

基于数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位研究

付 波

(中国铁建电气化局集团北方工程有限公司, 山西 太原 030000)

摘要: 针对当前电气化铁路高压电网故障定位误差, 效率低等不足, 以获得更加理想的电气化铁路高压电网故障定位结果, 提出基于数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位方法。首先分析引起电气化铁路高压电网故障定位不足的原因, 采集电气化铁路高压电网故障信号, 并提取电气化铁路高压电网故障特征, 然后采用数据挖掘技术构建电气化铁路高压电网故障定位的分类器, 最后进行仿真测试, 结果表明, 所提供的方法克服了当前方法存在的局限性, 提高了电气化铁路高压电网故障定位正确率, 故障定位效率更高。

关键词: 电气化铁路; 高压电网; 数据挖掘; 故障定位; 提取特征

Research on fault location of electrified railway high voltage power grid based on Data Mining

FU Bo

(North Engineering go., ltd of the Electrification Bureau Group, Crcc, Taiyuan 030000, China)

Abstract: in order to obtain more ideal fault location results of electrified railway high-voltage power grid, a fault location method of electrified railway high-voltage power grid based on data mining is proposed. Firstly, the factors causing the insufficient fault location of electrified railway high-voltage power grid are analyzed, the fault signals of electrified railway high-voltage power grid are collected, and the fault characteristics of electrified railway high-voltage power grid are extracted. Then, the classifier for fault location of electrified railway high-voltage power grid is constructed by using data mining technology. Finally, the simulation test is carried out. The results show that, This method overcomes the limitations of the current method, improves the accuracy of fault location of electrified railway high-voltage power grid, and has higher fault location efficiency.

Key words: electrified railway; high voltage power grid; data mining; fault location; extract features

0 引言

随着我国经济大幅发展, 铁路成为人们出行的一种重要方式, 同时随着电力技术发展, 出现了电气铁路。在电气化铁路的实际应用中, 高压电网对于铁路车辆运行起着重要作用, 当电气化铁路高压电网状态出现故障时, 使铁路运行车辆

处于危险状态, 因此电气化铁路高压电网故障定位研究具有重要意义^[1-2]。

通常可以将输电线路故障分成两种类型: 永久故障和瞬时故障。其中瞬时故障可通过重新合闸的方式来处理, 但故障点仍然较为薄弱, 在恢复供电以后必须及时处理故障点; 永久故障必须

迅速对故障进行定位与排除^[3]。耗费时间越长,则停电损失越大,并对系统的运行造成更大冲击。对于电气化铁路高压电网来说,寻求一种远程、高准确度的故障自动定位方法可以说是迫在眉睫的事^[4]。我国电气化铁路高压电网故障定位研究时间短,虽然有许多电气化铁路高压电网故障定位方法,但是存在电气化铁路高压电网故障定位不够精准的缺点,因此电气化铁路高压电网故障定位有待进一步研究^[5-7]。

针对引起电气化铁路高压电网故障定位不足的问题,设计了基于数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位方法,并对其性能进行分析。

1 数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位方法

1.1 采集故障信号

当电气化铁路高压电网系统出现故障后,对应的保护与开关正确动作,切除电源侧的故障元件以及故障相关区域。电气化铁路高压电网系统和故障母线与元件此时处于一种隔离状态,故障区域成为无源的独立子网络,因此对该子网络进行搜索,采集电气化铁路高压电网故障信号^[5]。电气化铁路高压电网系统自身规模较大,因此故障区域识别这一步骤需要实现速度的提升。确认识别故障区域就是遍历搜索电气化铁路高压电网系统状态空间的过程,其中各状态空间均由拓扑图的边与顶点构成。在该拓扑图中,系统中的母线与元件用顶点表示,连接顶点的保护与开关用边来表示。对于这类状态空间而言,应选择深度优先算法实施遍历搜索^[6]。就是开始于某顶点,对该顶点处出发的某分支进行搜索,并对其他分支进行遍历。在深度优先算法中,对节点深度进行以下定义:

1) 对起始节点进行定义,将其设为深度为0的根节点。

2) 当节点沿路径搜索时,其下方邻接子节点需要进行深度加1的处理。

深度优先算法的具体步骤为:

1) 用S表示初始顶点,将S放进堆栈表内,当S是目标节点,即得到一个解。

2) 当堆栈表是空的,直接退出。

3) 在堆栈表中将首节点a移至VISITED内。

4) 当a节点的深度不小于深度界限,跳转至步骤2)。

5) 自a节点开始遍历,在堆栈表中堆入a节点的后裔节点。当a节点不存在后裔节点时,跳转至步骤2)。

6) 当a节点的后裔节点有目标节点时,即为获得解,然后退出,该目标节点即为识别的故障区域。

在识别的故障区域中对故障信号进行采集^[7-9],在故障信号采集中使用的信号采集器为多通道信号采集器,将其设置在识别的故障区域中进行故障信号的采集。对采样频率进行设置,具体为

$$F_e(i) = 1 - \frac{M}{E} \quad (1)$$

式中, $F_e(i)$ 代表设置的采样频率; E 表示采样信号带宽; M 代表最大频率分量。

1.2 特征提取

针对采集的故障信号实施特征提取,主要通过多端传输线原理进行故障特征提取^[10]。将故障特征提取分为三个流程,具体为:

1) 在电气化铁路高压电网系统中,对任意一个节点进行选择,并将其当作故障特征的端点,用R来表示。将R的相邻节点当作支路点,用 P_1 来表示。将两个节点的距离当作故障特征提取的单位长度,用 L_R 来表示。通过下式进行故障特征提取

$$X = DL_R \quad (2)$$

式中, x 代表提取的故障特征; D 表示故障特征提取指标。

(2) 在 P_1 上进行 w 个端点的状态量等效,获取 w 组状态量。根据状态量对故障特征提取指标进行获取,获取的故障特征提取指标共 w 个,通过 D_K 来表示,其中 $K=1 \sim w$ 。

$$D_K = \frac{\ln\left(\frac{N_K}{M_K}\right)}{2\gamma L_R} \quad (3)$$

式中, γ 代表故障特征阈值; N_K 表示 w 个端点的状态量; M_K 代表等效后 w 个端点的状态量。

1.3 故障定位

最小二乘支持向量机是一种数据挖掘技术, 因此本文通过最小二乘支持向量机来学习, 根据提取的故障特征建立电气化铁路高压电网故障定位的分类器, 并进行电气化铁路高压电网故障定位。相比标准向量机, 最小二乘支持向量机能够对二次规划问题进行转化, 可以大大简化计算时的复杂性。将提取的故障特征当作 n 维输入样本, 用 X 来表示。通过 $(X_1, y_1), \dots, (X_N, y_N) \in R^n \times R$ 表示 N 个样本和其输出值。利用 $\phi(\cdot)$ 映射输入样本, $\phi(\cdot)$ 为一种非线性映射函数, 使输入样本被映射至对应的高维特征空间内, 具体为

$$y = f(X, W) = \text{sgn}[W^T \phi(X) + \beta] \quad (4)$$

式中, W 代表权重; $f()$ 表示线性转化函数; y 代表映射后的输入样本; β 表示偏置项; T 代表映射阈值。

综合考虑最小VC维和最小经验风险, 通过式(5)对向量机求解目标最优优化函数为

$$\min_{W, \beta, \xi} J(W, \beta, \xi) = \frac{1}{2} W^T W + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^N \xi_i^2 \quad (5)$$

其约束条件为

$$y_i [W^T \phi(X_i) + \beta] = 1 - \xi_i, i = 1, \dots, N \quad (6)$$

式中, ξ 代表误差向量; C 表示正则化因子; i 代表误差向量个数。

为对上述优化问题进行求解, 引进Lagrange乘子 α_i 。在求解中 $\alpha_i \in R^{N \times 1}$, 将约束优化转变成无约束优化, 具体为

$$L(W, \beta, \xi_i, \alpha_i) = J(W, \xi_i) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \left\{ y_i [W^T \phi(X_i) + \beta] - 1 + \xi_i \right\} \quad (7)$$

式中, $L()$ 为可导函数; $J()$ 表示辅助函数。

以KKT条件为依据可获得

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial W} = 0 \rightarrow W = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \phi(X_i) \\ \frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \phi(X_i) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = C \xi_i \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow y_i [W^T \phi(X_i) + \beta] - 1 + \xi_i = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)中的 W 和 ξ_i 消元去除, 得到线性方程组为

$$\begin{pmatrix} I & 0 & 0 & -Z^T \\ 0 & 0 & 0 & -Y^T \\ 0 & 0 & CI & -I \\ Z & Y & I & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W \\ \beta \\ \bar{\xi} \\ \bar{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1_N \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, I 代表消元阈值; Z 表示非线性映射集合, 具体计算公式为

$$Z = [\phi(X_1), \dots, \phi(X_N)] \quad (10)$$

Y 代表输出值集合, 可以用式(11)表示

$$Y = [y_1, \dots, y_N] \quad (11)$$

$\bar{\xi}$ 表示误差向量映射集合, 可表示为

$$\bar{\xi} = [\xi_1, \dots, \xi_N]^T \quad (12)$$

式中, $\bar{\alpha}$ 代表Lagrange乘子映射集合; 1_N 表示1的映射集合, 具体为

$$\bar{\alpha} = [\alpha_1, \dots, \alpha_N]^T \quad (13)$$

$$1_N = [1, \dots, 1]^T \quad (14)$$

以上方程组即为建立的电气化铁路高压电网故障定位分类器。

通过该电气化铁路高压电网故障定位分类器对电气化铁路高压电网故障进行准确定位, 故障位置共有三种情况, 具体如图1所示。

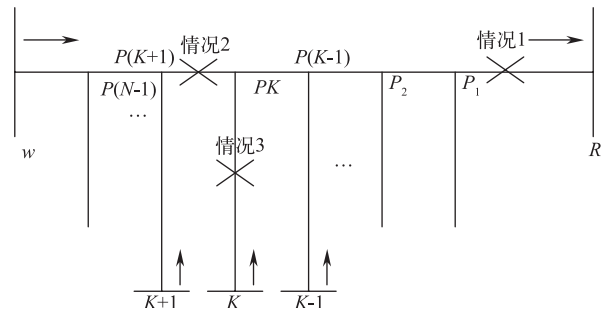


图1 故障位置情况

Fig. 1 Fault location

在第一种情况下, L_R 上发生故障, 提取故障特征为

$$\begin{cases} D_1 = D_2 = \dots = D_N \\ x = D_1 L_R = \dots = D_N L_R \end{cases} \quad (15)$$

在第二种情况下, $P_K - P_{(K+1)}$ 上发生故障, 提取故障特征为

$$\begin{cases} D_1 < \dots < D_K < D_{K+1} = \dots = D_N \\ x = D_{K+1} L_R = \dots = D_N L_R \end{cases} \quad (16)$$

在第三种情况下, $PK - K$ 上发生故障, 提取故障特征为

$$\begin{cases} D_1 < \dots < D_K > D_{K+1} > \dots > D_N \\ x = D_K L_R \end{cases} \quad (17)$$

将提取的不同特征输入到电气化铁路高压电网故障定位分类器中, 实现精准的故障定位。

2 仿真测试

2.1 仿真参数设置

通过PSCAD仿真平台对电气化铁路高压电网的仿真实验模型进行搭建, 具体如图2所示。在搭建电气化铁路高压电网仿真实验中, 线路的总长度设置为300 km, 输电线路电压等级设置为500 kV, 其他参数为: A端母线正序阻抗 $Z_{A1}=9.19+j52.10 \Omega$, 零序阻抗 $Z_{A0}=6.69+j37.92 \Omega$; B端母线正序阻抗 $Z_{B1}=8.19+j42.11 \Omega$, 零序阻抗 $Z_{B0}=6.52+j34.16 \Omega$ 。各处综合阻抗分布参数

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} \quad (18)$$

式中, Z_c 为综合阻抗; Z_1 、 Y_1 为分布参数。

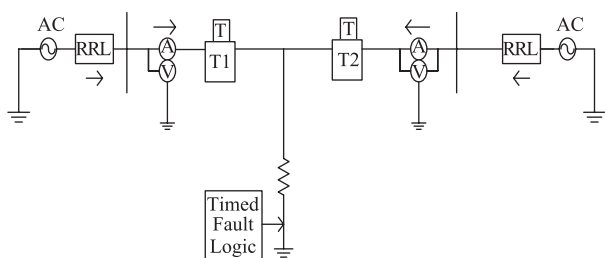


图2 电气化铁路高压电网的仿真实验模型

Fig. 2 Simulation experiment model of electrified railway high voltage power grid

2.2 故障情况实现与实验数据选取

通过对元件参数进行调整实现不同故障情况, 具体包括不同接地电阻、不同位置故障。故障数据为故障前一周波与其后第二周波的电网数据, 根据状态量对故障特征提取指标进行获取, 故障特征值分别为359.13、8.92、0.000 063 9、0.001 07、394.89和8.89, 在现实中高压线路参数可能会受到季节以及周围环境等因素的影响, 采用在线计算的高压线路参数和与实际高压线路参数有1%误差的给定参数来仿真。

2.3 故障定位误差测试

故障定位误差的计算公式为

$$E_L \% = \frac{|Q - E|}{L'} \times 100\% \quad (19)$$

式中, Q 代表定位结果; E 表示故障实际距离; L' 代表线路总长度。

选择传统电气化铁路高压电网故障定位方法作为对比测试方法, 本文方法和对比方法的电气化铁路高压电网故障定位误差测试结果见下表。从表中可知, 相对于对比方法, 本文方法能显著降低故障定位误差, 获得较高准确度的定位结果。

表 不同方法的故障定位误差测试结果

Tab. 1 Fault location error test results of different methods

测试结果	对比方法 (%)	本方法 (%)
单相接地故障	1.27	0.59
两相短路故障	0.43	0.1
两相接地故障	0.31	0.11
三相短路故障	0.3	0.04

2.4 故障定位效率测试

对数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位效率进行测试, 在故障定位效率测试中, 主要是对不同故障类型、不同故障距离下故障的定位时间进行测试。故障定位时间花费越短, 则证明具有更高的故障定位效率。测试结果如图3所示。由图3的故障定位效率测试结果表明, 数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位方法花费的时间都低于对比方法的时间, 说明本文方法的定位效

率更高，实用性更强。

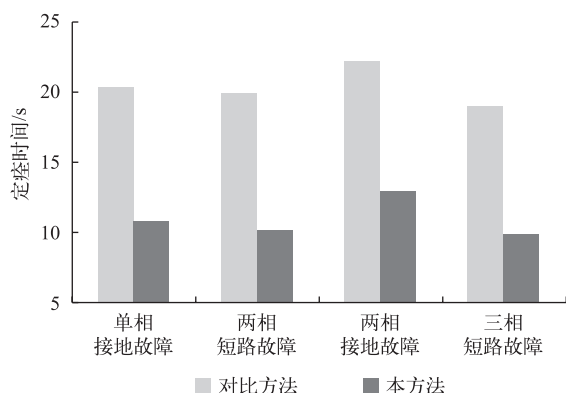


图3 故障定位效率测试结果

Fig. 3 Test results of fault location efficiency

3 结束语

电气化铁路高压电网故障复杂多变，对电气化铁路高压电网故障问题进行了深入研究，提出了基于数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位方法，测试表明，相对于对比方法，本文方法获得更精准的电气化铁路高压电网故障定位结果，具有较高的实际运行价值。

参考文献

- [1] 马志方. 高速铁路接触网隔离开关故障监测策略[J]. 智能城市, 2021, 7(1): 45-46.
- [2] 钮承新, 王义成, 钮继龙, 等. 高压电器外绝缘在线检测技术在电气化铁路的应用研究[J]. 电气

化铁道, 2019, 30(6): 33-35.

- [3] 卢剑. 电气化铁路高压电缆温度监测系统研究与应用[J]. 电气化铁道, 2015(6): 21-25.
- [4] 郭鑫鑫, 李群湛, 解绍锋, 等. 电气化铁路高压电缆牵引网电气特性研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 132-137.
- [5] 倪志刚. 电气化铁路牵引供电对铁路信号设备的影响分析[J]. 工程技术与管, 2022, 6(8).
- [6] 文杰. 浅析铁路牵引变电所接地网故障原因及对策[J]. 山东工业技术, 2018(13): 202.
- [7] 高锋阳, 李昭君, 袁成, 等. 含特殊负荷的配电网分层故障定位方法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 570-580.
- [8] 李振兴, 王朋飞, 王新, 等. 基于幅值特征和Hausdorff距离的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 169-177.
- [9] 谈强. 数据挖掘的铁路接触网设备运行状态识别研究[J]. 电气应用, 2020, 39(12): 94-98.
- [10] 马晓红, 朱玉锦, 李慧聪, 丁学田. 基于WPA-BP算法的电气化铁路用变压器故障诊断分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 43-46.

作者简介

付波 (1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统, 自动化和铁道电气化。

(收稿日期: 2021-12-20)