

基于多元状态感知监测技术的快速灭弧 开关故障在线监测

曹海欧¹, 孟屹华², 黄翔¹, 崔玉¹, 潘琪²

(1. 江苏省电力有限公司 电力调度控制中心, 南京 210000;

2. 江苏省电力有限公司 苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 现有快速灭弧开关故障在线监测方法缺乏足够的积累, 在大数量快速灭弧开关情况下存在着故障监测实时性差的缺陷, 为此提出基于多元状态感知监测技术的快速灭弧开关故障在线监测方法研究; 通过多元状态感知监测技术合理布置振动传感器, 获取快速灭弧开关多元振动信号, 利用小波变换方法降噪处理开关多元振动信号, 以此为基础, 提取灭弧开关多元振动信号特征因子; 求取多元特征因子权重, 得到灭弧开关融合特征向量, 构建故障诊断模型, 通过灭弧开关故障诊断实现了快速灭弧开关故障的在线监测; 通过测试结果显示: 与现有代表方法相比较, 提出方法在大数量快速灭弧开关情况下, 快速灭弧开关故障监测时间较短, 具备更好的实时性, 适合大力推广使用。

关键词: 多元状态感知监测技术; 灭弧; 开关故障; 在线监测

On Line Fault Monitoring of Fast Arc Extinguishing Switch Based on Multi State Perception Monitoring Technology

Cao Haiou¹, Meng Yihua², Huang Xiang¹, Cui Yu¹, Pan Qi²

(1. Electric Power Dispatching and Control Center of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. Suzhou Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: The existing on-line fault monitoring methods of fast arc extinguishing switches lack of sufficient data accumulation, and there is a defect of poor real-time fault monitoring in the case of a large number of fast arc extinguishing switches. Therefore, the research on on-line fault monitoring method of fast arc extinguishing switches based on multiple state perception monitoring technology is proposed. The multi-element vibration signal of the fast arc extinguishing switch is obtained by arranging the vibration sensor reasonably with the multi-element state sensing monitoring technology, and the multi-element vibration signal of the switch is denoised by the wavelet transform method. On this basis, the characteristic factors of the multi-element vibration signal of the arc extinguishing switch are extracted. The multi-element characteristic factor weight is obtained, the fused characteristic vector of arc extinguishing switch is obtained, the fault diagnosis model is constructed, and the online fault monitoring of arc extinguishing switch is realized through the fault diagnosis of arc extinguishing switch. The test results show that: compared with the existing representative methods, the proposed method has shorter fault monitoring time and better real-time performance in the case of large number of fast arc extinguishing switches, which is suitable for vigorously promotion and application.

Keywords: multi state perception monitoring technology; arc extinction; switch fault; online monitoring

0 引言

快速灭弧开关是电力系统中关键的控制与保护元件, 也是变电站内电气动作与机械动作最频繁的部件, 快速灭弧开关的安全、可靠运行对电力系统具备至关重要的作用。快速灭弧开关以空气为绝缘介质, 灭弧能力强, 成本低, 便于维修, 结构简单, 广泛应用于中、高压电力系统中, 功能等同于断路器开关^[1]。现有代表方法主要包括基于支持向量机的快速灭弧开关故障在线监测方法与基于 PHM (fault prediction and health management, 故障预测与健康

管理) 技术的快速灭弧开关故障在线监测方法。基于支持向量机的快速灭弧开关故障在线监测方法是一种基于统计学习理论的机器学习算法, 它可以对快速灭弧开关故障进行良好的分类, 从而为故障诊断技术向智能化方向发展提供了新的思路^[2]。介绍了支持向量机分类算法, 并将其应用于故障诊断领域, 并与 BP 神经网络 (back propagation neural network, 反向传播神经网络) 分类方法进行了比较。基于 PHM 技术的快速灭弧开关故障在线监测方法是在故障预测和健康管理技术的基础上, 提出了一种智能快速灭弧

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-07-02。

作者简介: 曹海欧(1979-), 男, 江苏南京人, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护技术与管理方向的研究。

引用格式: 曹海欧, 孟屹华, 黄翔, 等. 基于多元状态感知监测技术的快速灭弧开关故障在线监测[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1):

开关故障监测和诊断的方法, 利用最小冗余最大相关原则, 对原始特征集进行降维处理, 得到最佳故障特征子集; 实现快速灭弧开关故障诊断。然而, 由于快速灭弧开关的数量较多, 以往监测方法既浪费时间, 又耗费较高的费用。为此, 如何有效地监测快速灭弧开关故障, 是保障电力系统安全运行的关键^[3]。

现有快速灭弧开关故障在线监测方法缺乏足够的数据积累, 在大数量快速灭弧开关情况下存在着故障监测实时性差的缺陷, 为此提出基于多元状态感知监测技术的快速灭弧开关故障在线监测方法研究, 为电力系统稳定运行提供更加有效的保障^[4]。

1 快速灭弧开关故障在线监测方法研究

1.1 快速灭弧开关多元状态感知

为了保障快速灭弧开关在线监测的全面性, 利用多元状态感知监测技术获取快速灭弧开关多元振动信号。

快速灭弧开关每个组成部分结构的差别显著, 故障特征的可观测性与特征量也存在着较大的不同, 为此, 将振动传感器合理地布置在开关各个组成部分, 即可得到快速灭弧开关多元故障监测点位置^[5]。

快速灭弧开关结构如图 1 所示。

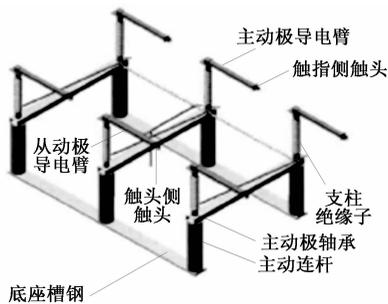


图 1 快速灭弧开关结构图

振动传感器选取 PCB 公司生产的 352C33 型振动传感器, 其参数如表 1 所示。

表 1 振动传感器参数表

参数名称	范围	单位
幅值	-50—50	g
灵敏度	100	mv/g
频率	0.5—10000	Hz
谐振频率	50	kHz

将 80 个振动传感器均匀地分布在快速灭弧开关的八个部分, 每个部分分布 10 个振动传感器, 以此为基础, 感知快速灭弧开关多元状态^[6]。

1.2 开关多元振动信号处理

通过多元状态感知监测技术获得了快速灭弧开关多元振动信号, 因开关所处环境的影响, 且震动传感器会带来一定干扰, 容易造成多元开关振动信号噪声。为了精确地监测快速灭弧开关故障, 需要处理开关多元振动信号^[7]。

目前的多元振动信号去噪方法主要有傅里叶分析法、低通滤波法等, 它们都会导致噪声信号有用部分的丢失, 因此本文采用小波变换来处理开关多元振动信号^[8]。切换多阶振动信号具有非平稳性, 常规噪声为高频成分, 而小波变换能对信号的低频、高频部分进行分解, 保持信号本身的结构特征^[9]。

基于小波变换方法的开关多元振动信号降噪处理示意图如图 2 所示。

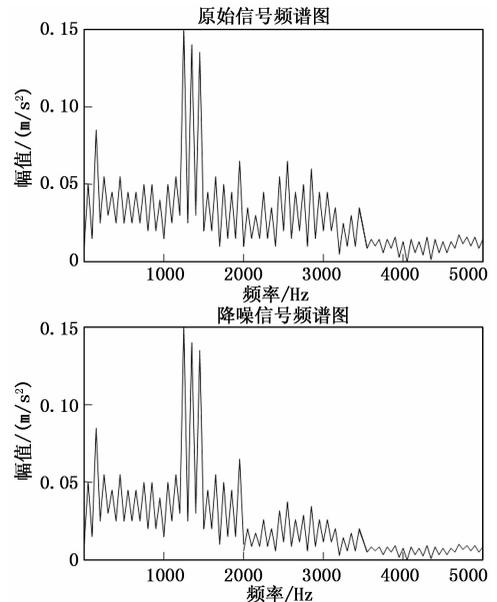


图 2 原始信号频谱图与降噪信号频谱图对比

具体开关多元振动信号诊断方法步骤如下。

步骤一: 小波包分解开关多元振动信号。通过时域到频域的变换, 确定多元振动信号的分解层次和小波基, 对原始多元振动信号进行 N 层小波包分解。需要注意的是, 多元振动信号具有衰减振荡特点, 在时域内具备紧致性, 则在频域内具备衰减性的小波基^[10]。

步骤二: 采用门限阈值形式量化处理小波包分解系数^[11]。常规情况下, 阈值分为硬阈值与软阈值。若阈值过大, 有用信号特征会丢失; 若阈值过小, 噪声去除效果差。

步骤三: 对开关多元振动信号进行小波包逆变换重构^[12]。

步骤四: 依据小波包逆变换重构结果诊断故障。

1.3 开关多元振动信号特征因子提取

在快速灭弧开关运行过程中, 零件间或零件间发生多次碰撞和摩擦, 振动信号的极值时刻能够反映零件的故障信息, 是快速灭弧开关故障在线监测的关键^[13]。

提取开关多元振动信号特征因子, 最核心的步骤是求取多元振动信号的包络过程, 提取振动信号极值时刻^[14]。设定此研究多元振动信号最小间隔为 0.3 s, 振动信号幅值阈值为 2 m/s²。

以获取的开关多元振动信号极值时刻为基础, 构建开关多元振动信号能量矩阵, 为了更好地提取开关多元振动

信号特征因子^[15]，基于时间轴计算 IMF (inherent mode function, 固有模式函数) 能量特征，具体特征因子提取过程如下：

首先，计算 IMF 能量特征与多元振动信号的相关系数，表示为：

$$\rho = \left| \frac{E[(c_i(t) - \mu_{c_i})(s(t) - \mu_s)]}{\sigma_{c_i} \sigma_s} \right| \quad (1)$$

公式 (1) 中， ρ 表示的是相关系数； $c_i(t)$ 表示的是 IMF 能量特征； μ_{c_i} 表示的是 IMF 能量特征系数； $s(t)$ 表示的是多元振动信号； μ_s 表示的是多元振动信号系数； σ_{c_i} 与 σ_s 分别表示的是 IMF 能量特征与多元振动信号的参与分量。

快速灭弧开关状态主要分为 8 种，分别为正常状态、高压故障、低压故障、导电臂松动、连杆松动、触头松动、底座螺栓松动以及槽钢松动^[16]。依据公式 (1) 提取主要的 IMF 分量，计算每个构成部分与多元振动信号之间的相关系数，具体数值如表 2 所示。

表 2 每个 IMF 分量与振动信号的相关系数表

状态	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4
正常状态	0.380	0.751	0.201	0.179
高压故障	0.365	0.720	0.298	0.232
低压故障	0.362	0.640	0.351	0.382
导电臂松动	0.333	0.610	0.310	0.220
连杆松动	0.301	0.651	0.342	0.301
触头松动	0.279	0.659	0.369	0.319
底座螺栓松动	0.319	0.668	0.319	0.309
槽钢松动	0.251	0.659	0.382	0.251

依据表 2 数据，计算 IMF 分量的能量距，计算公式为：

$$E_i = \sum_{k=1}^n [(k \cdot \Delta t) \cdot |C_i(k \cdot \Delta t)|^2] \quad (2)$$

公式 (2) 中， k 表示的是采样点； Δt 表示的是采样周期； C_i 表示的是 IMF 时间序列^[17]。

1.4 多元特征因子融合

以上述提取的开关多元振动信号特征因子为基础，单路振动信号特征因子很难明确快速灭弧开关故障的位置，为此融合多元特征因子^[18]。

为了形象表示振动信号特征因子，采用曲线图形式描述振动信号特征因子，如图 3 所示。

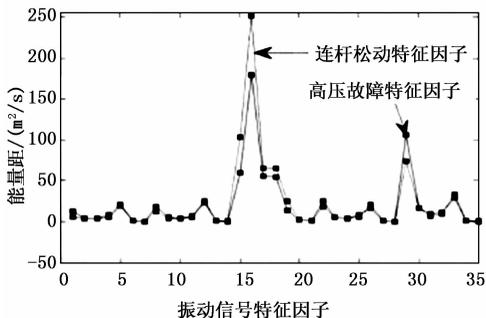


图 3 振动信号特征因子曲线图

如图 3 所示，IMF 能量距可以反映出 IMF 能量空间分布情况以及反映 IMF 能量的大小，有助于快速灭弧开关故障的定位^[19]。对于快速灭弧开关来说，不同故障的多元特征因子存在着显著的差距。但是，某些振动信号特征因子差别较小，导致多元特征因子融合后的特征向量精准性较差，为此，需要对其进行一定的优化^[20]。

快速灭弧开关故障位置的融合规则是：利用特征加权优化多元特征因子^[21]，输入多元特征因子样本集，在集合中选择一个样本，计算其与其他样本之间的欧式距离，以此为基础，判断样本的差异性，若差异性较大，保留该特征因子，反之，则删除该特征因子。将保留的振动信号特征因子融合，最终输出多元特征权重向量 W ^[22]。

以多元特征权重向量 W 为依据，筛选优化特征因子，选取特征权重值较小的振动信号特征因子，将其进行组合，得到融合后的快速灭弧开关多元状态特征向量，记为 E'_i 。

1.5 快速灭弧开关故障诊断

以上述得到的快速灭弧开关多元状态特征向量 E'_i 为基础，构建故障诊断模型，实现快速灭弧开关故障的在线监测。

首先，训练开关正常状态与故障样本数据，得到 $k+1$ 个超球面，其中， k 表示的是故障类型数量；1 是开关正常状态数量。若数据不属于 $k+1$ 个超球面内，则将认为开关属于“Else”故障，以此来补充快速灭弧开关故障类型，为后续的监测提供帮助^[23]。这种方式还可以提升监测方法在故障类别不完备的情况下监测的精准性。

在快速灭弧开关故障诊断过程中，评判函数为：

$$f = R^2 - |E'_i - a|^2 \quad (3)$$

式 (3) 中， R 表示的是 $k+1$ 个超球面空间； a 表示的是常数。则开关故障决策值为：

$$\omega = \begin{cases} \arg \max: f & \exists f \geq 0 \\ k+1 & \forall f < 0 \end{cases} \quad (4)$$

依据式 (4) 的结果，诊断快速灭弧开关的故障类型，诊断规则如表 3 所示。

表 3 快速灭弧开关故障诊断规则表

故障类别	决策值	故障类别	决策值
正常状态	1	触头松动	6
高压故障	2	底座螺栓松动	7
低压故障	3	槽钢松动	8
导电臂松动	4	Else	9
连杆松动	5		

综上所述，实现了基于多元状态感知监测技术的快速灭弧开关故障的在线监测，为快速灭弧开关的可靠运行提供保障，从而确保电力系统的稳定运行。

2 仿真实验分析

为了验证提出快速灭弧开关故障在线监测方法的实时性，设计仿真对比测试。现有代表方法主要包括基于支持向量机的快速灭弧开关故障在线监测方法与基于 PHM 技术的快速灭弧开关故障在线监测方法。为了展示提出方法的

性能, 利用对比研究方法, 具体测试过程如下所示。

2.1 实验测试准备

为了保障测试的顺利进行, 首要的任务就是选取唯一的测试对象——电子电磁式快速灭弧开关。测试自变量为快速灭弧开关数量, 范围为 30~150 个。测试对象连接方法如图 4 所示。

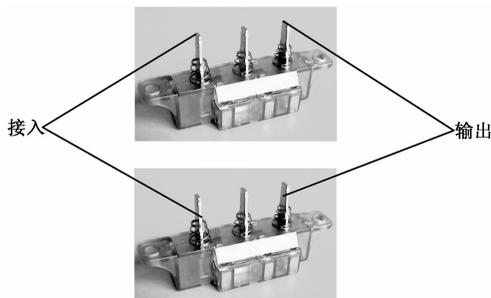


图 4 测试对象连接图

如图 4 所示, 快速灭弧开关以并联方式连接在电力系统中, 这样可以保障在某一个快速灭弧开关故障的情况下, 电力系统可以利用其他的快速灭弧开关达到灭弧的目的, 保障电力系统的顺利运行。

依据图 4 选取的测试对象——电子电磁式快速灭弧开关进行仿真对比测试, 通过实时性表现方法的性能。

2.2 测试评估指标选取

快速灭弧开关故障在线监测方法的实时性决定着方法的监测性能, 实时性越好, 表明方法的性能越好。快速灭弧开关故障在线监测方法实时性主要由快速灭弧开关故障监测时间决定, 其计算公式为:

$$T_s = T_{s1} + T_{s2} + T_{s3} \quad (5)$$

式 (3) 中, T_s 表示的是快速灭弧开关故障监测时间; T_{s1} 表示的是开关多元振动信号处理时间; T_{s2} 表示的是多元特征因子融合时间; T_{s3} 表示的是快速灭弧开关故障诊断时间。

常规情况下, 快速灭弧开关故障监测时间 T 越短, 表明方法实时性越好, 反之, 则方法实时性越差。

2.3 开关多元振动信号处理时间分析

开关多元振动信号处理是开关故障在线监测的第一步, 也是方法的关键环节。通过测试得到开关多元振动信号处理时间对比情况如表 4 所示。

表 4 开关多元振动信号处理时间对比情况表

开关数量	基于支持向量机方法	基于 PHM 技术监测方法	提出监测方法
30	1.23 s	1.45 s	0.56 s
60	1.56 s	1.11 s	0.77 s
90	1.87 s	1.23 s	0.89 s
120	2.00 s	1.59 s	0.91 s
150	1.94 s	1.99 s	1.00 s

如表 4 数据显示, 提出方法的开关多元振动信号处理时间远远的低于现有代表方法, 其最小值可以达到 0.56 s。

2.4 多元特征因子融合时间分析

通过测试得到多元特征因子融合时间对比情况如表 5

所示。

表 5 多元特征因子融合时间对比情况表

开关数量	基于支持向量机方法	基于 PHM 技术监测方法	提出监测方法
30	2.13 s	2.58 s	1.23 s
60	2.00 s	2.55 s	1.11 s
90	2.03 s	2.54 s	1.10 s
120	2.15 s	2.03 s	1.00 s
150	2.38 s	2.05 s	1.22 s

如表 5 数据显示, 提出方法的多元特征因子融合时间远远的低于现有代表方法, 其最小值可以达到 1.00 s, 节省操作时间, 多元针对信号处理效果较好。

2.5 快速灭弧开关故障诊断时间分析

通过测试得到快速灭弧开关故障诊断时间对比情况如表 6 所示。

表 6 快速灭弧开关故障诊断时间对比情况表

开关数量	基于支持向量机方法	基于 PHM 技术监测方法	提出监测方法
30	3.33 s	3.01 s	2.00 s
60	3.25 s	3.00 s	2.01 s
90	3.45 s	2.45 s	2.00 s
120	3.69 s	2.59 s	2.11 s
150	4.01 s	2.90 s	2.28 s

如表 6 数据显示, 提出方法的快速灭弧开关故障诊断时间远远的低于现有代表方法, 其最小值可以达到 2.00 s。

3 结束语

快速灭弧开关具备良好的灭弧性能, 可以防止电火花的产生。常用的快速灭弧开关主要有三种, 分别为电子电磁式快速灭弧开关、油式快速灭弧开关与压气快速灭弧式负荷开关。国际大电网会议对快速灭弧开关的可靠性进行过世界范围内的调查, 我国也对快速灭弧开关事故进行过大量的统计研究。经过调查与研究表明, 快速灭弧开关故障多数是由操作机构导致的, 以往对快速灭弧开关的监测是在设备交接或者停电期间进行, 通过快速灭弧开关状态判断, 维修或者更换快速灭弧开关。提出方法的开关多元振动信号处理时间、多元特征因子融合时间与快速灭弧开关故障诊断时间均小于现有代表方法, 表明提出方法的快速灭弧开关故障监测时间较短, 具备更好的实时性, 可以为快速灭弧开关的可靠性、安全性提供更加有效的保障。但是, 由于仿真对比测试快速灭弧开关数量取值范围的有限性, 导致测试具有一定的局限性, 为此, 需要对快速灭弧开关故障在线监测方法进行进一步的优化研究。

参考文献:

[1] 熊德智, 陈向群, 杨杰, 等. 微型断路器灭弧失效分析及性能优化设计 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (11): 2333-2341.
 [2] 逯玉兰, 李广, 郝玉胜, 等. 基于 Wi-Fi 无线感知技术的猪

- 呼吸频率监测 [J]. 农业工程学报, 2019, 35 (24): 183-190.
- [3] 刘彬, 石亲民, 吕玮, 等. 多断口真空快速隔离开关试验研究 [J]. 高压电器, 2018, 54 (2): 56-61.
- [4] 张海峰, 蔡永军, 李柏松, 等. 智慧管道站场设备状态监测关键技术 [J]. 油气储运, 2018, 37 (8): 841-849.
- [5] 刘文清, 杨靖文, 桂华侨, 等. “互联网+”智慧环保生态环境多元感知体系发展研究 [J]. 中国工程科学, 2018, 20 (2): 111-119.
- [6] 王燕山, 胡飞, 张梅菊, 等. 智能制造中的状态在线监测技术 [J]. 测控技术, 2018, 37 (5): 3-8.
- [7] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46 (20): 142-149.
- [8] 焦敬品, 李海平, 翟顺成, 等. 基于压缩感知的金属加筋板兰姆波健康监测技术 [J]. 航空学报, 2019, 40 (7): 695-670.
- [9] 王巨丰, 周鑫, 李籽剑, 等. 固相气态除雷击短路故障下电力系统暂态稳定性分析 [J]. 电网技术, 2018, 12 (12): 4160-4166.
- [10] 高镜, 何怡刚, 罗旗舞, 等. 一种光伏逆变器状态在线监测技术 [J]. 仪表技术与传感器, 2018, 10 (10): 47-50.
- [11] 王肖, 董德勇, 周骁, 等. 浅析 ABB LTB245 E1 系列开关典型故障案例 [J]. 电气技术, 2018, 19 (9): 104-106, 110.
- [12] 樊家昊, 汪卫国, 王丰华, 等. 真空灭弧有载分接开关振动特性分析 [J]. 电网技术, 2019, 43 (12): 4425-4432.
- [13] 杜鑫. 一起 500 kV GIS 断路器局部放电数据异常的分析与处理 [J]. 高压电器, 2018, 54 (4): 216-220.
- [14] 黄克捷, 程建伟, 王帅兵, 等. 252 kV GIS 灭弧室绝缘故障的电热耦合仿真分析 [J]. 广东电力, 2019, 32 (5): 133-140.
- [15] 祁海洋, 袁端磊, 王海燕, 等. 线圈布置方式对旋弧负荷开关开断能力的影响 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (11): 88-93.
- [16] 郭志奇. 基于电弧电流判据的直流断路器失灵保护 [J]. 都市轨道交通, 2019, 32 (4): 116-120.
- [17] 刘焱, 崔博源, 王宁华, 等. 1100 kV 特高压交流变电站开关设备低温应对措施 [J]. 高压电器, 2019, 55 (5): 226-231.
- [18] 葛国伟, 张鹏浩, 程显, 等. 真空灭弧室零区剩磁补偿装置及效果 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (11): 3272-3279.
- [19] 杨保利, 吴明清, 王晶, 等. 内孔形式对聚四氟乙烯灭弧喷口烧蚀过程的影响 [J]. 绝缘材料, 2018, 51 (9): 21-24.
- [20] 李德军, 沈威, KUSCHEL M, 等. 一种采用洁净空气绝缘和真空灭弧技术的环境友好型 GIS 的研究和应用 [J]. 高压电器, 2019, 55 (2): 21-30.
- [21] 张邳昂, 孙佳, 肖傲, 等. LW9-66 型断路器常见故障分析 [J]. 通信电源技术, 2018, 35 (2): 139-140, 144.
- [22] 欧芳志, 王巨丰, 李世荣, 等. 雷电诱导爆炸气流灭弧防雷装置原理研究与应用 [J]. 电气开关, 2018, 56 (4): 15-21.
- [23] 李静, 王奥飞, 樊小敏, 等. SF₆ 断路器弧前因素对电弧形成过程的影响研究 [J]. 电气工程学报, 2018, 13 (12): 18-22.
- [2] 张岚, 王献军, 赵卫华. 电力电缆故障定位在线检测研究 [J]. 电气技术, 2018, 19 (10): 55-58.
- [3] 毛健美, 王莉, 胡苏阳, 等. 混沌扩频多根电缆故障在线同步诊断研究 [J]. 电子学报, 2018, 46 (7): 1625-1632.
- [4] 张骁, 魏幼平. 电力系统中隐性故障快速定位检测仿真 [J]. 计算机仿真, 2018, 35 (2): 71-75.
- [5] 王丹阳, 唐健钧, 陈讴, 等. 基于时域反射法的航空电缆故障定位技术研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (2): 84-88, 96.
- [6] 张孟琛, 牛益国, 宣文华. 含 DG 配电网分层分区协同故障定位隔离技术 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (23): 115-121.
- [7] 李雷, 陈朝晖, 董晓刚, 等. 基于聚类分析的软件多故障定位技术 [J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45 (5): 55-62.
- [8] 李卡, 蔡俊强, 孙二双, 等. 基于信息综合分析的数字化变电站故障定位技术研究 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (18): 82-86.
- [9] 都秀红. 基于改进 Petri 网的采区供电系统故障诊断 [J]. 煤炭技术, 2018, 37 (12): 302-304.
- [10] 王国昊, 姜玉林, 宋云峰, 等. 基于行波测距技术的电缆故障定位的应用 [J]. 东北电力技术, 2020, 41 (2): 16-18.
- [11] 杜晓东, 李秋阳, 杨韬辉, 等. 基于有限元分析法的 GIS 超声波故障定位技术研究与应用 [J]. 青海电力, 2018, 37 (4): 25-30.
- [12] 肖先勇, 何婧宇, 陈纓, 等. 非有效接地配电网单相接地故障定位的技术难点 [J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33
- [13] 羊权荣, 汪宇, 何跃川. 城市轨道交通施工监测在 GIS+BIM 平台的集成应用 [J]. 隧道建设 (中英文), 2019, 39 (2): 345-351.
- [14] 张岩, 文福拴, 熊文, 等. 基于广域测量信息的电力系统故障诊断解析模型 [J]. 电力建设, 2018, 39 (5): 10-20.
- [15] 刘静. IGCT 故障电流限流技术在船舶供电系统中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40 (18): 82-84.
- [16] 周培培, 钱雪军. 轨道交通供电系统混合变电站的仿真研究 [J]. 铁路计算机应用, 2019, 28 (11): 65-69.
- [17] 吴高华, 李倩, 史宇峰. 城市轨道交通关键设备识别与运行状态评价 [J]. 交通运输研究, 2019, 5 (5): 94-101.
- [18] 李懿儒, 罗日成, 谭逢焘, 等. 轨道交通供电系统中变压器直流偏磁分析 [J]. 上海电机学院学报, 2019, 22 (1): 56-62.
- [19] 季少卫, 孙勇, 谢宁. 高海拔与周期负载条件下的雷达供电系统可靠性分析 [J]. 现代雷达, 2018, 40 (11): 61-67, 71.
- [20] 赵雪, 牟晓春, 柏嵩, 等. 适用于城市轨道交通牵引传动系统建模 [J]. 自动化技术与应用, 2018, 37 (9): 13-19.
- [21] 张钢, 刘志刚, 魏路, 等. 新一代智慧型牵引供电系统关键技术与应用示范 [J]. 都市轨道交通, 2018, 31 (1): 136-142.
- [22] 夏加富, 王竞, 乔卿阳, 等. 直流牵引供电系统的短路故障仿真 [J]. 船电技术, 2019, 39 (6): 29-32.
- [23] 刘艳丽, 郭凤仪, 李磊, 等. 矿井供电系统串联型故障电弧仿真分析及诊断方法 [J]. 煤炭学报, 2019, 44 (4): 1265-1273.