

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.038

基于灰色关联度和 TOPSIS 的真空断路器运行状态综合评估

李济沅, 邱玉婷, 于竞哲, 李莎, 周浩

(浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 基于灰色关联度和 TOPSIS 法对真空断路器运行状态进行综合评估, 根据真空断路器典型故障类型, 构建由振动信号、真空度、电寿命、触头温度组成的评估指标体系, 采用熵权法确定各项指标权重系数。通过样本与正理想解和负理想解的欧氏距离和灰色关联度描述样本与理想方案的贴近程度, 综合灰色关联度和欧氏距离计算评估样本的相对贴近度, 并据此对评估样本进行优劣排序。实例论证及与其他方法对比表明, 该方法可以客观有效地评估真空断路器运行状态, 为合理安排真空断路器检修计划以及指导真空断路器设备维修提供可靠参考。

关键词: 真空断路器; 状态评估; 灰色关联度; TOPSIS 法; 熵权法; 模型

State Complex Evaluation of Vacuum Circuit Breaker Based on Grey Correlation Degree and TOPSIS Method

LI Jiyuan, QIU Yuting, YU Jingzhe, LI Sha, ZHOU Hao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: An evaluation model for vacuum circuit breaker is established based on grey correlation degree and TOPSIS method, and an evaluation index system, which consists of vibration signal, vacuum density, electrical endurance and contact temperature, is proposed considering typical faults of vacuum circuit breakers. The entropy weight method is applied to determine the weights of the evaluation indexes. The Euclidean distances and grey correlation degrees are calculated to describe the closeness between the evaluating samples and the positive or negative ideal solutions, and the samples are ranked according to their calculated relative closeness. Results of data analysis for a case study show that the proposed method reflects the operating status of a vacuum circuit breaker objectively and effectively compared to other method, so it may provide a reference for maintenance planning and policy of vacuum circuit breaker.

Key words: vacuum circuit breaker; state assessment; grey correlation degree; TOPSIS method; entropy method; models

0 引言

真空断路器在电力系统中承担控制和保护的双重功能, 是电网运行的关键设备。因此对真空断路器的运行状态进行评估, 对于提高设备的利用率, 合理安排设备检修计划以及实现设备故障隐患早期预警具有显著意义^[1-4]。

随着真空断路器在线监测技术的快速发展, 振

动信号、触头温度、局部放电、真空度、电寿命、分合闸线圈电流等能够反映断路器机械性能的指标的在线实时监测成为可能, 这也为断路器运行状态综合评估提供有利条件^[5-8]。

目前关于断路器运行状态综合评估的方法主要有模糊综合评价法, 层次分析法, 雷达图法等。文[9]将灰色综合模糊评判应用到断路器状态评估中, 计算比较复杂, 且指标集较大时会出现评判失败现象; 文[10]利用层次分析法进行断路器综合性能评估,

收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2016-12-24

当指标数目增加时,会导致权重系数难以确定,而且过分依赖专家评判导致主观性过强;文[11]结合雷达图思想,引入一种图数结合的断路器多指标综合评估方法,简单直观,但是受特征参量数量的限制(不超过5个),可拓展性会受到制约。

断路器运行状态综合评估是一种多指标评估过程,其指标受统计因素限制及人为因素影响,具有“灰色”特征,灰色关联分析法广泛应用于状态评估、风险分析等领域^[12-14]。同时,逼近理想点法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)通过计算评估样本距离最佳方案和最差方案的距离,利用理想解的相对贴近度作为综合评估标准,是多目标决策分析中常用的有效方法^[15-17]。以上方法在电力设备维修策略、电能质量综合评估、电网规划综合决策等研究领域有较为广泛的应用^[18-21],而在断路器运行状态综合评估中较少涉及。

综合以上研究成果,文中提出了基于灰色关联度和 TOPSIS 的断路器运行状态综合评估方法,结合真空断路器的主要故障类型,构建断路器运行状态综合评估指标体系,并通过熵权法确定各项指标权重,然后对各评估对象进行综合评价排序,最后结合算例对该评估方法进行实证分析,并与其他评估方法进行比较,验证评估方案的有效性,为该领域的进一步研究提供参考依据。

1 真空断路器运行状态综合评估指标体系

国际大电网会议对高压断路器故障率调查表明,操动机构故障率约占整体故障的40%,控制回路故障率约占整体故障的30%,主回路故障及其他部分故障率约占整体故障的20%和10%^[22]。因此要实现断路器性能的全面评估,所建立的评估指标体系必须能够正确有效地反映以上几类典型故障,并描述断路器各组成部分的运行状态。

研究表明,真空断路器发生各类故障的主要原因是操作机构失灵、导电触头烧蚀、灭弧室真空度劣化、触头接触不良等,与之相关的故障特征量包括:分合闸线圈电流、触头温度、真空度、局部放电、行程特性、电寿命,综合考虑各类典型故障的覆盖面以及指标特征参量的可测性,文中选取振动信号、真空度、电寿命及触头温度4项指标对真空断路器运行状态进行综合评估。

1.1 真空度

真空度直接影响断路器的绝缘与开断性能,是反映真空灭弧室状态优劣的重要技术指标,灭弧室漏气或触头材料烧蚀放气都会导致真空度降低,需

要对其进行实时监测。

1.2 电寿命

电寿命主要受触头分断电流时的电烧蚀影响,当触头表明电烧蚀累计到一定程度时,将无法可靠分断电流,标志着电寿命的结束,是反映断路器电气开断能力的重要指标。

1.3 触头温度

正常运行状态下,触头温度不会超过限值,当触头接触不良、压力不够、表面不平或接触电阻增大时,触头温度将超过限制,甚至导致绝缘击穿,威胁设备安全运行。

1.4 振动信号

正常情况下,断路器的振动信号是稳定的,具有较好的重复性。如果振动信号发生明显改变,往往预示着出现了机械特性缺陷,振动信号故障评估范围比较宽,可以反映多种机械故障。

2 真空断路器运行状态综合评估模型建立

针对断路器性能综合评估指标体系的特点,以及评估目的,文中采用基于灰色关联度和 TOPSIS 的模型对断路器性能进行评估。

基于灰色关联度和 TOPSIS 的断路器性能综合评估的步骤如下。

2.1 规范化指标并确定权重

2.1.1 根据评估对象构造指标矩阵

假设对 m 个样本进行评估,包含 n 个评价指标,与样本相对应的各指标可以表示为 $x_{ij}(i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$,则其指标矩阵可以表示为 $X=[x_{ij}]_{m \times n}$ 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.1.2 指标矩阵规范化处理

由于评估指标量纲不同甚至存在较大差别,需进行评估指标规范化处理,如式(2)所示,利用向量规范化方法得到规范化指标矩阵 $Y=[y_{ij}]_{m \times n}$ 。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

2.1.3 确定评估指标权重

熵权法是一种依据各指标所包含的信息量的多少确定指标权重的客观赋权法,某个指标的熵越小,说明该指标值的变异程度越大,提供的信息量也就越多,在综合评价中起的作用越大,则该指标的权重也应越大。熵权法计算步骤简单,有效利用了指标数据,排除了主观因素的影响。

根据熵的定义,计算第 j 项指标的熵值 b_j 为

$$b_j = -\frac{\sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}}{\ln m} \quad i=1,2,\dots,m. \quad (3)$$

式(3)中, $0 \leq b_j \leq 1$ 且规定 $y_{ij}=0$ 时, $y_{ij} \ln y_{ij}=0$ 。

则第 j 项指标的熵权为

$$w_j = \frac{1-b_j}{n - \sum_{j=1}^m b_j} \quad j=1,2,\dots,n. \quad (4)$$

式(4)中, $0 \leq w_j \leq 1$ 且 $w_1+w_2+\dots+w_n=1$ 。

指标权重系数矩阵为 $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$ 。

权重系数体现了指标的信息量,熵权值越大表示该指标对综合决策的作用越大,直观有效地反映了指标间的差异程度。

2.1.4 计算加权规范化指标矩阵

按照式(5)对规范化矩阵 Y 进行加权处理,得到加权规范化矩阵 Z 。

$$Z_{ij} = w_j y_{ij}. \quad (5)$$

2.2 计算欧式距离及灰色关联度

2.2.1 确定理想正解与理想负解

分别构造正理想解向量 $Z^+=(z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+)$, 负理想解向量 $Z^-=(z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-)$ 。

$$Z^+ = \begin{cases} \max z_{ij} & j \in T_1 \\ \min z_{ij} & j \in T_2 \end{cases}; \quad (6)$$

$$Z^- = \begin{cases} \min z_{ij} & j \in T_2 \\ \max z_{ij} & j \in T_1 \end{cases}. \quad (7)$$

T_1 为值越大越好的指标集合(正向指标); T_2 为值越小越好的指标集合(负向指标)。

2.2.2 计算评估样本到理想正解与理想负解的欧氏距离

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad i=1,2,\dots,m; \quad (8)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad i=1,2,\dots,m. \quad (9)$$

2.2.3 计算评估样本到理想正解与理想负解的灰色关联度

第 i 样本与正理想解关于第 j 个指标的灰色关联系数为

$$\xi_{ij}^+ = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}}. \quad (10)$$

式(10)中: $\Delta_{ij} = |z_j^+ - z_{ij}|$; $\Delta_{\min} = \min_i \min_j \Delta_{ij}$ 为两级最小差; $\Delta_{\max} = \max_i \max_j \Delta_{ij}$ 为两级最大差; ρ 为分辨系数,通常取 0.5。

第 i 个样本关于正理想解的灰色关联度为

$$\xi_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{ij}^+. \quad (11)$$

同样,可得到第 i 个样本与负理想解关于第 j 个指标的灰色关联系数为

$$\xi_{ij}^- = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}}. \quad (12)$$

式(12)中,其他同式(10)。

第 i 个样本关于正理想解的灰色关联度为

$$\xi_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{ij}^-. \quad (13)$$

2.3 计算相对贴近度并将样本排序

2.3.1 欧氏距离和灰色关联度无量纲化处理

$$R_i^* = \frac{R_i}{\max_{1 \leq i \leq m} (R_i)}. \quad (14)$$

式(14)中, R_i 分别代表 d_i^+ , d_i^- , ξ_i^+ , ξ_i^- , 而 R_i^* 则代表无量纲处理化后的各项参量值。

2.3.2 综合无量纲化后的欧氏距离和灰色关联度

关于正理想解的欧式距离越小、灰色关联度越大则样本越接近理想方案,反之则远离理想方案,据此,综合考虑无量纲化后的欧氏距离和灰色关联度如下:

$$T_i^+ = f d_i^+ + (1-f) \xi_i^+; \quad (15)$$

$$T_i^- = f d_i^- + (1-f) \xi_i^-. \quad (16)$$

式(15)、(16)中, f 为偏好系数,可以根据决策者的偏好程度进行调整。

2.3.3 计算相对贴近度

相对贴近度可以综合反映评估样本与正理想解和负理想解的贴近程度,计算为

$$c_i = \frac{T_i^+}{T_i^+ + T_i^-}. \quad (17)$$

2.3.4 对评估对象进行排序

相对贴近度越大,说明样本越贴近正理想解,样本性能越好;相对贴近度越小,说明样本越远离正理想解,样本性能越差。

3 算例分析

3.1 构造加权化标准矩阵

文[11]中给出真空断路器 4 种典型运行状态即绿(运行良好)、黄(运行正常,需继续监视)、橙(状态劣化,需更换某些部件)、红(需更换断路器),以及描述以上 4 种运行状态的 5 项指标区间,文中选取这 5 种指标参数序列作为实证评估对象,评估指标列表见表 1。

根据式(2)对各指标进行规范化处理,得到规范化指标矩阵见表 2。

表 1 评估指标数据

Table 1 Data of evaluating indexes

断路器	振动信号/p.u.	真空度/mPa	电寿命/%	触头温度/℃
1	0.8	0.0	40.0	45.0
2	3.00	1.33	35.00	55.00
3	4.5	5.0	20.0	65.0
4	5.5	7.0	10.0	75.0
5	6	10	5	85

表 2 规范化评估指标矩阵

Table 2 Normalized matrix of evaluating indexes

断路器	振动信号	真空度	电寿命	触头温度
1	0.081 6	0.000 0	0.691 1	0.302 5
2	0.306 0	0.100 3	0.604 7	0.369 8
3	0.458 9	0.377 1	0.345 5	0.437 0
4	0.560 9	0.528 0	0.172 8	0.504 2
5	0.611 9	0.754 3	0.086 4	0.571 4

由式(3)、(4)算得各项指标的权重系数见表 3。

表 3 熵权法求得各项指标的权重系数

Table 3 Normalized matrix of evaluating indexes

指标	振动信号	真空度	电寿命	触头温度
熵值	0.913 3	0.756 6	0.870 3	0.985 1
权重系数	0.182 6	0.512 7	0.273 3	0.031 4

得到规范化指标矩阵和权重系数后,根据式(5)计算出加权后的规范化指标矩阵见表 4。可以看出,4 项指标中,真空度变异程度最大,因此提供的信息最多,在综合评估中起的作用最大,因此权重系数最大。而反之,触头温度变化非常均匀,变异程度最小,提供信息也最少,所以在综合评估中起的左右最小,因此权重系数最小。

表 4 加权规范化指标矩阵

Table 4 Normalized weighted matrix of indexes

断路器	振动信号	真空度	电寿命	触头温度
1	0.014 9	0.000 0	0.188 9	0.009 5
2	0.055 9	0.051 4	0.165 3	0.011 6
3	0.083 8	0.193 4	0.094 4	0.013 7
4	0.102 4	0.270 7	0.047 2	0.015 8
5	0.111 7	0.386 7	0.023 6	0.170 0

3.2 计算欧式距离和灰色关联度

4 项指标中,正向指标为电寿命,负向指标为振动信号、真空度及触头温度。根据式(6)、(7)确定正理想解及负理想解见表 5。

表 5 正理想解与负理想解

Table 5 Positive ideal solutions and negative ideal solutions

参数	振动信号	真空度	电寿命	触头温度
正理想解	0.014 9	0.000 0	0.188 9	0.009 5
负理想解	0.111 7	0.386 7	0.023 6	0.017 9

得到正理想解与负理想解后,根据式(8)、(9)计算各评估样本到正理想解和负理想解的欧氏距离,计算结果见表 6。

表 6 欧式距离

Table 6 Euclidean distance

断路器	正理想解欧式距离	负理想解欧氏距离
1	0.000 0	0.431 6
2	0.069 9	0.368 3
3	0.226 1	0.207 8
4	0.317 9	0.118 8
5	0.431 6	0.000 0

分辨系数通常取 0.5,由式(10)-(13)计算各评估样本与正理想解和负理想解的灰色关联度见表 7。

表 7 灰色关联度

Table 7 Grey correlation degree

断路器	正理想解灰色关联度	负理想解灰色关联度
1	1.000 0	0.624 2
2	0.873 9	0.671 8
3	0.721 9	0.771 1
4	0.662 6	0.864 9
5	0.624 2	1.000 0

3.3 计算相对贴近度

根据式(14)计算无量纲化处理后的欧氏距离及灰色关联度见表 8。

表 8 无量纲化处理后的欧氏距离与灰色关联度

Table 8 Dimensionless results of Euclidean distance and grey correlation degree

断路器	正理想解欧氏距离	负理想解欧氏距离	正理想解灰色关联度	负理想解灰色关联度
1	0.000 0	1.000 0	1.000 0	0.624 2
2	0.162 0	0.853 3	0.873 9	0.671 8
3	0.523 9	0.481 5	0.721 9	0.771 1
4	0.736 6	0.275 3	0.662 6	0.864 9
5	1.000 0	0.000 0	0.624 2	1.000 0

根据式(15)、(16)计算评估样本与正理想解和负理想解的接近程度计算结果见表 9。

表 9 评估样本与正理想解和负理想解的接近程度

Table 9 Closeness between samples and positive ideal solutions or negative ideal solutions

断路器	正理想解接近程度	负理想解接近程度
1	1.000 0	0.312 1
2	0.863 6	0.416 9
3	0.601 7	0.647 5
4	0.469 0	0.800 8
5	0.312 1	1.000 0

根据经验,通常取偏好系数 $f=0.5$,根据式(17)计算得各样本相对贴近度见表 10。

表 10 评估样本相对贴近度

Table 10 Relative closeness of evaluating samples

断路器	1	2	3	4	5
贴近度	0.762 1	0.674 4	0.481 7	0.369 3	0.237 9

可以看出,根据样本相对贴近度的大小对指标优劣程度进行排序,则表 10 算得的 5 种相对贴近度对应于断路器 5 种性能评价状态的临界值,可根据实测样本数据的相对贴近度计算值与上述临界值进行比较,从而对评估样本综合运行状态进行评估并排序。

3.4 实测数据评估

文[11]给出了 3 种状态下的断路器以上 4 种指标的实测值,其规范化评估指标矩阵见表 11。

表 11 规范化评估指标矩阵

Table 11 Normalized matrix of evaluating indexes

断路器	振动信号	真空度	电寿命	触头温度
1	0.870	0.706	0.543	0.575
2	0.673	0.682	0.514	0.625
3	0.346	0.929	0.765	0.730

根据文中所提出的评估模型对以上实测样本相对贴近度进行计算,计算结果见表 12。

表 12 评估样本相对贴近度

Table 12 Relative closeness of evaluating samples

断路器	1	2	3
贴近度	0.480 2	0.643 2	0.352 6

将表 12 与表 10 对比可以看出,断路器 1 处于橙色状态,需要更换某些部件;断路器 2 处于黄色状态,运行正常,仍需继续监视;断路器 3 处于红色状态,需要更换断路器。实际运行中,断路器 1 弹簧机构发生异常,断路器 2 是对断路器 1 进行维护后得到的数据,断路器 3 则是运行时间较长,真空管部分已经发生劣化。

可以看出,文中提出的综合评估模型的评估结果与实际运行情况相符合,也与文[11]提出的雷达图法评估结果相一致,这充分说明文中方法评估结果的有效性,同时与雷达图法相比,指标数量增加,该方法依然适用,具有良好的可拓展性。

4 结语

文中引入灰色关联度和 TOPSIS 法建立真空断路器运行状态综合评估模型,充分考虑到评估指标的灰色性,同时 TOPSIS 法可以很好地克服单一指标评估的不准确性。

选取振动信号、真空度、电寿命、触头温度为主

要评估指标,覆盖真空断路器的典型故障类型且具有良好的可拓展性。采用熵权法确定各项指标的权重系数,避免多因素权重系数确定的主观性。

实例验证以及与其他方法对比表明,文中所建立的评估模型能够客观有效地评估真空断路器运行状态,为真空断路器设备维修以及检修规划提供可靠参考,分辨系数以及偏好系数对评估结果影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘有为,肖 燕.智能高压开关设备可靠性自评估方法[J]. 电网技术,2015,39(3):862-866.
LIU Youwei,XIAO Yan. A self-evaluation method of reliability for smart high voltage switchgear[J]. Power System Technology,2015,39(3): 862-866.
- [2] 刘 瑾,冯瑛敏,章 辉,等.基于熵值分析和层次分析法的智能电网电力终端接入网综合效益评价[J]. 电力建设,2015,36(5):136-140.
LIU Jin,FENG Yingmin,ZHANG Hui,et al. Comprehensive benefit evaluation for power terminal access network in smart grid based on analytic hierarchy process and entropy analysis[J]. Electric Power Construction,2015,36(5): 136-140.
- [3] 陈建平,胡占强,苏晓东.智能化断路器机械特性在线监测关键技术设计[J]. 高压电器,2014,50(4):108-112.
CHEN Jianping,HU Zhanqiang,SU Xiaodong. Key technology design to on-line monitoring of mechanical characteristics for intelligent vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(4): 108-112.
- [4] 杨志泽,梁 良,李小勇,等.灰色关联模型在高压断路器故障诊断中的应用[J]. 电网技术,2015,39(6):1731-1735.
YANG Zhize,LIANG Liang,LI Xiaoyong,et al. Application of the gray correlation model in fault diagnosis of high-voltage circuit breakers[J]. Power System Technology,2015,39(6): 1731-1735.
- [5] 宋锦刚.基于振动信号小波包提取和相似性原则的高压开关设备振动监测[J]. 电网技术,2010,34(4):189-193.
SONG Jingang. Vibration monitoring of high-voltage circuit breakers based on vibration signal extraction by wavelet packets and similarity principle[J]. Power System Technology,2010,34(4): 189-193.
- [6] 黄 建,胡晓光,巩玉楠.基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(12):108-113.
HUANG Jian,HU Xiaoguang,GONG Yunan. Machinery fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(12): 108-113.
- [7] 王 鹏,张 军,余 泳,等.一种新型断路器电寿命在线监测系统[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):109-111.

- WANG Peng,ZHANG Jun,YU Yong,et al. A new type of on-line monitoring system for electrical endurance of circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(17): 109-111.
- [8] 段建东,叶兵,张青山,等.基于翅片散热和 ZigBee 的开关柜触头温度测控系统[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):157-162.
- DUAN Jiandong, YE Bing, ZHANG Qingshan, et al. Online contact temperature monitoring and control system based on finned radiator and ZigBee for switch cabinet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 157-162.
- [9] 李宇,张国钢,耿英三.基于模糊理论的高压断路器状态评估研究[J]. 高压电器,2007,43(4):274-277.
- LI Yu, ZHANG Guogang, GENG Yingsan. The condition assessment method for HV circuit breakers based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 274-277.
- [10] 国连玉,李可军,梁永亮,等.基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):161-167.
- GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [11] 李海英,冯冬,宋建成.中压真空断路器状态的雷达图法评估模型[J]. 电网技术,2013,37(7):2053-2059.
- LI Haiying, FENG Dong, SONG Jiancheng. Condition-based assessment model of MV vacuum circuit breaker with radar chart method[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2053-2059.
- [12] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等.灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(8):2041-2046.
- LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041-2046.
- [13] 李彦斌,于心怡,王致杰.采用灰色关联度与 TOPSIS 法的光伏发电项目风险评价研究[J]. 电网技术,2013,37(6):1514-1519.
- LI Yanbin, YU Xinyi, WANG Zhijie. Risk assessment on photovoltaic power generation project by grey correlation analysis and TOPSIS method[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1514-1519.
- [14] 贾乐刚,杨军.基于 AHP-熵权法的电动汽车充电站运行能效评估[J]. 电力建设,2015,36(7):209-215.
- JIA Legang, YANG Jun. Running energy efficiency assessment in electric vehicle charging station based on AHP-entropy method[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 209-215.
- [15] 孙晓东,焦玥,胡劲松.基于灰色关联度和理想解法的决策方法研究[J]. 中国管理科学,2005,13(4):63-68.
- SUN Xiaodong, JIAO Yue, HU Jinsong. Research on decision-making method based on gray correlation degree and TOPSIS[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(4): 63-68.
- [16] 孙强,葛旭波,刘林,等.智能电网多属性网络层次组合评价法及其应用研究[J]. 电网技术,2012,36(10):49-54.
- SUN Qiang, GE Xubo, LIU Lin, et al. Multi-attribute network process comprehensive evaluation method for smart grid and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 49-54.
- [17] 杨志超,张成龙,葛乐,等.基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):90-94.
- YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flashover pollution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.
- [18] 杨良军,熊小伏,张媛.基于灰色关联度和理想解法的电力设备状态维修策略[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(18):74-78.
- YANG Liangjun, XIONG Xiaofu, ZHANG Yuan. Research on condition-based maintenance policy of electric power equipment based on grey correlation degree and TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 74-78.
- [19] 付学谦,陈皓勇.基于理想解法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):26-30.
- FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on TOPSIS approach[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 26-30.
- [20] 李正明,施诗,潘天红,等.基于灰色关联度和理想解法的电能质量综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(6):14-19.
- LI Zhengming, SHI Shi, PAN Tianhong, et al. A synthetic power quality assessment based on grey correlation analysis and TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 14-19.
- [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] 郭磊,郭创新,曹一家,等.考虑断路器在线状态的电网风险评估方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):20-24.
- GUO Lei, GUO Chuangxin, CAO Yijia, et al. Power transmission risk assessment considering breaker online status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 20-24.
- 李济沅(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网自动化、断路器在线监测。
- 邱玉婷(1992—),女,硕士研究生,主要从事电能质量研究。
- 于竞哲(1991—),男,硕士研究生,主要从事配电网自动化研究。
- 李莎(1992—),女,硕士研究生,主要从事配电网信息化研究。
- 周浩(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统过电压、配电网自动化等方向研究工作。