

基于多维感知的输电线路危险点识别控制技术研究

丁赞成,王大军,李万翔

(国网新疆电力有限公司阿勒泰供电公司,新疆阿勒泰 836599)

摘要:针对输电线路中存在的危险点影响电力系统稳定性问题,研究了基于多维感知的输电线路危险点识别控制技术,能够及时控制输电线路风险、降低噪声及对危险点位置进行有效识别。首先利用空间向量理论构建多维感知数据模型,采用无线传感器网络检测电路内差异参数,并通过向量运算识别输电线路危险点;然后在多维感知数据模型内引入十字滑动窗口,从空间及时间角度提升危险点的识别精度和速度,以危险点识别结果为基础,采用插值法通过运算危险点间最短矩阵以获取最短传输路径,控制危险线路和受其影响产生巨大有功潮流变动的次危险线路,从而实现对输电线路危险点控制。实验结果证明该技术危险点识别过程延时小,危险点识别准确性高且不易受危险点位置及噪声的干扰。

关键词:多维感知;输电线路;危险点;识别控制技术;空间向量

中图分类号:TM755 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23458

Research on Dangerous Point Identification and Control Technology of Transmission Line Based on Multi-dimensional Perception

DING Zancheng, WANG Dajun, LI Wanxiang

(Altay Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Altay 836599, Xinjiang, China)

Abstract: In view of the problem that the dangerous points in transmission lines affect the stability of power system, the technology of identifying and controlling the transmission line dangerous points based on multi-dimensional perception was studied, which can control the transmission line risk in time, reduce noise and effectively identify the location of the dangerous points. Firstly, the multi-dimensional perceptual data model was constructed by using space vector theory, and the difference parameters in the circuit were detected by wireless sensor network, and the transmission line dangerous points were identified by vector operation. Then, the cross sliding window was introduced into the multi-dimensional perceptual data model to improve the recognition accuracy and speed of dangerous points from the space and time. Based on the results of dangerous point identification, interpolation method was used to calculate the shortest matrix among dangerous points to obtain the shortest transmission path, control the dangerous line and the sub dangerous line which will cause great active power flow changes, thus, the control of transmission line dangerous point was realized. The experimental results show that the process of dangerous point identification is less delay, the accuracy of the dangerous points identification is high and it is not easy to be interfered by the location and noise of the dangerous points.

Key words: multi-dimensional perception; transmission line; dangerous point; identification control technology; space vector

输电线路是电力系统的重要组成部分,维护输电线路的安全是保障电力系统运行稳定的关键。高效地识别输电线路中的危险点能够有效避免大面积断电影响生活秩序,导致经济损失等

问题。输电线路肩负着传输电能的职责,其整体涵盖面广,基本架设在户外,重要的部件如杆塔、绝缘等不仅需要承担平常电能负载及机械运行等功能,还需面对复杂的外界因素,如雷电、暴风

基金项目:国网新疆电力有限公司科技项目(SGXJY00GHJS2000011)

作者简介:丁赞成(1974—),男,学士,正高级工程师,Email:dzc1974@163.com

等极端天气。多种因素都会影响线路部件,致使输电线路出现问题。克服各类因素避免线路危险点出现可以在很大程度上确保线路输电的稳定运行^[1]。一旦线路有危险点出现,采取有效措施选择最短路径在最短的时间内控制危险点出现造成的损害亦是目前电力学者研究的方向之一。

相关电力研究人员将多维感知技术应用到电力网络施工过程中,施工采用三维可视化技术辅助,减少施工过程中出现危险几率^[2]。同时,利用传感器进行施工作业动态监测,了解现场施工情况。多维感知技术应用于电力网络施工领域,提高了施工效率,但由于施工过程中可变因素过多,导致多维感知技术的优势受限,未得到最大化利用。李伟^[3]等人研究基于极限梯度提升树(extreme gradient boosting, XGBoost)的输电线路危险点识别控制技术,采用极限梯度提升树构成识别框架,构建输电线路危险点识别模型,从气象因子角度出发,识别线路危险点,该方法识别性能较好。但因气象因子具有多变等特性,导致该方法对危险点的控制能力较弱;匡载波^[4]等人研究基于脑启发视觉神经网络的输电线路危险点识别控制技术,该方法从生物视觉内提取特征并同脉冲网络结合对输电线路进行检测,该方法可对危险点进行精确定位,但由于该方法运算较为复杂,造成对危险点识别时间较长,不能及时控制危险点出现。

针对上述问题,本文提出基于多维感知的输电线路危险点识别控制技术。该方法从多维感知角度出发,充分利用其优势,通过构建向量空间模型并加入十字滑动窗口对线路危险点进行最大化检测,并用插值法完成最短路径搜索,实现危险点精准定位,找到危险线路并及时控制,避免输电线路断电等情况的发生。

1 危险点识别控制研究

1.1 基于多维感知的输电线路危险点识别

1.1.1 基于多维感知数据模型

基于多维感知的输电线路危险点检测需要对感知的危险点数据构建多维向量空间模型。

向量空间模型(vector space model, VSM)为多维数据模型,可将数据映射成一点,该点属于高维空间,此数据具备多维属性或特征值。多维感知采用无线传感器网络(wireless sensor net-

work, WSN),可对电力区域内的差异参数进行监测,根据参数的实际情况采用数个传感器模块构成感知节点^[5]。本文采用向量空间模型的塑造思路,采用向量运算的形式对输电线路危险点快速定位,依据节点在某时刻将传输数据映射成空间内特定点,其中该节点来自传感器模块。

输电线路危险点检测过程采用空间向量的方式完成,比传统的危险点检测方法精准同时检测速度快,能够提高危险点检测效率。节点危险点检测前将多维空间向量引进,通过检测异常点或向量实现危险点检测。异常点或向量来自多维空间^[6]。

在此基础上,构造VSM,根据VSM理论,分别用 T, Y 和 H 描述温度、光照及湿度传感三大模块,用三者描述维度,建立三维向量空间,所用的权重为三者属性值,可构建空间向量 $X_t=(3\ 000, 28, 50)$,表示处于 t 时刻传感数据,用 S 将数据传输出去, S 表示感知节点。用图1描述构建VSM过程。

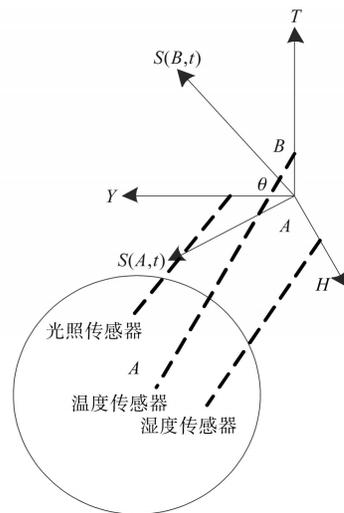


图1 向量空间模型的建立

Fig.1 The establishment of the vector space model

基于此,在某时刻全部节点传输的数据都可采用构建空间向量的形式实现^[7],该向量具有三维属性,用下式描述:

$$X_t = (Y_{(s,t)}, T_{(s,t)}, H_{(s,t)}) \quad (1)$$

式(1)内,各属性值可能取值区间、单位、计量方式各不相同,因此构建的向量无法实现统一标准,导致最终建立的向量维度权重偏大,相对于某维度,空间向量全部偏向它,影响检测效果。

基于此,需在VSM构建步骤内加入处理程序,采用归一化处理最大值,该值来自各维度属性值^[8]。各数值由绝对值变成相对值,该数据转

换过程通过归一化处理方式实现,归一化处理缩减运算量,此时,构建某时刻WSN节点传输数据的规范空间向量完成。

1.1.2 感知数据滑动窗口模型

在构建VSM后,各时刻每个空间向量经节点传递出的数据映射获得,将滑动窗口技术引入VSM,可将自身邻居节点及历史数据充分利用^[9],即从空间及时间角度对存在危险或异常的WSN节点进行更快捷精准定位。通过感知数据分析可知,感知数据会遵守它沿着时间方向完成,同理可知,处于空间领域,该数据同样会遵循这一规律。WSN节点将该数据传送回来。

如果此时滑动窗口为纵向,判断WSN节点危险点仅能采用某节点原始数据。若感知数据出现在某个时间段且为固定值,则易发生节点误判情况,导致危险点检测不够全面^[10];其中节点误判指的是实际是正常节点但判定结果却是危险节点,或者实际是危险节点但判定结果却是正常节点的情况。相同时间下,仅可将该节点以及邻居节点数据利用横向滑动窗口比对方法获取比对结果。故障存在于该节点以及邻居节点情况下,容易出现将故障节点判断为正常节点情况,降低故障节点判定精度^[11]。采用十字滑动窗口,该窗口结合纵横两方向窗口,该窗口纵向为节点本身原始数据,横向为感知数据,来自相邻节点。

本文采用十字滑动窗口同VSM相结合对输电线路危险点进行准确识别,由于电力网络的复杂化,因此还需对其进行严格控制,避免危险点对输电线路造成破坏。

1.2 输电线路危险点控制

基于上述识别出的线路危险点,通过最短传输路径搜索过程搜索出危险线路,便于及时开展应对措施,完成输电线路危险点控制。

1.2.1 最短传输路径搜索

由于电网输电线路复杂,且边数数量大、节点数目多,选择最短的传输路径实施搜索可提高危险线路搜索效率^[12]。为此,本文采用插点法(Floyd算法)对全部电网进行搜索得到危险线路的最短传输路径。

插点法算法可获得最短传输路径,可计算2节点间最短距离,该节点为识别到的输电线路危险点,插值法在时间上的复杂度高,当节点数处于300内,插值法运算速度快^[13]。插值算法的关

键点在于使获取的危险点间传输路径矩阵最短,该矩阵通过邻接矩阵求得,邻接矩阵来自网络模型内。计算过程如下:

1) 设用 $W = [w_{ij}]_{n \times n}$ 描述危险点的邻接矩阵,若 $w_{ij} = d$ 则表明 v_i 至 v_j 有路到达,其中路的长度用 d 描述;如无路,则 $w_{ij} = \infty$ 。

2) 保留插入点信息采用矩阵 D 实现, v_i 至 v_j 所途经的点用 D_{ij} 描述,即 $D_{ij} = j$ 。

3) 危险点内插入各顶点,比较插点前后的距离,即 $w_{ij} = \min(w_{ij}, w_{ik}, w_{kj})$, 若 $D_{ij} = k$, 则表明 w_{ij} 值变小。 D 和 w_{ij} 分别包括最短路径和最短道路信息。

最短传输路径搜索算法流程如图2所示。

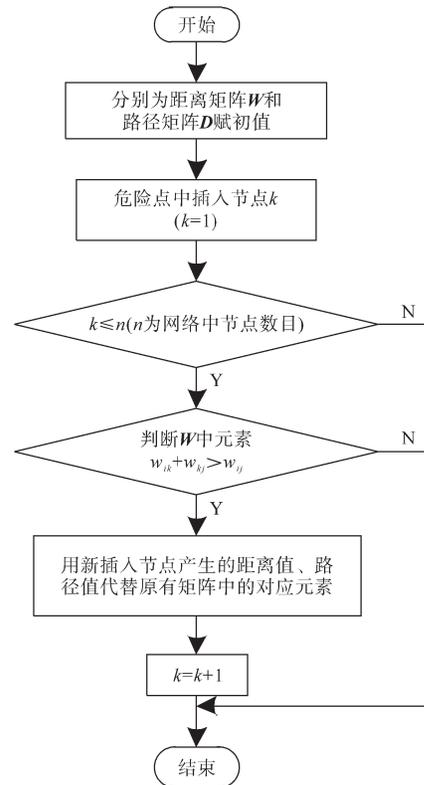


图2 最短传输路径搜索算法流程

Fig 2 The shortest transmission path search algorithm flow

1.2.2 危险线路的确定

若输电线路 Y_i 存在危险点,有功潮流分别用 $S_j^{(0)}, S_j^{(1)}$ 和 $S_i^{(0)}$ 描述,支路用 Y_i 描述,前线路、后线路及断开线路用 Y_j 描述。 Y_i 断开前 Y_j 得到 $S_j^{(0)}$; Y_i 断开后 Y_j 得到 $S_j^{(1)}$, Y_i 断开前获得 $S_i^{(0)}$, 则开断 Y_i 的有功潮流用下式描述:

$$\lambda_j^{(i)} = \frac{S_j^{(1)} - S_j^{(0)}}{S_i^{(0)}} \quad (2)$$

式中: $\lambda_j^{(i)}$ 为分布系数,表示 Y_j 受 Y_i 存在危险点所造成后果的影响程度; Y_j 为正常线路; Y_i 为开

断线路。

$\lambda_j^{(i)}$ 分布系数归属有功潮流, $\lambda_j^{(i)}$ 越大, 转移至 Y_j 有功潮流越大, Y_j 受危险点影响程度越大, 反之影响程度越小。

假设电力系统中危险线路的初始阶段所接收的有功功率以及输出的有功功率为固定状态, 此时电力系统保持平衡的有功功率状态。电力系统终端所接收危险线路的初始部位的有功功率总大小为固定^[14], 仅输电通道有所调整。分析以上过程可知, 与危险线路两侧间接或直接连接的线路所受到的影响较大。

通过分析大规模停电事故所知, 当输电线路出现危险点时, 会引起小范围线路产生巨大有功潮流变动, 其余线路有功潮流改变较小, 甚至保持原样。

由此可见, 当电网有危险点出现时, 与危险线路间接或直接连接的线路所产生的功潮流干扰巨大, 该线路为次危险线路^[15]。应对于危险线路和次危险线路采用合理的应对策略, 完成输电线路危险点最大程度控制。

2 实验分析

为验证上述基于多维感知的输电线路危险点识别控制技术的可行性, 设计如下实验。

仿真过程采用PSCAD内搭建电力系统模型, 系统频率为50 Hz, 其电压等级是250 kV, 线路长150 km。为确保实验贴近实际, 在系统各电信号内分别加入10 dB, 20 dB, 30 dB高斯白噪声, CPU为AMDR5 3550H, 硬盘为2 TB固态硬盘, 内存16 GB, 操作系统Windows 10具备栅格计算器, 同时含有3D mine软件, 本实验可用样本数量5 000个, 其中包含危险点数量1 500个。

2.1 识别延时比较

从危险点样本中随机抽取处于输电线路的不同位置处的8个危险点, 按距离的先后顺序依次用A, B, C, D, E, F, G, H表示, 仿真时间设定2 s, 设定危险点时刻0.4 s; 选取文献[3]中的基于极限梯度提升的线路危险点识别技术及文献[4]中的基于脑启发视觉神经网络的输电线路危险点识别技术为本文技术的对比技术, 统计三种技术对各个危险点识别性能, 识别结果用表1表示。其中, 延时是指危险点出现到危险点被检测到所消耗的时间。

表1 三种技术识别结果比较

Tab.1 Comparison of recognition results of three methods

| 危险点 | 本文技术 | | 文献[3]技术 | | 文献[4]技术 | |
|-----|------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | 识别结果 | 延时/ms | 识别结果 | 延时/ms | 识别结果 | 延时/ms |
| A | A | 1.3 | A | 2.1 | A | 3.7 |
| B | B | 1.4 | B | 2.6 | B | 3.9 |
| C | C | 1.8 | C | 3.1 | C | 5.8 |
| D | D | 1.9 | D | 3.5 | C | 6.1 |
| E | E | 2.1 | F | 4.2 | F | 7.3 |
| F | F | 2.2 | E | 4.5 | E | 7.6 |
| G | G | 2.5 | H | 6.2 | H | 8.1 |
| H | H | 2.7 | G | 7.1 | G | 8.3 |

由表1分析可知, 无论输电线路的任意位置出现危险点, 本文技术都可以准确识别危险点, 检测全部危险点均可在危险点出现2.7 ms内完成, 文献[3]和文献[4]技术并未实现全部危险点的准确定位, 且最大识别延时分别为7.1 ms, 8.3 ms。实验结果表明: 本文技术危险点识别的延时很小, 危险点识别准确性高且不受危险点位置影响。

2.2 不同噪声强度下危险点识别比较

随机抽取200个样本作为测试集, 其余样本作为训练集, 测试电信号内分别加入大小为10 dB, 20 dB, 30 dB高斯白噪声干扰情况下, 三种技术对危险点的识别效果, 衡量三种技术抗噪性能, 识别效果如图3所示。

分析图3可知, 文献[3]和文献[4]技术受噪声强度影响较大, 当噪声强度提高到30 dB时, 两种技术的识别危险点的正确率不足85%。而本文技术的正确率始终维持在较高水平。这说明本文技术对噪声的适应性较好, 噪声强度的增大并未对本文技术造成实质性影响。实验结果证明: 本文技术识别危险点的正确率高, 对噪声的适应性强, 具有较高的实用性。

2.3 危险点识别精准性比较

排除上述所提的噪声干扰, 设定所处的环境无外界因素干扰, 同时将系统电流频率从50 Hz降到5 Hz, 从现有样本中抽取300个作为测试集, 其余作为训练集, 训练150次, 并将该150 m长输电线路划分成8段(编号I~VIII), 在无外界干扰且电流频率为低频情况下, 比较三种技术对含有不同数量危险点的8段输电线路中危险点的识别情况, 详情用表2描述。

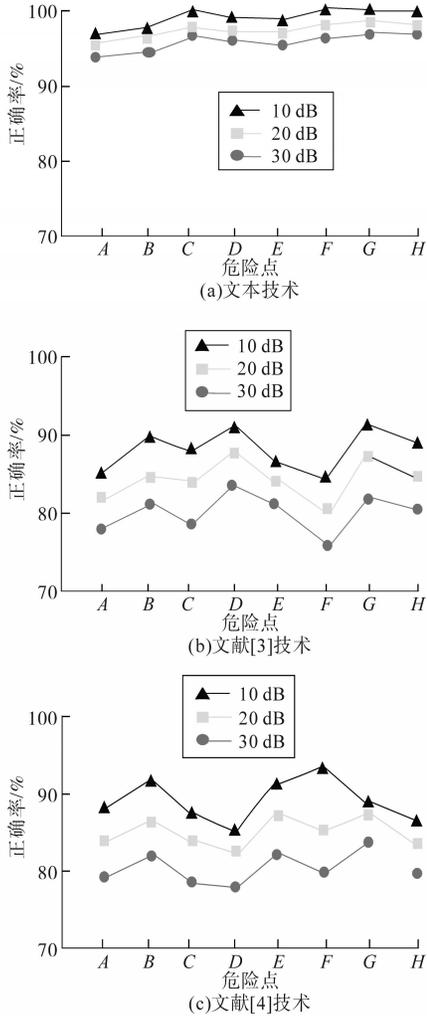


图3 三种噪声强度下识别正确率比较

Fig.3 Comparison of recognition accuracy under three kinds of noise intensities

表2 电流5 Hz时三种技术对危险点识别结果统计

Tab.2 Statistics on the identification results of the three technologies for dangerous points when the current is 5 Hz

| 输电线路编号 | 危险点个数(个) | 本文技术 | | 文献[3]技术 | | 文献[4]技术 | |
|--------|----------|------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | | 误判数 | 正确率/% | 误判数 | 正确率/% | 误判数 | 正确率/% |
| I | 178 | 0 | 100.00 | 0 | 100.00 | 0 | 100.00 |
| II | 230 | 1 | 99.57 | 16 | 93.04 | 15 | 93.48 |
| III | 152 | 0 | 100.00 | 5 | 96.71 | 4 | 97.37 |
| IV | 198 | 1 | 99.49 | 30 | 84.85 | 46 | 76.77 |
| V | 234 | 2 | 99.15 | 48 | 79.49 | 51 | 78.21 |
| VI | 122 | 0 | 100.00 | 0 | 100.00 | 0 | 100.00 |
| VII | 201 | 1 | 99.50 | 19 | 90.55 | 25 | 87.56 |
| VIII | 185 | 0 | 100.00 | 0 | 100.00 | 0 | 100.00 |
| 总计 | 1 500 | 5 | 99.67 | 118 | 92.13 | 141 | 90.60 |

由表2可知,本文相较于其他两种方法,误判数极低,仅5处出现误判,所误判的危险点数量

少,文献[3]和文献[4]技术的误判数量远高于本文技术,说明在容易出现误判的危险点处,本文技术的识别性能依旧高于其他两种方法。且在无外界环境干扰情况下,本文技术对危险点的识别准确率平均值为99.67%。输电电流频率的降低并未对本文技术造成影响,识别危险点的性能依然保持较高水平,虽有误判情况发生,但数量极少。实验结果说明:本文技术可对危险点进行精准判定,识别危险点的准确率高且不易受低频电流影响。

2.4 危险线路确定效果

实际输电线路危险点识别时,天气等客观因素必须考虑进去,各类客观因素对输电线路的影响各不相同,本文提取各客观因素中的关键影响因子,分别是天气因子、覆冰、地形条件、实际路况及恶劣条件等,它们分别用 a, b, c, d 及 e 描述。查阅相关资料获取各类客观因素权重值为: $a=0.215, b=0.189, c=0.163, d=0.215, e=0.244$ 。

利用上述各客观因子权重值数据,采用栅格计算器运算获取克服客观因子同时保障输电线路正常投入使用的综合成本。以该成本为基础,采用3D mine软件模拟该输电线路所在的环境,测试三种技术在客观因子的干扰下进行输电线路识别控制的成本和最佳路径距离,详细结果用图4描述。

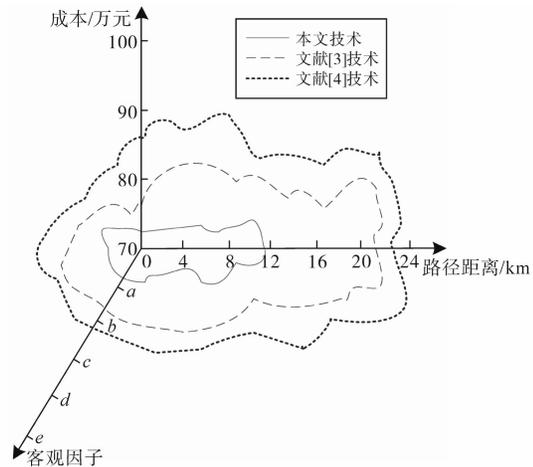


图4 危险线路确定结果对比

Fig. 4 Comparison of the determination results of dangerous lines

由图4分析可知,采用本文技术对输电线路进行识别控制时,所选择路径最短,且成本最低;文献[3]和文献[4]技术尽管考虑客观因子干扰,但选择的路径较长,同时成本高。本文技术优势十分显著的原因在于其利用多维感知模型精准识别危险点位置,并采用插值算法归一化处理映射

向量对应的权重值,获取最短路径,有效节省了成本。实验结果证明:采用本文技术可获取最短路径,且综合成本最低。

3 结论

本文研究了基于多维感知的输电线路危险点识别控制技术,提高了对输电线路危险点的识别能力,通过构建VSM缩减运算量,加入十字滑动窗口对危险点进行精准识别,利用插值算法完成最短路径搜索,从而确定危险输电线路,及时控制线路危险。实验结果显示,本文技术识别危险点准确性高,且不易受低频电流及噪声干扰,检测危险点的时延低,输电线路危险点识别效果好。然而该技术中构建的模型对节点数目有一定限制,在未来的研究中可以引入小波运算过程,采用多尺度方法提高模型运算效率,并进一步扩展对输电线路危险点的识别范围,提升该技术的实际应用性。

参考文献

- [1] 程宏波,高雅琦,王勋,等.基于故障类型识别的输电线路自适应测距方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(2):137-144.
Cheng Hongbo, Gao Yaqi, Wang Xun, *et al.* Adaptive fault location method for transmission lines based on fault type identification[J]. Protection and Control of Power Systems, 2019, 47 (2): 137-144.
- [2] 龚钢军,张帅,吴秋新,等.基于TensorFlow的高压输电线路异物识别[J].电力自动化设备,2019,39(4):204-209,216.
Gong Gangjun, Zhang Shuai, Wu Qiuxin, *et al.* Foreign body identification of high voltage transmission line based on tensorflow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (4): 204-209, 216.
- [3] 李伟,王丽霞,李广野,等.基于极限梯度提升树的输电线路缺陷风险预报[J].控制工程,2018,25(7):1172-1178.
Li Wei, Wang Lixia, Li Guangye, *et al.* Transmission line defect risk prediction based on limit gradient lifting tree[J]. Control Engineering, 2018, 25 (7): 1172-1178.
- [4] 匡载波,王江.基于脑启发视觉神经网络输电线路部件识别的研究[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(7):14-20.
Kuang Zaibo, Wang Jiang. Research on transmission line component recognition based on brain inspired visual neural network[J]. Journal of Power System and Automation, 2020, 32 (7): 14-20.
- [5] 谢从珍,白剑锋,王红斌,等.基于多维关联信息融合的架空输电线路雷害风险评估方法[J].中国电机工程学报,2018,38(21):6233-6244,6485.
Xie Congzhen, Bai Jianfeng, Wang Hongbin, *et al.* Lightning risk assessment method for overhead transmission lines based on multi-dimensional association information fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (21): 6233-6244, 6485.
- [6] 赵隆,张甜,黄新波,等.智慧输电线路接续管状态实时感知技术研究[J].高压电器,2020,56(9):114-121,128.
Zhao Long, Zhang Tian, Huang Xinbo, *et al.* Research on real-time state sensing technology of smart transmission line connector[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56 (9): 114-121, 128.
- [7] 刘又维,樊绍胜,唐立军,等.基于关键点的输电线路防振锤滑移视觉检测[J].激光与光电子学进展,2020,57(20):279-285.
Liu Youwei, Fan Shaosheng, Tang Lijun, *et al.* Visual inspection of transmission line damper slip based on key points[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 279-285.
- [8] 李博通,赵盛,李斌,等.基于电弧电流边际谱能量比的输电线路永久性故障识别方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(10):61-67.
Li Botong, Zhao Sheng, Li Bin, *et al.* Permanent fault identification method for transmission lines based on marginal spectral energy ratio of arc current[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30 (10): 61-67.
- [9] 赖秋频,杨军,谭本东,等.基于YOLOv2网络的绝缘子自动识别与缺陷诊断模型[J].中国电力,2019,52(7):31-39.
Lai Qiupin, Yang Jun, Tan Bendong, *et al.* Insulator automatic identification and defect diagnosis model based on YOLOv2 network[J]. China Electric Power, 2019, 52 (7): 31-39.
- [10] 夏远洋,李啸鹏,陈飞翔,等.基于FastICA的输电线路行波故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(1):138-143.
Xia Yuanyang, Li Xiaocong, Chen Feixiang, *et al.* Traveling wave fault location method for transmission lines based on FastICA[J]. Power Systems Protection and Control, 2019, 47 (1): 138-143.
- [11] 曾勇斌,王星华,彭显刚,等.输电线路缺陷风险建模及其预测方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):91-98.
Zeng Yongbin, Wang Xinghua, Peng Xiangang, *et al.* Study on modeling and forecasting method of transmission line defect risk[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (10): 91-98.
- [12] 甘国晓,耿光超,高波,等.考虑线路停运概率的电力系统连锁故障阻断控制[J].电网技术,2020,44(1):266-272.
Gan Guoxiao, Geng Guangchao, Gao Bo, *et al.* Blocking control of cascading failures in power system considering outage probability[J]. Power Grid Technology, 2020, 44(1): 266-272.
- [13] 张媛媛,王毅,韩彬,等.半波长输电线路潜供电弧工频谐振作用机理及优化控制方案[J].电网技术,2018,42(7):2073-2080.
Zhang Yuanyuan, Wang Yi, Han Bin, *et al.* Working mechanism and optimal control scheme of power frequency resonance

(下转第72页)

- 电站跨间隔检修技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2):175-181.
- Yang Gaofeng, Xie Bing, Zeng Zhian, *et al.* Research on inter bay maintenance technology of intelligent substation based on SCD and CCD calibration[J]. Protection and Control of Power System, 2019, 47 (2): 175-181
- [3] 尹相国, 张文, 路致远, 等. 面向智能变电站二次设备的故障诊断方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3):44-50.
- Yin Xiangguo, Zhang Wen, Lu Zhiyuan, *et al.* Research on fault diagnosis method for secondary equipment of intelligent substation[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57 (3): 44-50.
- [4] 王同文, 刘宏君, 邵庆祝, 等. 智能变电站二次回路智能预警及故障诊断技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8):64-68, 103.
- Wang Tongwen, Liu Hongjun, Shao Qingzhu, *et al.* Research on intelligent early warning and fault diagnosis technology for secondary circuit of intelligent substation[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(8):64-68, 103.
- [5] 李奎, 戴逸华, 牛峰, 等. 基于触发角识别的脉动直流剩余电流有效值检测方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 80-84.
- Li Kui, Dai Yihua, Niu Feng, *et al.* Detection method of RMS of pulsating DC residual current based on trigger angle recognition[J]. Power Automation Equipment, 2017, 37 (5): 80-84.
- [6] 郭丽娟, 张玉波, 尹立群, 等. 基于离群点检测的变电主设备异常辨识与规律分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(9): 14-21.
- Guo Lijuan, Zhang Yubo, Yin Liqun, *et al.* Anomaly identification and rule analysis of substation main equipment based on outlier detection[J]. China Southern Power Grid Technology, 2018, 12 (9): 14-21.
- [7] 杨梅, 孙宏强, 郝静. 基于RMO的感应电动机转子断条故障检测[J]. 电气传动, 2020, 50(8):119-124.
- YANG Mei, SUN Hongqiang, HAO Jing. Broken rotor bar fault detection of induction motors based on RMO[J]. Electric Drive, 2020, 50(8):119-124.
- [8] 周剑飞, 刘晨. 基于LSTM的设备故障在线检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(1):272-278.
- Zhou Jianfei, Liu Chen. Online fault detection method of equipment based on LSTM[J]. Computer Engineering and Application, 2020, 56 (1): 272-278.
- [9] 张瑶, 王然风, 唐孝先. 选煤厂机电设备参数检测与故障诊断系统设计及实现[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(6):47-50.
- Zhang Yao, Wang Ranfeng, Tang Xiaoxian. Design and implementation of parameter detection and fault diagnosis system for electromechanical equipment in coal preparation plant[J]. Mining Research and Development, 2017, 37 (6): 47-50.
- [10] 黄磊, 郭栋, 赵越岭, 等. 配电变压器绕组状态在线评估系统研究[J]. 电气传动, 2021, 51(2):62-68.
- Huang Lei, Guo Dong, Zhao Yueling, *et al.* Research on online evaluation system for winding state of distribution transformer[J]. Electric Drive, 2021, 51 (2): 62-68.
- [11] 文娟, 谭阳红, 何怡刚, 等. 含分布式电源的复杂配电网多阶段故障恢复方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14):3332-3341.
- Wen Juan, Tan Yanghong, He Yigang, *et al.* Multi stage fault recovery method for complex distribution network with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3332-3341.
- [12] 卫佳乐, 丁正生. 新型稀疏自动编码器组合的深度学习学习方法[J]. 计算机仿真, 2020, 37(4):280-284.
- Wei Jiale, Ding Zhengsheng. Deep learning method for new sparse automatic encoder combination[J]. Computer Simulation, 2020, 37 (4): 280-284.

收稿日期:2021-04-12

修改稿日期:2021-05-12

(上接第58页)

- of secondary arc in half wavelength transmission line[J]. Power System Technology, 2018, 42 (7): 2073-2080.
- [14] 颜肃, 张玮亚, 李宏仲, 等. 基于人工智能的输电线路故障快速诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 94-99.
- Yan Su, Zhang Weiya, Li Hongzhong, *et al.* Research on fast fault diagnosis method of transmission line based on artificial intelligence[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (19): 94-99.
- [15] 付华, 吴赛, 徐耀松, 等. 基于VMD与广义S变换的HVDC线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4):125-133.
- Fu Hua, Wu Sai, Xu Yaosong, *et al.* Fault location of HVDC lines based on VMD and generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (4): 125-133.

收稿日期:2021-05-07

修改稿日期:2021-06-18