

# 基于电压治理的中压馈线分类及其治理措施选择

欧阳森, 马少华, 黄 湘

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:**中压馈线在电压治理上面临电压偏差和波动等问题,且治理措施和设备的选择较多。针对电网企业在规划、运维工作中难以为海量的中压馈线选择针对性治理措施的问题,提出一种基于电压治理的中压馈线分类及其治理措施选择方法。首先,从馈线自身属性参数影响电压的机理出发,建立涵盖线路属性和负荷特性的电压特征指标体系,并采用基于因子分析的模糊 C 均值(FCM)聚类算法,对馈线进行初步地聚类划分,从而判断馈线是否需要进行线路改造或在线路上加装治理设备。然后,应用数理统计理论设计描述概率分布和时域波动特性的母线电压特性评估方法,利用所得评估等级对初步聚类结果进一步精细划分,从而确定是否修改母线电压调控策略或者在母线上加装设备。最后,通过实例分析验证所提方法的有效性和实用性。

**关 键 词:**电压治理;中压馈线;聚类算法;分类;措施选择

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.024 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)05-0171-07

## Research on classification and voltage governance measures selection for medium voltage feeders

OUYANG Sen, MA Shaohua, HUANG Xiang

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Medium voltage feeders face voltage deviation and fluctuation problems, and there are many choices of governance measures and equipment. A classification and voltage governance measures selection method of medium voltage feeders is proposed in view of the current situation that power grid enterprise is difficult to select the pertinent measures for massive medium voltage feeders in the planning and operation of the network. Firstly, considering the influence of feeder's property parameters on voltage, a voltage characteristic index system is designed which covers the line property and load characteristic. Then, the feeders are sorted by the Fuzzy C-mean (FCM) clustering algorithm based on the factor analysis so as to judge whether the feeders need to be transformed or install the governance equipment. Then, the bus voltage characteristic evaluation method is designed to describe the probability distribution and time domain fluctuation characteristics. The primary clustering results are further refined by the bus voltage characteristic grades to determine whether it is necessary to modify bus voltage control strategy or install equipment on the bus. Finally, the effectiveness and practicability of this method are verified by an example.

**Key words:** voltage governance; medium voltage feeders; clustering algorithm; classification; measures selection

收稿日期:2018-05-21;修回日期:2018-08-15

基金项目:广东省自然科学基金(2016A030313476)

通信作者:欧阳森(1974-),男,博士,副研究员,主要从事智能配电网规划与运行、电能质量分析与控制研究,E-mail:ouyangs@scut.edu.cn

随着用电负荷的攀升和新型非线性设备的接入,当代中压馈线(以下简称“馈线”)既有电压偏差问题,也有波动性问题<sup>[1]</sup>,为此,可以在中压母线上改进其电压调控策略,或者增加补偿装置,或者在线路上加装补偿设备。目前各类治理装置的种类也非常丰富,然而,针对何种电压问题选择何种合适的治理装置,或者进行针对性的改造,尚缺乏科学的评判标准和规范。因此,若能结合电压偏差和波动问题成因对海量的馈线进行有效分类,并为每类馈线选择针对性治理措施,将对中压配网的电压治理工作具有重要意义。

目前,针对中压配电网电压问题的治理有比较多的研究,有详细讨论采用多种电压治理措施的方法,也有针对某项电压治理措施展开的优化设计。例如,文献[2-3]围绕中压母线电压调节、网架调整、导线更换、加装补偿设备(无功补偿或线路调压器等)等多种措施展开讨论;文献[4-7]则分别围绕中压母线电压调控策略、网架改造、新型治理设备研制等某项措施展开深入的讨论。可供选择的电压治理措施和补偿设备有很多,但中压馈线的线路参数、网架等基本结构差异甚大,且丰富的运行特性又使得其电压特性复杂多变,所以研究馈线的合理分类,以及各类馈线的电压治理措施及配置原则,需要设计合理的量化分析方法来实现。

目前已有文献讨论了利用聚类算法对馈线进行分类,集中于线损测算和故障选线等方面<sup>[8-10]</sup>。有些文献已关注到针对电压问题进行馈线分类的需求,文献[11]围绕电压、受影响用户数量、电压越限时长等指标分析电压质量水平,然后利用谱聚类算法进行馈线分类;文献[12]则从过电压信号中提取一些波形特征值,然后利用遗传-FCM算法实现过电压类型的识别。这些文献提及的聚类指标着眼于电压数值的大小差异,未能考虑电压偏差与波动问题的相互关系,因此,需要重新设计能考虑电压问题成因的指标,继而设计可进行电压措施选择的分类方法。

综上,该文设计一种基于电压治理的中压馈线分类及其治理措施的选择方法。首先考虑馈线自身属性参数对电压的影响,筛选出相应的电压特征指标对馈线进行聚类划分,用于判断是否需要进行线

路改造或是在线路上加装治理设备;其次,考虑中压母线对馈线电压特性的影响,设计描述电压概率分布和时域波动特性的母线电压评估方法,根据所得评估等级在聚类结果的基础上进一步精细划分,从而确定是否调节母线电压控制策略或者在母线上加装设备。据此所得馈线分类结果及其对应电压治理措施可提高中压配网建设改造的针对性和投资的有效性。

## 1 馈线聚类划分

### 1.1 电压特征指标体系

中压配网元件参数多样,运行条件多变,使得不同馈线的电压特性以及电压问题成因各有不同,因而须在线路上对应选择不同的治理措施。该文考虑电压机理,从线路属性和负荷特性2个方面选取指标来反映馈线的电压特征。线路属性是指线路的基本参数,在线路建成后基本保持不变,包括供电半径、主干线截面积、电缆化率、配变总容量;负荷特性是指线路的负荷水平,指标数值随时间发生变化,包括年最高负载率、年最大电流、年供电量。对这7项特征指标进行简要分析。

1)供电半径:指从电源点到其供电的最远负荷点之间的直线距离。一般而言,供电半径越大,线路末端的电压问题越严重。

2)主干线截面积:其实质是主干线载流导体的线径。一般而言,主干线截面积越小,则其阻抗越大,电压降落也越大。

3)电缆化率:指电缆线路总长度和所有线路总长度的比值。该指标既可表征线路的阻抗水平,也与线路末端电压偏高问题有强相关性。

4)配变总容量:指挂载在馈线上所有配变的额定容量之和,一定程度上反映了馈线的负荷水平。同时,配变总容量越大,则变压器损耗越大,电压降落就越大。

5)年最高负载率:负载率是指变压器实际承担的负荷与其容量之比,75%~80%之间最佳。相同容量的变压器,虽铁损相同,但负载率越大,铜损越大,其电压降落就越大。

6)年最大电流:指线路在一年内出现的最大负

荷电流。该指标直观上是负荷最重时的电流值,本质上可反映电压降的程度。

7)年供电量:指馈线的全年配送电量值。该指标越大,意味着负荷越重,则馈线线损与电压降就越大。

### 1.2 聚类划分方法

通过对各种聚类算法进行对比,该文采用 FCM 聚类算法<sup>[13]</sup>。文献[11-12]提到的电压特征指标虽然存在较高的合理性,但其数量较多,且指标之间的相关性分析不足,各指标对电压的影响程度也没有讨论。因子分析法<sup>[14]</sup>可将相关性较强的指标归结为一个共同因子,再从中挑选出对该共同因子贡献率最高的指标作为聚类指标,从而在不损失主要信息的前提下,实现指标的筛选和降维。故该文建立基于因子分析的馈线分类方法。

1)利用馈线的原始数据建立矩阵,并进行归一化处理,获得标准化矩阵  $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times 7}$ ,其中  $x_{ij}$  表示第  $i$  条馈线的第  $j$  个归一化指标值。

2)对标准化矩阵  $\mathbf{X}$  进行因子分析。提取特征值大于 1 的主要因子并形成成分矩阵,选择成分矩阵中载荷值较大的特征指标,并从  $\mathbf{X}$  中提取对应列向量,从而得到修改标准化矩阵  $\mathbf{X}' = (x'_{ij})_{n \times m}$ 。

3)确定馈线的分类数区间  $[a, b]$  ( $b > a > 1$ ),对任意分类数  $c \in [a, b]$ ,令初始聚类中心的  $V^{(0)} = (v_{sj})_{c \times m}$ ,设置收敛精度  $\epsilon > 0$ ,迭代次数  $k = 0$ 。

4)建立目标函数如下:

$$\text{Min } J_{\text{FCM}}(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{s=1}^c \sum_{i=1}^n u_{is}^\lambda d_{is}^2 \quad (1)$$

式中  $\lambda > 1$  为模糊系数;  $\mathbf{U} = \{u_{is}\}$  为隶属度矩阵;  $u_{is}$  为第  $i$  条馈线  $x_i$  属于第  $s$  类的隶属度;  $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_c]$  为各聚类中心向量集;  $d_{ij} = \|x_i - v_s\|$  表示馈线  $x_i$  到中心  $v_s$  的距离,该文采用欧氏距离法。

隶属度矩阵  $\mathbf{U}$  和聚类中心矩阵  $\mathbf{V}$  的迭代方程:

$$u_{is} = \left[ \sum_{y=1}^c (d_{is}/d_{iy})^{2/\lambda-1} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$v_s = \frac{\sum_{i=1}^n u_{is}^\lambda x_i}{\sum_{i=1}^n u_{is}^\lambda} \quad (3)$$

5)令  $k = k + 1$ ,计算隶属度矩阵  $\mathbf{U}^{(k+1)}$  和聚类中心矩阵,迭代至满足终止条件:  $\|V^{(k)} - V^{(k+1)}\| \leq \epsilon$ ; 由式(4)计算各分类数  $c$  对应的 Xie-Beni 聚类有效性

指标值<sup>[15]</sup>,然后计算此刻相应的聚类中心矩阵  $\mathbf{V}_{\text{xie}}$ :

$$\mathbf{V}_{\text{xie}}(\mathbf{U}, \mathbf{V}, c) = \frac{\sum_{s=1}^c \sum_{i=1}^n u_{is}^\lambda \|x_i - v_s\|^2}{n \min_{i \neq s} \|v_i - v_s\|^2} \quad (4)$$

6)取最小的  $\mathbf{V}_{\text{xie}}$  所对应的分类数作为最优分类数,并将其作为初始聚类中心  $V^{(0)}$ ,重复步骤 4)、5),可获得最优分类结果。

7)若各指标的数值差异较大,可先进行标么化处理:

$$\bar{y}_{sj} = \frac{\bar{x}_{sj}}{\max\{\bar{x}_{sj}\}} \quad (5)$$

其中  $\bar{x}_{sj}$ 、 $\bar{y}_{sj}$  分别为标么化前后的第  $s$  类别馈线的第  $j$  个指标平均值。

此外,按照表 1 将馈线的各指标进行等级划分,以便更直观地观察其分类差异。

表 1 指标等级

Table 1 Index grade

指标/p. u.	等级	指标/p. u.	等级
[0.70, 1.00]	大	[0.00, 0.40]	小
[0.40, 0.70]	中		

## 2 母线电压特性评估方法

馈线电压特性除了与自身硬性条件和运行状态有关以外,还受中压母线的影响。当中压母线存在电压问题时,可通过母线电压治理来提升馈线的电压质量,因此直接的馈线聚类结果并不完善,在其基础上需根据母线电压特性进一步细分。

电压合格率是主要的母线电压考核指标,但其作为静态指标,无法体现电压的偏差分布特性、波动特性等动态规律。基于配电网现有的指定日整点的电压监测数据<sup>[16]</sup>,该文设计了描述电压概率分布和时域波动特性的母线电压评估方法,从而指导母线上治理措施的选择。

### 2.1 电压概率分布特性的评估

现假设有  $n$  条馈线,其中的第  $i$  条馈线的母线电压记录有  $H$  个电压监测值,分别为  $V_i(t_1)$ 、 $V_i(t_2)$ 、 $\dots$ 、 $V_i(t_H)$  (这  $H$  个之间为等时间间隔)。对这些电压监测值的数值特征进行数理统计,可获取其电压偏差分布特性、波动特性。该文通过讨论各个电压监测值所处的偏差区间的概率来获取其概率

分布特性。

1)设计电压偏差的得分函数如式(6)所示。公式中的几个电压偏差区间源自国家标准<sup>[17]</sup>,并根据实际监测值与标称电压之间的绝对差设计各区间的权重分。

$$b = \begin{cases} 2 & |\Delta V_i| \leq 0.03 \\ 1 & 0.03 < |\Delta V_i| \leq 0.05 \\ 0 & 0.05 < |\Delta V_i| \leq 0.07 \\ -r|\Delta V_i| & |\Delta V_i| > 0.07 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $b$  为相应偏差区间内的权重得分;  $r$  为放大系数;  $|\Delta V_i| = |V_i(t_h) - 1.0|$ ,  $V_i(t_h)$  为标么值。

由式(6)可知,当  $|\Delta V_i|$  小于 7% 时,符合国家标准,当  $|\Delta V_i| \leq 3\%$  时,电压监测值与标称电压数值差并不大,此时分布特性最优,可赋最高分;当  $5\% < |\Delta V_i| \leq 7\%$  时,电压监测值毗邻越限区间,可赋 0 分;而当  $|\Delta V_i| > 7\%$  时,则赋负分值。为了确保 4 个分值的数量级差异不大,该文取  $r = 10$ 。在实际使用中,也可根据需要重设  $b$  和  $r$  的取值。

2)对第  $i$  条馈线的电压监测值求取最大的 3 个偏差区间的概率  $\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3} (t_1 \sim t_H)$ 。

3)对第  $i$  条馈线的  $H$  个电压监测值 ( $t_1 \sim t_H$ ) 求偏差得分的数学期望即为电压概率分布评估值。其电压概率分布评估值为

$$E_i = 2 \times \mu_{i1} + 1 \times \mu_{i2} + 0 \times \mu_{i3} + \left( - \sum_{h \in \Omega} r |\Delta V_i| \right) / n \quad (7)$$

其中,  $\Omega = \{h \mid |\Delta V_i| > 0.07, h = 1, 2, \dots, H\}$ 。

该评估值越大,说明电压监测值与标称电压的差异越小,意味着电压概率分布特性越好。

## 2.2 电压时域波动特性评估

该文采用电压监测值的标准差来反映电压时域波动特性,其大小直观地反映  $t_1 \sim t_H$  内母线电压波动的严重程度。第  $i$  条馈线首端的母线电压时域波动评估值  $S_i$  为

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{H} \sum_{h=1}^H (V_i(t_h) - \bar{V}_i)^2} \quad (8)$$

其中,  $\bar{V}_i$  是第  $i$  条馈线在  $t_1 \sim t_H$  时间段内母线电压监测值的平均值,  $\bar{V}_i = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H V_i(t_h)$ 。

该评估值越小,说明  $V_i$  处在一个以  $\bar{V}_i$  为中心的小区间上的概率越大,即电压时域波动特性越好。

## 2.3 评估等级

电压概率分布评估值和时域波动评估值的类型不同,需将其标准化处理并转换为百分制得分,其中,电压概率分布评估值属于极大型指标,转换公式为

$$E'_i = \frac{E_i - \min\{E_i\}}{\max\{E_i\} - \min\{E_i\}} \times 100 \quad (9)$$

而电压时域波动评估值属于极小型指标,转换公式为

$$S'_i = \frac{\max\{S_i\} - S_i}{\max\{S_i\} - \min\{S_i\}} \times 100 \quad (10)$$

然后,根据百分制得分将电压特性优劣程度划分为 3 个等级,如表 2 所示。

表 2 电压特性等级划分

得分	等级	得分	等级
[100, 85]	优	[60, 0]	差
[85, 60]	良		

根据母线电压特性等级可将聚类所得的每类馈线进一步细分为几类。

## 3 电压治理措施选择流程

### 3.1 馈线电压治理措施

首先对一些经典的馈线电压治理措施进行整理,并详细分析各项措施的适用情况、指标特点、实施方式,最后从母线电压治理、馈线治理的角度进行分类,如表 3 所示。其中,从母线电压治理角度,可选择调节母线电压、在母线上加装动态无功补偿装置等措施;从馈线治理角度,可选择线路改造、在线路上加装治理设备等措施。

### 3.2 馈线分类与措施选择流程

馈线分类方法包括 2 个步骤:基于线路属性和负荷特性的聚类划分,以及母线电压特性精细划分。根据各指标特点,分类的第 1 步可判断馈线是否需要线路改造,或是在线路上加装治理设备。分类的第 2 步在第 1 步的基础上,可确定每类馈线是否需要调节母线电压或者在母线上加装治理设备。馈线分类与对应电压治理措施选择流程如图 1 所示。

表 3 馈线电压治理措施  
Table 3 voltage governance measures for the feeders

类型	典型措施	适用情况	对应指标特点	实施方式
母线上治理	调节母线电压	母线电压不合格,但波动不大	母线电压概率分布等级“差”且 母线电压时域波动等级非“差”	调节主变压器分接头或改变 并联电容器组的投切状态, 使母线电压维持在合格范围
	加装动态无功 补偿装置	母线电压波动较大,或波动性 负荷占比较高	母线电压时域波动等级“差”	在母线上加装 SVG 或 DSTATCOM, 配置容量经计算确定
加装设备	安装线路无功 补偿器	线路无功不足,如供电半径过长, 线径过细等,但负荷波动不大	供电半径“大”、或主干线截面 积“小”,且母线电压时域 波动等级非“差”	安装在距线路首端 2/3 处,配置容量为 负荷无功需求的 2/3 左右,或经计算确定
	加装馈线自动 调压器	线路无功充足,但负荷较重 或波动性负荷占比较高	年供电量“大”、或母线电压 时域波动等级“差”	安装在距线路首端 1/3 或 1/2 处,依据 调压器后的负荷情况和线路电压 情况合理确定容量以及调压系数
线路上治理	增大导线截面	导线线径过小造成无功损 耗、电压降累积严重	主干线截面积“小”	考虑负荷的增长需求,按照《配电网规 划设计技术导则》选择合适的导线
线路改造	调整网架结构	线路重过负荷运行或供电 半径过长	供电半径“大”、或年供电量“大”	寻求周边临近变电站或临近 轻负荷短线路
	增加变电站布点	线路重过负荷运行或供电半 径过长,但周围无临近电源点	供电半径“大”、或年供电量“大”	从规划角度出发,新增变电站或变 电站出线,对原有线路进行分割

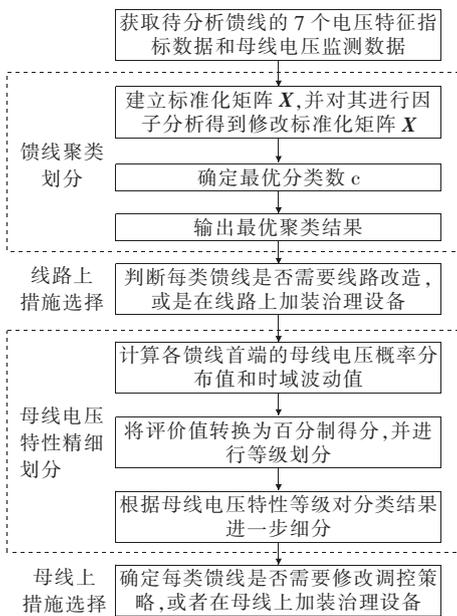


图 1 馈线分类与电压治理措施选择流程

Figure 1 Flow chart of classification and governance measures selection of medium voltage feeders

## 4 实例分析

以某地区 543 条馈线为实例进行方法的应用验证。该文获取了这些馈线的供电半径、主干线截面

积、电缆化率等 7 个电压特征指标的原始数据,以及 2018 年 1 月各馈线首端的母线电压监测数据,数据精度为 1 h。由于样本量巨大,故不详细列出所建立的原始数据矩阵以及归一化处理结果。

首先,进行因子分析,提取出特征值大于 1 的 3 个主要因子,形成旋转成分矩阵,如表 4 所示。

表 4 旋转成分矩阵

Table 4 Rotational component matrix

指标	成分 1	成分 2	成分 3
供电半径	-0.204	-0.209	0.862
主干线截面积	0.177	0.955	-0.069
电缆化率	0.161	0.949	-0.061
配变总容量	0.516	0.306	0.506
年最高负载率	0.919	0.246	-0.083
年最大电流	0.936	0.082	-0.037
年供电量	0.831	0.132	-0.047

由表 4 可知,成分 1 主要与配变总容量、年最高负载率、年最大电流及年供电量有关,代表线路的负荷情况。成分 2 主要与主干线截面积及电缆化率有关,代表线路的导线属性。成分 3 主要与供电半径有关,代表线路的供电距离。结合各指标性质和因子载荷值可将年供电量(年最高负载率和年最大电

流为极值数据,不能反映常态)、主干线截面积和供电半径作为聚类指标。

然后检验聚类结果的有效性,分类数区间取为 $[2, 7]$ 时对应的聚类有效性指标 $V_{xie}$ 分别为 $[108.04, 87.77, 134.01, 174.15, 215.79, 347.07]$ ,故最佳分类数为3。最佳聚类结果和聚类中心所对应的馈线分别如表5、6所示。

表5 聚类划分结果

Table 5 Clustering result

聚类类别	供电半径	主干线截面积	年供电量	馈线数量/条
I	小	大	大	355
II	中	小	中	112
III	大	中	小	76

表6 聚类中心所对应馈线

Table 6 Feeders in clustering center

聚类类别	供电半径/ km	主干线截面积/ mm <sup>2</sup>	年供电量/ (10 <sup>4</sup> kW·h)
I	4.7	300	1 363
II	9.6	120	658
III	22.4	240	256

接着对各馈线进行母线电压特性评估。限于篇幅,不再列出具体的评估结果。根据母线电压特性评估等级对初步聚类结果进一步精细划分,如表7所示。母线电压特性“非差”是指电压概率分布和时域波动等级都不为差;“仅分布差”是指概率分布等级为差,时域波动等级不为差;“波动差”是指时域波动等级为差,而概率分布等级无限制。

从聚类结果看,I类别馈线的供电半径较小,主干线截面较大,即导线属性较好,但年供电量较大即负荷较重,所以应加装自动调压器。II类别馈线的供电半径和年供电量均处于中等水平,但主干线截面较小,所以应更换合适的粗线径导线。III类别馈线的主干线截面处于中等水平,且线路负荷较轻,但供电半径较大,所以应根据周围有否临近电源点调整网架结构或者增加变电站布点。在此基础上,对于母线电压特性等级为差的馈线,应优先选择母线电压治理。若仅概率分布等级为差,则应调节母线电压;若时域波动等级为差,则应在母线上加装动态无功补偿装置。各类馈线对应的电压治理措施如表8所示。

表7 精细划分结果

Table 7 Fine division results

供电半径	主干线截面积	年供电量	母线电压特性	馈线数量/条	细分类别
小	大	大	非差	232	I A
			仅分布差	17	I B
			波动差	106	I C
中	小	中	非差	74	II A
			仅分布差	10	II B
			波动差	28	II C
大	中	小	非差	53	III A
			仅分布差	4	III B
			波动差	19	III C

表8 各类馈线对应的电压治理措施

Table 8 Voltage governance measures for various feeders

类别	治理措施
I A	加装自动调压器
I B	调节母线电压、加装自动调压器
I C	加装动态无功补偿装置、加装自动调压器
II A	线路无功补偿、增大导线截面
II B	调节母线电压、线路无功补偿、增大导线截面
II C	加装动态无功补偿装置、增大导线截面
III A	线路无功补偿、调整网架结构、增加变电站布点
III B	调节母线电压、线路无功补偿、调整网架结构、增加变电站布点
III C	加装动态无功补偿装置、调整网架结构、增加变电站布点

表8的馈线分类及措施选择结果有助于电网企业制定中压配网的治理与改造规划,从而提高措施针对性和投资有效性。同时,当某条馈线产生电压问题时,也可根据相关指标数据找出其所属类别,从而快速确定应选择的电压治理措施。

## 5 结语

随着配电网精细化管理的推进,亟须建立科学、有效的电压治理措施选择机制,该文开展了研究。

1)考虑馈线自身属性参数对电压的影响,设计涵盖线路属性、负荷特性的电压特征指标体系,提高初步聚类划分的合理性。

2)考虑中压母线对馈线电压的影响,设计衡量电压概率分布与时域波动特性的母线电压特性评估方法,该方法所得评估结果是对馈线进一步精细划分的重要依据。

3)所得馈线分类结果可有效判断每类馈线需在母线上还是在线路上进行电压治理,以及指导设备类型的选择,有助于电网企业开展中压配网的治理与改造工作。

### 参考文献:

- [1] 张喆,李庚银,魏军强.考虑分布式电源随机特性的配电网电压质量概率评估[J].中国电机工程学报,2013,33(13):150-156.  
ZHANG Zhe, LI Gengyin, WEI Junqiang. Probabilistic evaluation of voltage quality in distribution networks considering the stochastic characteristic of distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 150-156.
- [2] 邱志鹏,吕平,张健,等.配电网居民客户端低电压治理方案探讨[J].供用电,2015,32(11):75-78.  
QIU Zhipeng, LV Ping, ZHANG Jian, et al. Solution for the low voltage problem of residential customers in distributed network[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(11): 75-78.
- [3] 邓鋆芃,郑洁云,陈旷,等.考虑可靠性及电压稳定性的主动配电网多目标分层规划[J].电力科学与技术学报,2018,33(4):3-12.  
DENG Junpeng, ZHENG Jieyun, CHEN Kuang, et al. Multi-objective two-layer planning for active distribution network by considering economics, reliability and voltage stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 3-12.
- [4] Farag H E Z, El Saadany E F. A novel cooperative protocol for distributed voltage control in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1645-1656.
- [5] 张勇军,林建熙,杨银国.电力系统无功电压调控配合研究综述[J].电网技术,2012,36(3):101-107.  
ZHANG Yongjun, LIN Jianxi, YANG Yinguo. Survey on voltage/var control and coordination of power systems [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 101-107.
- [6] 陶志东,顾浩,丁晓群.基于电压稳定影响的多目标无功优化研究[J].智慧电力,2018,46(10):63-70.  
TAO Zhidong, GU Hao, DING Xiaoqun. Study of multi-objective reactive power optimization based on voltage stability[J]. Smart Power, 2018, 46(10): 63-70.
- [7] 张国荣,马晓芳,彭勃,等.基于三端口柔性多状态开关的电压波动治理研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(23):57-64.  
ZHANG Guorong, MA Xiaofang, PENG Bo, et al. Distribution network voltage fluctuation control based on flexible multi-state switch[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 57-64.
- [8] 蓝敏,李朔宇,李锡祺,等.基于聚类分群的线损特征分析方法[J].电力科学与技术学报,2013,28(4):54-58.  
LAN Min, LI Shuoyu, LI Xiqi, et al. Cluster algorithm based line losses analysis method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(4): 54-58.
- [9] 简金宝,王媛媛,曾祥君,等.基于系统聚类分析的馈线接地保护[J].电力系统自动化,2013,37(5):111-116.  
JIAN Jinbao, WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, et al. Earth fault feeder detection based on hierarchical clustering analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 111-116.
- [10] 李雅洁,孟晓丽,宋晓辉,等.基于最优FIR滤波器与层次聚类的配电网单相接地故障选线方法[J].电网技术,2015,39(1):143-149.  
LI Yajie, MENG Xiaoli, SONG Xiaohui, et al. Single-phase-to-ground fault line detection for distribution network based on optimal finite impulse response filter and hierarchical clustering[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 143-149.
- [11] 张忠会,刘故帅,谢义苗,等.基于谱聚类的城市低电压分区治理决策[J].中国电力,2016,49(10):101-105.  
ZHANG Zhonghui, LIU Gushuai, XIE Yimiao, et al. Treatment decision-making of partition in low voltage based on spectral clustering in urban power system [J]. Electric Power, 2016, 49(10): 101-105.
- [12] 杜林,郭良峰,司马文霞,等.基于遗传算法的电网过电压分层模糊聚类识别[J].中国电机工程学报,2010,30(10):119-124.  
DU Lin, GUO Liangfeng, SIMA Wenxia, et al. Hierarchical fuzzy-clustering classification of overvoltages in power systems based on the genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 119-124.
- [13] 曲福恒,崔广才.模糊聚类算法及应用[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [14] 林海明.因子分析模型的改进与应用[J].数理统计与管理,2009,28(6):998-1012.  
LIN Haiming. The improvement and application of factor analysis model[J]. Application of Statistics and Management, 2009, 28(6): 998-1012.
- [15] 周开乐,杨善林,丁帅,等.聚类有效性研究综述[J].系统工程理论与实践,2014,34(9):2417-2431.  
ZHOU Kaile, YANG Shanlin, DING Shuai, et al. On cluster validation[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2014, 34(9): 2417-2431.
- [16] DL/T 500—2009.电压监测仪使用技术条件[S].
- [17] GB/T12325—2008.电能质量供电电压偏差[S].