

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200226

# 考虑不同敏感设备耐受特性的用户侧电压暂降 严重程度区间评估方法

栾乐, 马智远, 莫文雄, 许中, 周凯, 郭倩雯

(广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510420)

**摘要:** 电压暂降严重程度指标是定量评估节点暂降水平的基础。针对现有评估方法未考虑敏感设备耐受能力不确定性与差异性的问题, 提出了一种改进的用户侧电压暂降严重程度区间评估方法。首先, 阐述了现有评估方法无法反映不同敏感设备耐受能力不确定性的问题。为刻画耐受能力的不确定性, 基于典型敏感设备的不确定区域, 采用区间数理论对严重程度指标计算方法进行修正。针对传统区间评估方法运算结果过于保守的问题, 基于节点负荷占比波动范围确定区间权重, 采用仿射算法计算得到用户侧综合严重程度区间指标。通过测量函数进行节点排序。采用 IEEE 30 节点系统进行仿真验证。结果表明所得区间指标能够通过区间范围与上下边界, 刻画配电网节点用户侧的综合暂降水平与动态耐受特性。

**关键词:** 电压暂降; 耐受特性; 严重程度; 仿射算法; 区间评估

## Voltage sag severity interval assessment method for user side considering tolerance characteristics of equipment of differing sensitivity

LUAN Le, MA Zhiyuan, MO Wenxiong, XU Zhong, ZHOU Kai, GUO Qianwen

(Electric Power Test Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

**Abstract:** A voltage sag severity index is the basis for sag assessment. Because the existing method does not consider the uncertainty and difference of the tolerance characteristics, this paper proposes an improved voltage sag severity interval assessment method for the user side. First, this paper explains the existing method and points out that it cannot reflect the uncertainty of the tolerance characteristics. To characterize the uncertainty, it uses interval number theory to modify the calculation method based on the uncertainty regions of typical sensitive equipment. Because the results of the traditional interval assessment method are conservative, it determines the interval weight and uses an affine algorithm to calculate the comprehensive severity interval index. Finally, it uses the measurement function to determine the site ranking. The IEEE 30-bus system is used for verification. The results show that the interval index can characterize the comprehensive sag level and dynamic tolerance characteristics of the user side.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GZHKJXM20170141).

**Key words:** voltage sag; tolerance characteristics; severity; affine algorithm; interval assessment

## 0 引言

电压暂降是目前最为主要的电能质量问题之一, 其给敏感用户带来了巨大的经济损失, 并对用户用电满意度与电力营商环境造成了负面影响<sup>[1-3]</sup>。

对暂降事件严重程度的定量描述是解决该问题的基础, 而准确分析用户侧所遭受的影响是解决该问题的难点<sup>[4]</sup>。因此, 提出一种考虑用户侧耐受特性的电压暂降严重程度刻画与评估方法, 已成为目前电能质量研究领域的重要课题。

目前对电网侧电压暂降严重程度评估的研究, 主要采用的是指标方法和概率方法<sup>[5]</sup>。IEEE Std 1564-2014 标准所提电压暂降严重程度指标虽已得

基金项目: 中国南方电网有限公司科技项目资助(GZHKJXM20170141)

到广泛采纳, 但其计算方法未考虑用户侧差异<sup>[6]</sup>。文献[7]通过幅值和持续时间两个独立指标进行刻画, 采用二者乘积所得的综合指标进行评估, 避免了敏感设备耐受能力的不确定性。文献[8]在现有耐受曲线的基础上建立了不同暂降类型的影响度函数, 实现了对电压暂降更为细化精确的严重程度评估。文献[9-10]针对敏感设备耐受曲线的不确定区域, 基于最大熵方法建立了电压暂降故障水平的概率评估模型, 但该模型并未考虑交流接触器(AC Contactor, ACC)的耐受特性。文献[11]详细讨论了ACC在考虑波形点特征下的耐受曲线不确定区域, 利用不同敏感特性所对应的概率分布函数, 对电压暂降造成的故障概率水平进行评估。文献[12]将暂降特征与设备耐受能力不确定区域相结合, 采用隶属函数与云模型建立了综合指标评估方法, 但其计算过程较为复杂, 且未给出故障状态对应隶属度函数的详细参数。此外, 现有方法均未考虑不同敏感设备耐受能力的不确定性, 所得评估结果无法反映出用户侧真实的电压暂降水平。

针对上述问题, 本文提出一种改进的用户侧电压暂降严重程度区间评估方法。本文首先分析了现有评估方法无法反映出耐受能力不确定性的问题。由此, 基于四种典型敏感设备耐受特性的不确定区域, 本文采用区间数理论对严重程度指标进行修正, 以此实现对耐受能力的不确定性评估。为评估接入了不同敏感设备的配电网节点用户侧电压暂降水平, 基于敏感设备负荷占比的波动范围确定相应的区间权重, 采用仿射算法计算得到综合严重程度区间指标, 克服了传统区间运算过度保守的问题, 从而反映出更加准确的用户侧动态综合耐受特性。最后, 通过所建立的区间指标测量函数序关系确定方法, 对不同电压暂降严重程度的节点进行排序, 以此识别配网系统中的脆弱节点。通过IEEE 30节点系统进行仿真验证, 结果表明所提严重程度区间评估方法能够定量刻画敏感设备耐受能力的不确定性大小, 反映配网节点用户侧更加真实的暂降水平。本文方法应用于配电网中能够为敏感用户选择合适的接入点提供依据, 有效提升用户用电满意度并以此改善电力营商环境。

## 1 现有评估方法及其存在的问题

### 1.1 电压暂降严重程度指标计算方法

在IEEE Std 1564-2014标准中, 电压暂降严重程度指标的定义为: 基于电压暂降幅值与持续时间特征, 在相应耐受曲线下计算得到的, 用于定量刻画电压暂降事件对用户或设备所造成影响程度的指

标。其计算公式为<sup>[6]</sup>

$$S = \frac{1-V}{1-V_{\text{curve}}(T)} \quad (1)$$

式中:  $V$  为暂降幅值;  $T$  为暂降持续时间;  $V_{\text{curve}}(T)$  为耐受曲线在持续时间  $T$  范围内所对应的幅值。

耐受曲线反映了敏感设备对电压暂降事件的耐受能力临界特性, 现有研究大多采用 SEMI F47 曲线, 如图 1 所示<sup>[13]</sup>。

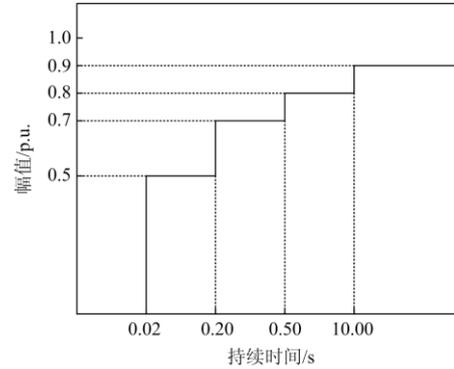


图 1 SEMI F47 耐受曲线

Fig. 1 SEMI F47 tolerance curve

结合 SEMI F47 曲线与式(1)可以看出: 当暂降事件刚好落于曲线上时, 严重程度  $S=1$ ; 若事件位于曲线上方, 则严重程度  $S<1$ , 暂降事件不属于严重范畴; 若事件位于曲线下方, 则严重程度  $S>1$ , 暂降事件属于严重的范畴, 敏感设备将会受到影响进而引发不正常的工作状态甚至造成故障<sup>[14]</sup>。

根据严重程度指标值在幅值-持续时间平面上的分布规律可知: 严重程度指标的实质为电压暂降事件所对应非正常状态与耐受曲线所反映的敏感设备故障临界状态之间的偏离程度。幅值越小, 持续时间越长, 则暂降事件偏离正常状态的程度就越大, 严重程度指标值也就越大, 如图 2 所示。

### 1.2 现有评估方法存在的问题

通过现有研究的实验数据表明, 电压暂降事件下敏感设备的耐受边界是一个不确定性区域。当电压暂降事件位于该不确定区域上下边界以外时, 敏感设备为正常运行或完全故障的确定状态; 而当事件位于该区域以内时, 敏感设备的状态将呈现出不确定性。针对某类型敏感设备电压暂降耐受特性的实验测试结果如图 3 所示<sup>[15]</sup>。

此外, 在同一电压暂降事件下, 由于结构、功能以及控制方法的不同, 不同类型敏感设备的耐受能力也具有很大差异<sup>[16]</sup>。在这种情况下, 仅通过单一耐受曲线计算得到的严重程度指标, 便无法反映出实际配电网节点的接入负荷差异。

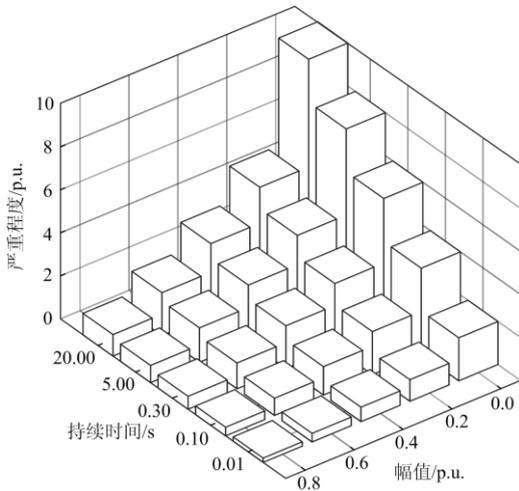


图2 严重程度指标值在幅值-持续时间平面上的分布示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of distribution of severity index values on the magnitude-duration plane

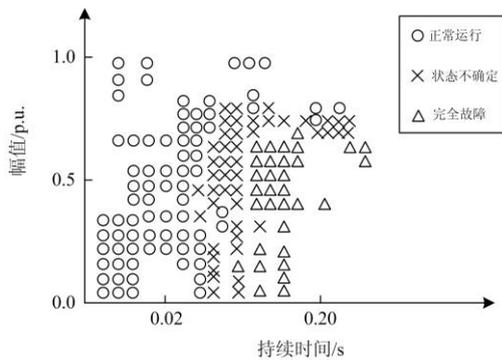


图3 敏感设备耐受特性的实验测试结果示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of experimental test results of sensitive equipments tolerance characteristics

综上所述, 现有评估方法存在不能刻画敏感设备耐受能力不确定性与差异性的问题, 所得评估结果无法反映出用户侧的真实电压暂降水平。因此, 本文在考虑不同敏感设备不确定区域的基础之上, 提出一种改进的严重程度区间指标计算方法, 以对现有评估方法所存在的不足进行弥补。

## 2 敏感设备暂降严重程度区间指标

### 2.1 典型敏感设备的不确定区域

在实际生产应用中, 典型敏感设备包括可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、交流调速器(Adjustable Speed Driver, ASD)、个人计算机(Personal Computer, PC)和ACC这四种类型<sup>[17]</sup>, 在考虑波形点(Point on Wave, POW)与相位跳变(Phase Angle Jump, PAJ)等多维电压暂降特征的前

提下, 测试得到以上四种典型敏感设备耐受特性的不确定区域<sup>[11,17-19]</sup>, 如图4所示。

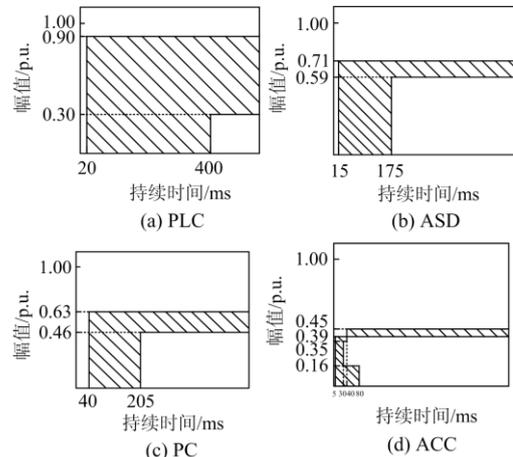


图4 典型敏感设备的不确定区域

Fig. 4 Uncertainty regions of typical sensitive equipments

其中, PLC、ASD、PC 三种敏感设备的不确定区域均为规则矩形, 而 ACC 则为边界较曲折的非矩形不确定区域, 因其是由多段矩形对实际测试结果中较为复杂的曲线边界进行拟合所得<sup>[18]</sup>。

### 2.2 改进的严重程度区间指标计算方法

针对四种典型敏感设备的不确定区域, 在考虑不同持续时间范围内幅值区间 $[V]_i$ 分布差异的情况下, 将不确定区域划分为多个子区域, 如图5所示。

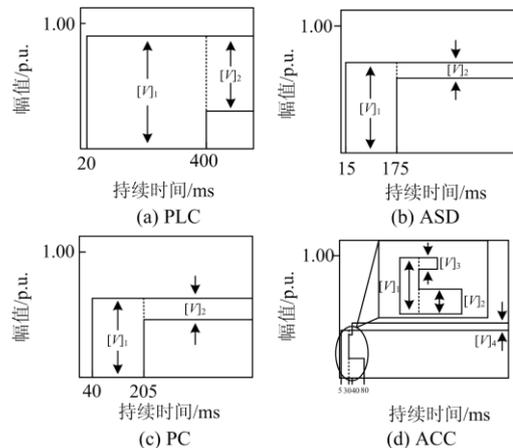


图5 典型敏感设备不确定区域的幅值区间划分

Fig. 5 Magnitude interval division of typical sensitive equipments uncertainty regions

为反映敏感设备在电压暂降事件下的实际耐受特性, 本文采用区间数理论刻画耐受能力的不确定性<sup>[21]</sup>, 将现有严重程度指标计算公式中的耐受曲线幅值  $V_{curve}(T)$  修正为幅值区间  $[V](T) = [V_{region}^-(T), V_{region}^+(T)]$ , 由此可将式(1)改写为

$$[S] = \frac{1-V}{1-[V_{\text{region}}^-(T), V_{\text{region}}^+(T)]} \quad (2)$$

式中,  $V_{\text{region}}^-(T)$  和  $V_{\text{region}}^+(T)$  分别为幅值区间数  $[V](T)$  的上下边界。

对于两个区间数  $[a]=[a^-, a^+]$  和  $[b]=[b^-, b^+]$ , 其相应的运算法则为

$$[a]+[b]=[a^-+b^-, a^++b^+] \quad (3)$$

$$[a]-[b]=[a^- - b^+, a^+ - b^-] \quad (4)$$

$$[a] \cdot [b] = [\min(a^-b^-, a^-b^+, a^+b^-, a^+b^+), \max(a^-b^-, a^-b^+, a^+b^-, a^+b^+)] \quad (5)$$

$$[a]/[b] = [a^-, a^+] \times [1/b^+, 1/b^-] \quad (6)$$

若考虑一般点值数为上下边界相等的特殊区间数, 基于式(2)一式(6)即可得到严重程度区间指标  $[S]$ , 如式(7)所示。

$$[S] = \left[ \frac{1-V}{1-V_{\text{region}}^-(T)}, \frac{1-V}{1-V_{\text{region}}^+(T)} \right] \quad (7)$$

其中, 针对 ACC 不规则的不确定区域, 当电压暂降事件对应了两个幅值区间子区域时, 将二者指标计算结果均值作为最终区间指标  $[S]$ 。

通过严重程度区间指标  $[S]$  的区间范围, 能够定量地反映出相应敏感设备耐受能力的不确定性大小; 而通过  $[S]$  的上下边界, 则能够定量地刻画电压暂降对该设备造成影响的严重程度大小。

### 3 节点用户侧综合严重程度评估

#### 3.1 考虑区间权重的仿射算法综合评估

在实际配电网中, 节点用户侧通常接入了多种不同类型的敏感设备负荷, 因此当系统发生电压暂降事件时, 需要综合考虑不同敏感设备的耐受特性, 以实现对用户侧电压暂降水平的综合评估。

为评估节点用户侧的电压暂降综合严重程度, 本文提出一种基于节点负荷占比的区间赋权方法。在节点仅接入四种典型敏感设备的情况下, 将一定监测时间范围内四种负荷占比的波动范围作为其相应的区间权重。设在一个月的监测时间范围内, 节点某类型敏感设备负荷占比的变化曲线如图 6 所示, 则可取曲线波动范围的最大值和最小值, 作为该负荷的区间权重边界值, 如式(8)所示。

$$[w] = [r_1\%, r_2\%] = [w^-, w^+] \quad (8)$$

传统区间运算方法计算结果过于保守, 所得区间往往比实际范围大很多<sup>[22]</sup>。因此, 本文基于四种典型敏感设备的独立严重程度区间指标  $[S]_i$  与相应

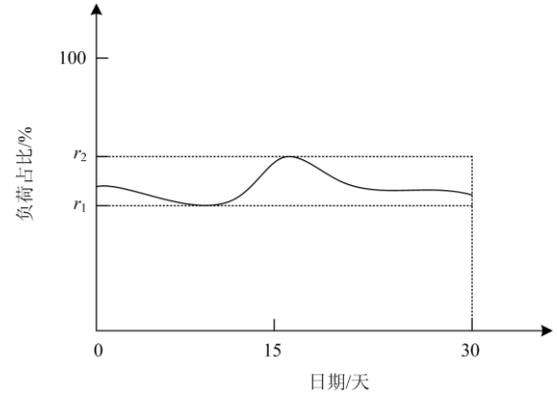


图 6 节点某类型敏感设备负荷占比变化规律示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a certain type of sensitive equipment load variation

的区间权重  $[w]_i (1 \leq i \leq 4)$ , 将区间数转化为仿射数, 如式(9)和式(10)所示。

$$\langle x \rangle = m_{[x]} + r_{[x]} \varepsilon \quad (9)$$

$$\begin{cases} m_{[x]} = \frac{x^+ + x^-}{2} \\ r_{[x]} = \frac{x^+ - x^-}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $m_{[x]}$  和  $r_{[x]}$  分别为区间数  $[x]$  的区间中点和区间半径;  $\varepsilon \in [-1, 1]$  为仿射数的噪声元。

对于仿射数  $\langle x \rangle$  和  $\langle y \rangle$ , 采用仿射乘积运算得到的区间数  $[z] = [z^-, z^+]$  可表示为

$$[z] = \langle x \rangle \langle y \rangle = (m_{[x]} + r_{[x]} \varepsilon)(m_{[y]} + r_{[y]} \varepsilon) \quad (11)$$

$$\begin{cases} z^- = \min(m_{[x]}m_{[y]} + m_{[x]}r_{[y]} \varepsilon + m_{[y]}r_{[x]} \varepsilon + r_{[x]}r_{[y]} \varepsilon^2) \\ z^+ = \max(m_{[x]}m_{[y]} + m_{[x]}r_{[y]} \varepsilon + m_{[y]}r_{[x]} \varepsilon + r_{[x]}r_{[y]} \varepsilon^2) \\ \text{s.t. } \varepsilon \in [-1, 1] \end{cases} \quad (12)$$

针对上式, 可通过有约束条件下的非线性规划方法, 求解得到仿射数乘积的区间数结果<sup>[23]</sup>。

基于式(7)一式(12), 通过加权方法计算得到节点用户侧综合严重程度区间指标  $[S]_c$ , 实现对配电网用户侧综合暂降水平与动态耐受特性的定量刻画。

$$[S]_c = \sum_{i=1}^4 \langle w \rangle_i \langle S \rangle_i \quad (13)$$

#### 3.2 基于测量函数的节点严重程度排序

在得到配网系统中各个节点的用户侧综合严重程度区间指标  $[S]_c$  之后, 为了对各个节点的实际暂降水平进行定量比较并排序, 本文采用测量函数  $\mu$  来衡量各区间数之间的序关系<sup>[24]</sup>。设  $[x]$  和  $[y]$  为区间数, 则测量函数  $\mu([x], [y])$  可定义为

$$\mu([x],[y]) = \begin{cases} m_{[y]} - m_{[x]} + 2\text{sgn}(m_{[y]} - m_{[x]}) \\ (r_{[y]} + r_{[x]} = 0) \\ \frac{m_{[y]} - m_{[x]} + \text{sgn}(m_{[y]} - m_{[x]})}{r_{[y]} + r_{[x]}} \\ (m_{[y]} \neq m_{[x]}, r_{[y]} + r_{[x]} \neq 0) \\ (r_{[y]} - r_{[x]}) / \max(r_{[x]}, r_{[y]}) \\ (m_{[y]} = m_{[x]}, r_{[y]} + r_{[x]} \neq 0) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (15)$$

基于式(14)和式(15)的计算结果,可根据以下条件确定区间数[x]和[y]之间的序关系,由此对各个节点用户侧综合电压暂降水平进行排序:

- 1) 若  $\mu([x],[y]) = 0$ , 则  $[x] = [y]$ ;
- 2) 若  $\mu([x],[y]) > 0$ , 则  $[x] < [y]$ ;
- 3) 若  $\mu([x],[y]) < 0$ , 则  $[x] > [y]$ 。

本文方法应用于配电网中,能够基于系统内各个节点的监测信息,刻画不同节点在电压暂降事件下的综合暂降水平与动态耐受特性,以此识别系统内的脆弱节点。本文方法所得评估结果能够为敏感用户选择合适的接入点提供依据,有效提升用户用电满意度,进而在一定程度上改善电力营商环境。

本文方法总体流程如图7所示。

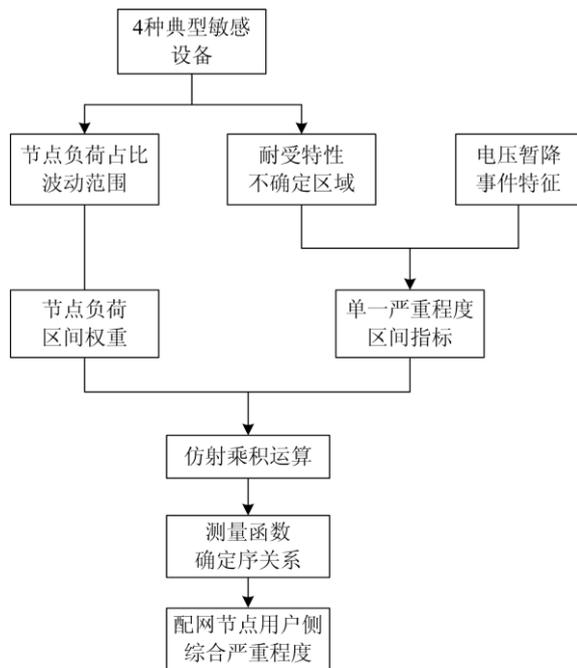


图7 本文方法总体流程图

Fig. 7 Flow chart of the proposed method

需要说明的是,本文所提方法适用于在现有 IEEE Std 1564-2014 指标标准的定义下,配电网中敏感用户所遭受电压暂降事件的严重程度评估。

#### 4 仿真验证

本文通过 Matlab 平台,基于如图8所示的 IEEE 30 节点配电网<sup>[25]</sup>测试系统,采用故障概率模型生成电压暂降事件<sup>[26]</sup>,由此得到系统内各个节点的电压暂降幅值与持续时间仿真数据,如表1所示。

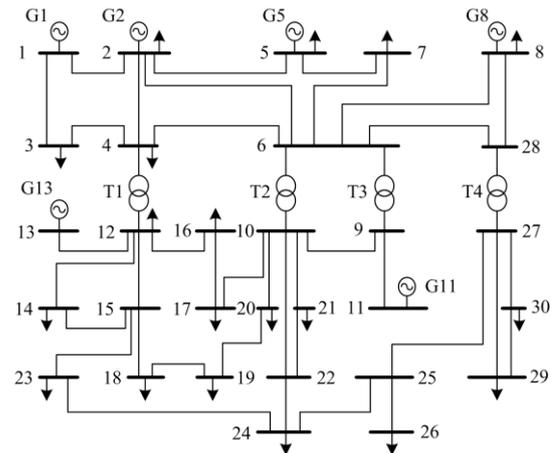


图8 IEEE 30 节点配电网测试系统

Fig. 8 IEEE 30-bus distribution network test system

表1 各个节点的电压暂降幅值与持续时间仿真数据

节点编号	幅值 V/p.u.	节点编号	幅值 V/p.u.
1	0.750 6	16	0.658 5
2	0.743 9	17	0.633 3
3	0.711 7	18	0.581 9
4	0.700 4	19	0.574 9
5	0.805 4	20	0.580 2
6	0.704 5	21	0.604 5
7	0.677 1	22	0.604 4
8	0.713 4	23	0.601 7
9	0.722 9	24	0.596 5
10	0.633 7	25	0.646 2
11	0.837 6	26	0.633 5
12	0.695 8	27	0.680 3
13	0.804 3	28	0.714 3
14	0.650 4	29	0.660 7
15	0.628 2	30	0.654 7
持续时间 T/s		0.102	

##### 4.1 典型敏感设备单一严重程度区间指标

假设在 IEEE 30 节点配电网测试系统中,各个节点均接入了四种典型敏感设备负荷。基于表1所得电压暂降幅值与持续时间仿真数据,根据图5所

示的四种典型敏感设备不确定区域幅值区间的划分结果, 以及式(7)所建立的严重程度区间指标计算公

式, 计算得到各节点下不同敏感设备的单一严重程度区间指标 $[S]_i$ 值, 结果如表 2 所示。

表 2 单一敏感设备严重程度区间指标

Table 2 Severity interval index of a certain type of sensitive equipment

节点 编号	单一严重程度区间指标 $[S]_i$ /p.u.				节点 编号	单一严重程度区间指标 $[S]_i$ /p.u.			
	PLC	ASD	PC	ACC		PLC	ASD	PC	ACC
1	[0.25,2.49]	[0.25,0.86]	[0.25,0.67]	[0.41,0.45]	16	[0.34,3.42]	[0.34,1.18]	[0.34,0.92]	[0.56,0.62]
2	[0.26,2.56]	[0.26,0.88]	[0.26,0.69]	[0.42,0.47]	17	[0.37,3.67]	[0.37,1.26]	[0.37,0.99]	[0.60,0.67]
3	[0.29,2.88]	[0.29,0.99]	[0.29,0.78]	[0.47,0.52]	18	[0.42,4.18]	[0.42,1.44]	[0.42,1.13]	[0.69,0.76]
4	[0.30,3.00]	[0.30,1.03]	[0.30,0.81]	[0.49,0.54]	19	[0.43,4.25]	[0.43,1.47]	[0.43,1.15]	[0.70,0.77]
5	[0.19,1.95]	[0.19,0.67]	[0.19,0.53]	[0.32,0.35]	20	[0.42,4.20]	[0.42,1.45]	[0.42,1.13]	[0.69,0.76]
6	[0.30,2.95]	[0.30,1.02]	[0.30,0.80]	[0.48,0.54]	21	[0.40,3.96]	[0.40,1.36]	[0.40,1.07]	[0.65,0.72]
7	[0.32,3.23]	[0.32,1.11]	[0.32,0.87]	[0.53,0.59]	22	[0.40,3.96]	[0.40,1.36]	[0.40,1.07]	[0.65,0.72]
8	[0.29,2.87]	[0.29,0.99]	[0.29,0.77]	[0.47,0.52]	23	[0.40,3.98]	[0.40,1.37]	[0.40,1.08]	[0.65,0.72]
9	[0.28,2.77]	[0.28,0.96]	[0.28,0.75]	[0.45,0.50]	24	[0.40,4.03]	[0.40,1.39]	[0.40,1.09]	[0.66,0.73]
10	[0.37,3.66]	[0.37,1.26]	[0.37,0.99]	[0.60,0.67]	25	[0.35,3.54]	[0.35,1.22]	[0.35,0.96]	[0.58,0.64]
11	[0.16,1.62]	[0.16,0.56]	[0.16,0.44]	[0.27,0.30]	26	[0.37,3.66]	[0.37,1.26]	[0.37,0.99]	[0.60,0.67]
12	[0.30,3.04]	[0.30,1.05]	[0.30,0.82]	[0.50,0.55]	27	[0.32,3.20]	[0.32,1.10]	[0.32,0.86]	[0.52,0.58]
13	[0.20,1.96]	[0.20,0.67]	[0.20,0.53]	[0.32,0.36]	28	[0.29,2.86]	[0.29,0.99]	[0.29,0.77]	[0.47,0.52]
14	[0.35,3.50]	[0.35,1.21]	[0.35,0.94]	[0.57,0.64]	29	[0.34,3.39]	[0.34,1.17]	[0.34,0.92]	[0.56,0.62]
15	[0.37,3.72]	[0.37,1.28]	[0.37,1.00]	[0.61,0.68]	30	[0.35,3.45]	[0.35,1.19]	[0.35,0.93]	[0.57,0.63]

分析表中数据可知: 仿真所得暂降事件的持续时间仅为较短的102 ms, 使其落在了 PLC、ASD 和 PC 的幅值区间范围最大的子区域内, 而对于 ACC 则落在了幅值区间范围较小的子区域内。因此, PLC、ASD 和 PC 的严重程度区间指标下界均相同, 而 ACC 的下界取值则较高。结合图 4 可以看出, 在  $T=102$  ms 的持续时间范围内, PLC、ASD、PC 和 ACC 的幅值区间上界依次减小, 使得其各自相应的严重程度区间指标上界依次减小。

因此在该电压暂降事件下, PLC 的严重程度区间指标范围与上界均最大, 说明其耐受能力最差, 电压暂降的程度最严重; 而相比之下, ACC 则具有最强的耐受能力, 电压暂降的程度最轻微。

#### 4.2 综合严重程度区间指标与节点排序

基于 4.1 节所提方法, 根据文献[18]中所给出的不同监测时间范围内配电网节点下四种敏感设备负荷数量的变化规律, 考虑负荷占比的波动在一年的时间尺度下最为显著<sup>[27]</sup>, 因此选取一年作为监测时间范围, 针对其余非敏感负荷进行忽略不计的理想化处理, 最终得到相应的区间权重如表 3 所示。

表 3 四种典型敏感设备的区间权重

Table 3 Interval weights of 4 typical sensitive equipments

敏感设备	PLC	ASD	PC	ACC
区间权重	[0.24,0.26]	[0.21,0.25]	[0.19,0.26]	[0.27,0.32]

基于区间指标与区间权重的仿射乘积结果, 在约束条件  $\varepsilon \in [-1,1]$  下进行非线性规划求解, 得到各个节点的综合严重程度区间指标 $[S]_C$ , 如表 4 所示。

表 4 节点用户侧综合严重程度区间指标

Table 4 Site user side comprehensive severity interval index

节点 编号	综合严重程度区间 指标 $[S]_C$ /p.u.	节点 编号	综合严重程度区间 指标 $[S]_C$ /p.u.
1	[0.27,0.83]	16	[0.37,1.21]
2	[0.28,0.86]	17	[0.40,1.31]
3	[0.31,0.99]	18	[0.45,1.53]
4	[0.32,1.04]	19	[0.46,1.56]
5	[0.21,0.60]	20	[0.45,1.53]
6	[0.32,1.02]	21	[0.43,1.43]
7	[0.35,1.13]	22	[0.43,1.43]
8	[0.31,0.98]	23	[0.43,1.44]
9	[0.30,0.94]	24	[0.44,1.47]
10	[0.40,1.31]	25	[0.38,1.26]
11	[0.18,0.47]	26	[0.40,1.31]
12	[0.33,1.06]	27	[0.35,1.12]
13	[0.21,0.61]	28	[0.31,0.98]
14	[0.38,1.24]	29	[0.37,1.20]
15	[0.40,1.34]	30	[0.37,1.23]

基于表 4 所得结果, 根据 3.2 节所建立的测量函数序关系确定方法, 对系统内各个节点按照电压

暂降严重程度由小到大的顺序排列，如图 9 所示。

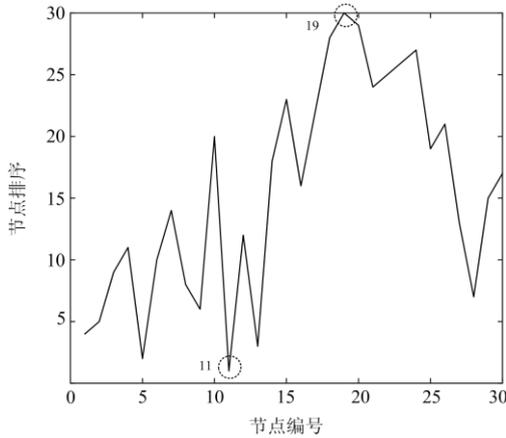


图 9 节点综合严重程度区间指标排序结果

Fig. 9 Ranking of comprehensive severity interval index

可以看出，节点 11 由于所接入发电机的电压支撑作用<sup>[28]</sup>，受电压暂降事件的影响程度最低，对应综合严重程度区间指标值最小，排序最靠前；而节点 19 由于其位于系统内远离发电机的边缘位置，且邻接节点数量较多，因此受电压暂降事件的影响程度最高，对应综合严重程度区间指标值最大，排序也最为靠后。

因此，本文方法所得暂降水平评估结果能够与配电网中节点的实际拓扑与电气特性保持一致，基于综合严重程度区间指标的节点排序具有合理性。

### 4.3 不同评估方法对比

基于 SEMI F47 耐受曲线，采用现有单一指标方法评估得到各个节点的严重程度点值指标，将其与采用传统区间运算方法<sup>[22]</sup>评估所得区间指标以及本文方法所得区间指标进行对比，如图 10 所示。

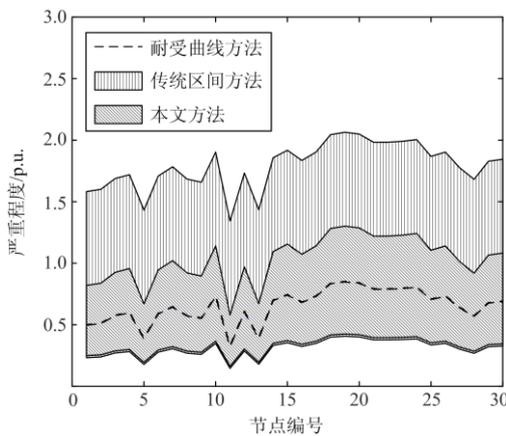


图 10 不同方法下的指标评估结果对比

Fig. 10 Comparison of site ranking results under different severity assessment methods

可以看出：1) 耐受曲线方法所得严重程度单一点值指标曲线被包含在两种区间指标所构成区域的范围之内，区间指标在本质上其实是对单一点值指标在考虑敏感设备耐受能力不确定性信息情况下的一种拓展形式；2) 本文方法与传统区间方法所得严重程度区间指标，均能够通过其区间范围大小来反映配网节点在考虑不同敏感设备与不同负荷占比情况下的动态耐受特性；3) 本文方法通过仿射算法减小上界取值以缩减区间宽度，能够得到更加精确的区间评估结果，克服了传统区间方法计算结果过于保守从而造成区间范围过大的问题。

## 5 结论

本文基于典型敏感设备耐受特性的不确定区域，提出一种改进的电压暂降严重程度区间评估方法，通过仿真验证结果表明：

1) 基于四种典型敏感设备耐受特性的不确定区域，采用区间数理论对严重程度指标计算方法进行修正，所得区间指标能够定量刻画不同敏感设备耐受能力的不确定性大小；

2) 根据配电网节点负荷占比的波动范围确定区间权重，计算得到用户侧综合严重程度区间指标，并通过测量函数进行节点排序，以此实现对配电网节点用户侧的综合暂降水平以及动态耐受特性的准确描述，识别出系统中的脆弱节点；

3) 采用仿射算法对传统区间运算进行改进，能够有效缩减区间宽度，得到更加精确的区间评估结果，克服了传统区间方法计算结果过于保守从而造成区间范围过大的问题；

4) 本文方法主要应用于配电网场景中，评估结果能够为敏感用户选择合适的接入点提供依据，减少电压暂降事件所带来的损失，有效提升敏感用户的用电满意度，有助于营商环境的改善。

## 参考文献

[1] 刘佳翰, 陈克绪, 马建, 等. 基于卷积神经网络和随机森林的三相电压暂降分类[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 112-118.  
LIU Jiahuan, CHEN Kexu, MA Jian, et al. Classification of three-phase voltage dips based on CNN and random forest[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 112-118.

[2] 刘书铭, 吴亚盆, 张博, 等. PC 机电压暂降敏感度试验研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 32-36, 48.  
LIU Shuming, WU Yapen, ZHANG Bo, et al. Experimental research on sensitivity of PC to voltage sags[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 32-36, 48.

- [3] 汪颖,王欢,王昕.一种基于改进灰色关联分析的电压暂降源识别方法[J].电测与仪表,2020,57(15):1-7.  
WANG Ying, WANG Huan, WANG Xin. A method of voltage sag source identification based on improved grey relational analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 1-7.
- [4] 吕干云,蒋小伟,郝思鹏,等.基于半监督支持向量机的电压暂降源定位[J].电力系统保护与控制,2019,47(18):76-81.  
LÜ Ganyun, JIANG Xiaowei, HAO Sipeng, et al. Location of voltage sag source based on semi-supervised SVM[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 76-81.
- [5] 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.
- [6] ELECTRICAL I O. IEEE guide for voltage sag indices[R]. 2014.
- [7] CHAN J Y, MILANOVIC J V. Severity indices for assessment of equipment sensitivity to voltage sags and short interruptions[C] // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA.
- [8] 卢文清,常乾坤,贾东强,等.设备侧电压暂降严重程度评估方法研究[J].电力自动化设备,2019,39(1):181-188.  
LU Wenqing, CHANG Qiankun, JIA Dongqiang, et al. Research on evaluation methods of voltage sag severity for equipment side[J]. Electric Power System Equipment, 2019, 39(1): 181-188.
- [9] 肖先勇,马超,杨洪耕,等.用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J].中国电机工程学报,2009,29(31):115-121.  
XIAO Xianyong, MA Chao, YANG Honggeng, et al. Stochastic estimation of equipment sensitivity to voltage sag based on voltage sag severity index and maximum entropy principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 115-121.
- [10] 肖先勇,陈武,杨洪耕.敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估[J].中国电机工程学报,2010,30(10):36-42.  
XIAO Xianyong, CHEN Wu, YANG Honggeng. Multi-uncertainty assessment for failure level of sensitive equipment caused by voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 36-42.
- [11] GUPTA C P, MILANOVIC J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 711-718.
- [12] 贾清泉,艾丽,董海艳,等.考虑不确定性的电压暂降不兼容度和影响度评价指标及方法[J].电工技术学报,2017,32(1):52-61.  
JIA Qingquan, AI Li, DONG Haiyan, et al. Uncertainty description and assessment of incompatibility & influence index for voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 52-61.
- [13] TAN R H G, RAMACHANDARAMURTHY V K. Voltage sag acceptability assessment using multiple magnitude-duration function[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 1984-1990.
- [14] 杨剑锋,姜爽,石戈戈.基于分段改进S变换的复合电能质量扰动识别[J].电力系统保护与控制,2019,47(9):64-71.  
YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.
- [15] 赵泓,肖先勇,李政光,等.敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J].电力自动化设备,2011,31(10):70-75.  
ZHAO Hong, XIAO Xianyong, LI Zhengguang, et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment failure rate due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 70-75.
- [16] ASHA K S, JAYA L A. Data mining for classification of power quality problems using WEKA and the effect of attributes on classification accuracy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 303-314. DOI: 10.1186/s41601-018-0103-3.
- [17] MILANOVIC J V, GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 918-924.
- [18] CEBRIAN J C, KAGAN N, MILANOVIC J V. Probabilistic estimation of distribution network performance with respect to voltage sags and interruptions considering network protection setting-part I: the methodology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 42-51.
- [19] DJOKIC S Z, STOCKMAN K, MILANOVIC J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.

- [20] 徐永海, 洪旺松, 兰巧倩. 电压暂降起始点与相位跳变对交流接触器影响的分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 92-97.  
XU Yonghai, HONG Wangsong, LAN Qiaoqian. Influence analysis of point-on-wave of voltage sag initiation and sag phase jump on alternating current contactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 92-97.
- [21] 徐俊俊, 吴在军, 胡秦然, 等. 考虑多类型分布式电源和负荷不确定性的主动配电网区间状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3255-3266.  
XU Junjun, WU Zaijun, HU Qinran, et al. Interval state estimation for active distribution networks considering uncertainties of multiple types of DGs and loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3255-3266.
- [22] 李小燕, 丁明, 齐先军. 考虑天气因素的输电网可靠性区间评估及其仿射算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 8-13.  
LI Xiaoyan, DING Ming, QI Xianjun. Interval reliability evaluation and affine arithmetic of transmission network considering weather factors[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 8-13.
- [23] 韩亮, 王守相. 含光伏风电的基于仿射算法的配电三相潮流计算[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3413-3418.  
HAN Liang, WANG Shouxiang. Affine algorithm based calculation of three-phase power flow in distribution network connected with PV generation and wind generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3413-3418.
- [24] 李扬, 韦钢, 李功新, 等. 含 DG 的主动配电网供电路径优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1971-1979.  
LI Yang, WEI Gang, LI Gongxin, et al. Research on optimization of power supply route of active distribution network considering DG[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1971-1979.
- [25] 据泽立, 朱跃, 蒲路, 等. 配电网电压综合补偿方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 235-240.  
JU Zeli, ZHU Yue, PU Lu, et al. Study on the voltage integrated compensation method of distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 235-240.
- [26] 代双寅. 电压暂降随机预估研究与软件开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.  
DAI Shuangyin. Stochastic assessment of voltage sag and software development[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [27] 常小强, 宋政湘, 王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 1-5.  
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on monte carlo algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 1-5.
- [28] 程杉, 倪凯旋, 苏高参, 等. 基于 DAPSO 算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 195-202.  
CHENG Shan, NI Kaixuan, SU Gaocan, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations based on DAPSO algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 195-202.

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-11-09

作者简介:

栾乐(1983—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为设备状态监测、评价研究与应用; E-mail: 1615096389@qq.com

马智远(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量分析与控制、新能源相关技术;

莫文雄(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力技术监督管理与电力生产管理。

(编辑 周金梅)