

基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估

肖 白¹, 刘亚伟¹, 施永刚², 焦明曦³

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021;

3. 国网吉林省电力有限公司 长春供电公司, 吉林 长春 130021)

摘要:针对专家评判法在中压配电网供电可靠性评估确定指标权重的过程中容易受主观因素影响的问题,提出一种基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估方法。建立中压配电网供电可靠性评估指标体系,构造待评估对象的评估指标矩阵,并将其依次处理为归一化指标矩阵和标准化指标矩阵;通过对标准化指标矩阵的主成分分析,确定起主要作用的主成分,并以此求取综合评估函数中各可靠性指标的权重;建立待评估对象的供电可靠性综合评估函数,进而求得待评估对象的可靠性评估值;结合各指标权重及其归一化指标值绘制待评估对象的各指标满意度及重要性区域图,为中压配电网具有更高可靠性的改造提供了量化、直观的科学依据。工程实例证明了所提方法的有效性和实用性。

关键词:中压配电网;主成分分析;可靠性;评估指标

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.002

0 引言

中压配电网可靠性评估能够有效指导供电系统规划、设计、建设、改造、运行及管理,改善系统的供电可靠性,提高电网投资效益,国内外越来越多的供电企业正在开展或计划开展此项工作^[1]。在保证电力系统供电质量的前提下,配电网的可靠性评估是提高电力工业现代化水平的重要工作环节,通过对配电网的可靠性评估,发现中压配电网的薄弱环节,找到影响供电可靠性的主要因素,进而针对存在的问题提出具体的电网改造方案,进一步改善供电可靠性,并使整个配电网的安全性能和经济效益得到增加。

当前配电网可靠性评估的典型方法有^[2-12]故障模式影响分析法^[6]、人工神经网络法^[7]、可靠性框图法^[8]、蒙特卡罗法^[9]和故障树分析法^[10]。在对配电网进行整体可靠性评估的过程中往往需考虑多个指标综合作用的结果,其中指标权重的确定大多采用依赖专家评判^[11],这种赋权方法受到专家知识、经验、偏好的制约,易受主观性和偶然性因素的影响;而 TOPSIS 法^[12]在对指标进行同趋势的转换中权重易受叠代法的影响。

针对上述问题,本文提出一种基于主成分分析 PCA (Principal Component Analysis) 的中压配电网供电可靠性评估方法。首先建立中压配电网供电可靠

性评估指标体系,构造待评估对象的评估指标矩阵;其次通过 PCA 确定起主要作用的主成分,并据此求取综合评估函数中各可靠性指标的权重;然后建立供电可靠性综合评估函数;最后结合各指标权重及其归一化指标值,绘制待评估对象的各指标满意度及重要性区域图。工程实例表明该方法是有

1 PCA 原理简介

PCA 法是一种常用的数据分析方法。目前 PCA 法在电力系统状态估计、输电网规划方案决策等^[13-15]众多研究领域已经成功应用。PCA 通过线性变换将给定的一组相关变量转换成另一组不相关的变量,这些新的变量按照方差依次递减的顺序排列,可用于提取数据的主要特征分量,常用于高维数据的降维。新变量即称为主成分,而且其保留了原有变量中所包含的信息^[16]。PCA 主要通过坐标的平移和旋转达到降维的目的。假设有 2 维数据表,其中数据呈椭圆状分布,重心为坐标原点,如图 1 所示。将坐标系作旋转变换,以数据变异最大的方向为 Y_1 轴,得到一个正交坐标系 Y_1OY_2 ,忽略数据变异较小的方向,即 Y_2 轴方向,将数据点投影在 Y_1 轴上。这样就可以将原来 2 维数据空间的问题简化到 1 维数据空间进行分析。

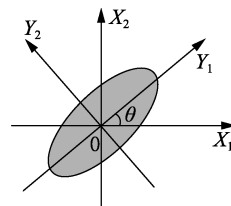


图1 PCA 降维原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of dimension reduction of PCA

收稿日期:2018-01-02;修回日期:2018-06-22

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(20170101120JC);吉林省教育厅科技项目(JJKH20180442KJ)

Project supported by Jilin Provincial Natural Science Foundation (20170101120JC) and the Scientific Item of Education Bureau of Jilin Province (JJKH20180442KJ)

2 构建基于 PCA 的可靠性评估模型

2.1 建立中压配电网供电可靠性评估指标体系

本文在文献[17]的五大类 33 个用于配电网可靠性评估的指标中,从最能表征中压配电网用户用电可靠性的角度,确定 8 个指标,建立中压配电网供电可靠性评估指标体系。这 8 个指标分别为系统平均停电频率指标(SAIFI)、系统平均停电持续时间指标(SAIDI)、用户平均停电频率指标(CAIFI)、用户平均停电持续时间(CAIDI)、平均供电可用率(ASAI)、用户平均缺供电量(AENS)、预安排停电平均持续时间(MID-S)、平均停电用户数(MIC)。

2.2 构造标准化可靠性指标矩阵

待评估对象为多地区或同一地区不同时期的中压配电网供电系统。根据多地区的中压配电网待评估对象的可靠性横向比较结果,可确定下一阶段配电网改造优先级。而同一地区不同时期的中压配电网可靠性纵向比较结果,可以反映配电网建设发展状态是否满足合理有效性,并可预测下一时期的配电网可靠性发展状态,为配电网改造建设提供依据。

SAIFI、SAIDI、CAIFI、CAIDI、AENS、MID-S、MIC 均为指标值越小越好的逆向指标,ASAI 为指标值越大越好的正向指标,为了便于分析和计算,本文将各逆向指标均正向化处理为正向指标^[18]。

由 n 个待评估对象 m 个供电可靠性评估指标构成的指标矩阵如式(1)所示。

$$\mathbf{X} = (x_{ji})_{n \times m} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_i, \dots, \mathbf{X}_m) \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m\} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{X}$ 为由 $n \times m$ 个指标值构造的指标矩阵; $\mathbf{X}_i$ 为指标矩阵中的第 i 个指标列向量; x_{ji} 为第 j 个待评估对象的第 i 个指标值; $\mathbf{x}$ 为供电可靠性评估指标体系中指标的集合; x_i 为指标集合中的第 i 个指标; m 为可靠性评估指标体系中的指标个数; n 为待评估对象的个数。

利用式(3)对正向指标进行归一化处理:

$$x_{ji}^* = \frac{x_{ji}}{\max(x_{ji})} \quad (3)$$

利用式(4)对逆向指标进行正向化和归一化处理:

$$x_{ji}^* = 1 - \frac{x_{ji}}{\max(x_{ji})} + \left\{ 1 - \max \left[1 - \frac{x_{ji}}{\max(x_{ji})} \right] \right\} \quad (4)$$

通过对正向指标归一化及对逆向指标正向化和归一化处理后,得到如式(5)所示的归一化可靠性指标矩阵。

$$\mathbf{X}^* = (x_{ji}^*)_{n \times m} = (\mathbf{X}_1^*, \mathbf{X}_2^*, \dots, \mathbf{X}_i^*, \dots, \mathbf{X}_m^*) \quad (5)$$

对归一化指标矩阵 $\mathbf{X}^*$ 进行标准化处理,得到如式(6)所示的标准化可靠性指标矩阵。

$$\mathbf{X}_Z^* = (x_{Zji}^*)_{n \times m} = (\mathbf{X}_{Z1}^*, \mathbf{X}_{Z2}^*, \dots, \mathbf{X}_{Zi}^*, \dots, \mathbf{X}_{Zm}^*) \quad (6)$$

2.3 构造标准化可靠性指标矩阵

构造标准化指标矩阵 $\mathbf{X}_Z^*$ 的相关系数矩阵,得到如式(7)所示的矩阵。

$$\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times m} \quad (7)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(\mathbf{X}_{Zi}^*, \mathbf{X}_{Zj}^*)}{\sqrt{D(\mathbf{X}_{Zi}^*)} \sqrt{D(\mathbf{X}_{Zj}^*)}} \quad (8)$$

其中, $\text{cov}(\mathbf{X}_{Zi}^*, \mathbf{X}_{Zj}^*)$ 为标准化可靠性指标矩阵中第 i 列向量和第 j 列向量的协方差; $D(\mathbf{X}_{Zi}^*)$ 和 $D(\mathbf{X}_{Zj}^*)$ 分别为标准化可靠性指标矩阵中第 i 列向量和第 j 列向量的方差; r_{ij} 反映了指标 x_i 和指标 x_j 的相关程度, r_{ij} 值越大表示指标间相关程度越高,且当多数 r_{ij} 值大于等于 0.7 时,满足主成分降维的要求^[19]。

求相关系数矩阵 $\mathbf{R}$ 的特征值,选出其中大于 0 的特征值构造如式(9)所示的特征值集合。

$$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_q\} \quad (9)$$

其中, λ_k 为相关系数矩阵 $\mathbf{R}$ 大于零的特征值,且规定 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k \geq \dots \geq \lambda_q > 0$ 。

特征值集合 λ 对应的规范正交特征向量矩阵 $\mathbf{A}$ 如式(10)所示。

$$\mathbf{A} = (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_k, \dots, \mathbf{A}_q) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2i} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{ki} & \dots & a_{km} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{q1} & a_{q2} & \dots & a_{qi} & \dots & a_{qm} \end{bmatrix}_{q \times m} \quad (10)$$

由主成分定义可知,对标准化指标矩阵进行 PCA 后主成分的表达式如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \\ \vdots \\ y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2i} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{ki} & \dots & a_{km} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{q1} & a_{q2} & \dots & a_{qi} & \dots & a_{qm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{Z1}^* \\ \mathbf{X}_{Z2}^* \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{Zi}^* \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{Zm}^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, y_k 为特征值 λ_k 对应的主成分。

主成分 y_k 对应的特征值 λ_k 为该主成分的方差,由式(12)可得主成分 y_k 的方差对总方差的贡献率为:

$$\mu_k = \lambda_k / \sum_{j=1}^q \lambda_j \quad (12)$$

其中, μ_k 反映了 y_k 包含所有指标信息的百分比。

由式(12)可知,各主成分方差贡献率大小依次递减,其中第一主成分方差贡献率最大,前 d 个主成分的累计方差贡献率为:

$$\mu = \sum_{k=1}^d \lambda_k / \sum_{j=1}^q \lambda_j \quad (13)$$

依据采用累计方差贡献率确定主要主成分的原则,当累计方差贡献率 $\mu \geq 80\%$ 时,可知前 d 个主成分可以基本反映 m 个指标的信息,初步确定前 d 个主成分为起主要作用的主成分,但需进一步检验确定。

对标准化指标矩阵 $\mathbf{X}_z^*$ 进行 PCA 法下的因子分析^[20],得到如式(14)所示的指标 x 与主成分 y_k 的相关载荷阵。

$$\mathbf{B}_d^0 = (\mathbf{b}_1^0, \dots, \mathbf{b}_k^0, \dots, \mathbf{b}_d^0) = (\mathbf{b}_{ik}^0)_{m \times d} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{B}_d^0$ 为主成分载荷阵; $\mathbf{b}_k^0$ 为指标 x 与主成分 y_k 的相关载荷列向量; $\mathbf{b}_{ik}^0$ 为指标 x_i 与主成分 y_k 的相关载荷值。

观察主成分载荷阵 $\mathbf{B}_d^0$, 如果前 d 个主成分与各指标有较高的相关载荷值,表明前 d 个主成分可以基本反映各指标的信息,可最终确定起主要作用的主成分为前 d 个主成分。

由上述分析可知,前 d 个主成分可基本反映 m 个指标所包含的信息,利用前 d 个主成分对应的特征值及规范正交特征向量矩阵元素值确定各指标的权重,如式(16)所示。

$$\boldsymbol{\Omega}_x = (\omega_{x_1}, \omega_{x_2}, \dots, \omega_{x_i}, \dots, \omega_{x_m})_{1 \times m} \quad (15)$$

$$\omega_{x_i} = \frac{\sum_{k=1}^d (a_{ki} \lambda_k) / \sum_{k=1}^d \lambda_k}{\sum_{j=1}^m \left[\sum_{k=1}^d (a_{kj} \lambda_k) / \sum_{k=1}^d \lambda_k \right]} \quad (16)$$

其中, ω_{x_i} 为求得的评估指标体系中第 i 个指标的权重值; $\boldsymbol{\Omega}_x$ 为评估指标体系中各指标权重构成的行向量。

2.4 建立中压配电网供电可靠性评估模型

计算出各指标权重后,结合式(5)中的归一化指标矩阵构建中压配电网供电可靠性综合评估函数,如式(17)所示。

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\Omega}_x (\mathbf{X}^*)^T = (f(1), \dots, f(j), \dots, f(n)) \quad (17)$$

$$f(j) = (\omega_{x_i})_{1 \times m} (x_{ji}^*)_{1 \times m}^T \quad (18)$$

其中, $f(j)$ 为第 j 个待评估对象的中压配电网供电

可靠性评估函数值; $\mathbf{F}$ 为各待评估对象的中压配电网供电可靠性评估函数值的行向量。

通过对式(17)和(18)的计算,可以得到待评估对象的可靠性评估函数值,为了详细解析待评估对象的可靠性评估值,本文以各指标满意度为横坐标,以各指标重要性程度为纵坐标,绘制各指标满意度及重要性区域图,通过区域图对影响待评估对象的各供电可靠性评估指标进行解析,确定出主要影响待评估对象供电可靠性指标。其中,以式(5)中归一化指标矩阵的行向量表征各指标满意度,以式(16)中的各指标权重值表征各指标重要性程度。

3 工程实例分析

本文供电可靠性待评估对象选自东北某经济技术开发区中压配电网,如图2所示,总供电区域面积为 112 km^2 ,依据 66 kV 变电站主变联络关系划分为 13 个供电分区,分别为 U1—U13。评估年份为 2014 年。评估所用的指标数据为该区供电公司根据实际电网运行统计及计算所得。选取供电分区 U1—U13 的 8 个指标数据,详见表 1。

利用式(1)、(4)对由表 1 构造的指标矩阵进行

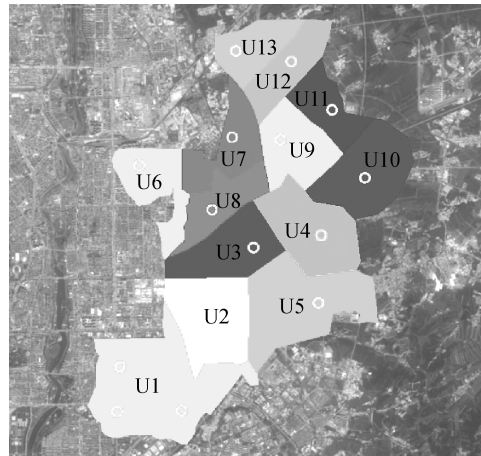


图 2 经济技术开发区地理范围及各供电分区

Fig.2 Geography of economic technological development zone and power supply partitions

表 1 U1—U13 各分区供电可靠性指标

Table 1 Power supply reliability indexes of partition U1-U13

分区	SAIFI/ [次·(户·a) ⁻¹]	SAIDI/ [h·(户·a) ⁻¹]	CAIFI/ [次·(户·a) ⁻¹]	CAIDI/ [h·(户·a) ⁻¹]	ASAI/%	AENS/ [(kW·h)·(户·a) ⁻¹]	MID-S/ (h·次 ⁻¹)	MIC/ (户·次 ⁻¹)
U1	0.941 4	7.440 6	1.360 4	5.330 9	99.992	3.705	3.29	38.1
U2	0.904 1	6.668 4	1.333 4	4.968 6	99.996	3.448	3.24	37.2
U3	1.079 4	9.393 0	1.793 5	5.429 3	99.986	3.197	3.26	38.9
U4	1.792 7	10.011 2	1.819 8	5.584 2	99.975	3.248	3.44	43.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
U10	1.848 1	10.538 1	1.838 2	5.816 9	99.875	3.455	3.47	43.6
U11	1.112 8	9.887 3	1.811 6	5.655 5	99.886	3.401	3.29	39.1
U12	0.932 1	7.019 4	1.346 9	5.175 6	99.942	3.668	3.27	37.4
U13	1.157 3	9.986 2	1.865 9	6.107 9	98.388	3.571	3.36	39.7

正向化和归一化处理,得到归一化指标矩阵 X^* 为:

$$X^* = \begin{bmatrix} 0.509 & 0.639 & \cdots & 0.947 & 0.934 & 0.857 \\ 0.579 & 0.631 & \cdots & 0.703 & 0.940 & 0.844 \\ 0.891 & 0.700 & \cdots & 0.958 & 0.985 & 0.957 \\ 0.985 & 0.967 & \cdots & 0.903 & 0.991 & 0.996 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.606 & 0.681 & \cdots & 0.760 & 0.950 & 0.849 \\ 0.909 & 0.746 & \cdots & 1.000 & 0.994 & 0.962 \\ 1.000 & 1.000 & \cdots & 0.949 & 1.000 & 0.944 \\ 0.981 & 0.928 & \cdots & 0.896 & 0.984 & 0.979 \end{bmatrix}_{13 \times 8} \quad (19)$$

由式(6)对归一化指标矩阵 X^* 进行标准化处

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.837\ 8 & 0.785\ 0 & 0.695\ 9 & 0.113\ 0 & 0.771\ 9 & 0.942\ 6 & 0.980\ 8 \\ 0.837\ 8 & 1 & 0.986\ 1 & 0.804\ 7 & 0.133\ 5 & 0.787\ 2 & 0.765\ 9 & 0.860\ 3 \\ 0.785\ 0 & 0.986\ 1 & 1 & 0.788\ 1 & 0.142\ 8 & 0.895\ 0 & 0.707\ 7 & 0.821\ 6 \\ 0.695\ 9 & 0.804\ 7 & 0.788\ 1 & 1 & 0.681\ 9 & 0.738\ 1 & 0.830\ 6 & 0.726\ 8 \\ 0.113\ 0 & 0.113\ 5 & 0.142\ 8 & 0.681\ 9 & 1 & 0.881\ 0 & 0.410\ 7 & 0.135\ 0 \\ 0.771\ 9 & 0.787\ 2 & 0.895\ 0 & 0.738\ 1 & 0.880\ 1 & 1 & 0.795\ 0 & 0.817\ 0 \\ 0.942\ 6 & 0.765\ 9 & 0.707\ 7 & 0.830\ 6 & 0.410\ 7 & 0.795\ 0 & 1 & 0.936\ 6 \\ 0.980\ 6 & 0.860\ 3 & 0.821\ 6 & 0.726\ 8 & 0.135\ 0 & 0.817\ 0 & 0.936\ 6 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$a_1 = \begin{bmatrix} 0.394\ 3 \\ 0.391\ 0 \\ 0.379\ 4 \\ 0.383\ 2 \\ 0.254\ 7 \\ 0.220\ 9 \\ 0.403\ 4 \\ 0.406\ 6 \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} 0.224\ 2 \\ 0.234\ 5 \\ 0.219\ 1 \\ -0.307\ 3 \\ -0.788\ 1 \\ -0.307\ 7 \\ -0.069\ 1 \\ 0.178\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

对 X_z^* 进行 PCA 法下的因子分析,得到指标 x 与主成分 y_k 的相关载荷阵如表 2 所示。

表 2 因子载荷阵

Table 2 Factor loading matrix

矩阵	主成分	SAIFI	SAIDI	CAIFI	CAIDI	ASAI	AENS	MID-S	MIC
$(B_z^0)^T$	y_1	0.924	0.916	0.889	0.898	0.363	0.518	0.945	0.953
	y_2	-0.253	-0.223	-0.247	0.346	0.888	0.347	0.078	-0.201

由表 2 可知,主成分 y_1 与所有的指标均为显著正相关,除了指标 ASAI 外,其余各指标与第一主成分均有较高的相关载荷值,即第一主成分反映了 SAIFI 指标包含信息的 92.4%、SAIDI 指标包含信息的 91.6%、CAIFI 指标包含信息的 88.9%、CAIDI 指标包含信息的 89.9%、ASAI 指标包含信息的 36.3%、AENS 指标包含信息的 51.8%、MID-S 指标包含信息的 94.5%、MIC 指标包含信息的 95.3%,说明第一主成分反映了除指标 ASAI 外的其他指标信息。而指标 ASAI 与第二主成分 y_2 的相关载荷值为 0.888,说明第二主成分反映了指标 ASAI 的信息,同时结合式

理,得到标准化指标矩阵 X_z^* ,利用式(7)和(8)对标准化指标矩阵 X_z^* 求相关系数矩阵,得到相关系数矩阵 R 如式(20)所示。

相关系数矩阵 R 是主对角线上元素均为 1 的对称阵,矩阵中元素的绝对值多数均大于 0.7,即变量之间有高度相关性,满足主成分降维要求。

求相关系数矩阵 R 的特征值,由式(9)得 $\lambda = \{5.49, 1.27, 0.80, 0.44\}$ 。

依据采用累计方差贡献率选取主要主成分的原则,由式(13)计算可知特征值 λ_1 和 λ_2 的累计方差贡献率 $\mu = 84.5\%$;同时 λ_1 和 λ_2 对应的规范正交特征向量矩阵的列向量如式(21)所示。

(13)得出前 2 个主成分的累计方差贡献率 $\mu = 84.5\%$,可看出提取 2 个主成分就能反映全部指标的信息,所以用 2 个主成分可以基本反映原来 8 个指标的信息,可确定起主要作用的主成分为 y_1 和 y_2 。

由上述可知,前 2 个主成分可基本反映 8 个指标包含的信息,利用式(16)求得各指标权重值见表 3。

表 3 各指标权重

Table 3 Weight of each index

指标	权重	指标	权重
SAIFI	0.166	ASAI	0.027
SAIDI	0.165	AENS	0.056
CAIFI	0.160	MID-S	0.144
CAIDI	0.116	MIC	0.166

由表 3 可以看出,各指标权重大小排序依次为 SAIFI, MIC > SAIDI > CAIFI > MID-S > CAIDI > AENS > ASAI,揭示了各个指标对中压配电网供电可靠性评估的权重大小,其数值大小也反映了各个指标的相对重要程度;同时表 3 反映了 SAIFI、MIC、SAIDI 等权重较大的指标是影响该评估地区中压配电网可靠性的主要因素,也是下一阶段配电网改造过程中需解决的主要问题。

计算出各指标权重后,结合式(5)中归一化指标矩阵得中压配电网供电可靠性评估函数式(17)和(18),计算可得各待评估对象的中压配电网供电可靠性评估值,如表 4 所示。

由表 4 可以看出,在 2014 年所有的供电分区分中,供电分区 U9 的供电可靠性评估值为 0.726,是供

表 4 各供电分区供电可靠性评估值

Table 4 Results of power supply reliability evaluation for each partition

分区	评估值	分区	评估值	分区	评估值
U1	0.964	U6	0.737	U11	0.869
U2	0.997	U7	0.957	U12	0.980
U3	0.890	U8	0.779	U13	0.844
U4	0.789	U9	0.726		
U5	0.755	U10	0.766		

电可靠性最差的供电分区,同时由表 4 的结果可以得出下阶段各供电分区的电网改造优先级依次为 $U9>U6>U5>U10>U8>U4>U13>U11>U3>U7>U1>U12>U2$ 。为了找出影响供电分区 U9 供电可靠性的主要原因,以供电分区 U9 的各指标满意度为横坐标,各指标重要性程度为纵坐标绘制供电分区 U9 的各指标满意度及重要性区域图,如图 3 所示。

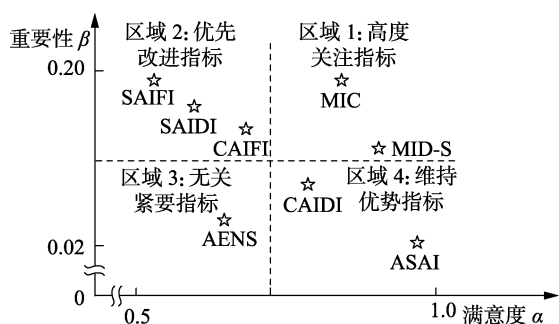


图 3 各指标满意度及重要性区域图

Fig.3 Quadrant diagram of satisfaction and importance for each index

以求得的归一化指标矩阵中第 9 行指标值表征供电分区 U9 的各指标满意度,如表 5 所示。以式(16)求得的各指标权重值表征供电分区 U9 的各指标重要性程度,如表 3 所示。

表 5 供电分区 U9 的各指标满意度值

Table 5 Satisfaction value of each index for partition U9

指标	满意度	指标	满意度
SAIFI	0.544	ASAI	0.984
SAIDI	0.622	AENS	0.655
CAIFI	0.680	MID-S	0.920
CAIDI	0.780	MIC	0.829

由图 3 可以看出, α 轴和 β 轴将第一象限分为 4 个区域($\alpha \in (0.5, 1)$ 、 $\beta \in (0.020, 0.166)$),本文取 $\alpha = 0.85$ 、 $\beta = 0.125$,通过区域图能够非常直观地看出造成供电分区 U9 供电可靠性低的主要薄弱点,以及在下步改造中的优势和劣势,从而可以有针对性地确定改造方案中的重点。

图 3 中,区域 1 属于重要性高满意度也高的指标区域,其中包含指标 MID-S、MIC,这 2 个指标对应的电网改造是下步改造中的高度关注点,既要保持现有优势又要对其加强巩固;区域 2 属于重要性高但满意度低的指标区域,其中包含指标 SAIFI、

SAIDI、CAIFI,针对影响这 3 个指标的薄弱环节进行电网改造可以显著提高供电可靠性;区域 3 属于重要性和满意度都低的区域,其中包含指标 AENS,可以看出指标 AENS 不是造成供电分区 U9 供电可靠性低的主要原因,在下步改造优先级中低于区域 2 中的指标;区域 4 中的 CAIDI、ASAI 为维持优势指标,即其满意度高于重要性,反映了上次电网改造成果的有效性,同时也指出了在下步改造中,可以将该区域指标改造的资金和资源转到其他重要的方面,如与区域 2 中指标对应的电网改造。

4 结论

本文提出了一种基于 PCA 的中压配电网供电可靠性评估方法,具有以下特点:

- 通过 PCA 求取可靠性指标权重的方法,在对中压配电网各可靠性指标构建的矩阵进行 PCA 时,充分利用客观数据特征确定各指标权重,有效避免了在确定指标权重过程中,受主观因素的不利影响;
- 能够对整体或单个区块内电网的可靠性进行评估,并通过绘制待评估对象的各指标满意度及重要性区域图,量化、直观地展示了对中压配电网可靠性进行综合评估的结果,使工作人员很容易看出应该优先从哪几个与可靠性指标对应的内容入手,建设或改造中压配电网;
- 原理简单且易于实现,能对多地区或同一地区不同时期多个待评估对象进行供电可靠性评估,识别中压配电网在多个供电分区中的薄弱区块,给出优先从哪个供电分区开始改造中压配电网的依据。

参考文献:

- [1] 万凌云,王主丁,伏进,等. 中压配电网可靠性评估技术规范研究[J]. 电网技术,2015,39(4):1096-1100.
WAN Lingyun, WANG Zhuding, FU Jin, et al. Research on technical standard for reliability assessment of medium voltage distribution networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1096-1100.
- [2] KJOLLE G, ROLFSENG L, DAHL E. The economic aspect of reliability in distribution system planning[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 1153-1157.
- [3] 邱生敏,管霖. 规划配电网简化方法及其可靠性评估算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):85-90.
QIU Shengmin, GUAN Lin. Simplification of distribution network planning and its reliability evaluation algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 85-90.
- [4] 郑文杰,黄嘉健,孙川,等. 基于停电性质分类的多环节电网可靠性评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):129-135.
ZHENG Wenjie, HUANG Jiajian, SUN Chuan, et al. Reliability evaluation based on outage character classification for multi-level power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 129-135.
- [5] 商海涛,吴林,赵渊,等. 计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):129-135.
SHANG Haitao, WU Lin, ZHAO Yuan, et al. Reliability evaluation model of distribution network incorporating centralized feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):

- 129-135.
- [6] LI Weixing, WANG Peng, LI Zhimin, et al. Reliability evaluation of complex radial distribution systems considering restoration sequence and network constraints[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 753-758.
- [7] WANG W D, LOMAN J M, ARNO R G, et al. Reliability block diagram simulation techniques applied to the IEEE Std. 493 standard network[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2004, 40(3): 887-895.
- [8] WARREN C A, AMMON R, WELCH G. A survey of distribution reliability measurement practices in the US[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(1): 250-257.
- [9] 赵洪山, 赵宇航, 候杰群, 等. 需求响应对配电网供电可靠性影响分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 8-14.
ZHAO Hongshan, ZHAO Yuhang, HOU Jiequn, et al. Effect of demand response on supply reliability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 8-14.
- [10] BROWN R E, GUPTA S, CHRISTIE R D. Distribution system reliability assessment: momentary interruptions and storms[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4): 1569-1575.
- [11] 李晓辉, 徐晶, 李达, 等. 基于层次分析的配电网可靠性评估指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(3): 69-74.
LI Xiaohui, XU Jing, LI Da, et al. Index system of reliability evaluation for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2009, 21(3): 69-74.
- [12] 胡元潮, 阮江军, 杜志叶, 等. 基于TOPSIS法的变电站一次设备智能化评估[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 22-27.
HU Yuanchao, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Evaluation of substation primary equipment intellectualization based on TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 22-27.
- [13] 杨廷方, 张航, 黄立滨, 等. 基于改进型主成分分析的电力变压器潜伏性故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 149-153.
YANG Tingfang, ZHANG Hang, HUANG Libin, et al. Incipient fault diagnosis based on improved principal component analysis for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 149-153.
- [14] 刘宝英, 杨仁刚. 基于主成分分析的最小二乘支持向量机短期负荷预测模型[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 13-17.
LIU Baoying, YANG Rengang. Short-term load forecasting model based on LS-SVM with PCA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 13-17.
- [15] 聂宏展, 聂耸, 乔怡, 等. 基于主成分分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 134-138.
NIE Hongzhan, NIE Song, QIAO Yi, et al. Comprehensive decision-making of alternative transmission network planning based on principal component analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 134-138.
- [16] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
YU Xiaofen, FU Dai. A summary of multi-index comprehensive evaluation methods[J]. Statistics and Decision, 2004(11): 119-121.
- [17] 国家能源局. 供电系统用户可靠性评价规程: DL/T 836—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [18] 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
ZHANG Peng. Comprehensive evaluation based on principal component analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004.
- [19] 余锦华. 多元统计分析与应用[M]. 广州: 中山大学出版社, 2005: 193-197.
- [20] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. 统计研究, 2013, 30(8): 25-31.
LIN Haiming, DU Zifang. Some problems in comprehensive evaluation in the principal component analysis[J]. Statistical Research, 2013, 30(8): 25-31.

作者简介:



肖 白

肖 白(1971—),男,吉林吉林人,教授,博士,长期从事电力系统规划、城市电网风险评估、电力系统继电保护等方面的研究与教学工作(E-mail:xbxiaobai@126.com);

刘亚伟(1989—),男,河南永城人,硕士,主要研究方向为电力系统规划、风险评估(E-mail:dqlyw0923@163.com)。

Power supply reliability assessment of mid-voltage distribution network based on principal component analysis

XIAO Bai¹, LIU Yawei¹, SHI Yonggang², JIAO Mingxi³

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Company Co., Ltd., Changchun 130021, China;

3. Changchun Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Company Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: Aiming at the problem that the expert judgment method is easily influenced by subjective factors in the process of determining the index weight for power supply reliability evaluation of mid-voltage distribution network, an evaluation method based on principal component analysis is proposed. The evaluation index system of power supply reliability for mid-voltage distribution network is established, and the evaluation index matrix of the objects to be evaluated is constructed, which is successively converted to the normalized index matrix and standardized index matrix. The principal components playing the leading role are determined according to the principal component analysis of standardized index matrix, and the weights of each reliability index of the comprehensive evaluation function are calculated. The comprehensive evaluation function is then established to obtain the reliability evaluation value of the objects to be evaluated. Combined with the weights of each index and its normalized index value, the quadrant diagrams of satisfaction and importance for each index are drawn, which provides a quantitative and intuitive scientific tool for the reconstruction of mid-voltage distribution network with higher reliability. The validity and practicality of the proposed method are verified by an engineering example.

Key words: mid-voltage distribution network; principal component analysis; reliability; evaluation index