

基于AI技术的输变电脆弱线路自动识别与控制应用

吕征宇

(国网上海电力设计有限公司,上海 200002)

摘要:输变电系统是电力输送的重要纽带,为了降低运维成本和提高识别效果,提出一种基于AI技术的输变电脆弱线路自动识别与控制应用方法。利用人工智能技术(AI)的决策树贪心算法(ID3)度量线路不同运行特征之间的信息量,得到线路特征,引入互信息特征选取(MIFS)优化决策树,利用调节系数和惩罚项平衡线路运行特征间的冗余度,并且引入加权度数,衡量节点权重并重点考虑所有连接线路的有功总量。在综合分析电纳介数和加权度数等指数前提下得到综合的脆弱线路自动识别指标,建立识别模型,最后改变输变电线路的潮流传输及负载变化实现控制。实验证明所提方法能够准确识别出脆弱线路位置,方法有效可行,其控制应用也有效降低了运维成本。

关键词:连锁故障;综合脆弱识别;AI技术;输变电线路;识别指标;控制应用

中图分类号:TM77 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24906

Application of AI Technology in Automatic Identification and Control of Transmission and Transformation Vulnerable Lines

LÜ Zhengyu

(State Grid Shanghai Electric Power Design Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: The power transmission and transformation system is an important link of power transmission. In order to reduce the cost of operation and maintenance and improve the recognition effect, an application method of automatic identification and control of transmission and transformation vulnerable lines was proposed based on artificial intelligence (AI) technology. Using the greedy decision tree algorithm (ID3) of AI to measure the amount of information between different operation characteristics of the line, it got the line characteristics, introduced mutual information feature selection (MIFS) to optimize the decision tree, balanced the redundancy between the line operation characteristics by using the adjustment coefficient and penalty term, and introduced the weighted degree, measured the node weight and focused on the total active power of all connecting lines. Based on the comprehensive analysis of the permittivity and weighted degree, the comprehensive automatic identification index of vulnerable lines was obtained, the identification model was established, and finally the power flow transmission and load change of transmission and transformation lines were changed to achieve control. The experiment shows that the proposed method can accurately identify the location of vulnerable lines, which is effective and feasible, and its control application also effectively reduces the operation and maintenance costs.

Key words: interlocking failure; comprehensive vulnerability identification; AI technology; power transmission and transformation lines; identification indicators; control application

近年来,随着我国经济社会的快速发展,全国范围内的电力需求呈现逐年增加的趋势,对电力系统的安全、稳定运行提出了更高的要求,也是对输电线路的安全、高效电力输送工作的一种

考验。为了避免大规模负荷用电造成的输变电故障,采取科学有效的技术手段及时识别电网内易受影响的脆弱线路具有重要意义。其中,电网系统中易损线路的准确自动识别及控制应用是

基金项目:国家电网公司科技项目(521304170028)

作者简介:吕征宇(1971—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电网工程数字化与数字孪生,Email:11z2y3939@163.com

保障电网安全稳定运行的有效手段,并且有效的方法可以降低运维成本。

倪良华等人^[1]研究的冲击后果脆弱识别方法,根据线路受到冲击后的脆弱程度,建立脆弱自动识别指标,从潮流的冲击影响及线路承受韧性两个方面,实现脆弱线路的自动识别;王竞才等人^[2]研究的虚假攻击脆弱识别方法,利用建立电力信息数据将各类物理攻击和虚拟攻击进行建模,再通过研究和计算电网线路在割裂攻击模式下的响应程度,判断具体的脆弱线路。上述两种方法的识别角度相对单一,且侧重点在攻击模式下,因此最终的识别结果并不能完全体现输电网中线路脆弱的整体情况,其存在一定的局限性。

输变电线路关键特征的信息度量是识别变电脆弱线路的关键,因此,本文提出了一种基于AI技术的输变电脆弱线路自动识别与控制应用。该方法引入了AI技术的决策树ID3算法,并且通过互信息特征选取(MIFS)进行了优化,同时,在构建输变电线路的脆弱自动识别指标时,引入加权度数,进一步优化识别算法,通过综合分析全部脆弱线路的自动识别指标,得到较为全面的综合自动识别指标,最终实现输变电的脆弱线路识别。

1 AI技术下输变电线路关键特征的信息度量

为了能够更加准确全面地量化获得输变电线路运行信息并识别其脆弱线路,借助AI人工智能技术中的决策树ID3算法,并且引入MIFS对其进行优化,完成AI技术下输变电线路关键特征的信息度量。在决策树ID3算法度量输变电线路关键特征的信息时,决策树ID3算法通过信息熵^[3]这一概念深度刻画输变电站电网中存在的随机变量和其不确定性。

假设脆弱线路在电网中的概率密度分布^[4]为 $p(x)$,对应的连续型随机变量为 X ,此时线路中的不确定性程度可以通过信息熵表示,公式为

$$H(X) = -\int_x p(x) \log(x) dx \quad (1)$$

通过相同的计算逻辑,可以利用联合熵度量多个随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 之间的不确定性,公式为

$$H(X_1, \dots, X_n) = -\int_{x_1} \dots \int_{x_n} p(x_1, \dots, x_n) \cdot \log p(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (2)$$

根据联合熵计算的不确定性,在已知一个变量 Y 的情况下,针对另一个变量 X 的不确定性,计算变量的条件熵:

$$H(X|Y) = H(X, Y) - H(Y) \quad (3)$$

以上述获取的变量不确定性的条件熵为决策树的根节点,如果两个随机变量的信息数量一致,此时可以使用互信息值^[5]表示这两个变量的相关性。设定两个随机变量分别为 X 和 Y ,相对应的两个变量中信息的边缘概率分布^[6]分别用 $p(x)$ 和 $p(y)$ 表示,则 X 和 Y 之间的互信息表达式如下:

$$I(X, Y) = -\int_y \int_x p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} dx dy \quad (4)$$

根据同样的计算逻辑,可以得到多个变量之间的联合互信息值,从而根据联合互信息值可以获取线路特征,计算公式为

$$I(X_1, \dots, X_n; Y) = -\int_{x_1} \dots \int_{x_n} \int_y p(x_1, \dots, x_n, y) \cdot \log \frac{p(x_1, \dots, x_n, y)}{p(x_1, \dots, x_n)p(y)} dx_1 \dots dx_n dy \quad (5)$$

将上述获取的多个变量之间的联合互信息值作为决策树的子节点。结合根节点和子节点形成决策树,决策树以联合互信息值为分离目标的评价函数,采用自顶向下不可返回的策略,搜索出全部空间的一部分,确保决策树建立最简单。针对输变电网脆弱线路的关键性特征,通过决策树ID3算法可以有效地度量线路不同运行特征之间的信息量,同时直接地度量出线路运行特征间的冗余性,得到较为完整的线路特征选择。在组合所有的线路运行特征后,其中包含的线路运行分类信息量和独立参考下,显示每个线路的运行特征中包含的分类信息量之间存在着明显的差异。在这种情况下,说明线路不同的运行特征之间存在相同的信息值,这些信息特征对于输变电线路分类而言相对冗余。

为了进一步减少决策树ID3算法先验参数调节系数对识别结果的影响,提高识别准确性,在决策树ID3算法获取信息后,引入MIFS优化决策树ID3算法。在决策树ID3算法基础上,利用MIFS选择线路运行互信息的有效特征。在选择特征 f 时,为了最大程度地避免子集合 S 冗余度高的情况,通过评价标准降低冗余度,对应的MIFS评价标准为

$$I(C; f_i) - \beta \sum_{f_s \in S} I(f_i; f_s) \quad (6)$$

式中: $I(C; f_i)$ 为线路运行状态候选特征 f_i 和线路特征分类 C 之间的互信息; f_s 为子集中已经选取的特征; $I(f_i; f_s)$ 为 f_i 和 f_s 之间的互信息值; β 为评价标准的调节系数, 取值保持在 0.5~1 之间。

在公式中添加惩罚项^[7], 用于平衡线路运行候选特征和已选特征之间存在的冗余度。调节系数主要依赖于函数计算的先验性, 在这个过程中, 应该选择最大互相不相关特征作为脆弱线路识别的不确定性因素, 这一阶段的特征评价标准可表示为

$$I(C; f_i) - \max_{f_s \in S} \left\{ \frac{I(C; f_s)}{H(f_s)} \right\} I(f_s; f_i) \quad (7)$$

在对互信息条件完成近似求值之后, 通过式(7)可以有效提高决策树 ID3 算法获取输变电网中各条线路信息的准确性, 在很大程度上减少了先验参数调节系数对结果的影响, 为输变电脆弱线路自动识别与控制应用奠定基础。

2 输变电线路的脆弱自动识别指标

基于决策树 ID3 算法获取到输变电网线路情况后, 得到线路特征的分析 and 提取结果, 接下来针对脆弱线路进行综合性的自动识别指标构建。首先根据决策树 ID3 算法获得的输变电脆弱线路节点信息, 分析输变电网中每个节点线路在电网中的重要程度, 二者之间的紧密程度越大, 证明该条线路节点越重要, 其公式表示为

$$k_i = \sum_{j=1}^n l_{ij} I(C; f_i) \quad (8)$$

式中: k_i 为线路节点 i 对应的度数; l_{ij} 为线路 ij 的度数取值, 线路 ij 和线路节点 i 之间相连的情况下度数取值为 1, 若完全不相连则将取值定为 0; n 为输变电系统内的线路节点总数量。

在实际工作中, 发电机线路的分布和实际状态会影响整个系统的稳定运行, 因此, 为了降低影响, 在构建输变电脆弱线路自动识别方法时, 引入加权度数, 进一步优化识别算法, 在式(8)中添加相应的权重度数^[8], 并且结合电网中的输电功率, 获取加权度数, 公式为

$$K_i = \tau \sum_{j=1}^n k_i p_{ij} \quad (9)$$

式中: K_i 为线路节点 i 对应的加权度数; p_{ij} 为线路 ij 在电网中的输电功率; τ 为权重度数。

加权度数主要考虑不同节点的权重问题, 能够更加全面体现出各个节点在电网线路中的重要性, 考虑因素中还包括所有连接线路的有功总量^[9]。假设两种拓扑结构 a 和 $P_a = 15, P_b = 15$ 的结构相似但方向不同, 此时得到的线路节点重要度分别为 $K_a = 15, K_b = 15$, 节点对应的传输功率为 $P_a = 15, P_b = 15$ 。

对输变电系统中各条线路的输电功率 p_{ij} 在节点 i 处的注入功率, 输变电系统中各条线路的传输有功功率与对应的节点电压和线路电抗有着密切的关系, 公式为

$$P_{ij} = \frac{v_i v_j}{x_{ij}} \sin \theta_{ij} = v_i v_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (10)$$

式中: P_{ij} 为经过线路 ij 流动的有功功率; v_i, v_j 分别为线路 i 和 j 两个节点的电压; θ_{ij} 为线路 ij 上 i 和 j 两个节点之间的电压相角差; x_{ij} 为线对应的对电抗; b_{ij} 为线路对应的电纳。

根据式(10)可知, 输变电系统内电力线路的功率和电纳值之间成正比, 将输电线路的电纳作为指定向量的连接权重, 此时线路 ij 的所属电纳介数^[10]可表示为

$$B_{ij} = \sigma \cdot b_{ij} \quad (11)$$

式中: B_{ij} 为线路 ij 实际所属电纳介数值; σ 为线路赋值系数。

当线路 ij 所属节点对应的两端电压与相角差之间呈固定值时, 电纳介数值的大小与线路的传输功率呈正比关系。当电纳的介数值较高时, 证明输电线路更为重要, 通过电纳介数值可以有效地识别出脆弱线路^[11]。

在利用决策树 ID3 算法统计输变电线路节点并计算节点度数和功率时, 电纳介数根据线路的电抗做出基础判断, 尽管电纳介数从状态和结构两方面考虑, 但这仅仅只能反映出节点的重要性, 而电抗指标无法全面体现电力系统的状态特征, 单独从电网线路的运行状态或是网络结构去考虑和识别脆弱线路都不够全面。

针对上述问题, 基于决策树 ID3 算法, 将加权度数和电纳介数这两个衡量指标有效结合, 参考决策树 ID3 算法获取到的输变电网整体运行状态特征, 并在此基础上, 引入电压裕度, 获得综合的脆弱自动识别指标, 此时得到的综合指标值越大, 证明该条线路是脆弱的。线路 ij 的综合脆弱自动识别指标 M_{ij} 表示如下:

$$M_{ij} = \sqrt{K_i K_j} \cdot B_{ij} / V^k \quad (12)$$

线路节点 k 处的电压裕度 V^k 的计算过程如下:

$$V^k = \begin{cases} \frac{u_i^k - u_{cr}^k}{u_0^k - u_{cr}^k} & k = \begin{cases} i & u_i^i < u_i^i \\ j & u_i^i > u_i^i \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中: u_i^k 为线路节点 k 在 t 时刻对应的真实电压值; u_0^k 为线路节点 k 处检测到的初始电压值; u_{cr}^k 为线路节点 k 处对应的临界电压值。

输变电线路运行状态临界值的距离会随着电压裕度值的减小而缩小。当线路电抗 x_{ij} 发生变化时,线路中的电压也会随之发生,综合的脆弱线路自动识别指标中考虑到了电抗的影响,因此选择潮流终端节点作为线路节点 k 。至此完成输变电线路的脆弱自动识别指标设计。

3 脆弱线路识别模型及控制

建立输变电脆弱线路识别模型,利用随机、静态链式以及动态链式3种攻击模式,确定电力系统的薄弱环节。随机攻击每次都会随机选择不同的目标线路进行攻击;静态链式攻击是指按顺序中断综合介数最大的输变电线路;动态链式攻击主要根据电网中实时介数最大线路进行切断操作^[12]。

为了更直接地检测和识别出脆弱线路,需要采用第2节的脆弱自动识别指标。在决策树ID3算法应用的基础上完成识别,其不仅计算简单而且还能够全面反映出输变电网络的实际状况,并能准确地识别脆弱线路的具体影响程度。

通过识别线路的最大传输能力,从线路容量这个角度分析其对应的输电能力,根据输变电网络中输电的最大流估算电网线路的最大传输能力 E :

$$E = Q_{\max}(A, C) \quad (14)$$

式中: A 为输变电网络对应的拓扑结构矩阵; C 为电网中各条分支线路的容量矩阵; Q_{\max} 为输变电网络的最大流。

输变电网络中各条线路的实际运行状态可能受到各种环境情况的影响,从而发生故障,因此,最后通过计算系统整体传输能力,结合综合脆弱自动识别指标,可以实现对脆弱线路的准确识别,识别模型为

$$F_{ij} = M_{ij} + \omega E \quad (15)$$

式中: ω 为脆弱线路识别转换系数; F_{ij} 为脆弱线路识别模型。

脆弱线路的识别流程如图1所示,具体过程如下:

1) 根据输变电系统内各线路实际运行情况计算并确定线路的综合介数,包括所有涉及到的参数值,以完成综合介数和自动识别指标的确立。

2) 利用不同攻击模式对应攻击输变电网络中的所有线路。

3) 最终在验证模型的基础上完成脆弱线路的准确识别。

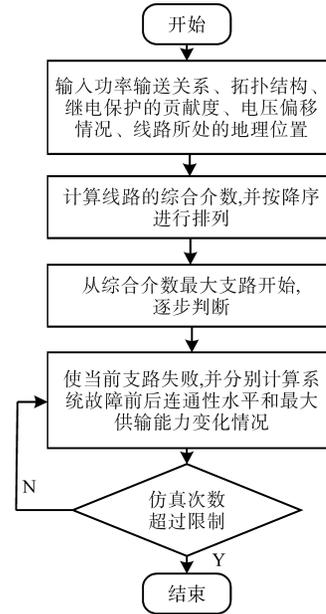


图1 识别流程

Fig.1 Identification process

在控制方面,经过精准识别输变电中的脆弱线路后,要分析电路潮流的正向变化情况,减小输变电线路的负载和输电压力,有效保护重要线路和脆弱线路,延长输变电网络内线路的使用寿命,实现整个输变电线路的安全控制。

4 实验论证分析

为了能准确验证本文所研究的基于AI技术的输变电脆弱线路自动化识别方法的有效性,首先建立小型输变电网络系统,网络系统整体结构如图2所示。

小型输变电网络系统的服务器采用Apache服务器,整体结构采用的是浏览器/服务器(Browser/Server, B/S)和客户端/服务器(Client/Server, C/S)两种模式混合的网络结构。硬件配置为中央处理器(central processing unit, CPU)为i7-10700F,处理器intel8核,16线程,内存8G,硬盘为500G。

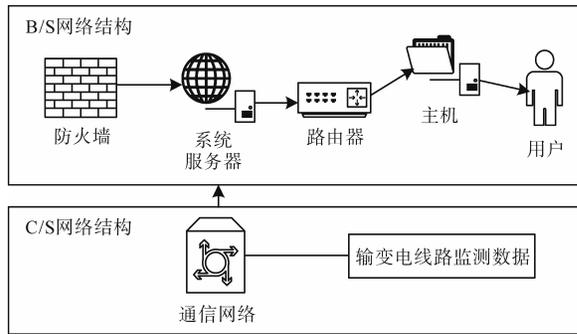


图2 小型输变电网络系统结构

Fig.2 System structure of small power transmission and transformation network

在上述小型输变电网络系统结构的基础上,设计模拟输变电节点系统,其中包含10机和39个节点作为实验分析模型。通过AI技术获取其节点系统的拓扑结构图,如图3所示。

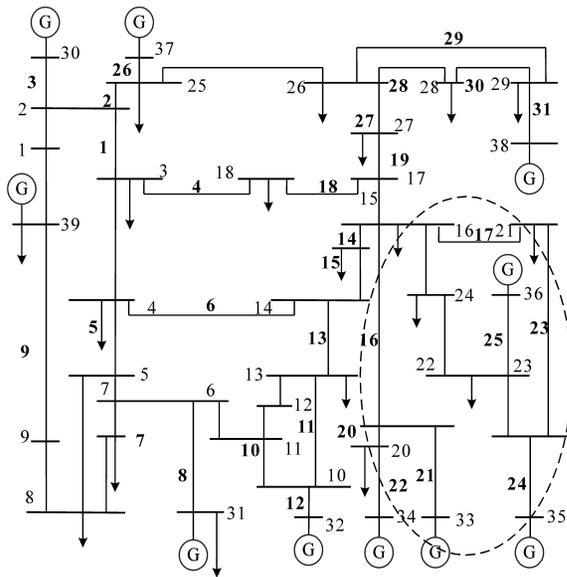


图3 模拟输变电节点系统

Fig.3 Analog transmission and transformation node system

图3中标准字体表示的是线路节点编号,加粗字体表示的是线路编号。按照线路的重要程度,利用AI技术将其区分成重要和不重要两类。不重要线路的开合状态不会对整个输变电系统线路造成较大的冲击,经过统计可知这些线路编号分别1—2,1—39,3—4,5—8,6—7,6—11,7—8,8—9,12—11,12—13,14—15,16—24,12—13,23—24,25—26。再将区分后得到的输变电系统中重要线路,根据本文研究的脆弱线路识别综合指标进行排序,得到的结果如图4所示。

根据图3和图4的综合比对可知,前14位的脆弱线路排序中,综合识别指标较高的线路节点都处在相对密集的区域,且在整个输变电网络系

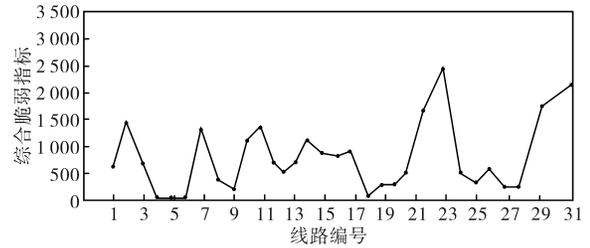


图4 节点脆弱线路排序

Fig.4 Ranking of node fragile lines

统内属于中枢连接线路,符合实际建立的小型输变电模型实际情况。而22—25,29—38,21—22,2—25这4条输电线路,不仅处在线路节点的密集区域,其位置也处在电量输送的关键节点上,表明上述4条输变电线路的开合状态会直接影响电量的输送。从图中还可以看出,5—6,16—17,16—21,17—18这4条输变电线路的传输能力虽然仅处于中等水平,但其在整个输变电网络系统内属于中枢连接位置,这些线路如果存在脆弱或发生故障,也会直接导致输电通道的中断,造成输电网发生区域性供电功率不足或者线路过载等状况的发生。

筛选出脆弱排序前14位的输变电线路后,分别利用冲击后果脆弱识别法(文献[1])、虚假攻击脆弱识别法(文献[2])、原方法(未应用本文方法前,研究对象应用的方法)和本文方法识别输变电脆弱线路,将4种不同方法的识别结果进行对比,结果如表1所示。

表1 4种方法脆弱线路识别结果

Tab.1 Identification results of vulnerable lines by four methods

排序	线路名称			
	冲击后果脆弱识别法	虚假攻击脆弱识别法	原方法	本文方法
1	3—6	16—17	22—25	22—25
2	7—9	22—25	29—38	29—38
3	21—22	17—18	5—6	21—22
4	16—19	23—24	16—17	2—25
5	3—18	21—22	21—22	5—6
6	16—21	23—36	16—21	16—17
7	24—25	19—33	2—25	16—21
8	22—25	16—21	17—18	17—18
9	16—21	16—19	23—36	16—19
10	19—25	25—37	10—11	15—16
11	23—36	3—18	10—13	10—13
12	2—25	16—24	15—16	10—11
13	5—6	29—38	16—19	23—36
14	16—17	32—10	28—29	28—29

根据表1中的识别结果,4种方法下得到的脆弱线路排序并不完全相同,而本文研究方法下识别出的线路中22—25,29—38,21—22,2—25这几条线路的脆弱程度最严重,识别结果与实际结果一致。由于其主要分布在输变电设备相对集中的节点区域,该脆弱线路与实际中的脆弱线路一致,这些脆弱线路的开合状态将会直接导致无法正常输电。本文方法通过研究综合性脆弱识别指标优先识别出了输变电模拟网络中,发电机所在的密集区域以及对应的重要线路,除了这些密集节点聚集区域内的线路外,整个输变电模拟网络中的中枢连接线路也非常重要。这些线路分别是5—6,16—17,16—21,17—18,16—19,15—16,识别出的线路脆弱性与实践线路一致,本文识别出来的上述中枢连接线路一旦断开,很大程度会使33—36号发电机无法正常的向外输送功率。而当16—17和15—16这两处脆弱线路出现断开现象时,会导致图2中椭圆内的输变电区域范围形成电力孤岛。而对比方法的输变电脆弱线路识别结果均与实际结果存在一定的差别,其中冲击后果脆弱识别法的识别结果中脆弱性最严重的4条输变电线路仅识别出了1条,假攻击脆弱识别法未识别出脆弱性最严重的输变电线路,原方法的识别效果较好,其识别准确性高于上述两个方法,其识别出了4条脆弱性最严重输变电线路中的2条,但是与本文方法相比,其识别出的脆弱线路准确性较低,因此,本文方法的脆弱线路识别结果优于对比方法。

通过对表1中4种不同方法得出的识别结果进行对比可知,输变电线路的脆弱程度和其对应的运行状态息息相关,并且与输变电的网络结构也存在着紧密联系。本文方法在AI技术的基础上,有效地掌握了输电网系统的拓扑结构,同时结合了电气介数等综合自动识别指标,能够更加有效地捕捉电网拓扑位置上的脆弱线路。同时,本文方法还可以识别出不重要的线路,对应的综合脆弱指标也都相对偏低,远远低于重要线路的综合脆弱指标,这一点也证明了本文方法是切实可行的。

根据脆弱线路的识别情况,针对性的对脆弱线路和重要线路的输电情况进行相应控制应用。为了验证对脆弱线路的控制结果,而控制效果越好,则运维成本越低,因此,以运维成本反映控制效果,在4月份应用本文方法,前3个月未应用本

文方法,针对输电网在控制前后的实际运维成本情况进行对比,结果如图5所示。

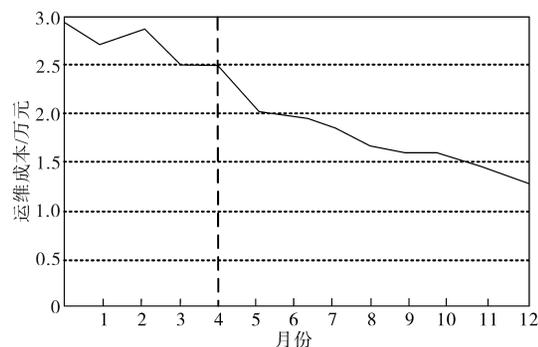


图5 脆弱线路控制前后运维情况

Fig.5 Operation and maintenance of vulnerable line before and after control

根据图5可知,在开始控制输变电脆弱线路之前,输变电站前3个月的运维成本较高,均在2.5万元以上;但从4月份开始控制之后,线路的运维成本逐月下降,证明控制后输变电线路的损坏情况在变少,所占用的运维成本也在减少,证明控制应用的效果较为明显。

5 结论

基于AI技术的输变电脆弱线路识别,在AI技术下完成输变电线路运行状态的识别,构建对应识别模型,综合重要线路的脆弱自动识别指标,在此基础上识别脆弱线路。根据发电机的密集节点和线路输电能力等要素,较好地识别出与中心联系有关的重要线路,通过减小输变电线路的负载和输电压力参数等方式,加强了对脆弱性指数较高的线路的防护。实验分析证明,本文方法能够有效自动识别和预防控制输变电脆弱线路,具有较高应用价值。

参考文献

- [1] 倪良华,闻佳妍,张晓莲,等.基于受冲击与断开后果脆弱度的电网关键线路识别[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):81-87.
NI Lianghua, WEN Jiayan, ZHANG Xiaolian, et al. Critical lines identification in power grid based on vulnerability of line under impact and disconnection consequence[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (1): 81-87.
- [2] 王竟才,李琰,徐天奇.虚假数据注入攻击建模及攻击下脆弱线路的快速筛选[J].电力建设,2022,43(1):104-112.
WANG Jingcai, LI Yan, XU Tianqi. Modeling of false data injection attacks and rapid screening of vulnerable lines under attacks [J]. Electric Power Construction, 2022, 43 (1): 104-112.

- [3] 南璐,何川,刘天琪.考虑风光出力不确定性的电-气互联系统脆弱线路辨识[J].中国电机工程学报,2022,42(2):524-537.
NAN Lu, HE Chuan, LIU Tianqi. Vulnerable lines identification of integrated electricity and natural gas systems considering wind and photovoltaic generation uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (2): 524-537.
- [4] 王红壮,刘天琪,何川,等.基于改进脆弱线路辨识的关键输电断面确定方法[J].现代电力,2020,37(3):294-302.
WANG Hongzhuang, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Key transmission section determination method based on improved vulnerable line identification[J]. Modern Electric Power, 2020, 37 (3): 294-302.
- [5] 李永成,刘树美,于尧,等.兼顾路段和交叉口的路网脆弱性识别机制[J].北京邮电大学学报,2020,43(1):14-20.
LI Yongcheng, LIU Shumei, YU Yao, et al. Road network vulnerability identification mechanism considering road sections and intersections[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(1): 14-20.
- [6] 孙立强,李鹏,刘宣廷,等.考虑连锁故障的覆冰灾害下输电线路脆弱性分析模型[J].高压电器,2022,58(1):155-161, 169.
SUN Liqiang, LI Peng, LIU Xuanting, et al. Analysis model of transmission line under ice coating disaster considering cascading fault[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58 (1): 155-161, 169.
- [7] 魏明奎,周全,宋雨妍,等.基于PageRank算法的输电网连锁故障脆弱线路辨识[J].中国电力,2021,54(5):74-82.
WEI Mingkui, ZHOU Quan, SONG Yuyan, et al. Identification of vulnerable lines in transmission network for cascading failure based on pagerank algorithm[J]. Electric Power, 2021, 54 (5): 74-82.
- [8] 程晓磊,王鹏,王渊,等.基于大数据的配电网故障诊断预测模型设计[J].电气传动,2022,52(2):61-66.
CHENG Xiaolei, WANG Peng, WANG Yuan, et al. Design of distribution network fault diagnosis and prediction model based on big data[J]. Electric Drive, 2022, 52 (2): 61-66.
- [9] 田猛,董政呈,龚立,等.考虑控制系统-发电机信息物理耦合的脆弱输电线路辨识[J].电力系统自动化,2021,45(11):11-18.
TIAN Meng, DONG Zhengcheng, GONG Li, et al. Identification of vulnerable transmission line considering cyber-physical coupling of control system and generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 11-18.
- [10] 陈瀚翔,邱志斌,王海祥,等.基于MFCC特征与GMM的输电线路涉鸟故障相关鸟种智能识别[J].水电能源科学,2021,39(7):171-174,67.
CHEN Hanxiang, QIU Zhibin, WANG Haixiang, et al. Intelligent identification of bird species related to bird involved faults in transmission lines based on MFCC characteristics and GMM [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(7): 171-174, 67.
- [11] 于光耀,孙冰,王旭东,等.考虑节点的桥重要度的城市电网结构脆弱性分析[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(7):103-108,116.
YU Guangyao, SUN Bing, WANG Xudong, et al. Structural vulnerability analysis of urban power grid based on bridge importance of nodes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32 (7): 103-108, 116.
- [12] 魏震波,鞠敬,易刚春,等.基于改进LeaderRank算法的电网连锁故障关键线路辨识方法[J].高电压技术,2021,47(12):4265-4273.
WEI Zhenbo, JU Qi, YI Gangchun, et al. Identification of critical lines of power grid cascading failures based on modified leaderrank algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47 (12): 4265-4273.

收稿日期:2023-01-12

修改稿日期:2023-01-30