

基于集对分析和关联规则的配电网故障选线决策方法

马格土, 但敏

国网重庆市电力公司市南供电分公司, 重庆

收稿日期: 2024年12月12日; 录用日期: 2025年3月11日; 发布日期: 2025年3月19日

摘要

配电网故障选线是配电系统稳定运行的保障, 其重要性不言而喻。无数学者综合各方因素深入研究配电网故障选线决策方法, 但现有研究对故障选线原理的适应性分析略显不足。且由于工程实际并未制定严格的选线标准, 随意选择选线装置的乱象层出不穷, 致使选线方法和配电网工况不匹配。鉴于此, 文章参考前人研究成果, 综合考量工程实况, 择优选择和配电网工况高度适配的选线方法, 并构建了基于关联规则和集对分析的选线原理决策模型, 力求能提升选线质效, 消除工程隐患, 保障人身安全。具体包括建立选线特征量集、选线可信度指标集和关联因素集, 求取关联因素对故障特征的权重系数, 计算选线可信度指标和关联因素的相关系数, 并在此基础上提出关联模型计算方法, 构造隶属度函数, 构建选线评价矩阵。

关键词

故障选线, 集对分析, 关联规则

A Fault Line Selection Decision Method in Distribution Network Based on Set Pair Analysis and Association Rules

Getu Ma, Min Dan

Shinan Power Supply Branch Company of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing

Received: Dec. 12th, 2024; accepted: Mar. 11th, 2025; published: Mar. 19th, 2025

Abstract

The fault line selection of the distribution network guarantees the stable operation of the

distribution system, and its importance is self-evident. Many scholars have studied the fault line selection decision method of distribution networks by integrating various factors, but the adaptability analysis of the fault line selection principle in the existing studies is slightly insufficient. Due to the fact that there is no strict line selection standard, the random selection of the line selection device is endless, resulting in the mismatch between the line selection method and the working condition of the distribution network. In light of this, the paper draws on the research findings of predecessors, takes into comprehensive consideration the actual conditions of the project, and selects the optimal line selection method that is highly compatible with the distribution network operating conditions. Furthermore, it constructs a line selection decision-making model based on association rules and set pair analysis, striving to enhance the quality and efficiency of line selection, eliminate potential project risks, and ensure personal safety. Specifically, it establishes a set of fault line selection characteristic quantities, a set of line selection credibility indicators, and a set of associated factors for distribution networks. It proposes a calculation method for the correlation model between line selection credibility indicators and associated factors, calculating the correlation coefficient of the reliability index of line selection and the correlation factor of line selection. On this basis, the correlation model calculation method is proposed, the membership degree function is constructed, and the line selection evaluation matrix is constructed.

Keywords

Fault Line Selection, Set Pair Analysis, Association Rule

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入 21 世纪, 随着国内配电系统的进一步发展, 配电网结构日趋复杂, 其特征主要在于配电网母线出线逐渐增多, 故障零序电流分布日趋复杂, 故障种类繁多。发生故障时能快速、准确地选出故障线路的选线方法是配电网安全可靠运行的重要保障[1] [2]。

目前, 基于故障信号稳态分量选线方式和基于暂态分量选线方式, 是工程上适用范围较广两种故障线路选线方法。能量法、五次谐波法、零序电流有功分量法等常见的基于稳态分量的选线方式; 首半波法、小波分析法等是常见的基于暂态分量的选线方式。理论上, 以上各选线方法均能准确选择出故障线路, 但在实际运行中, 每种选线方法的效果受到不同因素的影响, 无法保障准确选线。基于故障信号稳态分量的选线方法, 如零序电流比幅法、零序功率法、零序电流有功分量法等选线方法受线路长度、不平衡电流、流经接地消弧线圈的电感电流等因素影响较大; 基于故障分量暂态特征量进行选线的方法, 如首半波法、小波分析法等, 受到故障发生时刻、过渡电阻、电力电子设备等因素影响较大。

随着城市电缆线路所占比例逐年增加, 使得馈线电容电流逐渐增大, 同时, 由于架空馈线导线坠地、树木与架空馈线接触引起的高阻接地故障时有发生, 且配网多为辐射状网络, 分支众多、结构复杂, 馈线参数受外界影响较大且不易准确获取, 使得基于现行方法的选线设备在实际运行中常常发生漏选和误选情况。对于实际的小电流接地系统, 其配电网结构、出线类型、负荷情况等因素将对不同的选线方法产生不同程度的影响[3] [4]。由于现场工况错综复杂, 现有常规选线方式难以适应, 导致选线准确率常年偏低, 于是有研究提出基于神经网络、模糊理论和粗糙集理论等基于信息融合技术的故障选线方法, 融合不同选线方式的优点从而构造出一种新的选线方式以适应现场情况。但是基于信息融合技术的选线方

式理论较为复杂, 实现难度大, 实际效果如何尚待验证[5]。

显然, 为了提升故障线路选线准确率, 从根本上规避选线不当引致的工程风险, 当务之急是优化现有选线方法、量化评价标准、构建决策模型, 以便能选择最优选项方法, 切实提升选线质效。

选择高效率的配电网故障选线评估决策方法, 重在构建选线特征量和配电网工况的关系模型。关联规则是以概率推理为基础的数学方法, 其主要用以描述特定条件下特定对象的不确定性。关系准则可表示选线特征量和配电网参数间的模型关系。但是, 故障选线的评估决策同时牵涉多方因素, 如随机不确定因素、信息不完全因素、中介不确定因素、模糊不确定因素等, 因此仅采用关联规则分析不能全面地分析选线特征量与配电网之间的关系模型。

集对分析(set pair analysis, SPA)是利用联系度处理不确定问题的系统分析方法[6]。集对分析的原理是基于差异度、同一度、对力度三个维度将研究相同系统内特定对象的确定性和不确定性, 进而全面准确地刻画研究对象间的相互影响、相互联系和相互转化[7][8]。目前, 学者已提议将集对分析应用于各个行业领域, 如电网规划[9][10]领域、变压器状态评估[11][12]领域。虽然电气领域也与时俱进地引入了集对分析方法, 但集对分析应用还处于单独集对的“初级阶段”, 重在分析单个试验指标, 而忽视了指标间内在关联。而且, 现阶段引入的层次分析法, 并不能完全克服主观性缺陷。

因此, 为了选择和运行方式、电网结构高度匹配且可信度较高的故障选线方式, 本文提出了基于集对分析和关联规则的配电网故障选线决策方法, 针对常用选线方法, 建立选线特征量集、选线可信度指标集和关联因素集, 求取关联因素的权重系数, 计算选线可信度指标和选线关联因素的相关系数, 并在此基础上提出关联模型计算方法, 构造隶属度函数, 构建选线评价矩阵, 择优选取选线方式。

2. 关联规则与集对分析的理论基础

2.1. 关联规则理论

关联规则是指记事务数据库中数据项集间具有满足某种特定要求的关联关系的准则[13], 在关联规则中, D 代表记事务数据库, $|D|$ 代表中所有子集事务 T 的个数。项集 A 的出现频率, 记为 $f(A)$ 。若项集 $A \subset D$, $B \subset D$, 且 $A \cap B \neq \emptyset$, 则 $A \Rightarrow B$ 即关联规则, A 为关联规则的前提, 而 B 为关联规则的结论。

关联规则 $A \Rightarrow B$ 的置信度为 D 中同时包含 A 和 B 的比例, 即条件概率 $P(B|A)$, 记为:

$$C_{i,j} = P(B|A) = \frac{f(A \cup B)}{f(A)} \times 100\% \quad (1)$$

反映关联规则确定性的置信度, 可表征关联规则可信度。且置信度显著正相关于关联规则的可信度。

2.2. 集对分析理论

设集合 A 和集合 B 组成集对 $H(A, B)$, 在具体问题 Q 的背景下, 展开分析集对 H 的特性, 发现 H 特性共有 P 个。其中, 集合 A 和集合 B 的共同特性共有 X 个, 集合 A 和集合 B 的对立特性共有 Z 个, 除此之外的 Y 个特征($Y = P - X - Z$)既不是共有特性, 也不是对立特性, 据此可构建如下所示的联系度表达式:

$$\mu_{(A,B)} = a + bi + cj \quad (2)$$

式中: $\mu_{(A,B)}$ 为集合 A 和集合 B 间的联系度, 取值最小为-1, 最大为 1; a 、 b 、 c 分别代表问题 Q 下集合 A 和集合 B 的同一度、差异度、对立度, $a = X/P$ 、 $b = Y/P$ 、 $c = Z/P$; i 是差异度系数, 取值范围[-1, 1]; j 是对立度系数, 取恒定值 1 [14]。

式(2)联系度表达式称为三元联系度, 即将研究对象分为三部分进行分类研究。目前, 三元联系度已

而被广泛应用于解决工程问题。但因故障选线评估对评价精度要求较为严格, 这种一分为三的划分满足不了故障选线评估的进度要求。为此, 可基于集对分析, 细分差异度 b [14], 具体具体情况和实际要求展开式(2), 得到多元联系度, 如下所示。

$$\mu = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_2 + \cdots + r_{l-1} i_{l-2} + r_l j \quad (3)$$

式(3)称之为 l 元联系度, 记矩阵 $R = [a, b_1, b_2, \dots, b_{l-2}, c]$ 称为评价指标的评价矩阵, $E = [1, i_1, \dots, i_{l-2}, j]^T$ 为系数矩阵。

3. 基于集对分析和关联规则的配电网选线评估方法

3.1. 故障特征量集与关联因素集

目前, 配电系统的故障选线方式不一而足, 各种故障选线方式各有优劣, 本文综合对比了五次谐波法、零序电流比幅法、零序电流有功分量法、零序功率法四种常见的选线方法。这四种选线方式既有不可替代的优势, 也有难以克服的局限:

① 故障电流中的非周期分量会导致电流互感器饱和, 引起不平衡电流, 这将会影响系统的零序电流, 可能会改变系统各线路的零序电流测量值, 不能如实反映线路上的零序电流, 也无法准确反映有功分量和零序功率, 可能会导致误判;

② 零序电流受线路长度影响, 当长线路和短线路间的差距过大时, 若短线路某相接地, 则短线路和非故障长线路的零序电流并无明显区别, 这对检测的灵敏度提出了高标准要求;

③ 若网络各线路电缆化率不同, 不同原因引致的电路故障, 其电容电流具有显著差异, 在选择故障路线时也有可能出现偏差;

④ 接地点过渡电阻具有较大阻值时, 中性点偏移电压变小, 零序电流小到“临界值”时, 就难以排除信号干扰, 导致故障线路选择出现偏差。

因此, 本文建立了故障特征量集和关联因素集, 以便能准确反映故障线路选择的准确度及其影响因素(表 1, 表 2)。

Table 1. Set of fault features for selecting transmission lines

表 1. 选线方式故障特征量集

项集	故障特征量
C_1	零序电流
C_2	零序电流有功分量
C_3	五次谐波
C_4	零序功率

Table 2. Set of factors associated with the selection of transmission lines

表 2. 选线方式关联因素集

项集	关联因素
F_1	过渡电阻
F_2	馈线长度方差
F_3	馈线电缆化率
F_4	电流互感器饱和程度

3.2. 集对分析理论在选线决策中的应用

故障选线特征量的大小为评价选线方式准确率的唯一指标。计选线方式评价指标 $U = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r\}$, 则关联因素与评价指标 U 可构成 1 元联系度。

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \dots + b_{l-2} i_{l-2} + c j \quad (4)$$

则可记矩阵 $\mathbf{R} = [a_1, b_1, \dots, b_{l-2}, c]$ 为指标的评价矩阵, 矩阵 $\mathbf{E} = [l, i_1, \dots, i_{l-2}, j]$ 为指标系数矩阵。

评估选线方式时, 首先确定关联因素评价矩阵, 准确求解故障特征值的联系度, 并根据故障特征值联系度确定最佳选线方式, 一般而言, 故障特征值联系度越小, 其对应的选线方式的准确度越高。具体而言, 故障特征的联系度函数表述如下。

$$u_i = \omega_i \mathbf{R}'_i \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \omega_{i,1} & \omega_{i,2} & \omega_{i,3} & \dots & \omega_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}'_1 \\ \mathbf{R}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}'_j \end{bmatrix} \mathbf{E} \quad (5)$$

式中, u_i 为选线方式 C_i 的联系度, ω_i 为 C_i 对应的常权重系数矩阵, \mathbf{E} 为系数矩阵, \mathbf{R}'_i 为 C_i 的评价矩阵, \mathbf{R}'_j 为 F_j 的评价矩阵。

3.3. 关联因素对故障特征量的权重计算

配电网运行过程中, 故障原因错综复杂。故障特征量和关联因素并不是一一对应的关系, 一种故障特征量往往受不同关联因素影响, 一种关联因素可同时影响不同故障特征量。如前文相关内容, 4 种关联因素同时影响 4 种故障特征量, 且每种关联因素的影响程度有异。鉴于此, 需要准确关联权重系数, 以便于综合判断不同关联因素对不同故障特征值的影响程度。

具体可借助关联规则 $A \Rightarrow B$ 置信度求解关联权重系数。在故障选线中, 可利用 N 次故障仿真或录波所得的故障特征量与关联因素间的相关系数表示置信度:

$$\rho_{i,j} = 1 - \frac{6 \sum_{k=1}^4 (F_{j,k} - C_{i,k})^2}{32} \quad (6)$$

式中, $F_{j,k}$ 、 $C_{i,k}$ 分别代表第 j 种关联因素、第 i 种故障特征量的第 k 组仿真/录波数据, $\rho_{i,j}$ 表示第 i 种故障特征量与第 j 种关联因素相关系数。

则关联权重系数可表示为:

$$\omega_{i,j} = \frac{\rho_{i,j}}{\sum_{j=1}^N \rho_{i,j}} \quad (7)$$

3.4. 关联系数矩阵的修正

不管从数量级层面而言, 还是从量纲层面而言, 关联因素的数据都有显而易见的差距。直接评估这些数据, 很容易出现小数据被大数据所吞噬的情况, 但小数据往往关乎选线准确性。直接评估关联因素数据, 很难保障选线的准确度。因此, 首先需要归一化处理关联因素。归一化表达式具体如下:

$$F'_j = \frac{|F_j - F_{\min}|}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (8)$$

式中, F'_j 为关联因素的相对严重度。 F_j 为 N 次故障仿真或录波所得的平均值。

基于此, 将 F'_j 按式(7)所计算的权重系数加权可求得故障特征量的相对评分值:

$$y_i = \sum_{j=1}^4 \omega_{i,j} F'_j \tag{9}$$

状态的组态变化, 并不影响常权重系数化, 那么, 改变决策变量时, 常权重系数就无法均衡目标值的组态, 因此, 需要采取文献[15]的变权重系数计算式:

$$\omega'_{i,j} = \frac{\omega_{i,j} y_i^{-1}}{\sum_{i=1}^4 \omega_{i,j} y_i^{-1}} \tag{10}$$

因此, 式(5)中故障特征量的联系度函数可修正为:

$$u_i = \omega'_i \mathbf{R}'_i \mathbf{E} = [\omega'_{i,1}, \omega'_{i,2}, \omega'_{i,3}, \dots, \omega'_{i,j}] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_j \end{bmatrix} \mathbf{E} \tag{11}$$

3.5. 选线评价矩阵的计算

为表示每种关联因素对故障选线准确率的影响程度, 将关联因素评价等级分为四级, 分别为: 严重影响、中度影响、轻微影响、无影响。图 1 所示为关联因素对故障特征量影响程度的半梯形与三角形分布隶属度函数示意图。

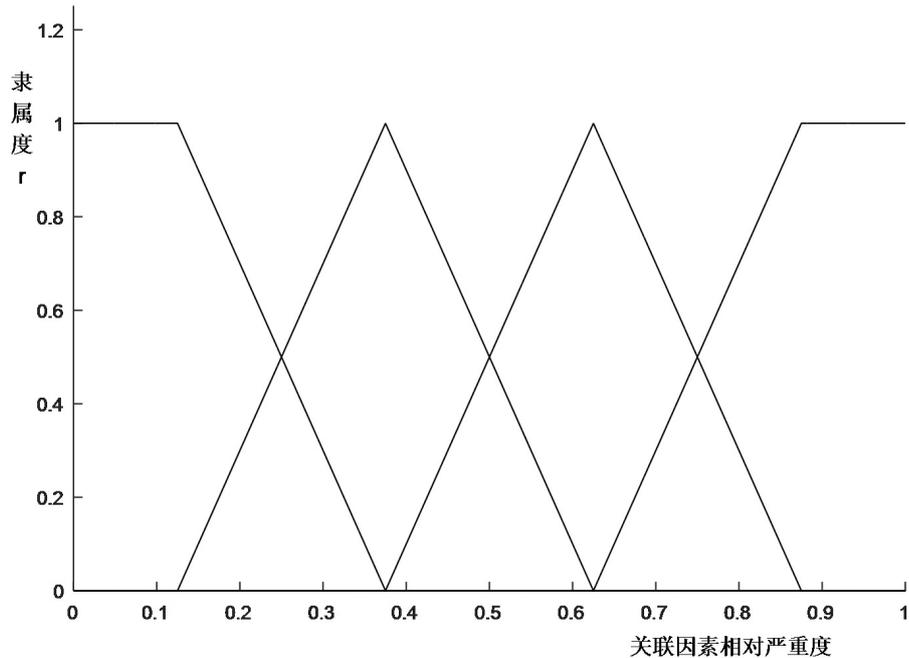


Figure 1. A semi-trapezoidal and triangular distribution membership function illustration of the degree of influence of correlated factors on fault characteristic quantities

图 1. 关联因素对故障特征量影响程度的半梯形与三角形分布隶属度函数示意图

则可构建如下所示的隶属度函数。

(1) 无影响时, 隶属度函数为:

$$r_1(F'_j) = \begin{cases} 1 & F'_j \leq 0.125 \\ -4F'_j + 1.5 & 0.125 < F'_j < 0.375 \\ 0 & F'_j \geq 0.375 \end{cases} \quad (12)$$

(2) 轻微影响时, 隶属度函数为:

$$r_2(F'_j) = \begin{cases} 4F'_j - 0.5 & 0.125 < F'_j < 0.375 \\ -4F'_j + 2.5 & 0.375 < F'_j < 0.625 \\ 0 & F'_j \geq 0.625 \text{ 或 } F'_j \leq 0.125 \end{cases} \quad (13)$$

(3) 中度影响时, 隶属度函数为:

$$r_3(F'_j) = \begin{cases} 4F'_j - 1.5 & 0.375 < F'_j < 0.625 \\ -4F'_j + 3.5 & 0.625 < F'_j < 0.875 \\ 0 & F'_j \geq 0.875 \text{ 或 } F'_j \leq 0.375 \end{cases} \quad (14)$$

(4) 严重影响时, 隶属度函数为:

$$r_4(F'_j) = \begin{cases} 0 & F'_j \leq 0.625 \\ 4F'_j - 2.5 & 0.625 < F'_j < 0.875 \\ 1 & F'_j \geq 0.875 \end{cases} \quad (15)$$

将式(8)所求得 F'_j 代入式(12)~(15), 则可求得关联因素的各等级隶属度函数值, 其评价矩阵可表示为:

$$\mathbf{R}_j = [r_1(F'_j), r_2(F'_j), r_3(F'_j), r_4(F'_j)] \quad (16)$$

则故障特征量 C_i 的评价矩阵可表示为:

$$\mathbf{R}'_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \mathbf{R}_3 \\ \mathbf{R}_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.6. 系数矩阵的确定

在式(11)中, \mathbf{E} 为系数矩阵, 可计为:

$$\mathbf{E} = [1, i_1, i_2, j]^T \quad (18)$$

其中, j 为对立度系数, 取值-1, i 为差异度系数, 取值范围[-1, 1]。本文根据均分法处理 i 的取值, 取值位于既定取值范围的 $l-2$ 个 $l-1$ 等分处, 可记为:

$$\begin{cases} i_1 = 1 - \frac{2}{l-1} \\ i_2 = 1 - \frac{4}{l-1} \end{cases} \quad (19)$$

本文中 $l=4$, 可得到系数矩阵为:

$$\mathbf{E} = [1, 0.33, -0.33, -1]^T \quad (20)$$

3.7. 选线方式决策过程

图 2 所示为选线方式决策流程图:

- (1) 收集配电网相关运行参数、故障录波图等样本数据, 搭建仿真模型。
- (2) 根据 N 次故障仿真或录波结果, 统计关联因素、故障特征量数据。
- (3) 根据式(6)式(7)计算相关系数和常权重系数。
- (4) 根据式(8)将关联因素作归一化处理, 代入式(9)与式(10), 求取故障特征量的变权重系数。
- (5) 将式(8)所得 F'_j 代入式(12)~(15), 求取关联因素评价矩阵。
- (6) 根据式(11)计算故障特征值的联系度, 并根据故障特征值联系度确定最佳选线方式, 故障特征值联系度越小, 其受关联因素影响, 选线方式的准确度越高。

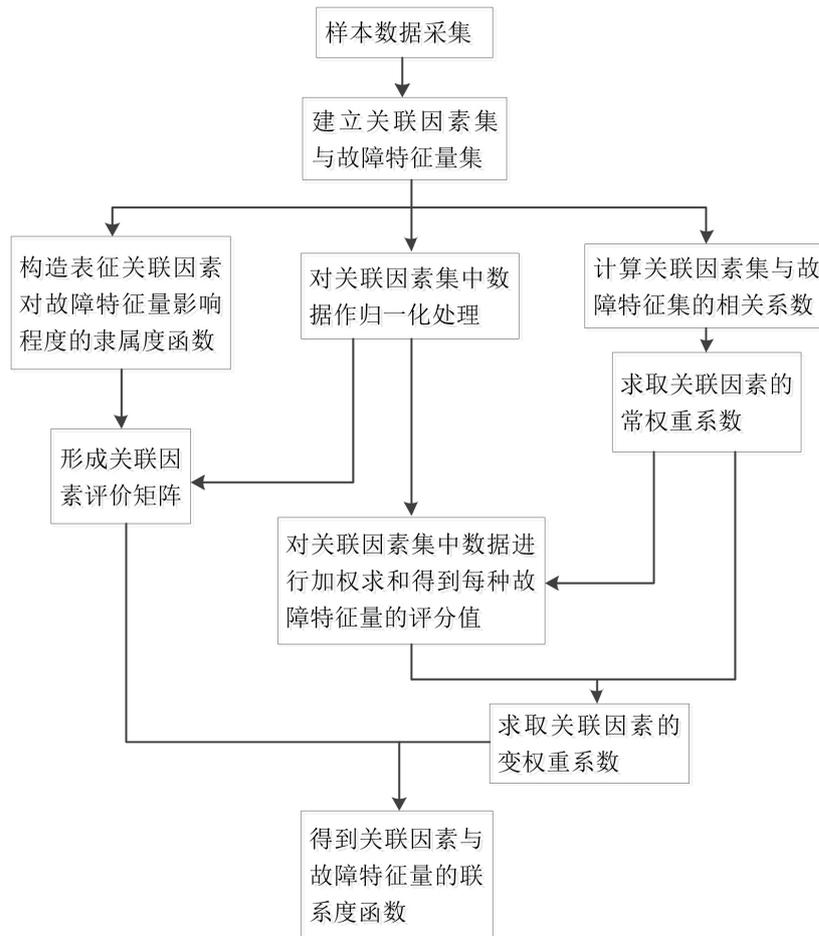


Figure 2. Decision process diagram for line selection method
图 2. 选线方式决策流程图

4. 结论

本文有针对性地借鉴既有研究成果, 综合考量复杂化的工程实况, 构建了基于关联规则和集对分析的选线原理决策模型, 具体包括建立选线特征量集、选线可信度指标集和关联因素集, 求取关联因素对故障特征的权重系数, 计算选线可信度指标和选线关联因素的相关系数, 并在此基础上提出关联模型计算方法, 构造隶属度函数, 构建选线评价矩阵, 以便能选择和配电网工况高度适配的选线方式, 提升选

线准确率, 确保配电网安全可靠运行, 规避工程隐患。

参考文献

- [1] 张玮, 盛和乐, 谢敏. 6~35kV 小电阻接地系统接地设备选择[J]. 电力勘测设计, 2017(5): 71-76.
- [2] 董雷, 何林, 蒲天骄. 中性点接地方式对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013(1): 96-101.
- [3] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[J]. 大自然探索, 1994, 13(1): 67-71.
- [4] Zhang, L., Gao, F. and Chen, F. (2013) Based on Set Pair Analysis of Spare Parts Supply Accurate Security Scheme Decision. 2013 *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, Chengdu, 15-18 July 2013, 1253-1255. <https://doi.org/10.1109/QR2MSE.2013.6625796>
- [5] 金华征, 程浩忠, 曾德君. 基于集对分析的柔性电网规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 7-12.
- [6] 田廓, 邱柳青, 曾鸣. 基于动态碳排放价格的电网规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 57-64, 18.
- [7] 廖瑞金, 郑含博, 杨丽君, 张镜议, 黄飞龙, 孙才新. 基于集对分析方法的电力变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 55-60.
- [8] 杨映滋, 罗日成, 黄知明. 模糊集对分析在大型变压器状态评价中的应用[J]. 电气技术, 2013, 14(1): 30-35.
- [9] Jadav, J.J. and Panchal, M. (2012) Association Rule Mining Method on OLAP Cube. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2, 1147-1151.
- [10] 杨明波, 马格士, 樊三军, 龙毅, 王波, 欧阳金鑫, 何天才. 基于可信度评价指标的配电网选线方式综合决策[J]. 电气工程, 2017, 5(4): 278-285. <https://doi.org/10.12677/JEE.2017.54034>
- [11] 汪陪庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994: 94.
- [12] 束红春. 配电网故障选线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] 王韶, 朱姜峰. 基于改进相关性分析法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 76-81.
- [14] 薛永端, 高旭, 苏永智. 小电流接地故障谐波分析及其对谐波选线的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 60-64.
- [15] 薛颢, 李延军, 程虎. 一种利用零序功率方向的小电流接地系统单相接地故障选线判据[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 132-138.