

基于关联规则的能源互联网输电线路安全分析

张志友¹, 陈德富²

(1. 南京信息职业技术学院 电子信息学院, 江苏 南京 210023;

2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 伴随着我国能源互联网战略的不断推进, 输电线路作为电能的长距离稳定传输的重要媒介, 在能源互联网中的作用越来越大, 但输电线路长期暴露于外界环境之下, 易受气象因素的影响, 如何保证输电线路的稳定运行成为研究的焦点问题。首先对输电线路的历史天气数据和缺陷数据进行处理和分析, 实现天气因素和输电线路缺陷数据的整合; 然后, 使用 Apriori 数据挖掘算法进行关联分析, 建立气象因子与输电线路缺陷的关联关系; 最后, 通过实验算例对比分析验证了方法的合理性和有效性, 并在灾害性天气下提前做好应对措施, 保证输电线路的稳定运行, 保障能源互联网的安全运行。

关键词: 输电线路; 能源互联网; 关联规则; 数据挖掘

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22161

Analysis Method of Transmission Line Security Based on Association Rules

ZHANG Zhiyou¹, CHEN Defu²

(1. School of Electronic Information, Nanjing Vocational College of Information Technology,

Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. College of Information Engineering,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: With the continuous advancement of China's energy internet strategy, as an important medium for long-distance stable transmission of electrical energy, transmission lines have an increasing role in the energy internet, but transmission lines are exposed to the external environment for a long time and are susceptible to meteorological factors influences. However, transmission circuit is exposed to external environment for a long time and is vulnerable to meteorological factors such as lightning, wind and rainstorm. Therefore, how to ensure the safety of transmission line become the focus of research. The historical weather data and defect data of transmission lines were processed and analyzed to realize the integration of weather factors and defect data. Then, the Apriori data mining algorithm was used to analyze the correlation between meteorological factors and transmission line defects. Finally, the rationality and effectiveness of the proposed strategy were verified through comparative analysis of experimental examples. The results show that the proposed strategy used correlation results to give early warning to defects and took countermeasures in advance to ensure the stable operation of transmission lines in severe weather, ensure the stable operation of the energy internet.

Key words: transmission lines; energy internet; association rules; data mining

随着能源互联网战略的不断推进, 电力系统在其中发挥着主干作用。输电线路作为连接发电侧与用户侧的重要纽带, 是提升能源互联网供电质量和用户体验的关键环节^[1-2]。当前, 能源互联网的建设对信息感知的深度、广度、密度、频度

和精度都提出了更高要求。能源互联网利用智能感知技术对系统内各个环节的电气量、状态量、物理量、环境量、空间量、行为量进行全面监控, 形成能源互联网底层感知基础设施^[3]。伴随着我国能源互联网的发展, 如何利用智能感知技

基金项目: 2016年度江苏教育厅自然科学研究项目(16KJB520014)

作者简介: 张志友(1982—), 男, 硕士, 副教授, Email: zhangzy@njcit.cn

术提高输电线路的安全性成为亟待解决的问题。在天气因素影响下输电线路缺陷属性中又有许多规律性的规则隐藏在其中,如果将温度、湿度、风力等天气因素,结合能源互联网的状态智能感知、微气象在线监测、自动气象站等监测数据进行科学分析,从中挖掘出其潜在的联系,那么相关部门在改进电力系统安全、防范恶劣天气灾害现状时做出的决策就有科学依据^[4]。

目前,针对这一问题国内学者进行了研究。文献[5]根据输电线路易受恶劣天气影响的特点,提出将防御框架覆盖的时间段向两端扩展,将防御功能在广域信息、仿真分析、决策支持等方面进一步深化的具体任务。文献[6-7]主要论述了停电防御系统应充分考虑外部天气因素影响,更有效地处理天气因素造成的突发事故。文献[8]建立电力系统气象监测及预警系统,提高电力系统应对极端天气的能力。文献[9-10]提出了预警系统多维度表征,将天气因素作为影响因子,建立了天气因素的电力事故影响模型,并证明了模型的有效性。传统方法是根据电力系统长期的运行经验进行判断,在灾害性天气下,输电线路可能发生某些缺陷,在日常巡检时需要重点防范^[11]。这种方法虽然能起到一定的预防作用,但是无法发现潜在的缺陷。

综上所述,能源互联网的发展已然成为一种必然的趋势,但是能源互联网智能感知技术的数据利用效率低,使得智能感知技术的巨大潜力无法发挥。因此,文中尝试利用智能感知技术获得的外部气象检测数据,并结合关联规则方法应用在电网输电线路安全分析中。首先,对历史缺陷数据和气象数据进行分析,再进行数据指标的筛选和整合;然后,利用Apriori算法建立两者之间的关联规则挖掘,挖掘气象因素和输电线路的关联关系,并在此基础上做好输电线路恶劣天气预防措施,保障输电线路的稳定运行。基于关联规则的电网输电线路安全分析研究,可有效提高输电线路在极端恶劣天气下的应对能力和电网的稳定性,保障能源互联网的安全运行,具有重要的研究价值和意义。

1 输电线路天气信息和缺陷信息处理

能源互联网属于“新基建”融合基础设施范畴,智能化、网络化、信息化是其主要特点。能源互联网中应用的智能感知技术,针对性地部署于

互联网的各个环节,对相关设备进行实时监测,为系统的安全稳定运行提供了可靠保障,为日常巡检、检修等工作提供了数据支撑。能源互联网范畴如图1所示。



图1 能源互联网范畴图

Fig.1 Energy Internet category

天气预警应用针对温度、湿度、风力等天气因素,结合输电线路的场景状态智能感知、局部气象在线监测等监测数据,实现多系统数据融合,可实现对重要输电通道的全天候、全方位状态监测与风险预警。如图2所示。

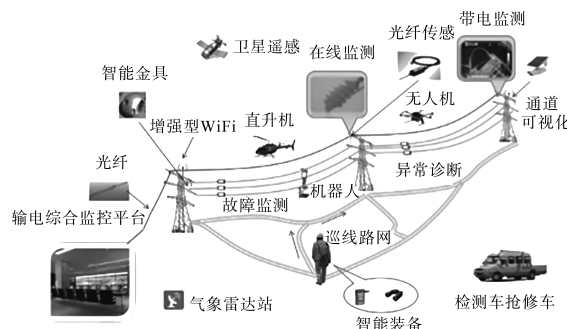


图2 多系统融合图

Fig.2 Multi-system integration

1.1 天气数据分析与处理

本文整理了智能感知系统采集的某省2019年~2020年历史天气数据,包含了各个探测位置的天气数据,如图3所示。

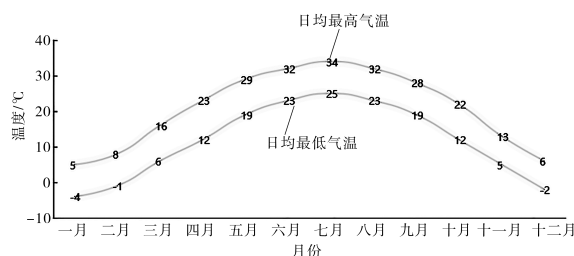


图3 天气数据图

Fig.3 Weather data

结合输电线路的实际生产运行状况,并考虑到了可能会受到灾害性天气的不良因素,进而给出了电网气象灾害的定义。本文为得出各气象因素是否对输电线路停运有很大影响,以及进一

步确定其影响程度,进而引入了变异系数。

变异系数法是通过变异程度的大小,进而判断赋值权重的范围。其中,变异程度是由评价指标确定的。如果指标的变异程度大,说明它的重要程度高,则被赋予的权值应较大;反之,则应赋予较小的权值。此外,输电线路的停运率表明,离散程度高、波动性大等特征是一些影响程度较高的气象因素往往所具有的,又因在进行数理统计时,常常需要用到随机变量的相对期望值,而它的偏离程度恰恰可以被用来表示方差的大小。因此,基于方差和变异系数的特殊性,本文结合两者特点,进而确定各气象因素的赋值权重。

从收集的气象序列数据中表明最高温度、最低温度、最高湿度、最低湿度、降水量、风力、气压、云、降水和能见度。这10种气象因素包含在每组气象序列数据中。 A_{ij} 表示第*i*组气象序列的第*j*个气象因素, $i=1,2,\cdots,m;m=20;j=1,2,\cdots,n;n=10$ 。计算各气象因素权值的步骤如下:

1)计算气象因素的均值和均方差,即

$$\bar{A}_j = \frac{\sum_{i=1}^m A_{ij}}{m} \quad (1)$$

$$Q_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (A_{ij} - \bar{A}_j)^2}{m}} \quad (2)$$

式中: Q_j 为第*j*个气象因素的均方差; A_{ij} 为第*j*个气象因素; $\bar{A}_j$ 为第*j*个气象因素的均值。

2)由上一步计算所得的均方差进而计算第*j*个气象因素的变异系数 σ_j ,即

$$\sigma_j = \frac{Q_j}{\bar{A}_j} \quad (3)$$

3)归一化处理各变异系数,进而得出第*j*个气象因素的权重 d_j ,即

$$d_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n d_j = 1 \quad (5)$$

选择最高温度、最低温度、最高湿度、最低湿度、降水量、风力、气压作为主要因素。具体数据如表1所示。

天气记录中经常出现少雨、多雨、干燥等用来描述降雨量的词汇。由于在天气预报中,满足

该地区在24 h之内降水量不超过0.1 mm的被定义为少雨,因此采用替换法处理对此类型小于0.1 mm的数据进行替换。对于天气记录中的缺失值采用牛顿插值法,根据相似点的已知值进行缺失补全。另外,由于在输电线路工作过程中会出现缺陷数据采集延迟的情况,所以分析时应考虑天气引起的延后效果和累计效应。具体描述如表2所示。

表1 气象因素取值

Tab.1 Meteorological factors

气象因素	天气现象	数值范围
温度	高温	$\geq 35^\circ\text{C}$
	低温	$\leq 2^\circ\text{C}$
相对湿度	高湿度	$\geq 90\%$
	低湿度	$\leq 50\%$
风力	强风力	$\geq 17.2\text{ m/s}$
降水量	降水量	$\geq 50\text{ mm}(24\text{ h})$
气压	低气压	$\leq 83.2\text{ kPa}$

表2 天气指标描述

Tab.2 Description of weather indicators

指标	对应指标	详细描述
最高温度	最高温度	选取连续7 d中最高温度
最低温度	最低温度	选取连续7 d中最低温度
最大风速	风速	选取连续7 d中最大风力等级
降水量	降水量	选取连续7 d中最大值
相对湿度	最高湿度	选取连续7 d中最大值
相对湿度	最低湿度	选取连续7 d中最小值
最小气压	气压	选取连续7 d中等级最小值

1.2 隐患数据分析与处理

由于电力系统缺陷记录中含有重复和无关的缺陷数据,因此结合实验需要对数据进行清洗。下图是某电网公司输电线路缺陷记录表如图4所示。

发现	隐患内容	2019年07月09日,发现66kV长双甲乙线80号铁塔基			隐患来源	日常巡视	隐患原因	电网安全隐患
	隐患编号	20190170	隐患所在单位	输电运检室	专业分类	输电	详细分类	违章施工
	发现人	高杨	发现人单位	输电运维一班	发现日期	2019-07-09		
	事故隐患内容	日常巡视发现:66kV长双甲乙线80号塔周围工地平整场地,国信地产将塔周围8米以外土壤全部挖走,深度超过2米,严重影响线路安全运行,不符合《电力设施保护条例》(中华人民共和国国务院令588号(2011))第十条						
	可能导致后果	七级电网事件			归属职能部门	运维检修		

图4 输电线路缺陷记录图

Fig.4 Transmission line defect record sheet

从图4的统计中可以看出,玻璃绝缘子自爆、鸟害、锈蚀、损伤和保护区安全隐患所占的比例排名靠前,在进行人工巡视时,需要重点关注这几类缺陷的发生。输电线路情况分布如图5所示。

接地装置损坏与气象的分布情况对比。如图6所示。它与强降水量的关系相似。主要可能原因为大量的强降水,造成水土流失,从而接地装置损坏。

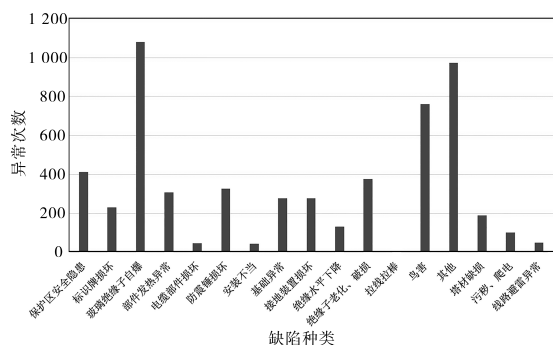


图5 输电线路情况分布图

Fig.5 Distribution of transmission lines

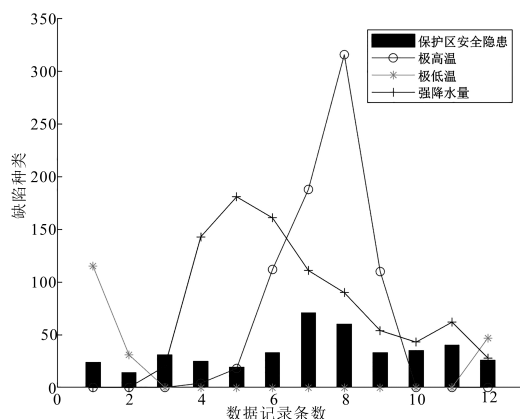


图6 接地装置损坏原因对比图

Fig.6 Comparison of grounding device damage causes

鸟害与气象的分布情况对比如图7所示。它与湿度、降水量的关系较为紧密。主要可能原因是湿度增强导致鸟类活动频繁。

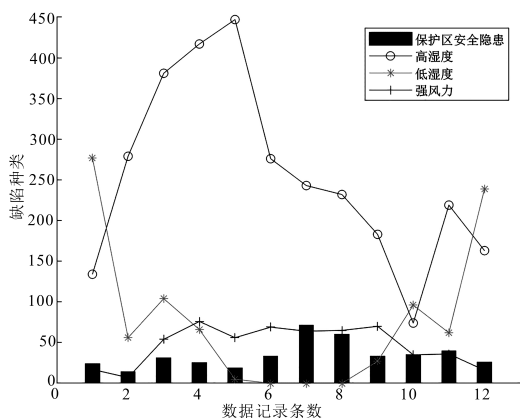


图7 鸟害原因对比图

Fig.7 Comparison of causes of bird damage

最后,对隐患数据进行归纳操作,包括以下两个步骤:1)信息提取,针对缺陷数据中存在的大量的、潜在的信息,需要进一步的分析和提取。2)信息合并,通过整合提取出的缺陷数据,将那些功能相似的属性信息进行合并。归纳结果如表3所示。

表3 缺陷表格

Tab.3 Defect form

位置	日期	缺陷分类	电压等级	线路名称
探测点A	2019-04-23	锈蚀、损伤	110 kV	长双线

1.3 数据指标筛选与整合

首先对所挖掘的所有数据都做了形式化的定义之后,就可以进行关联规则挖掘。一个缺陷情况表含有 n 个维,每个维代表一个缺陷属性,不同的属性下都有一个或多个值与之对应。 n 个维中所属的单元是用来记录每条事故属性值的。一般情况下, n 维数据也可以被看做为 n 个独立的数据表,每个表存储的是 n 维属性的值。由恶劣天气引起的电力系统事故属性有:线路属性、时间属性、电压属性、故障设施属性、灾害属性。各属性下的值如下:

1)线路属性:CS线、GCJ线、JSJY线、BH线、NL线、TZ线、HYP线、PQ线、DDJ线、HC线、HC线、WD线、HX线、XHY线、WT线、SQ线、WZ线、XX线、ZD线、CJ线、BCY线。

2)时间属性:Jan, Feb, Mar, Apr, May, Jun, Jul, Aug, Sep, Oct, Nov, Dec。

3)电压属性:110 kV, 220 kV, 500 kV。

4)故障设施属性:导线及地线、绝缘子、金具、杆塔及基础。

5)灾害属性:鸟害、部件发热异常、接地装置受损、保护区安全隐患及锈蚀部位损伤。

通过挖掘气象条件与各缺陷部位之间的关系,进而能够找出各数据间的数据关联,以其为条件进行数据整合,如表4所示。

表4 数据整合

Tab.4 Data integration

位置	日期	缺陷分类	电压等级/kV	线路名称	最高温度/℃	最低温度/℃	最高湿度/%	最低湿度/%	降水量/mm	风速/(m·s ⁻¹)	最低气压/kPa
探测点A	2019-07-23	锈蚀、损伤	110	长双甲乙线	30	20	93	75	3.2	10.5	100.28
探测点A	2019-07-23	锈蚀、损伤	110	金北乙线	29.9	19.8	93	76	3.3	10.4	100.27
探测点A	2019-01-10	绝缘子破损、老化	220	增华乙线	20	6.8	83	56	0.4	14.6	101.32
探测点A	2019-03-17	保护区安全隐患	110	苏莲线	25.4	11.9	89	60	3.6	9.7	102.07

2 基于 Apriori 算法的能源互联网输电线路安全分析

Apriori 算法是用于挖掘出数据关联规则的常用算法,它用于找出数据值中频繁出现的数据集合,将这些数据集合称为频繁项集,找出各项集合间的关联关系,有助于决策的制定。因此,Apriori 算法分为两步:第1步产生频集,第2步产生关联规则。算法的原理概括如图8所示。

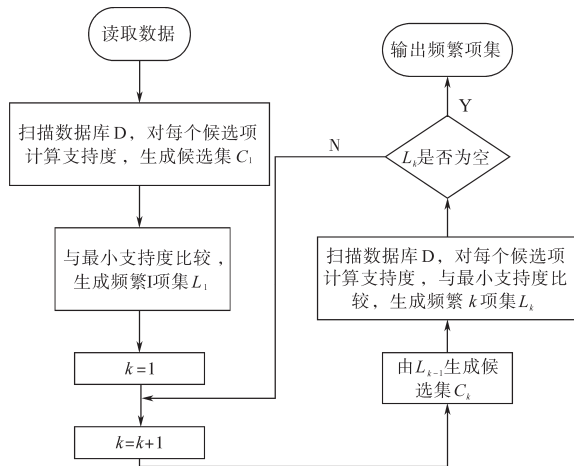


图8 Apriori 算法原理图

Fig.8 Algorithm principle

首先将缺陷记录和气象信息整理成关联规则模型所需的数据结构,从中抽取相关信息作为事务数据集,为方便起见将天气因素 A {最高温度、最低温度、最高湿度、最低湿度、降水量、风力、气压}分别简记为 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}$,将缺陷 B {鸟害、部件发热异常、接地装置受损、保护区安全隐患、锈蚀部位损伤}分别简记为 $\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ 。

每个项的集合被称之为项集,一个项集中所对应的支持度,定义为数据集中包含该项集的记录所占的比例。频繁项集就是支持度大于等于最小支持度阈值的项集,设定最小支持度为20%。首先产生候选集 C_k ,然后计算所有 k 项集的支持度,若支持度满足大于最小支持度阈值要求,则成为频繁 k 项集 L_k ,接着在 L_k 基础上产生候选集 C_{k+1} ,然后通过判断最小支持度来确定频繁 $(k+1)$ 项集 L_{k+1} 。在这个过程中连接步和剪枝步互相融合,最终得到最大频繁项集。数据集中所包含的某项集的事务个数,被定义为该项集的支持度计数。关联规则强度可以通过它的“支持度”和“置信度”来表示。支持度如下式:

$$\text{Support}(A \Rightarrow B) = \frac{A, B \text{ 同时发生的事物个数}}{\text{所有事物个数}} = \frac{\text{Support} - \text{Count}(A \cup B)}{\text{Total} - \text{Count}(A)} \quad (6)$$

在已知项集 A 发生的条件下,同时发生 B 的概率,这个事件也可以描述为发生 A 的同时发生 B 的置信度,它可由同时发生 A, B 事件的支持度计数与 A 的支持度计数相除得来:

$$\text{Confidence}(A \Rightarrow B) = P(A|B) = \frac{\text{Support} - \text{Count}(A \cup B)}{\text{Support} - \text{Count}(A)} \quad (7)$$

在利用得到的最大频繁项集与预先设定的最小置信度阈值生成关联规则。

鉴于上述分析,输电设备在传输过程中的某些缺陷与某些天气因素在统计上有较强相关性,并且可以通过 Apriori 算法在长期的大规模缺陷数据中找到这些关联性。因此,建立基于 Apriori 算法的传输线路安全分析模型对输电线路的长期安全可靠运行具有非常积极的作用。

分析流程描述如下:

- 1) 建立数据库。分析、收集并处理该期间内所有先前的传输线缺陷记录信息和天气数据。
- 2) 分析数据库中的 Apriori 算法。挖掘隐患与天气之间的关联规则。
- 3) 制定预案。针对挖掘出的所有关联规则进行规划。
- 4) 实时接收信息。在输电网的运行检修中,及时的接收天气预报信息。
- 5) 比对信息。把预报中的信息与已知的关联规则相比对,再按照之前制定的预案进行相应部署,具体流程如图9所示。

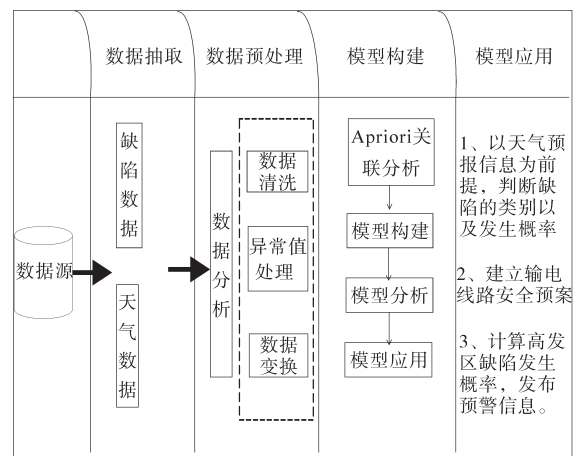


图9 输电线路安全分析流程

Fig.9 Transmission line safety analysis process

3 实验分析

本文采用 Matlab 平台设计与实现了基于关联规则的能源互联网输电线路安全分析。主要是挖掘输电线路故障与天气因素之间的关联,并且给出相应预防措施。

本文整理了某省 2019 年~2020 年的输电线路缺陷数据以及当时的气象数据。如表 5 所示。

表 5 输电线路缺陷数据

Tab.5 Transmission line defect data

月份	鸟害	保护区安全隐患	部件发热异常	接地装置损坏	锈蚀、损伤
1	11	24	5	8	116
2	21	14	5	22	44
3	60	31	40	31	134
4	280	25	54	46	93
5	124	19	42	18	56
6	93	33	29	17	39
7	81	71	31	36	30
8	47	60	62	22	54
9	25	33	7	6	17
10	2	35	4	12	70
11	8	40	13	50	42
12	8	26	14	8	35

对气象因素和输电线路缺陷进行分析,对数据进行筛选、合并。然后对整合后的数据,进行离散化处理,离散化结果如表 6 所示。

在实验中,针对离散后的气象数据和缺陷数

表 6 数据离散化

Tab.6 Data discretization diagram

缺陷分类	最高温度/℃	最低温度/℃	最高湿度/%	最低湿度/%	降水量/mm	风速/(m·s ⁻¹)	最高温度/℃	最低温度/℃	最高湿度/%
锈蚀、损伤	28.5	19.7	91.8	76.0	3.2	10.3	0	0	0
锈蚀、损伤	28.5	19.7	92.0	75.8	3.3	10.3	0	0	0
部件发热异常	27.8	13.6	88.9	60.1	3.6	9.7	0	0	0
锈蚀、损伤	27.9	13.6	89.0	60.0	3.6	9.7	0	0	0
部件发热异常	33.2	19.7	81.9	70.1	0.8	8.6	0	0	0
保护区安全隐患	29.4	19.7	91.8	75.8	3.3	10.3	-1	-1	1
锈蚀、损伤	21.5	9.2	99.0	57.5	2.2	9.5	0	0	0
保护区安全隐患	25.2	11.8	88.9	59.9	3.59	9.7	0	0	0
鸟害	30.4	17.6	85.7	60.0	0.40	11.1	0	0	0

关联分析结果如表 7 所示。

表 7 关联分析结果

Tab.7 Association analysis results

缺陷分类	气象因素	结果/%	支持度/%
鸟害	156.3≥降水量>41.2 97%≥湿度>88%	40.33	4
部件发热异常	36.9≥温度>34.2 36.9≥最高相对湿度>88%	26.28	4
接地装置受损	57.7≥降水量>26 最高湿度>91%	16.67	2
保护区安全隐患	33.5≥降水量>31.6	31.13	4
锈蚀部位损伤	降水量≤0.1 最高湿度>82%	53.28	4

据,选用需要同时满足置信度和支持度都最高的关联规则去挖掘气象条件和缺陷类别之间的关系,并使 Apriori 算法对其进行关联分析。部分程序运行如图 10 所示。

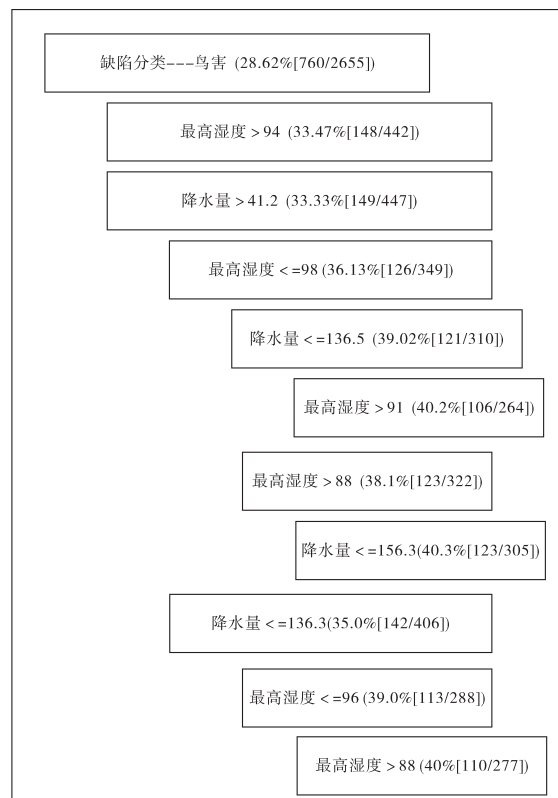


图 10 程序运行结果图

Fig.10 Program run result diagram

从关联分析结果中可得出以下几点:1)即使在降水量很低的情况下,发生锈蚀部位损伤的概率最大(53.28%);2)由各因素的关联度因素可知,鸟害、部件发热异常、保护区安全隐患、锈蚀部位损伤的支持度相同,都为4%,接地装置受损略低,为2%;3)在湿度较高的情况下,接地装置受损的发生概率也最低(16.67%)。可以根据各地区不同的天气情况,采取相应的预防措施。如表 8 所示。

表 8 预防措施
Tab.8 Related measures

月份	季节特点	重点检查内容	采取措施
1~3 月	保护区 安全隐患	1. 春运期间,对重要负荷线路及设备进行线路检查及设备接电红外监测; 2. 增加接地装置进行检查次数。	1. 利用配网管控平台,进行台区负荷招测,有针对性的进行现场复测和治理; 2. 进行线路全面巡视,掌握导线弛度变化情况,适时调整弛度和拉线强度。
4~6 月	鸟害高发期	1. 重点检查风口、河流附近、污秽严重区域输电线路和绝缘子情况; 2. 对悬垂绝缘子正上方的鸟巢进行清理检查。	1. 有针对性开展防外力破坏特巡和宣传工作; 2. 加强重要线路特巡工作; 3. 对地势低洼区域、河流附近线路进行检查,防止积雪融化造成线路基础冲毁; 4. 及时清除悬垂绝缘子正上方的鸟巢。
7~9 月	接地装置 易受损	巡视线路周边有无强风造成的故障隐患。	1. 检查接地装置完好性; 2. 检查输电线路各类交叉跨越情况,及时掌握线路交叉跨越现状,对不满足要求的必要时停电处理。
10~12 月	锈蚀部位 损伤	1. 巡视变压器油位,设备锈蚀及箱门完好情况; 2. 箱式设备凝露巡视,基础通风口巡查等。	1. 对导线弛度进行调整,对重过载、低电压和三相不平衡台区进行治理; 2. 配电线路及设备集中消缺,落实秋检工作; 3. 配变三相不平衡台区进行治理; 4. 箱式设备通风孔清理积雪等; 5. 加强设备检查,对锈蚀及时清除。

4 结论

文中提出了一种基于关联规则的能源互联网输电线路安全分析方法,该方法的提出能在一定程度上提高输电线路应对恶劣天气的能力,同时提高了能源互联网的智能化和安全水平。通过深入分析输电线路易受天气因素影响的问题,收集天气数据和缺陷数据进行分析和处理,然后采用的 Apriori 算法对天气因素下的输电线路故障进行了关联规则挖掘,最后针对关联分析结果采取应对措施,保证输电线路的稳定运行,满足了电网在恶劣天气下的高可靠性需求。

参考文献

- [1] 王继业,蒲天骄,仝杰,等.能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J].电力信息与通信技术,2020,18(4):1-14.
- [2] 李朋,钱文姝.输变电设备运行及防灾技术现状分析与发展趋势研究[J].电网与清洁能源,2017,33(12):37-40.
- [3] 陈洋.影响输电线路安全性的因素分析[J].电气技术,2019,

- 20(S1):90-92,98.
- [4] 王川化,余鹏飞.一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法[J].电力工程技术,2017,36(5):149-154.
- [5] Hou K, Shao G, Wang H, *et al.* Research on practical power system stability analysis algorithm basdon modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(11):1-7.
- [6] 李雪,孙霆锴,侯恺,等.极端天气下电力系统大范围随机设备故障的 N-k 安全分析及筛选方法[J].中国电机工程学报,2020(16):5113-5125.
- [7] 肖晗.基于量化关联规则的敏感性分析方法研究与应用[D].成都:西南石油大学,2017.
- [8] 陈勇,李胜男,张丽,等.基于改进 Apriori 算法的智能变电站二次设备缺陷关联性分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(20):135-141.
- [9] 林莉,云红艳,贺英,等.基于企业知识图谱构建的可视化研究[J].青岛大学学报(自然科学版),2019,32(1):55-60.
- [10] 谢千焱,高军伟,王飞林,等.计及极端气象条件影响的区域电网安全预警策略研究[J].电气应用,2018,37(23):39-45.
- [11] 李龙,谢大为,汤伟,等.计及气象因素的电网输电线路故障停运概率分析与应用[J].价值工程,2017,36(32):148-150.

收稿日期:2020-07-12

修改稿日期:2020-07-31

(上接第 61 页)

- [3] Ye S. Design and performance analysis of an iterative flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives[J]. ISA Transactions, 2019, 94: 255-264.
- [4] 周亚宁,胡朝晖,陈曦.基于死区函数的 MRAS 高精度转子位置估计[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5528-5535.
- [5] Feng G, Lai C, Kar N C. Speed harmonic based modeling and estimation of permanent magnet temperature for PMSM drive using Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1372-1382.
- [6] 张海刚,张磊,王步来,等.基于模糊 PI 滑模观测的 PMSM

位置检测[J].电气传动,2017,47(8):7-9.

- [7] 张立伟,李行,宋佩佩,等.基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J].电工技术学报,2019,34(z1):70-78.
- [8] Liang D, Li J, Qu R, *et al.* Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8994-9004.

收稿日期:2020-02-12

修改稿日期:2020-02-23