

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190929

# 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

冯澎湃<sup>1,2</sup>, 肖楚鹏<sup>1,2</sup>, 郭松<sup>1</sup>, 张明敏<sup>3</sup>, 李勇<sup>3</sup>, 丁凯<sup>4</sup>, 李伟<sup>4</sup>

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210000; 2. 国网电力科学研究院(武汉)能效测评有限公司, 湖北 武汉 430074; 3. 湖南大学电气与信息工程学院 湖南 长沙 410086; 4. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 随着变频器和继电器等大量敏感负荷的应用, 电压暂降问题愈发成为了配电网尤其是敏感负荷占比很高的现代工业配电网亟需解决的动态电能质量问题。为有效评估配电网中易引发电压暂降的薄弱环节与指导电压暂降补偿方案的设计, 提出了考虑多个敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域的辨识方法。首先, 通过引入母线暂降判定向量与线路暂降关联向量以及相应的判定准则, 确定了目标配电网中临界点在各线路上的分布以及各临界点的位置。其次, 基于获得的敏感负荷的电压暂降域, 得到了考虑交叠效应的配电网电压暂降域层级模型, 并由此定义了电压暂降影响度以实现了对配电网内电压暂降脆弱区域的量化评估。最后, 将所提方法应用于 IEEE14 母线系统电压暂降脆弱区域辨识, 验证了所提方法的可行性与合理性。

**关键词:** 电压暂降; 临界点; 脆弱区域; 敏感负荷; 配电网

## Voltage sag vulnerable area identification of a distribution grid with multiple sensitive loads

FENG Pengpai<sup>1,2</sup>, XIAO Chupeng<sup>1,2</sup>, GUO Song<sup>1</sup>, ZHANG Mingmin<sup>3</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, DING Kai<sup>4</sup>, LI Wei<sup>4</sup>

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute (Wuhan) Efficiency Evaluation Company Limited, Wuhan 430074, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410086, China; 4. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** With the application of a large number of sensitive loads such as frequency converters and electric relays, voltage sag has become an urgent dynamic power quality issue in distribution networks, especially in modern industrial distribution networks with a high proportion of sensitive loads. In order to effectively evaluate the vulnerability of voltage sag in a distribution network and guide the design of a voltage sag compensation scheme, a method for identifying the vulnerable area of voltage sag in distribution network considering multiple sensitive loads is proposed. This paper first introduces the bus sag identification vector, the line sag identification vector and corresponding judgment criteria. Then the distribution of critical points on each line and the location of critical points in the target distribution network are determined. Secondly, based on the obtained voltage sag region of sensitive loads, a hierarchical model of voltage sag domain of the distribution network considering the overlap effect is derived. In addition, the concept of voltage sag influence degree is thus defined to quantitatively evaluate the vulnerable area of voltage sag in a distribution network. Finally, the rationality and feasibility of the proposed method are verified for voltage sag vulnerable area identification of the IEEE14 bus system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52153218000B).

**Key words:** voltage sag; critical point; vulnerable area; sensitive load; distribution grid

## 0 引言

随着现代电力系统中电力电子化程度的逐步提

高, 其电能质量问题受到了更多的关注<sup>[1-4]</sup>。电压暂降是指电压有效值快速地跌落至额定电压的 10%~90%, 且持续时间为 0.5 周波~1 min<sup>[5]</sup>。当供电母线发生电压暂降事件时, 用户设备不能获得正常运行所需要的电压, 其工作性能也将受到影响, 严重时

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(52153218000B)

还会导致设备的停运、误动作, 导致整个业务系统的瘫痪, 造成重大经济损失<sup>[6]</sup>。因此, 在各类电能质量问题中, 电压暂降成为了电力部门与用户所关注的焦点。

针对电压暂降电能质量问题, 国内外学者已开展了大量的研究工作, 这些工作的研究点大都聚集在分析电压暂降幅值、相位跳变以及持续时间三个基本的特征量方面。文献[7-8]分析了配电网中出现电压暂降的原因, 并指出了短路故障是引发电压暂降的主要因素。文献[9-10]介绍了临界距离法, 通过建立简单分压器模型得到了预设电压暂降阈值下故障点的临界距离。该方法原理简单明确, 多应用于辐射型结构的配电网。故障点法<sup>[11]</sup>是指在电路上选定故障点, 通过仿真实验或者短路计算的手段求取敏感负荷所在母线的残余电压信息量, 以判断该故障点是否处于敏感负荷电压暂降域。文献[12]提出了在多重故障情况下, 将故障点视为新增的虚拟节点从而计算出配电网中的各故障电压信息量。此方法相对传统方法有着更明确的物理概念, 也具备更快计算速度的优势。文献[13]根据电压暂降的幅值以及持续时间, 提出了一种用电压暂降引起的能量损失来确定暂降严重程度的电压暂降严重性指标。IEEE Std1564—2014 根据设备的电压耐受曲线, 通过挖掘持续时间与允许电压暂降幅值之间的约束关系建立了电压暂降敏感度指标<sup>[14-15]</sup>。文献[16]提出了一种考虑电压暂降类型与电压暂降阈值的设备侧电压暂降严重程度评估方法。该方法结合了敏感负荷的电压耐受特性, 考虑了电压暂降严重程度具有连续性以及单调性的实际分布特点, 能够避免评估过程中可能出现的欠评估或过评估现象。文献[17-19]分别通过小波变换、傅里叶变换、Hilbert-Huang 变换等提取电压暂降信号上的有效特征量来对电压暂降源进行识别。

上述工作涉及了电压暂降成因的分析, 研究了电压暂降治理方案与电压暂降严重程度的评价指标, 但没有从系统层面评估配电网的电压暂降特性以及辨识配电网中易导致敏感负荷出现电压暂降的脆弱区域。为此, 本文提出了考虑多敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法。该方法计算了各敏感负荷的电压暂降域, 并根据各电压暂降域相互交叠的情况, 对考虑多敏感负荷配电网的电压暂降域进行了层级划定。基于电压暂降域层级模型, 结合配电网故障类型分布、母线与线路故障率等统计数据, 分别计算出各线路、母线可引发敏感负荷的预估暂降频次以及配电网内敏感负荷对应电压暂降域的总预估暂降频次。最后定义母线与线路各自

的电压暂降影响度, 分别对各母线以及线路在电压暂降行为中所产生的影响程度进行量化评估, 从而辨识出该配电网中的电压暂降脆弱区域, 为后续的电压暂降治理提供指导。

## 1 电压暂降幅值计算

准确快速地计算短路故障下的敏感负荷母线残余电压是确定某一敏感负荷电压暂降域的关键。通过建立网络的三序阻抗模型可实现对不同故障发生后各母线电压的求解, 其求解过程可结合图 1 简要说明。 $F$  为故障点位置,  $S$  为敏感负荷所在母线编号,  $p$  为故障点  $F$  距母线  $M$  的距离。 $Z_{MM}$ 、 $Z_{NN}$ 、 $Z_{FF}$  表示母线  $M$ 、 $N$  与故障点  $F$  的自阻抗,  $Z_{MN}$ 、 $Z_{SF}$  分别表示母线  $M$  与  $N$ 、 $S$  与  $F$  之间的互阻抗,  $Z_h$  为线路  $l_{MN}$  的序阻抗。敏感负荷所在母线的残余电压值计算过程如下。

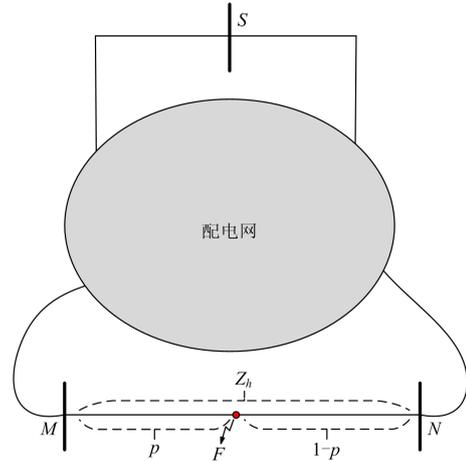


图 1 配电网短路故障电压幅值计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation for the influenced voltage after short-circuit fault in distributed network

1) 通过追加支路法求得目标网络的各序阻抗矩阵  $Z^{012}$ 。

2) 根据阻抗矩阵  $Z^{012}$  以及故障点的位置信息量  $p$ , 计算故障相关自阻抗  $Z_{FF}^{012}$  以及互阻抗  $Z_{SF}^{012}$ 。

$$Z_{FF}^{012} = p^2(Z_{MM}^{012} + Z_{NN}^{012} - 2Z_{MN}^{012} - Z_h^{012}) + p[Z_h^{012} - 2(Z_{MM}^{012} - Z_{MN}^{012})] + Z_{MM}^{012} \quad (1)$$

$$Z_{SF}^{012} = Z_{SM}^{012} + p(Z_{SN}^{012} - Z_{SM}^{012}) \quad (2)$$

3) 通过潮流计算得到故障前各母线电压幅值  $V_i^{\text{pref}}$ 。

4) 通过已求得各序阻抗与故障前各母线电压值  $V_i^{\text{pref}}$  计算目标母线处的残余电压值  $V_S^{\text{fault}}$ <sup>[20-21]</sup>。

## 2 电压暂降域的计算

### 2.1 临界点的计算

敏感负荷电压暂降域是指因故障引发电压暂降并致使敏感负荷停运的故障点所覆盖的位置区域。敏感负荷电压暂降域可通过计算引发敏感负荷停运的各临界点位置来实现。文献[22]提出了利用母线暂降判定向量与线路电压暂降关联向量，以系统地计算各临界点位置。然而该方法仍存在着较大的计算复杂度，在临界点的求取过程中可能会出现某些试探性质的计算工作。为提高临界点的计算效率，本文在文献[22]的基础上，对临界点的求取方法进行了改进，具体的计算过程如下。

步骤 1: 计算母线暂降判定向量

假设 1 至  $N$  母线依次发生故障时，敏感负荷所在母线上的故障电压大小为  $V_{S_i}^{\text{fault}}$ ，敏感负荷所在母线的电压暂降阈值为  $V_{\text{th}}$ ，则可令电压暂降阈值向量  $V_{\text{T}}$  与故障残余电压幅值向量  $V_{\text{F}}$  分别为

$$V_{\text{T}} = \begin{bmatrix} V_{\text{th}} \\ V_{\text{th}} \\ \vdots \\ V_{\text{th}} \end{bmatrix}, V_{\text{F}} = \begin{bmatrix} |V_{S_1}^{\text{fault}}| \\ |V_{S_2}^{\text{fault}}| \\ \vdots \\ |V_{S_N}^{\text{fault}}| \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此，母线暂降判定向量为

$$BSI = \begin{bmatrix} BSI_1 \\ BSI_2 \\ \vdots \\ BSI_n \end{bmatrix}, BSI_i = \begin{cases} 1, & (V_{\text{F}} - V_{\text{T}})_i \leq 0 \\ 0, & (V_{\text{F}} - V_{\text{T}})_i > 0 \end{cases} \quad (4)$$

观察式(4)可知， $BSI_i=1$  表示母线  $i$  包含在敏感负荷母线所对应的暂降域内； $BSI_i=0$  表示母线  $i$  位于敏感负荷母线对应的电压暂降域之外。

$$LSI = \begin{bmatrix} LSI_1 \\ LSI_2 \\ \vdots \\ LSI_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BSI_{1_F} + BSI_{1_T} \\ BSI_{2_F} + BSI_{2_T} \\ \vdots \\ BSI_{m_F} + BSI_{m_T} \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤 2: 计算线路暂降关联向量

根据步骤 1 中所求得的母线暂降判定向量，可定义线路暂降关联向量如式(5)所示。观察式(5)可知，向量  $LSI$  中  $LSI_i$  的取值由与该线路  $i$  相邻的母线暂降判定因子  $BSI_{i_T}$  和  $BSI_{i_F}$  的代数和决定。因此结合式(4)可知， $LSI_i$  可取值 0、1、2。 $LSI_i=0$  表明线路  $i$  所连接的两条母线落在敏感负荷电压暂降域

以外，故可获知线路  $i$  上不存在临界点且线路  $i$  位于敏感负荷电压暂降域之外； $LSI_i=1$  表明线路  $i$  所连接的两条母线中有一条处于敏感负荷电压暂降域以内，线路  $i$  部分落于电压暂降域内且线路  $i$  上存在唯一的临界点； $LSI_i=2$  表明线路  $i$  所连接的两条母线落在敏感负荷电压暂降域以内，线路  $i$  将部分或者全部处于电压暂降域内，也意味着线路  $i$  将存在两个或者零个临界点。

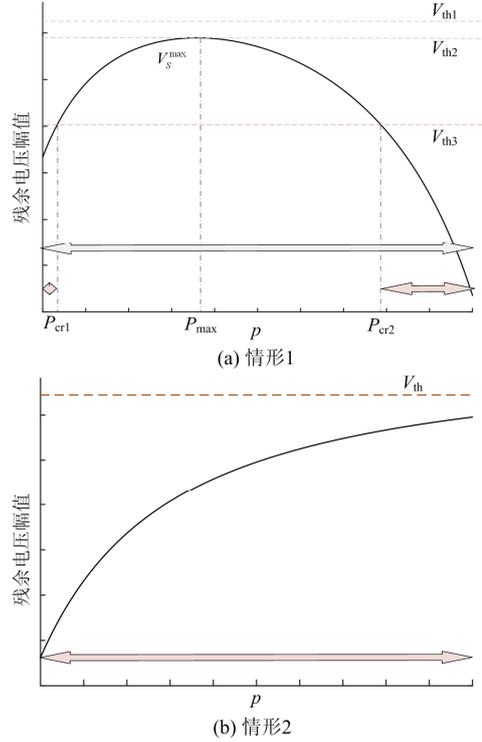


图 2  $LSI_i=2$  时负荷母线残余电压曲线

Fig. 2 Curves of the resident voltage on load bus when  $LSI_i=2$

步骤 3: 计算所有临界点

1) 当  $LSI_i=0$  时，由前述内容可知目标线路不存在临界点。

2) 当  $LSI_i=1$  时，由前述内容可知目标线路有一个临界点。此时，可利用二分法求取某一临界点位置信息量  $p_0$ ，该值满足  $|V_S^{\text{fault}}(p_0) - V_{\text{th}}| < \varepsilon$ ，其中  $\varepsilon$  为收敛阈值，则  $p_0$  为临界点的位置。

3) 当  $LSI_i=2$  时，敏感负荷母线残余电压值  $V_S^{\text{fault}}$  与变量  $p$  的函数关系可通过图 2(a)与图 2(b)所示的两类曲线情况表示。因此，该类情况需先判定敏感负荷母线残余电压值与线路故障位置量  $p$  的函数关系分别与图 2(a)与图 2(b)中哪一个对应。为此，先求  $p=0$  和  $p=1$  处  $V_S^{\text{fault}}(p)$  的导数  $(V_S^{\text{fault}})'|_{p=0}$  和  $(V_S^{\text{fault}})'|_{p=1}$ 。 (1) 当满足  $\{(V_S^{\text{fault}})'|_{p=1}\} \times \{(V_S^{\text{fault}})'|_{p=0}\} > 0$

时, 敏感负荷母线残余电压值  $V_S^{\text{fault}}$  与变量  $p$  的函数关系如图 2(b)所示, 该线路处于对应敏感负荷电压暂降域内; (2) 当满足  $\{(V_S^{\text{fault}})'\}_{|p=1}\} \times \{(V_S^{\text{fault}})'\}_{|p=0}\} < 0$  时, 敏感负荷母线残余电压值  $V_S^{\text{fault}}$  与变量  $p$  的函数关系如图 2(a)所示, 此时需先确定暂降幅值的最大值, 即计算  $p \in [0, 1]$ , 求  $p_0$  使  $V_S^{\text{fault}}$  取最大值  $V_S^{\text{max}}$ 。此时, 若  $V_S^{\text{max}} > V_{\text{th}}$ , 则目标线路上存在两个临界点。利用二分法分别搜索  $p_2 \in [p_0, 1]$  与  $p_2 \in (0, p_0]$ , 使其满足  $|V_S^{\text{fault}}(p_1) - V_{\text{th}}| < \varepsilon$  和  $|V_S^{\text{fault}}(p_2) - V_{\text{th}}| < \varepsilon$ , 则  $p_1$  与  $p_2$  分别为两临界点的位置; 若  $V_S^{\text{max}} < V_{\text{th}}$ , 则目标线路上没有临界点。

## 2.2 考虑含多敏感性负荷的电压暂降域层级分布

当配电网中含有多个敏感性负荷时, 其电压暂降域可能会发生重叠。该重叠区域发生短路故障时, 将同时影响多个敏感性负荷可靠运行。因此确定含多个敏感负荷的配电网电压暂降重叠区域对配电网电压暂降治理与重要负荷的安全运行有着重要的指导意义。

图 3 为考虑三个敏感负荷同时存在的配电网电压暂降域层级分布模型。从图中可以看出, 该情况下可将配电网电压暂降域按照重叠次数分为三个不同的等级:  $OL_1$ 、 $OL_2$  与  $OL_3$ , 其中下标  $i$  代表当该区域内发生短路故障时将会引发  $i$  个敏感负荷同时出现电压暂降。

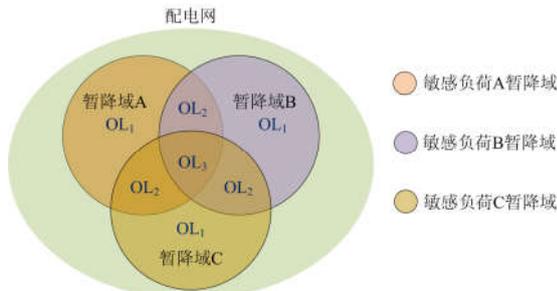


图 3 考虑 3 个敏感负荷的电压暂降域层级分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hierarchical distribution of the voltage sag area considering three sensitive loads

## 3 配电网电压暂降脆弱区域辨识

辨识配电网中引发电压暂降事件的母线与线路, 并评估其影响程度对配电网电压暂降治理有着重要意义。基于考虑多个敏感负荷的电压暂降域层级分布模型, 本节通过计算配电网相关预估暂降频次信息量以获取配电网中母线与线路的电压暂降影响度指标, 最后实现系统辨识配电网电压暂降脆弱区域的目的。

### 3.1 预估电压暂降频次

电压暂降域的分布情况及其对应的预估电压暂降频次是评估配电网电压暂降特性的重要因素。负荷的预估电压暂降频次可综合考虑负荷暂降区域内所有线路长度以及母线数目, 根据历史数据统计出来的故障概率数据得出<sup>[23-25]</sup>, 它表示配电网中某一个或者多个敏感负荷在一年内会出现的电压暂降期望次数。

1) 考虑单个敏感负荷的总预估电压暂降频次计算

由于不同类型短路故障对应的电压暂降域不一致, 敏感负荷总预估电压暂降频次应该根据不同短路故障对应的电压暂降域进行分别求取。这里用  $ESF_T$  表示敏感负荷对应总预估电压暂降频次, 则  $ESF_T$  的表达式为

$$ESF_T = \sum_{k=1}^4 \alpha_k \left[ \sum_{i=1}^m \gamma_{Bi} f_{Bk} + \sum_{j=1}^s l_{Lj} f_{Lk} \right] \quad (6)$$

式中:  $k$  代表四类常见的短路故障, 且分别为单相接地故障、两相接地故障、两相短路故障以及三相短路故障;  $\alpha_k$  为第  $k$  类短路故障的分布概率;  $\gamma_{Bi}$  取值 1 或 0, 其中  $\gamma_{Bi}=1$  表示母线  $Bi$  位于该电压暂降域内,  $\gamma_{Bi}=0$  表示母线  $Bi$  不在该电压暂降域中;  $l_{Lj}$  表示线路  $Lj$  包含在该电压暂降域内的长度;  $f_{Bk}$  为母线在  $k$  类短路故障下的故障率;  $f_{Lk}$  为线路  $k$  类短路故障下的故障率;  $m$  为配电网母线总数目;  $s$  为配电网线路总数目。

2) 考虑多个敏感负荷总预估电压暂降频次计算

由于同一配电网中可能存在多个敏感负荷, 对应暂降域可能出现重叠现象。在电压暂降重叠区域中, 一旦某一母线或者线路发生短路故障, 会导致多个敏感负荷所在母线同时出现电压暂降, 此时, 敏感负荷总预估电压暂降频次计算如下。

$$ESF_T = \sum_{k=1}^4 \alpha_k \left[ \sum_{i=1}^m \gamma_{Bi} h_{Bi} f_{Bk} + \sum_{j=1}^s l_{Lj} \mu_{Lj} f_{Lk} \right] \quad (7)$$

式中,  $h_{Bi}$  和  $\mu_{Lj}$  与母线和线路在电压暂降域层级模型中的分布有关, 取值满足如下条件。

$$h_{Bi} = \begin{cases} 1, & Bi \in OL_1 \\ 2, & Bi \in OL_2 \\ 3, & Bi \in OL_3 \\ 0, & Bi \in \text{其他} \end{cases} \quad \mu_{Lj} = \begin{cases} 1, & Lj \in OL_1 \\ 2, & Lj \in OL_2 \\ 3, & Lj \in OL_3 \\ 0, & Lj \in \text{其他} \end{cases}$$

### 3.2 基于电压暂降影响度的脆弱区域辨识

为表征配电网中的脆弱区域, 可通过预测配电网内各母线与线路引发的电压暂降频次在整个配电网范

围内总预估电压暂降频次的比值进行评估。本文将该比值分别称为母线电压暂降影响度和线路电压暂降影响度。式(8)、式(9)分别给出了配电网各母线和线路电压暂降影响度的表达式。

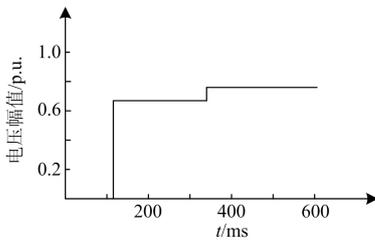
$$SI_{Bi} = \frac{\sum_{k=1}^4 \alpha_k \gamma_{Bi} h_{Bi} f_{Bi}}{ESF_T} \quad (8)$$

$$SI_{Li} = \frac{\sum_{k=1}^4 \alpha_k l_{Li} \mu_{Li} f_{Li}}{ESF_T} \quad (9)$$

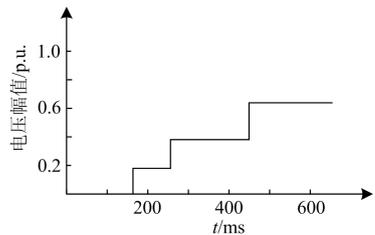
式中,  $SI_{Bi}$  与  $SI_{Li}$  分别为母线  $Bi$  与线路  $Li$  的电压暂降影响度。当  $SI_{Bi}$  与  $SI_{Li}$  的值越大意味着相应的母线或者线路可能引发的电压暂降次数越多, 也表明该母线或者线路脆弱程度越高。反之, 则意味着该母线或线路的脆弱程度越低。

#### 4 算例分析

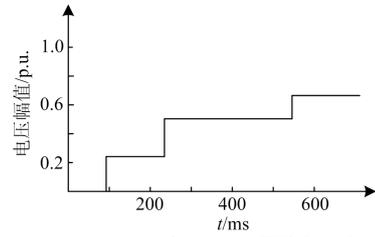
该部分根据所提出的考虑含多个敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法, 对 DigSILENT PowerFactory 软件提供的 14 母线系统算例进行分析与评估。该配电网系统共包含 17 条线路、3 台变压器以及 5 台发电机。假定该系统共存在 3 个敏感负荷, 且敏感负荷 A、B、C 分别连接在 3、6、14 号母线上。图 4(a)—4(c)分别为敏感负荷 A、B、C 的电压耐受曲线。考虑不同电压等级配电网的保护要求、保护装置与断路器动作时间, 可假定该 14 母线系统中 132 kV 与 33 kV 电压等级线路的故障清除时间分别为 200 ms 与 500 ms。因此, 结合图 4 中敏感负荷的电压耐受曲线可得到各敏感负荷电压耐受值如表 1 所示。表 2 为四类常见短路故障类型分布概率以及线路和母线的故障率。



(a) 敏感负荷 A 电压耐受曲线



(b) 敏感负荷 B 电压耐受曲线



(c) 敏感负荷 C 电压耐受曲线

图 4 敏感负荷 A、B、C 电压耐受曲线

Fig. 4 Voltage tolerance curves of sensitive loads A, B, C

表 1 敏感负荷电压耐受值

Table 1 Voltage tolerance value of the sensitive loads

敏感负荷	电压耐受值/p.u.
A	0.7
B	0.65
C	0.5

表 2 系统概率参数

Table 2 System probability parameters

短路故障类型	分布 概率/%	母线故障率/ (次/年)	线路故障率/ (次/km·年)
SLGF	75	0.001	0.024
DLGF	15	0.000 8	0.008
LLF	6	0.000 3	0.005
3LF	4	0.000 1	0.001

根据本文提出的敏感负荷电压暂降域计算方法, 得到了敏感负荷在不同故障类型下的电压暂降域对应临界点的位置, 并由此绘制了各故障类型下敏感负荷 A、B、C 对应的电压暂降域分布状况。此处仅列出单相接地故障(A 相接地)与三相短路故障下各敏感负荷对应的电压暂降域, 分别如图 5 与图 6 所示。根据计算得到的各敏感负荷电压暂降域, 并结合系统故障概率数据, 可求取系统各线路与各母线对应的预估电压暂降频次。表 3 为系统各线路对应预估电压暂降频次信息。从表中数据分析可知, 线路 1-5、2-4、2-5、3-4 与 4-5 发生短路故障会造成 3 个敏感负荷 A、B、C 同时发生电压暂降, 且该类电压暂降事件的预估频次为 0.138 3 次/年。线路 1-5、2-4、2-5、3-4、6-11、6-12、6-13、12-13、13-14 发生短路故障能够造成两个敏感负荷(A 与 B 或 B 与 C)同时发生电压暂降, 且该电压暂降事件预估发生频次为 0.507 次/年。此外, 由线路引发的单次电压暂降事件的预估发生频率为 3.380 3 次/年。各线路的总预估电压暂降频次计算结果也在表 3 中列出, 且线路的预估电压暂降频次可根据线路在各级电压暂降域上的预估暂降频次计算求得。

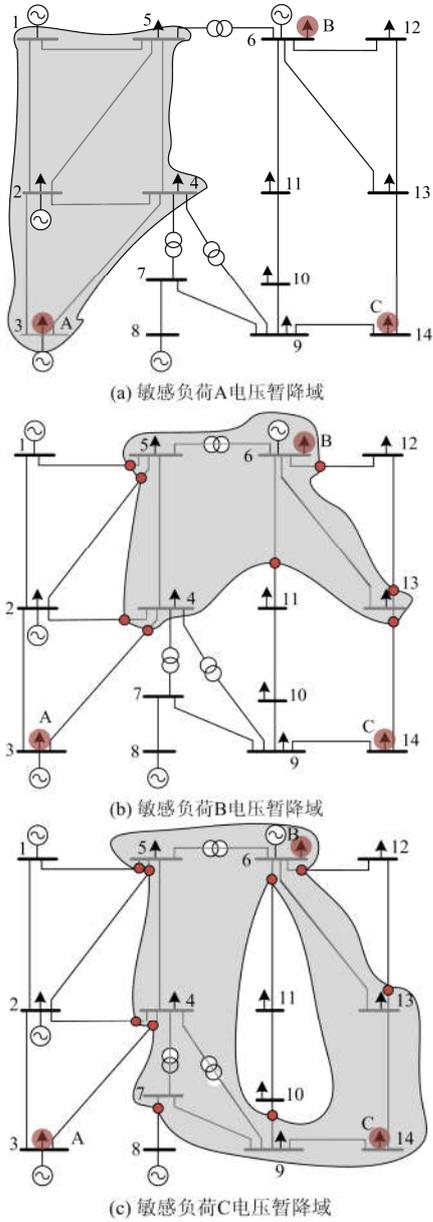


图5 单相接地故障下各敏感负荷电压暂降域分布  
Fig. 5 Voltage sag region distribution of the sensitive loads under SLGF

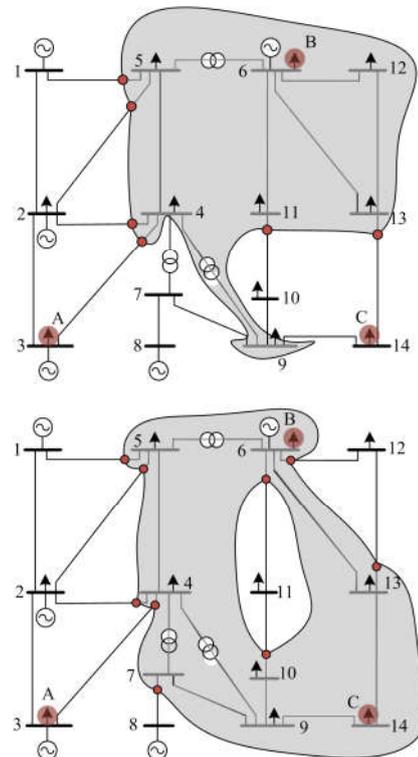
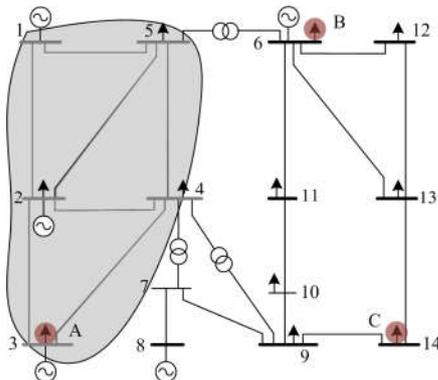


图6 三相短路故障下各敏感负荷电压暂降域分布  
Fig. 6 Voltage sag region distribution of the sensitive loads under 3LF

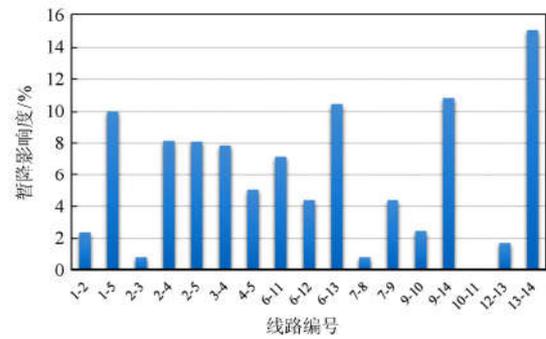


图7 系统各线路电压暂降影响度  
Fig. 7 Voltage sag impact degree for lines

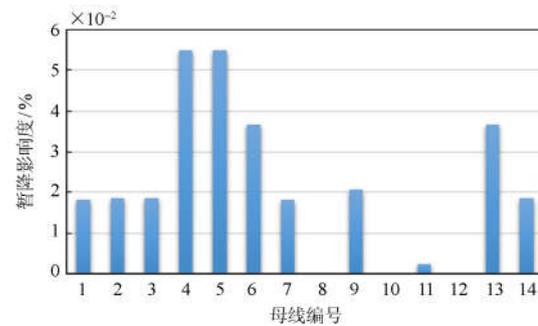


图8 系统各母线电压暂降影响度  
Fig. 8 Voltage sag impact degree for buses

表 4 为系统各母线对应预估电压暂降频次信息。类似地,当母线 4 与 5 发生短路故障时,敏感负荷 A、B、C 将同时出现电压暂降,且该电压暂降事件预估频次为 0.001 7 次/年。当母线 6、9、13 发生短路故障时,敏感负荷 B 与 C 将同时出现电压暂降,该电压暂降事件的预估频次为 0.001 9 次/年。由母线引发的单次电压暂降事件的预估频次为

0.005 4 次/年。母线所对应的总预估电压暂降频次计算结果如表 4 所示,其中母线预估电压暂降频次可由母线在各级电压暂降域上的预估电压暂降频次计算求到。

依据式(8)和式(9)可依次计算得到目标配电网各线路与母线电压暂降影响度。图 7 描绘了各线路电压暂降影响度大小分布情况。从图 7 可以看出,

表 3 线路预估暂降频次计算结果

Table 3 Results of the expected voltage sag frequency on lines

线路	考虑多敏感负荷的线路预估电压暂降频次分布							线路总预估电压暂降频次
	OL <sub>3</sub> 区域	OL <sub>2</sub> 区域			OL <sub>1</sub> 区域			
	A+B+C	A+B	B+C	A+C	A	B	C	
1-2	—	—	—	—	0.114 6	—	—	0.114 6
1-5	0.009 5	0.033	—	—	0.387 4	—	—	0.481 9
2-3	—	—	—	—	0.038 7	—	—	0.038 74
2-4	0.021	0.007 2	—	—	0.316 4	—	—	0.393 8
2-5	0.009 3	0.033 4	—	—	0.297	—	—	0.391 7
3-4	0.017 5	0.009 4	—	—	0.307 3	—	—	0.378 6
4-5	0.081	—	—	—	0.001 3	—	—	0.244 3
6-11	—	—	0.058 2	—	—	0.229 2	—	0.345 6
6-12	—	—	0.030 3	—	—	0.150 6	—	0.211 2
6-13	—	—	0.250 6	—	—	0.003 9	—	0.505 1
7-8	—	—	—	—	—	—	0.039 1	0.039 1
7-9	—	—	—	—	—	—	0.211 7	0.211 7
9-10	—	—	—	—	—	—	0.119 3	0.119 3
9-14	—	—	—	—	—	—	0.523 2	0.523 2
10-11	—	—	—	—	—	0.001 8	0.000 1	0.001 9
12-13	—	—	0.033 4	—	—	0.014 9	—	0.081 7
13-14	—	—	0.051 2	—	—	0.002 1	0.621 7	0.726 2

表 4 母线预估暂降频次计算结果

Table 4 Results of the expected voltage sag frequency on buses

母线	考虑多敏感负荷的母线预估电压暂降频次分布							母线总预估电压暂降频次
	OL <sub>3</sub> 区域	OL <sub>2</sub> 区域			OL <sub>1</sub> 区域			
	A+B+C	A+B	B+C	A+C	A	B	C	
1	—	—	—	—	8.74×10 <sup>-4</sup>	—	—	8.74×10 <sup>-4</sup>
2	—	—	—	—	8.92×10 <sup>-4</sup>	—	—	8.92×10 <sup>-4</sup>
3	—	—	—	—	8.92×10 <sup>-4</sup>	—	—	8.92×10 <sup>-4</sup>
4	8.74×10 <sup>-4</sup>	—	—	—	0.18×10 <sup>-4</sup>	—	—	2.64×10 <sup>-3</sup>
5	8.74×10 <sup>-4</sup>	—	—	—	0.18×10 <sup>-4</sup>	—	—	2.64×10 <sup>-3</sup>
6	—	—	8.74×10 <sup>-4</sup>	—	—	0.18×10 <sup>-4</sup>	—	1.766×10 <sup>-3</sup>
7	—	—	—	—	—	—	8.74×10 <sup>-4</sup>	8.74×10 <sup>-4</sup>
8	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	1.24×10 <sup>-4</sup>	—	—	—	7.5×10 <sup>-4</sup>	9.98×10 <sup>-4</sup>
10	—	—	—	—	—	—	0.04×10 <sup>-4</sup>	0.04×10 <sup>-4</sup>
11	—	—	—	—	—	1.24×10 <sup>-4</sup>	—	1.24×10 <sup>-4</sup>
12	—	—	—	—	—	—	0.04×10 <sup>-4</sup>	0.04×10 <sup>-4</sup>
13	—	—	8.74×10 <sup>-4</sup>	—	—	0.18×10 <sup>-4</sup>	—	1.766×10 <sup>-3</sup>
14	—	—	—	—	—	—	8.92×10 <sup>-4</sup>	8.92×10 <sup>-4</sup>

线路 13-14 电压暂降影响度越高, 表明线路 13-14 预期造成电压暂降的次数会越多, 因而具有最大的脆弱度。相反, 线路 10-11 电压暂降影响度为 0.039 4, 数值最低, 这表明线路 10-11 预期造成的电压暂降次数最少, 因而具有最低的脆弱度。图 8 描绘了系统各母线电压暂降影响度。从图 8 可以看出, 母线 4 和 5 电压暂降影响度最大, 这表明母线 4 和 5 预期造成的电压暂降事件次数越多, 因此具有最高的脆弱度。母线 9 的电压暂降影响度为 0, 因此该母线不会造成敏感负荷电压暂降事件。类似地, 可依次得到目标配电网中其他母线与线路的脆弱程度大小, 从而实现对整个配电网电压暂降脆弱区域的辨识。

## 5 结论

本文提出了一种考虑多个敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法。针对现有方法存在计算量大、计算效率低的问题, 本文提出的电压暂降域计算方法能够更加高效地确定临界点的分布状况, 避免在计算过程中出现尝试性的计算步骤, 因此在计算大型的配电网敏感负荷电压暂降域方面具有更好的适用性。在准确获得敏感负荷电压暂降域的基础上, 引入了母线电压暂降影响度与线路电压暂降影响度, 对配电网中母线和线路在电压暂降行为中所具有的影响程度进行了量化分析。利用该电压暂降影响度指标可直观地看出配电网中对敏感负荷电压暂降事件发生产生较大影响的区域, 该区域即所提及的电压暂降脆弱区域。

所提出的考虑含多敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法, 综合考虑了配电网故障类型分布概率、线路以及母线故障概率、配电网故障恢复时间等多个因素, 评估结果更贴合实际, 可为电力规划与管理部门在制定防御与保护措施时提供合理的参考。

## 参考文献

- [1] CHOTON K D, BASS O, KOTHAPALLI G, et al. Overview of energy storage systems in distribution networks: placement, sizing, operation, and power quality[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 1205-1230.
- [2] 吴凡, 赵晋泉, 朱斌, 等. 基于 MOPSO 的含分布式光伏配电网故障区段定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(6): 46-53.  
WU Fan, ZHAO Jinquan, ZHU Bin, et al. Faulty section location based on MOPSO for distribution networks with distributed photovoltaic generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(6): 46-53.
- [3] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(4): 8-16.  
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(4): 8-16.
- [4] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(9): 1-8.  
JIN Zhuoqing, XIANG Tieyuan, CHEN Hongkun, et al. Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(9): 1-8.
- [5] LI Z M, LI W W, PAN T H. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 78-85. DOI: 10.1186/s41601-016-0018-9.
- [6] 郑志宇, 李雅倩, 谢雪景, 等. 基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(18): 128-134.  
ZHENG Zhiyu, LI Yaqian, XIE Xuejing, et al. Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(18): 128-134.
- [7] 陈众励, 许维胜. 电压中断与电压暂降的成因及其防治[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(1): 518-520.  
CHEN Zhongli, XU Weisheng. Reason and prevention of voltage interruption and voltage sags[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(1): 518-520.
- [8] 崔灿, 肖先勇, 吴奎华, 等. 基于 HHT 和特征离散化的电压暂降扰动源分类特征提取[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(24): 8-15.  
CUI Can, XIAO Xianyong, WU Kuihua, et al. Feature extraction in classification of voltage sag sources based on HHT and feature discretization[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 8-15.
- [9] BOLLEN M H J. Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags[J]. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 1998, 145(1): 70-76.
- [10] BOLLEN M H J. Additions to the method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags[C] // *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, January 31-February 4, 1999, NY, USA: 1241-1246.
- [11] MATINEZ J A, MARTIN-ARNEDO J. Voltage sag studies in distribution networks, part II: voltage sag assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1679-1688.
- [12] 王东旭, 乐健, 刘开培, 等. 复杂电网多重故障条件下的电压暂降分析[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(7):

- 101-105.  
WANG Xudong, LE Jian, LIU Kaipei, et al. Voltage dip analysis for multiple faults case in complex power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 101-105.
- [13] BOLLEN M H J, SABIN D D, THALLAM R S. Voltage-sag indices—recent developments in IEEE PI564 task force[C] // IEEE PES International Symposium on Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, October 8-10, 2003, Montreal, Quebec, Canada: 34-41.
- [14] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [15] 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.
- [16] 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): 175-182.  
LU Wenqing, CHANG Qiankun, JIA Dongqiang, et al. Research on evaluation methods of voltage sag severity for equipment side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 175-182.
- [17] 王克星, 宋政湘, 陈德桂, 等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34.  
WANG Kexing, SONG Zhengxiang, CHEN Degui, et al. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 29-34.
- [18] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34.  
ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34.
- [19] MANULA M, SARMA A V R S. Classification of voltage sag causes using probabilistic neural network and Hilbert-Huang transform[J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 1(20): 22-29.
- [20] GOSWAMI A K, GUPTA C P, SINGH G K. An analytical approach for assessment of voltage sags[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2009, 31(7): 418-426.
- [21] GRAINGER J J, STEVENSON W D. Power system analysis[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [22] PARK C, JANG G. Systematic method to identify an area of vulnerability to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1583-1591.
- [23] 徐培栋, 肖先勇, 汪颖. 电压暂降频次两点估计随机评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 1-6.  
XU Peidong, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage sags frequency stochastic assessment based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 1-6.
- [24] 叶曦, 刘开培, 李志伟. 不确定条件下计及线路保护动作特性的电压暂降频次评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 169-176.  
YE Xi, LIU Kaipei, LI Zhiwei. Voltage sag frequency assessment considering action characteristics of line protection in uncertain conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 169-176.
- [25] YING W, XIAO X Y, LIU X N. Voltage sag frequency assessment considering customer satisfaction degree[C] // 21st International Conference on Electricity Distribution, June 6-9, 2011, Frankfurt, Germany: 1-4.

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-11-07

作者简介:

冯澎湃(1992—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为新能源电力工程及能效评估; E-mail: fengpengpai@sgepri.sgcc.com.cn

肖楚鹏(1984—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为配网节能及能效诊断检测; E-mail: xiaochupeng@场sgepri.sgcc.com.cn

郭松(1991—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统状态估计及能效评估。E-mail: guosong@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)