

DOI: 10.7667/PSPC160430

基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估

马纪, 刘希喆

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 为了从众多低压配网台区中高效筛选出健康状态差的台区进行优化改造, 提出基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估方法。首先从低压配网台区的6个状态指标建立评估指标体系。其次对指标进行一致化处理, 并用极值处理法对指标进行无量纲处理。然后用序关系分析法加入专家经验求得各指标的主观权重, 同时用熵权法求得各指标的客观权重。最后利用拉格朗日最优乘法求得各指标的综合权重, 得到低压配网台区健康状态的评估函数, 根据评估函数值对低压配网台区健康状态做出评估。通过对某地的若干个低压配网台区进行实例分析, 验证了该评估方法的可行性和高效性。

关键词: 低压配网台区; 健康状态; 序关系分析法; 熵权法; 拉格朗日最优乘法

Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method

MA Ji, LIU Xizhe

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

Abstract: In order to efficiently choose poor health status networks from many low-voltage distribution networks to optimize and improve them, this paper proposes an evaluation method of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy method. Firstly, evaluation index system from 6 status indexes is established. Secondly the indexes are processed consistently, and the indexes dimensionless is processed with extreme value. Then order relation analysis combining expertise is utilized to obtain index subjective weight, meanwhile entropy method is utilized to obtain index objective weight. Finally the optimal Lagrange multiplier method is used to obtain comprehensive index weight, then evaluation function is got, and health status of low-voltage distribution networks is assessed by the function. The feasibility and efficiency of the evaluation method are verified by analyzing several low voltage distribution networks in a certain area.

This work is supported by the Key Project of Guangdong Science and Technology Program (No. 2015B010128005).

Key words: low-voltage distribution network; health status evaluation; order relation analysis method; entropy weight method; optimal Lagrange multiplier method

0 引言

我国配电网具有规模庞大, 结构复杂, 设备种类和数量繁多, 运行方式多变, 实时量测系统不健全等特征, 造成影响配电网健康状态的因素很多, 而对配电网实施合理的评估, 将有助于判定配电网的运行状态, 有针对性对配电网进行改造, 使配电网的供电可靠性、电能质量、电网资产利用率等方面得到改善^[1]。

目前对配电网评估的研究已经很多, 主要从安全性、经济性、可靠性等方面进行。文献[2]分析了已投运电力用户在运行管理中的用电风险因素, 并建立了基于物元可拓理论的安全评价指标体系, 为量化评估重要电力用户的用电安全风险提供了一种新的思路和方法; 文献[3]提出一种新的配电网合环点的安全与经济性双层评估方法, 从安全与经济两个层面选出总体最优的配电网合环点; 文献[4]针对变压器故障机理的复杂性和不确定性特征, 提出了基于状态检修和马尔可夫过程的变压器全态状态评估模型; 文献[5]将浴盆形故障率函数的概念应用于

配电系统元件可靠性建模中,为配电网可靠性评估提供了一种新的思路;文献[6]把配网设备故障率与配网运行设备状态结合,得到配网设备的故障率模型,结合配网馈线分区法提出基于状态矩阵的大型城市配网可靠性评估方法;文献[7]将分布式电源、储能系统和电动汽车组合成联合发电系统,并用于含电动汽车的配网可靠性评估;文献[8]计算了不同接入点和不同接入容量的储能电站对配电网可靠性指标的影响;文献[9]建立了适应高压配电网规划特点的评价指标体系,并提出基于德尔菲法修正的层次分析法用于求各级指标权重;文献[10]从节点脆弱性方面综合考虑节点客观数据信息和节点价值系数得到效用风险熵权;文献[11]运用熵权法修正层次分析法确定的指标权重,通过物元可拓模型从经济效益、社会效益、技术效益和环境效益4个方面进行研究。另外有的研究从配网的接线模式^[12]、供电能力^[13]、配电网接纳电动汽车能力^[14]、新能源对配电网影响^[15]、电能质量综合评估^[16]等方面进行评价。

目前低压配电网台区的优化改造主要从用户的反馈信息、台区线路投运时间、台区变压器运行情况等方面来判断是否进行优化改造,凭经验判断对低压配电网台区进行规划改造,缺乏相应的分析方法和决策工具,不能针对低压配电网台区健康状态定量给出评估结果。针对低压配电网方面的评估,文献[17]从低压配电网的电压特性建立评估指标体系,基于序关系-拉开档次赋权方法确定指标权重;文献[18]基于层次分析法建立了新农村低压配电网的综合评估体系,采用0-10标度法确定单项指标的综合权重;文献[19]从网架结构、负荷特性两个方面建立指标体系,应用改进序关系分析法建立评估模型,这些研究从不同侧面、在不同程度上评价低压配电网特性,但缺乏对低压配电网台区健康状态的评估。

低压配电网台区数目多,如何高效筛选出问题台区进行改造?但低压配电网台区健康状态影响因素多且缺少合理的评估体系,所以本文提出基于序关系-熵权法的低压配电网健康状态评估方法。本文从6个主要指标建立评估指标体系,反映了低压配电网台区健康状态特性;对指标进行预处理,其中用极值处理法对指标进行无量纲处理;基于该指标体系运用序关系分析法加入专家对各指标重要程度的把握,凸显了对指标赋权的主观性;同时用反映低压配电网各指标的数据差异的熵权法,体现了对指标赋权客观性;最后利用拉格朗日最优乘法求各指标综合权重,从而得到低压配电网健康状态评估函数,根据评估函数值对各低压配电网状态特性进行评

估,为低压配电网台区的优化改造提供决策依据。

1 指标体系

从低压配电网台区健康状态方面考虑,遵循评估指标实用性、可行性和易获取的原则,用供电半径、最大线径的经济偏差率、综合线损率、变压器负载率、用户电压合格率、三相负荷不平衡程度等6个指标来对低压配电网台区健康状态进行分析。以下是各指标的定义。

(1) 供电半径(X_1):指变压器到用户端的距离,是评估低压配电网台区健康状态的重要参数之一。因为低压配电网供电半径过长易引发网络末端的电压问题,所以供电半径越长低压配电网台区状态评估结果越不理想。对于低压配网,城市、郊区和农村地区理想的供电半径距离依次增大。

(2) 最大线径的经济偏差率(X_2):指变压器低压侧导线的经济截面积 A_s 与其实际截面积 A 的偏差与 A_s 的比值,其中 A 一般是整个低压配电网台区线路最大的截面积。最大线径的经济偏差率越小,低压配电网台区健康状态越好。最大线径的经济偏差率计算公式为

$$X_2 = \frac{A_s - A}{A_s} = \frac{P_{\max} - \sqrt{3}\rho A U_n \cos\varphi}{P_{\max}} \quad (1)$$

式中: P_{\max} 为线路传输最大有功功率; U_n 为线路额定电压; ρ 为导线经济电流密度(A/mm^2)。

(3) 综合线损率(X_3):指低压配电网台区线路损失电能与台区总供电量之比,用来反映低压配电网台区运行是否经济。综合线损率越小,低压配电网台区健康状态越好。线路线损率的计算公式为

$$X_3 = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (2)$$

式中: P_1 为低压配电网台区供电负荷; P_2 为低压配电网台区用户总的电量数据。

(4) 变压器负载率(X_4):指低压配电网台区供电有功功率与变压器的额定有功功率之比,反映了变压器的负载情况。在变压器经济运行范围内,变压器负载率越小,低压配电网台区健康状态越好;当变压器运行在经济范围下限时,说明变压器的容量过大,造成变压器资源的浪费;当变压器运行在经济范围上限时,说明没有考虑近期对负荷增长的预测,造成变压器重载。

(5) 用户电压合格率(X_5):指低压配电网台区中电压合格的用户数量与整个台区用户数量的比值,反映用户对低压配电网台区电压的满意程度,是评估低压配电网台区健康状态特性的重要参数之一。用户电

压合格率越大, 低压配网台区健康状态越好。

(6) 三相负荷不平衡程度(X_6): 指配电变压器低压侧出线端 A, B, C 三相中最大的负荷与三相平均负荷的偏差与三相平均负荷的比值, 反映了负荷在三相中分布不合理的程度。三相负荷不平衡程度越小, 低压配网台区健康状态越好。三相负荷不平衡程度计算公式为

$$X_6 = \frac{3 \max\{P_A, P_B, P_C\} - (P_A + P_B + P_C)}{P_A + P_B + P_C} \quad (3)$$

式中: P_A, P_B, P_C 分别为配电变压器低压侧出线端 A, B, C 相的负荷。

2 指标预处理

低压配网台区健康状态指标分为正向指标、逆向指标和区间指标, 具有效益属性的正向指标值越大越好, 具有成本属性的逆向指标值越小越好, 具有分段属性的区间指标越靠近区间中部越好。在低压配网台区健康状态评估指标体系中: 正向指标为用户电压合格率 X_5 , 逆向指标为供电半径 X_1 、最大线径的经济偏差率 X_2 、综合线损率 X_3 、三相负荷不平衡程度 X_6 , 区间指标为变压器负载率 X_4 , 其中 X_1 有量纲指标, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6 为无量纲指标。因为逆向指标比较多, 所以把各指标一致化处理成逆向指标, 即指标值越小, 低压配网台区健康状态越好。进行完一致化处理后, 因为各评估指标具有不同的量纲和类型, 不能直接进行比较, 所以把各项指标进行无量纲处理, 本文基于极值处理法将各指标归一化到[0, 1]区间。以下为各类型评估指标预处理公式。

正向指标的一致化和无量纲处理公式为

$$X_i^* = \frac{X_{i\max} - X_i}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (4)$$

式中, $X_{i\max}, X_{i\min}$ 分别为若干个低压配网台区中该项指标 X_i 的最大值和最小值。

区间指标的一致化和无量纲处理公式为

$$X_i^* = \frac{|X_{i\text{mid}} - X_i|}{\max\{|X_{i\text{mid}} - X_i|\}} \quad (5)$$

式中, $X_{i\text{mid}}$ 为该项指标 X_i 的正常区间中点值。

逆向指标的无量纲处理公式为

$$X_i^* = \frac{X_i - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (6)$$

3 算法过程

低压配网台区健康状态评估方法是用 6 个评估

指标对低压配网台区健康状态进行评估。本文采用基于功能驱动原理的序关系分析法, 用专家经验对指标的重要程度进行判断, 得出各指标主观权重; 然后采用基于数据差异驱动原理的熵权法, 求得各指标客观权重; 最后利用拉格朗日最优乘法取得到各指标最接近序关系分析法和熵权法的权重, 从而得到低压配网台区健康状态评价函数, 计算出各低压配网台区的评价函数值, 并得出评估结果。

3.1 序关系分析法

因为在低压配网台区中需要进行各类筛选决策, 侧重点各不相同, 所以要求各项指标的权重能随着决策问题的改变而灵活变化, 序关系分析法可以满足这样的需求。序关系分析法^[20]避免了过于复杂的权重计算流程, 过程清晰简便, 能适应低压配网台区健康状态评估的需要, 并且能够充分体现专家的意愿。序关系分析法的过程如下。

(1) 首先确定序关系, 确定对于某评价准则具有的指标序关系为 $Y_1 > Y_2 > \dots > Y_m$ 。

(2) 然后确定相邻指标间的相对重要性程度。设专家评价指标 Y_{k-1} 与 Y_k 的重要程度之比 R_k 的理性判断为

$$R_k = Y_{k-1} / Y_k \quad (7)$$

式中, $k = m, m-1, \dots, 3, 2$ 。

(3) 最后进行权重系数 w_k 的计算:

$$w_k = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m R_k)^{-1} \quad (8)$$

$$w_{k-1} = R_k w_k \quad (9)$$

3.2 熵权法

按照信息论的解释, 信息是系统有序程度的一个度量, 熵是系统无序程度的一个度量。熵权法^[21]是一种基于数据差异驱动原理的客观赋权方法, 计算步骤简单, 有效利用了指标数据, 排除了主观因素的影响。某项指标的差异越大, 熵权越小, 该指标提供的信息量越大, 在评价中所起作用越大, 权值越大。熵权法原理步骤如下。

(1) 指标预处理

首先对各指标 X_{ij} (第 i 个台区的第 j 个指标) 进行预处理, 即对某台区的指标在同类指标中的比重进行处理, 计算在第 j 个指标下第 i 个台区的比重。

$$p_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \quad (10)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) 计算第 j 个指标的熵权 e_j

$$e_j = \frac{-1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (11)$$

(3) 计算第 j 个指标的权重系数

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^m e_j} \quad (12)$$

3.3 综合赋权法

序关系分析法利用专家经验得到各指标权重,反映了专家对指标重要程度的判断,没有考虑指标本身的差异对指标权重的影响;熵权法充分运用指标的数据信息的差异来确定指标权重,体现出完全客观的权重赋值,没有反映各指标的重要程度。所以将序关系分析法与熵权法相结合,从而使各个指标权重更加合理客观,不仅体现专家经验,还体现数据本身信息。

综合序关系分析法得到的主客观权重 w_i 和熵权法得到的客观权重 w_j , 确定综合权重 $W_i = \frac{w_i w_j}{\sum_{i=1}^n w_i w_j} (i = j)$,

为使综合权重 W_i 与主客观权重 w_i 和 w_j 尽可能接近,

根据最小信息熵原理^[22], 即 $\min E = \sum_{i=1}^n W_i (\ln \frac{W_i}{w_i}) +$

$\sum_{i=1}^n W_i (\ln \frac{W_i}{w_j}) (i = j)$, 用拉格朗日乘子法优化可得综

合权重计算式为

$$W_i = \frac{(w_i w_j)^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^n (w_i w_j)^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

式中, $\sum_{i=1}^n W_i = 1, W_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, i = j$ 。

3.4 健康状态评估函数

低压配网台区健康状态评估函数向量为

$$Y = XW \quad (14)$$

式中: $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$; Y_m 为第 m 个低压配网台区健康状态评估函数; W_n 为第 n 个指标的综合权重, $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$; X_{mn} 为第 m 个台区第 n 个指

标, $X = \begin{pmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix}$ 。

3.5 评估结果

通过低压配网台区健康状态评估函数得到各个低压配网台区健康状态评估函数值, 参照表 1 对低

压配网台区健康状态进行评估。

表 1 低压配网台区健康状态评估结果参考表

Table 1 Reference table for evaluation of status characteristics of low-voltage distribution network

评估函数值	[0,0.3]	(0.3,0.5]	(0.5,0.7]	(0.7,1]
台区健康状态	好	良	差	极差

4 实例分析

为了检验文中的评估指标体系和评估方法的合理性, 随机选取某供电局管辖内的 8 个低压配网台区, 并依次命名为台区 1, 2, ..., 8。

首先要对该 8 个低压配网台区进行收集资料, 收集的信息包括台区变压器的型号、变压器负荷、变压器低压侧出线线径、用户数量、投诉用户数量、用户端电压值、用户负荷、导线经济电流密度等。整理出该 8 个低压配网台区的 6 个原始指标, 并根据式(5)—式(7)对该 6 个指标进行预处理, 处理后的指标如表 2 所示。

表 2 预处理后的低压配网健康状态指标

Table 2 Pretreated health status index low-voltage distribution network

低压配网台区	预处理后各项指标					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
台区 1	0.2058	0.8403	0.0046	0.0449	0.3614	0.4518
台区 2	0.0000	0.5573	0.0000	0.0635	0.3333	0.7267
台区 3	0.3911	0.0000	0.7526	0.1114	0.0000	0.5138
台区 4	0.0343	0.8893	0.6278	0.4374	0.8702	1.0000
台区 5	0.1389	0.3771	0.5128	0.0065	0.5454	0.2364
台区 6	1.0000	0.5866	0.4556	0.0818	0.4074	0.3612
台区 7	0.5060	0.9636	0.9684	1.0000	0.9118	0.5984
台区 8	0.7890	1.0000	1.0000	0.0021	0.6984	0.0000

其次计算各指标的主客观权重: 设某专家根据有关信息对各指标重要性做出理性的判断, 重要性程度由大到小依次为: 用户电压合格率 Y_1 >三相负荷不平衡程度 Y_2 >综合线损率 Y_3 >变压器负载率 Y_4 >最大线径的经济偏差率 Y_5 >供电半径 Y_6 , 根据重要性程度的排序对各指标的重要性程度之比赋值, 然后根据式(7)—式(9)求得各指标的主客观权重如表 3 所示。

表 3 不同方法下各指标的权重

Table 3 Weight of each index under different ways

权重	各项指标					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
主观	0.0884	0.1149	0.1643	0.1264	0.2760	0.2300
客观	0.1960	0.0816	0.1464	0.3855	0.0908	0.0977
综合	0.1140	0.1059	0.1697	0.2415	0.1732	0.1657
AHP	0.0620	0.0310	0.2710	0.1290	0.4490	0.0580

再次计算各指标的客观权重: 首先对表 2 中的指标进行预处理, 即利用式(10)求得在某个指标下各个台区的比重; 然后根据式(11)、(12)分别求出各指标的熵权和客观权重, 其客观权重如表 3 所示。在计算熵值中, 指标为 0 时, 式(11)中因为有自然对数的运算而出现未定式, $\lim_{x \rightarrow 0} x \ln x = 0$ 。

然后计算各指标的综合权重, 利用式(13)求得各指标的综合权重, 如表 3 所示, 注意主观权重重要恢复原顺序。最后计算出各低压配网台区健康状态评估值, 并参照表 1 得到各台区的评估结果, 如表 4 所示。

由于层次分析法(AHP)是此类评估中常用的方法, 利用 AHP 对该 8 个低压配网台区健康状态进行评估。首先绘制层次分析法结构图, 如图 1 所示; 然后根据文献[16]的原理过程得到各指标的权重和各低压配网台区的状态评估结果(表 4)。

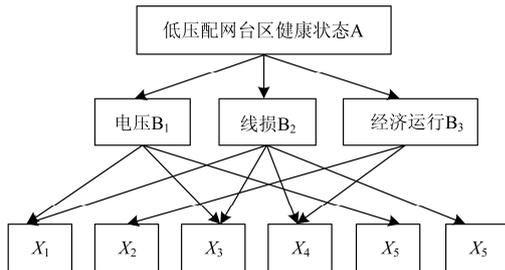


图 1 低压配网台区健康状态层次分析法结构图

Fig. 1 AHP chart of health status characteristics of low-voltage distribution network

表 4 各低压配网台区健康状态评估结果

Table 4 Evaluation result of health status characteristics of each low-voltage distribution network

低压配网台区	本文方法		AHP	
	评估值	评估结果	评估值	评估结果
台区 1	0.2677	好	0.2343	好
台区 2	0.2525	好	0.2173	好
台区 3	0.2961	好	0.2724	好
台区 4	0.6277	差	0.7050	极差
台区 5	0.2821	好	0.4187	良
台区 6	0.4336	良	0.4181	良
台区 7	0.8378	极差	0.8968	极差
台区 8	0.5107	差	0.6648	差

根据表 4 本文方法的评估结果, 台区 1、2、3、5 的状态好, 台区 6 的状态良, 台区 4、8 的状态差, 台区 7 的状态极差。

台区 2 的供电半径和线损率都是最优的, 三相负荷的不平衡程度较差, 其他指标基本都是同项指标较好的。台区 1、2、3、5 的各项指标基本合理,

但其中台区 6 的供电半径过大, 导致在该 4 个台区中健康状态最差, 评估结果为良。

对台区 7 状态极差的原因进行分析, 供电半径超过正常范围 95 m, 变压器低压线路线径远小于其经济截面积, 用户末端的最低电压远小于正常电压最低值, 线损占台区总电量的一半以上, 在用电高峰期时的用电负荷远超过变压器的容量, 用户电压合格的用户很少。

台区 4 和台区 7 相比, 虽然台区 4 的三相负荷不平衡程度要比台区 7 严重, 但是台区 4 的其他指标都比台区 7 好。台区 8 和台区 7 相比, 台区 8 的变压器负载率、用户电压合格率以及三相负荷不平衡程度都要优于台区 7, 其他指标略差, 但台区 8 整体的状态特性比台区 7 好。

根据表 4 本文方法和 AHP 的评估结果, AHP 使状态好的台区 1、2、3 的评估结果偏向乐观, 使状态差的台区 4、7、8 的偏向悲观, 使台区 5 的评估值增加了 0.1366, 主要是 AHP 仅考虑专家经验, 指标权重偏向 X_3 和 X_5 , 没有考虑各低压配网台区的差异。

针对本文方法和 AHP, 本文方法综合考虑了主观评估和客观评估, 反映了专家意愿和各评估对象的差异, 使评估结果更加合理客观, 而 AHP 仅考虑了专家意愿, 没有考虑数据本身的差异, 使评估结果与实际不相符。

结果表明, 通过本文方法对 8 个低压配网台区的台区健康状态进行评估, 筛选出台区健康状态差和极差的台区, 其中台区 7 的状态最差, 亟待对其进行优化改造, 改善其状态特性; 台区 4、8 的状态差, 其中台区 4 的三相负荷不平衡程度太大, 要对其负荷进行重新分配, 使其三相负荷趋近平衡; 台区 8 的线损率过大, 供电半径大大超出正常范围, 要通过增大线径和优化供电结构来降低其线损率和供电半径。本文方法可以高效合理地筛选出问题台区, 针对问题台区的各项指标提出针对性的改造方案。

5 结论

(1) 本文提出了基于序关系分析法-熵权法的低压配网台区健康状态评估方法, 从供电半径、最大线径的经济偏差率、用户电压合格率、三相负荷不平衡程度、综合线损率、变压器负载率等 6 个方面建立指标体系, 这些指标获取方便、可行性强, 能够高效合理地反映低压配网台区健康状态。

(2) 综合考虑本文的 6 个指标的特点以及其对台区健康状态的影响, 把指标分为正向指标、逆向指标和区间指标, 然后用极值处理法对指标进行一

致化处理。

(3) 用拉格朗日最优乘法使综合权重最接近主观权重和客观权重, 兼顾了专家经验和数据自身的特征, 避免了序关系分析法和熵权法的缺陷, 使综合权重更加合理。在算例中对比了本文方法和AHP, 再次说明了本文方法的合理客观。

(4) 从算例中可以看出, 变压器负载率、用户电压合格率、三相负荷不平衡程度、线损率对低压配网台区健康状态影响很大, 其中变压器负载率影响最大。基于此, 先筛选出变压器负载率过大的台区, 然后再从中筛选用户电压合格率低、三相负荷不平衡程度大、线损率高的台区, 最后再依据本文的方法进行评估, 经过前两次定性的粗选和最后一次定量的计算, 避免了对整个辖区内所有的低压配网台区都进行所有指标数据的采集, 可以更加高效精准地筛选出问题台区, 为下一步的优化改造提供高效合理的依据。

本文方法可行性强, 思路清晰, 适用于我国低压配网台区健康状态评估工作, 提高了对问题台区的筛选效率。通过实例分析, 验证了该方法的可行性和高效性。下一步根据评估结果对问题台区进行针对性的优化改造措施进行研究。

参考文献

- [1] 王成山, 罗凤章. 配电系统综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 191-220.
- [2] 赵建立, 周雯娟, 郑庆荣, 等. 基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 71-77.
ZHAO Jianli, ZHOU Wenjuan, ZHENG Qingrong, et al. Electrical safety assessment for important power users based on user's responsibility[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 71-77.
- [3] 冯欣桦, 黎洪光, 郑欣, 等. 计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 30-37.
FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.
- [4] 张桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 134-140.
ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.
- [5] 齐先军, 彭翔天, 张晶晶. 基于浴盆形故障率函数的配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 81-87.
QI Xianjun, PENG Xiangtian, ZHANG Jingjing. Reliability evaluation algorithm of power distribution system based on bathtub-shaped hazard function[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 81-87.
- [6] 方健, 徐栋, 季时宇, 等. 基于状态矩阵的大型城市配电网可靠性评估研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 59-65.
FANG Jian, XU Li, JI Shiyu, et al. Study on reliability assessment of large urban distribution network based on the equipment state matrix[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 59-65.
- [7] 白浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 联合发电系统用于含电动汽车的配网可靠性评估研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 127-137.
BAI Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. Reliability assessment based on combined power generation system for distribution system with electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 127-137.
- [8] 冯明灿, 邢洁, 方陈, 等. 储能电站接入配电网的可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 93-96, 103.
FENG Mingcan, XING Jie, FANG Chen, et al. The reliability evaluation of distribution network accessing the storage power station[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 93-96, 103.
- [9] 羌丁建, 寿挺, 朱铁铭, 等. 高压配电网规划评价指标体系与综合评价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 52-57.
QIANG Dingjian, SHOU Ting, ZHU Tieming, et al. An evaluation index system and comprehensive evaluation model on high-voltage distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 52-57.
- [10] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [11] 邓健, 王壮壮, 袁在忍, 等. 基于物元可拓模型的光伏

- 发电综合效益评价研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 117-125.
- DENG Jian, WANG Zhuangzhuang, YUAN Zairen, et al. Comprehensive benefit evaluation of photovoltaic power generation based on matter element extension model[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 117-125.
- [12] 潘锋, 张宇俊, 周敏. 一种基于接线模式的中压配电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 19-21, 35.
- PAN Feng, ZHANG Yujun, ZHOU Min. A comprehensive evaluation hierarchy for MV distribution network based on connection modes[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 19-21, 35.
- [13] 徐志飞. 中压配电网供电能力评价体系研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- XU Zhifei. The research and application of the medium voltage distribution network power supply ability evaluation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [14] 张祥文, 江星星, 王龙, 等. 配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 14-20.
- ZHANG Xiangwen, JIANG Xingxing, WANG Long, et al. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 14-20.
- [15] NIJHUIS M, GIBESCU M, COBBEN J F G. Assessment of the impacts of the renewable energy and ICT driven energy transition on distribution networks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1003-1014.
- [16] 李玲玲, 刘敬杰, 凌跃胜, 等. 物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 383-391.
- LI Lingling, LIU Jingjie, LING Yuesheng, et al. Power quality comprehensive evaluation based on matter-element theory and evidence theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 383-391.
- [17] 欧阳森, 陈欣晖, 耿红杰. 基于功效系数法的低压配网台区电压特性评估[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 35-40.
- OUYANG Sen, CHEN Xinhui, GENG Hongjie. Evaluation of voltage characteristics of low-voltage distribution network based on efficacy coefficient method[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(8): 35-40.
- [18] 曹阳, 孟晗辉, 赵力, 等. 基于层次分析法的新农村低压配电网综合评估方法[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 68-72.
- CAO Yang, MENG Hanhui, ZHAO Li, et al. A comprehensive evaluation method of new rural low-voltage distribution networks based on analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 68-72.
- [19] 欧阳森, 杨家豪, 耿红杰, 等. 面向台区管理的台区状态综合评价方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 187-192, 207.
- OUYANG Sen, YANG Jiahao, GENG Hongjie, et al. Comprehensive evaluation method of transformer area state oriented to transformer area management and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 187-192, 207.
- [20] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 31-78.
- [21] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81.
- LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [22] 杜栋, 庞庆华. 现代综合评估方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 10-19.

收稿日期: 2016-03-27; 修回日期: 2016-05-09

作者简介:

马 纪(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网评估优化及其智能算法; E-mail: majinanyang@126.com

刘希喆(1970-), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为配电网智能控制与优化. E-mail: liuxizhe@126.com

(编辑 姜新丽)