严重,互补累积分布函数亦有自变量取值越小,其值越高的特征。

1.1.2 电压暂降特征参数严重度曲线

利用累积/互补累积分布函数反映单次事件暂降特征参数的影响程度意义明确,易比较。在样本分布集中的区间,累积/互补累积分布函数斜率较大,对应影响度值变化较快,保证了区分度。但因样本数据的偏态性,累积/互补累积分布函数在样本分布稀疏的区间斜率过低,区分度弱。

针对上述劣势,引入具有线性区分度电压暂降特征参数严重性指标函数对累积/互补累积分布函数进行修正。幅值严重性指标(magnitude severity

index, MSI)、持续时间严重性指标(duration severity index, DSI)的归一化表达式见式(3)和式(4)^[11]。

$$f_{MSI}(U) = \begin{cases} 0 & U > U_{\max} \\ \frac{U_{\max} - U}{U_{\max} - U_{\min}} & U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \\ 1 & U < U_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{DSI}(T) = \begin{cases} 0 & T < T_{\min} \\ \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} & T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ 1 & T > T_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

系统侧评估时, $U_{\max}, U_{\min}, T_{\max}, T_{\min}$ 的选取须保证严重性指标能量化所有样本数据。将累积/互补累积分布函数和严重性指标进行等权求和,得到电压暂降幅值、持续时间影响度曲线。

$$\begin{cases} I_U(U) = 0.5f_{MSI}(U) + 0.5F_U(U) \\ I_T(T) = 0.5f_{DSI}(T) + 0.5F_T(T) \end{cases} \quad (5)$$

经修正, $I_U(U), I_T(T)$ 曲线顾及了数据偏态性,在全区间具有一定区分度,且在样本分布较集中的区间变化率大。

1.1.3 基于暂降统计表的节点平均电压暂降影响度

文中以暂降统计表中持续时间与幅值的划分为基础,计算各区间的影响度,再求取节点平均电压暂降影响度指标。暂降统计表由 IEC 61000-2-8 推荐表格修改得到:(1) 将推荐表格在 1 s 内的暂降事件的持续时间区间对半细化,考虑到仿真故障时间,不统计 1 s 以上的暂降事件;(2) 根据暂降定义从 0.5 周波(文中为 0.01 s)开始统计暂降事件。

基于暂降统计表对幅值及持续时间的区间进行划分,据式(6)和式(7)计算各幅值区间和持续时间区间的影响度值:

$$I_U(a) = I_U(0.5 \times (\bar{U}(a) + \underline{U}(a))) \quad (6)$$

$$I_T(b) = I_T(0.5 \times (\bar{T}(b) + \underline{T}(b))) \quad (7)$$

式中: $I_U(a)$ 为暂降事件幅值落于暂降统计表的幅值第 a 区间的幅值影响度值; $I_T(b)$ 为暂降事件时间落于暂降统计表的持续时间第 b 区间的持续时间影响度值; $\bar{U}(a), \underline{U}(a)$ 分别为暂降统计表中幅值第 a 区间上、下阈值; $\bar{T}(b), \underline{T}(b)$ 分别为暂降统计表中持续时间第 b 区间上、下阈值。式(6)表示单次暂降事件幅值落在第 a 区间的幅值影响度值由 $I_U(U)$ 曲线在第 a 区间中点的取值决定,式(7)同理。

设暂降事件持续时间、幅值相互独立,参考复数 $a+jb$ 的形式,设幅值和持续时间的影响度分别为

复数的实、虚部。据式(8)求取暂降事件幅值处于暂降统计表第 a 区间、持续时间处于第 b 区间时的归一化电压暂降影响度值:

$$I(a, b) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_u^2(a) + I_T^2(b)} \quad (8)$$

通过样本(如仿真数据)统计节点各次电压暂降事件的暂降幅值、持续时间落于暂降统计表的区间,结合式(8)得到有统计意义的系统侧指标即节点平均电压暂降影响度指标。

$$I_{ave.i} = \frac{\sum_{a=1}^9 \sum_{b=1}^8 [N_{ab.i} \times I(a, b)]}{\sum_{a=1}^9 \sum_{b=1}^8 N_{ab.i}} \quad (9)$$

式中: $N_{ab.i}$ 为节点 i 持续时间属于第 b 区间,幅值属于第 a 区间的暂降事件次数; $I_{ave.i}$ 为节点 i 的平均电压暂降影响度指标。

1.2 电压暂降频度指标

电压暂降频度指标反映特定时间内某一节点发生电压暂降的次数,其表达式见式(10)^[12]。

$$F_{sag.i} = \frac{N_{sag.i}}{N_{total}} \quad (10)$$

式中: $N_{sag.i}$ 为节点 i 在特定时间内的暂降次数; N_{total} 为总暂降发生次数。可将其作为系统侧第 2 个指标,反映节点遭受暂降的频繁程度。

2 设备侧评价指标

设备侧评价需考察暂降所引起的敏感设备故障情况,采用节点综合故障率作为设备侧评价指标。节点综合故障率由节点综合电压耐受曲线(voltage tolerance curve, VTC)和能量损失公式求取,反映评估期内节点故障率的期望。

设备的故障率与敏感设备 VTC 相关。在宏观把握设备对电压暂降的响应时,有时不需要知道各用电设备响应,可以整体考察节点暂降情况^[13-14]。采用节点综合 VTC,兼顾电气节点各类型的设备容量比、数量比和敏感性差异,整体反馈节点负荷对暂降的敏感情况。若认为设备的容量比、数量比及敏感性权重相等,且无决策偏好,某节点综合 VTC 见式(11)。

$$\begin{cases} U^* = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \tilde{U}_i (N_i + C_i + S_i) \\ T^* = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \tilde{T}_i (N_i + C_i + S_i) \end{cases} \quad (11)$$

式中: \tilde{U}_i, \tilde{T}_i 分别为第 i 类设备的 VTC 纵、横坐标值(含 $\tilde{U}_{i,max}, \tilde{U}_{i,min}, \tilde{T}_{i,max}, \tilde{T}_{i,min}$); U^*, T^* 分别为综合

VTC 的纵、横坐标(包括 $U_{max}^*, U_{min}^*, T_{max}^*, T_{min}^*$); N_i, C_i 分别为第 i 类设备的数量比和容量比; n 为设备类别数; S_i 为第 i 类设备的平均敏感性权值。

设备平均敏感性权值的求取基于设备 VTC,见图 1。令 $T_{i,ave} = 0.5 \times (\tilde{T}_{i,max} + \tilde{T}_{i,min})$, $U_{i,ave} = 0.5 \times (\tilde{U}_{i,max} + \tilde{U}_{i,min})$ 。定义容限均值 $T_{i,ave}, U_{i,ave}$ 与 T 轴, $T=1$ s 围成的矩形面积为设备平均故障面积,对各设备的平均故障面积归一化作为设备平均敏感性权值。

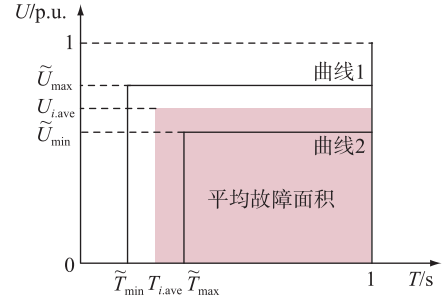


图1 敏感设备的平均敏感性权值计算
Fig.1 Calculation of average sensitivity weight of a sensitive equipment

设图 2 为某节点综合 VTC,红色网格区域和黑色竖线区域分别为正常工况区域和设备故障区域, A, B, C 为不确定区域,其意义参考文献[4]。

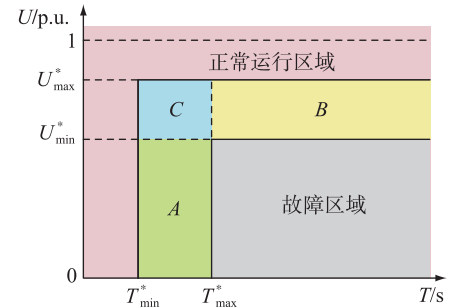


图2 节点综合电压耐受曲线

Fig.2 Comprehensive voltage tolerance curve of a node

设备故障可视为因暂降能量损失所致,根据能量损失公式 $E = (U_{max}^2 - U^2)T$,结合节点综合 VTC,构造故障率公式^[4]:

$$p = \begin{cases} 0 & (U, T) \in \text{正常运行区域} \\ \frac{T - T_{min}^*}{T_{max}^* - T_{min}^*} & (U, T) \in A \\ \frac{(U_{max}^*)^2 - U^2}{(U_{max}^*)^2 - (U_{min}^*)^2} & (U, T) \in B \\ \frac{(U_{max}^*)^2 - U^2}{(U_{max}^*)^2 - (U_{min}^*)^2} \frac{T - T_{min}^*}{T_{max}^* - T_{min}^*} & (U, T) \in C \\ 1 & (U, T) \in \text{故障区域} \end{cases} \quad (12)$$

设 n 次暂降互相独立, i 号节点综合故障率为:

$$P_{\text{com},i} = \sum_{v=1}^n p_{i,v} / n \quad (13)$$

式中: $p_{i,v}$ 为节点 i 遭受第 v 次暂降时的故障率。

3 综合评估方法

3.1 组合权重计算

节点暂降严重程度综合评价指标集为 $f = \{I_{\text{ave}}, F_{\text{sag}}, P_{\text{com}}\}$, 指标的统计结果可形成评价矩阵 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, $y_i = [a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}]^T$, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为节点数。赋权前, 将指标按式 (14) 归一化和同趋势化^[3]:

$$s_{ik} = \frac{\max_k a_{ik} - a_{ik}}{\max_k a_{ik} - \min_k a_{ik}} \quad k = 1, 2, 3 \quad (14)$$

式中: s_{ik} 为第 k 指标的同趋势归一化评价价值。

为兼顾专家主观经验和指标信息等客观因素, 采用主观的改进层次分析法和客观的熵权法计算指标权重^[15-16], 基于主、客观加权属性一致化原则组合赋权^[17]。设主、客观权重分别为 ω^* , ω' , 加权得组合权重, α, β 分别为组合权重中主、客观权重的系数:

$$\omega = \alpha\omega^* + \beta\omega' \quad (15)$$

设方案集为 $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_m\}$, $f_i = [s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}]^T$ 为指标集指标对 i 号节点暂降严重程度的评估结果。由式 (15) 可知, 方案 f_i 在第 j 项属性下主、客观权重的加权属性分别为 $s_{ij}\alpha\omega_j^*$, $s_{ij}\beta\omega_j'$, 偏离程度为:

$$d_i = \sum (s_{ij}\alpha\omega_j^* - s_{ij}\beta\omega_j')^2 \quad (16)$$

偏离程度越小, 方案 f_i 的主、客观决策信息越趋同, 越能在方案排序中体现主客观信息。建立优化模型:

$$\min D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\} \quad (17)$$

因各方案之间地位一致, 可按照等权线性加权将式 (17) 单目标化:

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{i=1}^m d_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 (s_{ij}\alpha\omega_j^* - s_{ij}\beta\omega_j')^2 \\ \text{s.t. } \alpha + \beta = 1 \\ \alpha, \beta \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

求解式 (18) 可得 α, β 取值。

3.2 采用基于马氏距离的 TOPSIS 法计算贴近度

传统 TOPSIS 模型利用欧氏距离量化贴近度, 未考虑指标间的相关性和冗余信息。决策体系的复杂性常导致评价指标间具有相关性, 传统 TOPSIS

模型决策结果可信度有所折扣。马氏距离引入随机变量的协方差测度指标间的相关性, 采用基于马氏距离的 TOPSIS 法能剥离指标相关性, 解决指标信息重叠、量纲差异等问题, 更具优势。

对方案集 $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_m\}$, 分别计算 f_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 与正理想解向量 v^+ 、负理想解向量 v^- 的马氏距离。

$$d(f_i, v^+) = \sqrt{(f_i - v^+)^T \Omega^T \Sigma^{-1} \Omega (f_i - v^+)} \quad (19)$$

$$d(f_i, v^-) = \sqrt{(f_i - v^-)^T \Omega^T \Sigma^{-1} \Omega (f_i - v^-)} \quad (20)$$

式中: $\Omega = \text{diag}(\sqrt{\omega_1}, \sqrt{\omega_2}, \sqrt{\omega_3})$; ω_i ($i = 1, 2, 3$) 为 3.1 节计算的权重; Σ 为样本协方差矩阵。

各方案的相对贴近度计算式为:

$$R_i = \frac{d(f_i, v^-)}{d(f_i, v^-) + d(f_i, v^+)} \quad (21)$$

式中: $R_i \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。 R_i 越大, 该方案越接近正理想解, 该节点暂降越不严重。评估流程如图 3 所示。

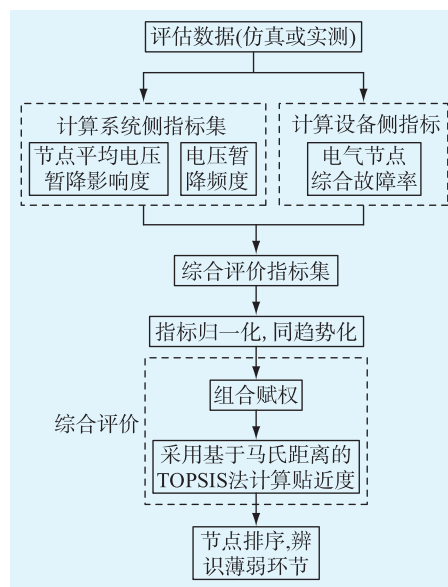


图3 评估流程

Fig.3 Flow chart of comprehensive evaluation

4 仿真算例

以 IEEE 30 节点系统为待评估电网, 系统模型见文献[18]。文中采用 MCS 仿真生成电压暂降样本数据, 故障线路、故障点位置、故障类型、故障触发时间及故障阻抗的 MCS 概率模型参考文献[5]。设自恢复性故障持续时间服从瑞利分布^[19], 保护动作时间服从正态分布^[20], 综合自恢复故障持续时间和保护动作时间可得暂降持续时长。可约定: (1)

若自恢复故障时间小于保护动作时间,保护不动作;(2)主保护先动作,主保护失效时后备保护动作;(3)同一线路任意点故障不考虑切除时间差异。MCS 抽样次数设置为 5 000 次。

电网故障率见文献[5],保护系统的故障清除时间见表1。为简化,设各节点下的负荷设备构成完全一致,各节点设备容量比、数量比如表2所示。VTC 阈值参考文献[13]。

表1 保护系统的故障清除时间

等级/ kV	主保护 动作时 间/ms	主保护动 作时间 偏差/ms	后备保 护清除 时间/ms	后备保护 清除时间 偏差/ms	主保护 失效概率
132	80	10.00	380	13.33	0.025
33	150	13.33	550	16.67	0.025

表2 设备容量和数量比

Table 2 Equipment capacity ratio and quantity ratio

设备	数量比	容量比
可编程逻辑控制器	0.15	0.15
交流调速器	0.25	0.27
个人计算机	0.18	0.20
交流继电器	0.27	0.25
不敏感负荷	0.15	0.13

4.1 指标集计算

4.1.1 节点平均电压暂降影响度计算

根据暂降统计表对 5 000 次仿真暂降事件进行统计,结果如图4所示。可见电压暂降幅值集中在 0.7 p.u.以上,持续时间集中在 0.25 s 内。

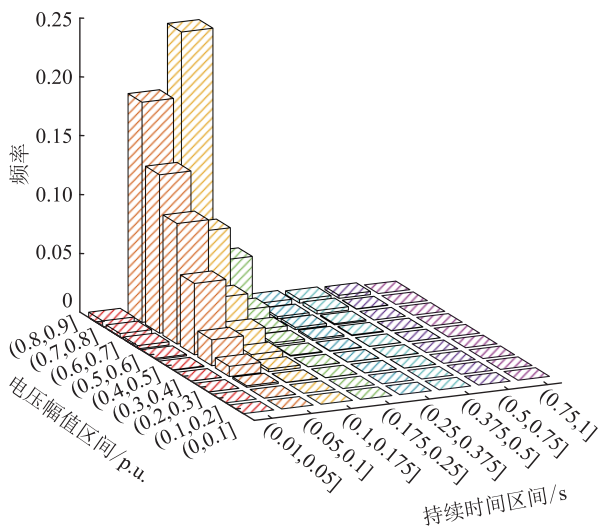


图4 电压暂降仿真事件统计

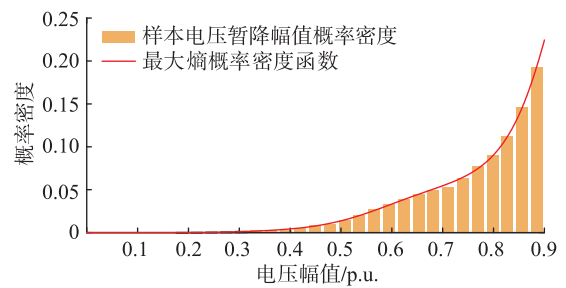
Fig.4 Statistical results of voltage sag simulation events

首先,采用 MCS 生成随机故障场景下暂降事件的小样本,采用最大熵原理求出小样本电压暂降的

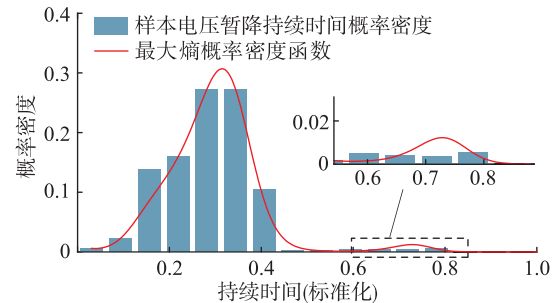
幅值及持续时间的概率密度模型。暂降统计表中持续时间区间长度不一,但就统计而言,各持续时间的划分区间地位相同,为免因区间长度差异造成误差,对持续时间区间标准化处理,即等长映射至 $[0,1]$ 区间,如表3所示,后续均使用持续时间标准化区间。求得电压暂降幅值及持续时间的最大熵概率密度函数如图5所示,再分别通过累积/互补累积计算得到持续时间/幅值的累积/互补累积分布函数。

表3 电压暂降持续时间标准化区间映射

持续时间/s	映射区间	持续时间/s	映射区间
$[0.01, 0.05]$	$[0, 0.125]$	$(0.25, 0.375]$	$(0.5, 0.625]$
$(0.05, 0.1]$	$(0.125, 0.25]$	$(0.375, 0.5]$	$(0.625, 0.75]$
$(0.1, 0.175]$	$(0.25, 0.375]$	$(0.5, 0.75]$	$(0.75, 0.875]$
$(0.175, 0.25]$	$(0.375, 0.5]$	$(0.75, 1]$	$(0.875, 1]$



(a) 电压暂降幅值概率密度及其最大熵概率密度函数



(b) 电压暂降持续时间概率密度及其最大熵概率密度函数

图5 电压暂降幅值及持续时间的最大熵概率密度函数

Fig.5 The maximum entropy probability density functions of voltage sag magnitude and duration

再求取电压暂降特征参数的影响度曲线。为使 MSI、DSI 对暂降统计表各区间均可量化,MSI 阈值取值为: $U_{\max} = 0.9$ p.u., $U_{\min} = 0$; DSI 阈值取值(标准化映射)为: $T_{\max} = 1$, $T_{\min} = 0$ (对应未标准化映射的 $T_{\max} = 1$ s, $T_{\min} = 0.01$ s)。根据 1.1 节计算电压暂降幅值、持续时间影响度曲线,如图6所示。可见 2 条影响度曲线光滑性良好,在定义域内区分度好。

基于暂降统计表的区间划分,归一化电压暂降影响度值关于各特征参数区间的示意图图7。图7

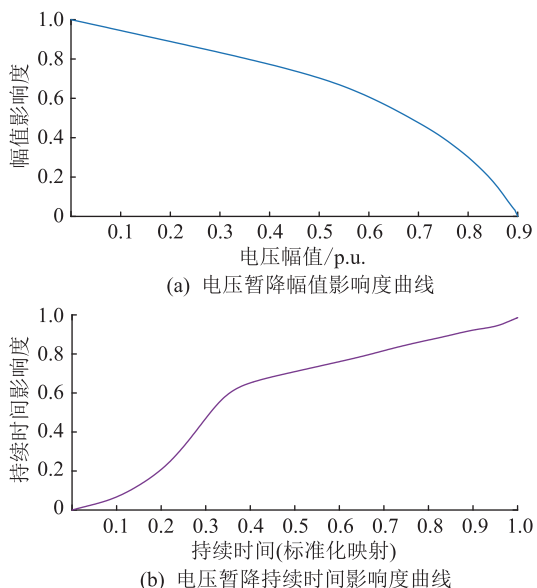


图6 电压暂降幅值影响度曲线与持续时间影响度曲线

Fig.6 The influence degree curves of voltage sag magnitude and duration

反映单次暂降事件幅值、持续时间分别处于某区间时的归一化电压暂降影响度值,可用于式(9)中 $I(a,b)$ 取值的查询。对5000次暂降仿真事件统计计算,可得各节点的平均电压暂降影响度,用于后续评估。

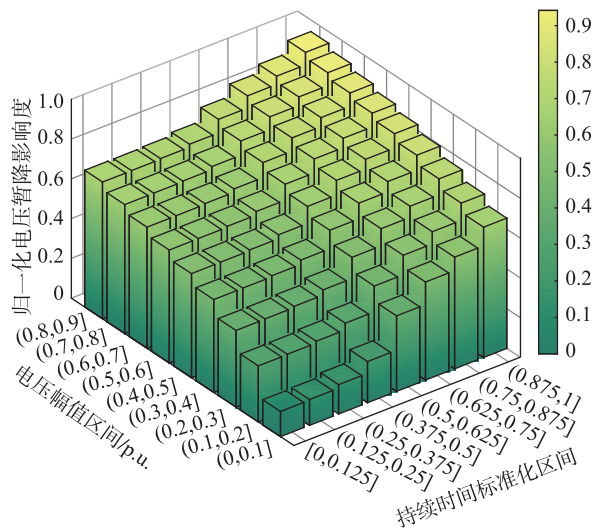


图7 归一化电压暂降影响度值

Fig.7 Normalized voltage sag influence values

4.1.2 电压暂降频度指标及节点综合故障率统计

通过5000次仿真结果可直观统计各节点的电压暂降频度指标。根据表2及2.1节可得节点综合VTC阈值为: $U_{max}^* = 0.77$ p.u., $U_{min}^* = 0.46$ p.u., $T_{max}^* = 260$ ms, $T_{min}^* = 65$ ms。在此基础上,结合能量损失计算待评估节点的综合故障率。

4.2 节点电压暂降严重程度评估与薄弱环节辨识

综合评价指标集 $f = \{I_{ave}, F_{sag}, P_{com}\}$ 的主观、客

观、组合权重分别为 $[0.311\ 25, 0.463\ 75, 0.225]$, $[0.276\ 85, 0.568\ 61, 0.154\ 54]$, $[0.290\ 4, 0.527\ 3, 0.182\ 3]$ 。3类权重均表明 F_{sag} 对评估影响最大, I_{ave} 次之。计算贴近度,得到节点排序如图8所示。

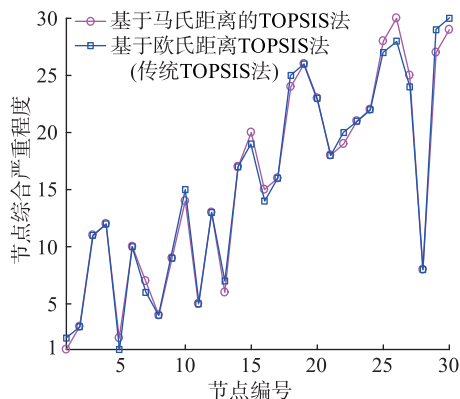


图8 IEEE 30节点系统节点暂降严重程度排序

Fig.8 Node sag severity ranking of IEEE 30-bus system

由图8可见,基于2种距离运算TOPSIS模型的排序结果趋势相似,但也存在差异:如基于马氏距离的TOPSIS法认为 $f_{30} > f_{26}$ ($A > B$ 表示A优于B),但传统TOPSIS法结论反之。因为基于能量损失的节点综合故障率与持续时间、幅值密切相关,故上述指标内联相关性。需要说明的是,因相关性较强的 I_{ave} 和 P_{com} 2个指标的赋权比重不是很大,故基于2种距离运算的TOPSIS法得到的节点排序区别不是很明显。但评价体系本应做到全面不冗余,基于马氏距离的TOPSIS法可剥离指标集间的相关性,避免冗余信息影响,应用于评估更妥当。

图8的排序结果反映节点对电压暂降的响应情况,可据此辨识电压暂降薄弱节点。1、2、5、8、11、13号节点排序值较小,贴近度高,暂降较不严重,上述节点与发电机或调相机有直接物理联系,发生电压暂降时,此类节点电压可由电源提供支撑,属暂降坚强节点。节点26、29、30等排序值较高,暂降情况较严重,属于暂降薄弱节点。上述薄弱节点均属于中压(33 kV电压等级)边缘节点,发生故障时,这类节点因与电源电气距离较远而无法得到有效电压支撑,将受较大影响,敏感设备应避免在此类节点定址。其余节点暂降严重程度介于坚强节点和薄弱节点之间,且存在低压节点暂降严重程度高于高压节点的现象。这是因为电压暂降往往从高压侧向中低压侧传播,一般不考虑中低压侧向高压侧的渗透,故中低压节点的电压暂降严重程度常高于拓扑位置相近的高压节点。

4.3 评估方法分析

为验证评价体系及指标的合理性,采用模糊 C 均值聚类算法^[21],将 30 个节点在若干评价指标得到的评估结果进行等级划分,划分等级借鉴配电网风险评估的级别分为 5 级。聚类等级越高,对应节点的指标越不乐观,节点电压暂降严重程度越高。不同指标的聚类结果如图 9 所示。

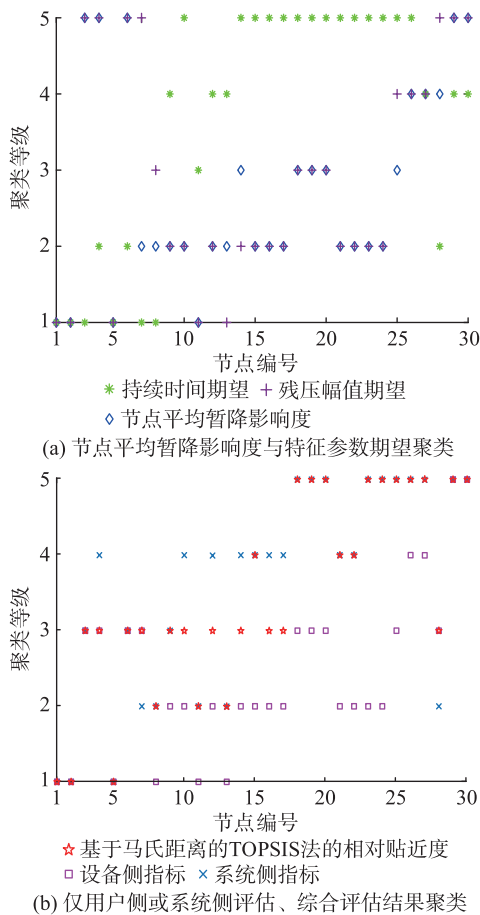


图 9 不同指标的聚类结果

Fig.9 Clustering results of various indices

节点平均电压暂降影响度与特征参数期望的聚类结果如图 9(a) 所示。可以看出,节点平均电压暂降影响度指标的评估结果聚类等级趋于各特征参数评估结果聚类等级的中间位置,且与暂降幅值期望的聚类结果较贴近,一定程度平衡了单一特征参数评估结果的差异性。

图 9(b) 展示了文中方法的评估结果、设备侧评估结果及系统侧评估结果的聚类情况,系统侧指标由 I_{ave} 和 F_{sag} 依循组合权重的赋权比例合成。聚类结果可反映节点暂降薄弱性。进一步发现,仅用系统侧或设备侧指标进行评估易致评估不当;仅用系统侧指标评估节点 4 和节点 28 分别可能造成过评估和欠评估;仅用设备侧指标评估 15~17 号节点会造成欠评估。因系统侧指标权重在综合权重中比

例较高,基于文中评估方法的聚类结果与系统侧指标评估聚类结果较接近。综上所述,采用文中综合评价方法进行评估,兼顾系统和设备侧对暂降的响应情况,可平衡单一供、需侧评估结果的差异性。

5 结语

文中提出了兼顾系统和设备侧的节点电压暂降严重程度的综合评估方法,采用 MCS 对 IEEE 30 节点系统仿真,并验证了评估效果。

(1) 基于最大熵原理,将累积/互补累积分布函数引入系统侧评估,根据暂降统计表、特征参数严重性函数、累积/互补累积分布函数构建节点平均电压暂降影响度指标,兼顾多个暂降特征参数,并根据特征参数区间统计归纳,计算简便。

(2) 综合考虑节点用电设备数量、容量及设备敏感性权值建立节点综合 VTC,提出基于平均故障面积的用电设备敏感性权值的计算方式。从宏观角度反映节点负荷对电压暂降的影响敏感度。

(3) 采用基于马氏距离的 TOPSIS 法代替传统方法计算贴程度,结果表明基于马氏距离的 TOPSIS 法能剔除指标相关性的不利影响,说明基于马氏距离的 TOPSIS 法比传统 TOPSIS 模型优越。

(4) 采用模糊 C 均值聚类算法对节点评估结果进行分级,结果显示,采用文中方法进行评估,在兼顾系统侧与设备侧暂降指标的基础上,克服了单一指标评估片面性,提高了评估判断的准确性。

参考文献:

- [1] 刘旭娜,肖先勇,汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):644-658. LIU Xuna, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage sag severity and its measure and uncertainty evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 644-658.
- [2] 杨家莉,刘书铭,徐永海,等. 基于熵权法的电压暂降严重程度综合评估方法[J]. 现代电力,2017,34(4):40-49. YANG Jiali, LIU Shuming, XU Yonghai, et al. Comprehensive evaluation method of voltage sag severity based on entropy coefficient method[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4): 40-49.
- [3] 杨家莉,徐永海. 基于组合赋权与 TOPSIS 模型的节点电压暂降严重程度综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 88-95. YANG Jiali, XU Yonghai. Comprehensive evaluation method of node voltage sag severity based on TOPSIS model and combination weights[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 88-95.
- [4] 周翔,王丰华,黄荣辉,等. 考虑系统与敏感设备的变电站电压暂降综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1940-1946. ZHOU Xiang, WANG Fenghua, HUANG Ronghui, et al. Assess-

- ment of voltage sags in substations based on power system and equipment sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(8):1940-1946.
- [5] 易杨,张尧,钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术,2008,32(6):57-60,75.
YI Yang, ZHANG Yao, ZHONG Qing. Assessment of voltage sags in large power consumer based on Monte Carlo method[J]. Power System Technology, 2008,32(6):57-60,75.
- [6] 刘鹏,郑景文. 基于 EMTDC 的电压暂降概率评估的仿真分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(3):429-434.
LIU Peng, ZHENG Jingwen. Simulation analysis of probabilistic assessment of voltage sags based on EMTDC[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016,49(3):429-434.
- [7] 曾江,蔡东阳. 基于组合权重的蒙特卡洛电压暂降评估方法[J]. 电网技术,2016,40(5):1469-1475.
ZENG Jiang, CAI Dongyang. A Monte Carlo assessment method of voltage sags based on combination weight[J]. Power System Technology, 2016,40(5):1469-1475.
- [8] 韦鹏飞. 电压暂降随机预估及其评估方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.
WEI Pengfei. Research on voltage sag stochastic prediction and evaluation method[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2018.
- [9] 肖先勇,王希宝,薛丽丽,等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法[J]. 电网技术,2007,31(22):30-33.
XIAO Xianyong, WANG Xibao, XUE Lili, et al. A method to stochastically estimate voltage sag sensitivity of sensitive equipments[J]. Power System Technology, 2007,31(22):30-33.
- [10] 徐永海,李晨懿,汪坤,等. 低压变频器对电网电压暂降耐受特性及兼容性研究[J]. 电工技术学报,2019,34(10):2216-2229.
XU Yonghai, LI Chenyi, WANG Kun, et al. Compatibility between low voltage variable-frequency drives and voltage sags in distribution systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(10):2216-2229.
- [11] 林焱,吴丹岳,章雪萌,等. 电压暂降指标的探讨[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(3):147-152.
LIN Yan, WU Danyue, ZHANG Xuemeng, et al. An exploration on index about voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2010,38(3):147-152.
- [12] 钟庆,林凌雪,易杨,等. 电压暂降评估指标(I):电网薄弱环节指标[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(1):110-114.
ZHONG Qing, LIN Lingxue, YI Yang, et al. Study on the evaluation index of voltage sags (I): unsubstantial location index[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,24(1):110-114.
- [13] 夏杰. 配电网电压暂降扰动源辨识与供电可靠性综合评估方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
XIA Jie. Research on method of distribution network voltage sag disturbance source identification and power supply reliability comprehensive evaluation[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2019.
- [14] 冯澎湃,肖楚鹏,郭松,等. 考虑含多敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(11):36-44.
FENG Pengpai, XIAO Chupeng, GUO Song, et al. Voltage sag vulnerable area identification of a distribution grid with multiple sensitive loads[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(11):36-44.
- [15] 李娜娜,何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术,2009,33(6):55-61.
LI Nana, HE Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight[J]. Power System Technology, 2009,33(6):55-61.
- [16] 张军,浦天宇. 多层次电压暂降评价方法研究[J]. 电力工程技术,2018,37(6):49-54.
ZHANG Jun, PU Tianyu. Multi-level evaluation method of voltage sag[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018,37(6):49-54.
- [17] 王中兴,张绍林,刘雁. 基于主客观加权属性值一致化的组合赋权法[J]. 广西科学,2007,14(3):247-249.
WANG Zhongxing, ZHANG Shaolin, LIU Yan. An synthetic approach to determine weights based on the identity of subjective and objective weighted attribute value[J]. Guangxi Sciences, 2007,14(3):247-249.
- [18] PARK C H, JANG G. Stochastic estimation of voltage sags in a large meshed network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007,22(3):1655-1664.
- [19] 崔鑫. 电压暂降严重程度综合评估方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
CUI Xin. Research on comprehensive evaluation method of severity of voltage sag[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2019.
- [20] 刘少辉,李新,孟泽文,等. 基于调度自动化系统的断路器动作特性研究及其状态评估[J]. 高压电器,2019,55(6):31-37.
LIU Shaohui, LI Xin, MENG Zewen, et al. Analysis and status assessment of circuit breaker's operation characteristics based on power dispatching automation system[J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(6):31-37.
- [21] 林顺富,谢潮,李东东,等. 基于灰色关联与模糊聚类分析的负荷预处理方法[J]. 电测与仪表,2017,54(11):36-42.
LIN Shunfu, XIE Chao, LI Dongdong, et al. Load preprocessing method based on grey relational analysis and fuzzy clustering[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(11):36-42.

作者简介:



邹泽宇

邹泽宇(1995),男,硕士,研究方向为电能质量评估治理(E-mail:scutep_zzyu@vip.163.com);

刘文泽(1973),男,博士,硕士生导师,研究方向为电能质量、设备监测。

Adaptability evaluation of instantaneous load on DC distribution network in offshore oil platform

LI Changming¹, YAN Honghua²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Green Power Technology Co., Ltd., Jinan 250003, China)

Abstract: Motors comprise the major electricity loads in offshore oil projects and motor starting may lead to instantaneous impacts. The impacts probably deteriorates system performance if DC distribution networks are employed. Based on the idea of analytical expression, the impacts of such loads are analyzed. Firstly, by simplifying the differential algebraic equations of the system, the analytical expression of DC bus voltage is derived. Then the impacts of instantaneous active load on DC distribution network in offshore oil platform are researched. Finally, a four terminal DC distribution network model based on the PSCAD/EMTDC platform is built and different instantaneous loads are set for simulation. The DC bus voltage under different instantaneous loads is analyzed. The correctness of the analytical expression is verified. The results show that the analytical expression effectively reflects the adaptability of instantaneous load on DC distribution network in offshore oil platform.

Keywords: DC distribution network; adaptability evaluation; instantaneous load; DC bus voltage; analytical expression; offshore oil platform

(编辑 陆海霞)

(上接第 70 页)

Comprehensive evaluation of node voltage sag based on power system and equipment sensitivity analysis

ZOU Zeyu, LIU Wenze

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the demand of evaluating voltage sag severity considering both electric utilities and users, an evaluation method based on power system and equipment sensitivity analysis is proposed. Initially, based on the focus of voltage sag assessment on system and user-side, the comprehensive attribute set is formed. The system-side index set is constructed with the average influence degree index as well as the voltage sag frequency index, further forms a comprehensive evaluation index set with the failure rate index. The average influence degree index is formed based on cumulative distribution density functions, statistical table and severity indices. The failure rate index is formed based on the comprehensive voltage tolerance curve and energy loss calculation. Then, the indices are weighted and Mahalanobis distance-based technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) is used to reflect the voltage sag severity levels. The simulation model of the IEEE 30-bus system is built so that the proposed method could be used to evaluate the voltage sag severity. The result could help find out the nodes which suffer from greater impacts of voltage sag events. Finally, the fuzzy C-clustering method is used to analyze the evaluation results. It is verified that the proposed evaluation method is helpful to overcome the one-sided problem of single index evaluation.

Keywords: voltage sag; severity assessment; Monte Carlo simulation; Mahalanobis distance-based technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); combination weights; fuzzy C-clustering method

(编辑 钱悦)