

基于告警信号文本挖掘的电力调度故障诊断

汪崔洋¹,江全元¹,唐雅洁¹,朱炳铨²,项中明²,唐剑³

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 国网浙江省电力有限公司,浙江 杭州 310007;

3. 国网杭州供电公司,浙江 杭州 310009)

摘要:电力调度系统在电力系统故障过程中会收到大量告警信号,若调度员无法在短时间内做出决策,则可能使故障扩大,为此提出基于告警信号文本挖掘的电力调度故障诊断方法,该方法包括告警信号文本预处理和故障诊断2个阶段。在第一阶段,基于隐马尔可夫模型(HMM)对告警信号文本进行分词并去除其中的停用词以构建本体词典,并采用向量空间模型(VSM)使文本向量化;在第二阶段,使用滑动时间窗读取实时告警信号,提出一种2层算法,第一层采用支持向量机(SVM)对滑窗内的告警信号进行分类,若分类结果判断为发生故障,则启动第二层k-均值聚类法提取较高可能性的故障供调度员参考。以某电力调度系统实际告警信号作为算例,验证了所提方法的可行性。

关键词:电力调度;文本挖掘;向量空间模型;支持向量机;k-均值聚类

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.019

0 引言

电力系统故障过程中会产生故障相关的告警信号,电力调度需要对这些告警信号做出快速反应。据统计,某省电力调控中心的调度系统平均每天接收30万条告警信号,短时间接收较大的信号量容易使调度员遗漏重要告警信号,调度员很难在短时间内根据经验做出准确决策,故障处理效率较低,可能使故障扩大,不利于系统恢复^[1]。如何对故障后的告警信号进行文本信息挖掘与归类,利用归类的告警信号进行快速有效的故障诊断,已经成为电力调度领域有待研究和解决的重要问题。

我国的电力调度告警信号为非结构化中文短文本^[2],含有大量专业词汇,并夹杂着数字与特殊符号,具有难以分词和语意模糊的问题。国内外对电力领域文本挖掘的研究较少。文献[3]采用词库型自然语言处理,运用向量空间模型VSM(Vector Space Model)进行文本信息挖掘,以及k近邻kNN(k-Nearest Neighbor)算法进行分类,但其分析对象是运维人员记录的断路器故障缺陷文本,与电力调度告警信号在结构和内容上有很大差异,在文本向量化过程中未考虑词语出现的频次、电力设备的编号以及文本中的数词,损失较多信息,且kNN分类算法属于惰性算法,没有训练学习过程,分类所需的计算都推迟到分类时才进行,对于高维度、大样本的电力调度告警信号,不满足强实时性的要求。文献[4]采用语义框架槽填充的方法处理电网的中文缺陷文本,实现非结构化文本的结构化,但其研究仅停

留在文本处理和对文本挖掘结果的数据统计。文献[5]对纽约城市电缆的故障工单进行挖掘,为主动检修提供辅助,文献[6]对社交网络中关于停电的文本进行挖掘,以提高电网的风险管理能力,但中文文本与英文文本在词语分隔和语序结构上截然不同,不能一概而论。

目前电力系统故障诊断方法主要有专家系统^[7]、解析模型^[8-11]、Petri网^[12-14]、人工神经网络^[15]、贝叶斯网络^[16]、多源信息融合^[17]等。这些方法经过多年发展具有一定的容错性和适应性,但其依赖详细的电网拓扑图和完备的保护设备动作逻辑来保证故障诊断的准确性,多变的电网拓扑极大降低了这些方法的实用性。

有一类数据驱动型电力系统故障诊断方法不存在上述依赖性。文献[18]提出基于范例推理的输变电设备状态智能诊断模型,利用支持向量机(SVM)形成设备故障分类器进行故障诊断,但直接采用二分类的SVM完成一对多分类算法会严重影响分类速度,且文中仅根据经验给出分类器目标优化问题的容忍误差,存在一定的主观性。文献[19]将基于关联规则的改进Apriori算法应用于电网在线故障诊断,但算法的可信度阈值需由人工整定,鲁棒性较差。

鉴于此,本文对电力调度告警信号进行文本挖掘和分类,诊断出较高可能性的故障供调度员参考。本文方法可作为电力系统中文文本信息挖掘的范例,故障诊断过程不依赖电气信息和电气量计算,为电力调度故障诊断提供了一种新技术。

1 电力调度告警信号与故障样本

1.1 电力调度告警信号

电力调度告警信号为中文短文本,可分为发信

收稿日期:2018-05-13;修回日期:2019-01-23

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211HZ15018Y)

Project supported by the Science & Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company(5211HZ15018Y)

时间、发信地点、信号内容、状态信息四部分,其中信号内容为非结构化中文短文本,包含信号中的大部分信息。一条典型的告警信号如图1所示。

发信时间	发信地点	信号内容	状态信息
2017-04-03 09:42:54	华东 塘岭	35 kV 4号主变 3号电容器 343 开关	分闸

图1 告警信号实例

Fig.1 An example of alarm signal

1.2 电力调度故障样本

电力调度故障样本是指按故障类型分类的告警信号集合,分为故障描述和故障相关告警信号两部分,如表1所示。故障样本反映了某一类型的故障和相关告警信号之间的对应关系:一旦相关告警信号出现,就表示发生了此类故障。

表1 故障样本实例

Table 1 An example of fault sample

故障描述	故障相关告警信号
华东.塘岭 4号主变 3号电容器保护 动作,	
塘岭变 4号	华东.塘岭 4号主变 3号电容器控制回路 断线,
主变 3号电	华东.塘岭/35kV.4号主变 3号电容器 343 开关 分闸,
容器事故跳闸,	华东.塘岭 4号主变 3号电容器事故信号 动作,
343 开关跳开	华东.塘岭 全站事故总信号 动作,
	华东.塘岭 4号主变 3号电容器开关油泵 启动

2 告警信号文本预处理

2.1 告警信号文本预处理流程

告警信号文本预处理使告警信号文本向量化,以供后续分类算法使用,流程如图2所示。详细实施方法在2.2和2.3节阐述。

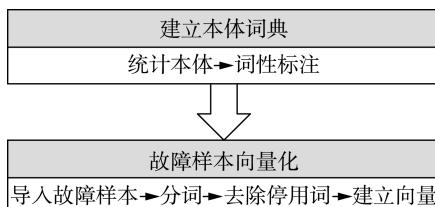


图2 告警信号文本预处理流程

Fig.2 Flowchart of alarm signal text preprocessing

2.2 建立本体词典

本体源自本体论^[4],本文提出的方法中本体指告警信号中有意义的实词,本体词性指本体词语的类别,每类都有相应的词性标注,包括描述变电站点的地点词(s)、描述一次和二次设备的名词(n)、描述带编号设备的带修饰名词(qn)、描述电压等级等数量信息的数词(u)、描述输变电设备状态的状态词(v)5类。

本体词典由本体和本体词性标注两部分组成,如表2所示。目前本体词典由人工构建,工作量较大,某省电网构建的本体词典包含该省电力调控中

心数据库中2014年3月至2017年4月间的所有历史告警信号中的实词,以及该省所辖的所有变电站名和线路名。本体词典的完备性会影响文本向量化和后续故障诊断的准确性。由于本体均为电力领域专业词汇,具有很强的通用性,在告警信号中不断重复出现,可认为按此方法建立的本体词典足够完备,只需在新投入变电站或输电线路时对新的变电站名或线路名加以补充。

表2 本体词典示例

Table 2 An example of ontology dictionary

本体	词性标注	本体	词性标注
瓯海	s	220 kV	u
电容器	n	故障	v
1号电容器	qn		

依据该省电网构建的本体词典共有本体数882个,其中地点词156个,名词453个,带修饰名词218个,数词17个,状态词38个。

2.3 故障样本向量化

不同于英文文本,中文文本没有空格对词语进行分隔,这使得中文文本信息挖掘相较英文文本困难得多,中文分词成为文本向量化的关键一步。本文采用隐马尔可夫模型HMM(Hidden Markov Model)中的Viterbi算法进行分词^[3],并给分词后的词语加上词性标注。去除停用词指去除“和”、“或”、“及”等字词以及“.”、“/”等标号。分词及去除停用词示例如表3所示。

表3 分词及去除停用词示例

Table 3 An example of text segment and stop words removing

处理前	处理后
华东.塘岭/35 kV.4号主变 3号电容器 343 开关 分闸	华东/s 塘岭/s 35 kV/u 4号主变/qn 3号电容器/qn 343 开关/qn 分闸/v

VSM是一种文本信息的特征表示模型,可将非结构化的文本表示为结构化的向量。告警信号簇指一类告警信号的集合,本文所提方法将各告警信号簇映射到向量空间中,每个告警信号簇对应一个向量。映射关系为:向量的每一维与一个本体构成一一映射,每一维的坐标值表示该向量描述的告警信号簇中该本体出现的次数。设本体词典中有n个本体,将它们按顺序编号为1—n,第j个本体对应第j维坐标 $w_{j,n}$ 维向量 $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ 表示为:

$$\mathbf{W} = [w_1 \ \dots \ w_j \ \dots \ w_n] \quad (1)$$

向量 \mathbf{W} 的维数等于本体数,由于大量维的值为0,实际计算中采用稀疏技术将向量 \mathbf{W} 存储为:

$$\mathbf{W}_{spa} = [d_1 w_1 \ \dots \ d_f w_f \ \dots \ d_g w_g] \quad (2)$$

其中, d_f 为向量 \mathbf{W} 中第f个非零元素所在的维度数; w_f 为向量 \mathbf{W} 中第f个非零元素的值; g 为向量 \mathbf{W} 中

非零元素个数。

故障样本向量化过程中,用VSM将各故障样本的告警信号簇映射到向量空间中,每个故障样本的告警信号簇映射为一个向量,具体步骤如下:

a. 导入各故障样本;

b. 对各故障样本的告警信号簇进行分词和去除停用词处理;

c. 按式(1)的形式为各告警信号簇建立向量,向量各维坐标初始化为0;

d. 搜索每个告警信号簇中的本体,每搜索到一个本体,该告警信号簇向量对应维坐标自增1。

3 电力调度故障诊断

3.1 基于告警信号文本挖掘的故障诊断流程

故障诊断阶段流程如图3所示,详细实施方法在3.2—3.5节阐述。为了叙述方便,后文将故障样本的告警信号簇映射的向量简称为样本向量,滑动时间窗内实时告警信号映射的向量简称为实时向量,余弦相似度简称为相似度。

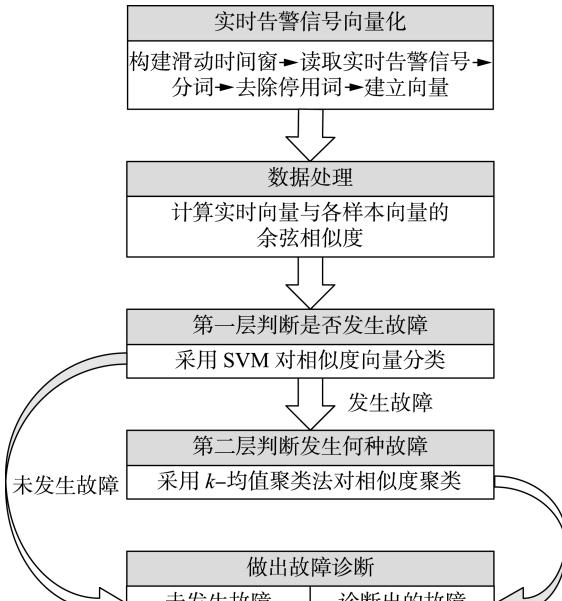


图3 故障诊断流程

Fig.3 Flowchart of fault diagnosis

故障诊断算法分为2层进行,可以避免相似度的阈值设定问题。在常规诊断方案中,需要对相似度设定一个阈值,通过判断每次计算结果中的最大相似度是否超过阈值来判断是否发生故障以及发生故障的类型。然而在实际应用中,相似度的最大值随实时向量的不同而波动范围很大,使得这类设定阈值的诊断方案因不够灵活而存在一些问题。例如在某些极端情况下,电力系统同时发生较多故障,此时最大相似度很可能会低于按常规情况设定的阈值,便无法准确判断出故障发生。本文提出2层故障诊断算法,先根据故障和非故障情况下相似度向

量在向量空间中的分布情况判断是否发生故障,再根据发生故障的相似度向量中所有相似度的分布情况判断发生的故障类型,该算法较阈值设定的方案更为准确高效。

3.2 实时告警信号向量化

本故障诊断方法通过构建滑动时间窗读取电力调度系统接收到的实时告警信号,滑动时间窗随时间向前滑动,读入其中的所有实时告警信号。滑动时间窗的时间窗口为 t_w ,滑动步长为 t_s ,且 $t_s < t_w$ 。为了保证实时性,时间窗的截止时刻 t_2 为调度GPS对时系统确定的当前时刻,起始时刻 $t_1 = t_2 - t_w$ 。相比于时间窗口无重叠的后移,引入滑动机制可以尽可能避免时间窗切分同一故障的实时告警信号簇,从而使故障诊断更准确。图4为某时段滑动时间窗示意图,其中 t_{w1}, t_{w2}, t_{w3} 为滑动时间窗按时间顺序滑动到的3个位置,时间轴上的字母表示各时段接收的实时告警信号。假设C,D,E,F为某一事故的实时告警信号簇,若时间窗无重叠后移,两相邻时间窗 t_{w1}, t_{w3} 都将切割实时告警信号簇;引入滑动机制后,时间窗滑动到 t_{w2} 时将读入该事故完整的告警信号簇,提高后续故障诊断的准确性。

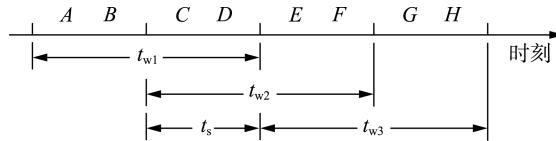


图4 滑动时间窗示意图

Fig.4 Schematic diagram of an sliding time window

考虑到电力系统的故障发展很快,调度系统运行数据显示,同一故障的所有告警信号往往在10 s内就发送完毕,所以 t_w 的取值不宜大于10 s;考虑到滑动时间窗内包含某一故障的实时告警信号越多,故障诊断越准确,所以 t_w 的取值不宜过小。 t_s 的取值应小于 t_w ,且大于计算机运行一次故障诊断算法所用时间, t_s 越小故障诊断越准确,但故障诊断算法运行次数越多,消耗的计算资源越大。

实时告警信号向量化是指将滑动时间窗中的实时告警信号用VSM映射到向量空间中,形成一个向量。首先读取滑动时间窗内的所有实时告警信号,其他步骤与2.3节步骤b-d类似。

需要注意的是,当有故障发生时,滑动时间窗中除了含有大量故障相关告警信号,往往还含有少量故障无关告警信号,这些故障无关告警信号所占比例较小,对故障诊断结果没有影响,因此在实时告警信号向量化时没有剔除这些信号。当算法确诊目前正在发生故障样本中的故障后,将滑动时间窗中的实时告警信号与正在发生的故障对应的故障样本中的告警信号进行比对,筛选出故障无关告警信号方便调度员查看。

3.3 余弦相似度计算

设故障样本总数为 m ,本体词数(即向量维数)为 n 。定义实时向量与第 i 个样本向量的相似度为 s_i ,计算方法为:

$$s_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_j w_{ji}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n w_{ji}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中, w_j 为实时向量的第 j 维坐标; w_{ji} 为第 i 个样本向量的第 j 维坐标。

该实时向量与 m 个样本向量得到的所有相似度 s_i 从小到大排列组成 m 维相似度向量 $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{1 \times m}$, 表示为:

$$\mathbf{S} = [s_1 \ \cdots \ s_i \ \cdots \ s_m] \quad (4)$$

$$s_1 \leq \cdots \leq s_i \leq \cdots \leq s_m$$

3.4 SVM 分类

SVM 在解决小样本、非线性和高维模式识别问题中表现出特有的优势^[18]。本文采用 SVM 判断当前是否发生故障,SVM 的核函数采用径向基函数 RBF(Radial Basis Function)。

基于 3.3 节中得到的升序相似度向量,观察发现故障时的相似度向量(正样本)和无故障时的相似度向量(负样本)在较高排位处的数值存在差异,即正样本在较高的排位倾向于出现更高的相似度。故 SVM 的输入特征为各排位对应的相似度数值。

本文选用 200 个正样本和 200 个负样本参与 SVM 的训练和测试。为评估训练效果,本文采用留一法进行交叉验证:每次训练选用 399 个正/负样本作为训练集,剩余的 1 个正/负样本作为测试集;如此迭代 400 次,使得每个正/负样本都能用来测试 SVM 模型。这个过程相当于对同一个 SVM 模型迭代训练了 400 次。

这里分别用 P 和 N 表示正、负样本集,用 T_P 、 T_N 、 F_P 和 F_N 分别表示真阳性、真阴性、假阳性和假阴性集,则有:

$$P = T_P + F_N \quad (5)$$

$$N = T_N + F_P \quad (6)$$

采用灵敏度 S_p 、特异度 S_n 和马修斯相关系数 M_{cc} 这 3 个参数评价 SVM 的效果,其中 S_p 表示正样本真实被识别出的比例, S_n 表示负样本真实被识别出的比例, M_{cc} 同时评估了正、负样本被准确识别的程度,是一个更加平衡的参数。

$$S_p = \frac{T_p}{T_p + F_N} \times 100\% \quad (7)$$

$$S_n = \frac{T_N}{T_N + F_P} \times 100\% \quad (8)$$

$$M_{cc} = \frac{T_p T_N - F_N F_p}{\sqrt{(T_p + F_N)(T_N + F_p)(T_p + F_p)(T_N + F_N)}} \quad (9)$$

SVM 测试结果如表 4 所示。

表 4 SVM 测试结果

Table 4 SVM test result

实际情况	识别结果	
	故障次数	无故障次数
故障	200	0
无故障	1	199

由式(7)—(9)算出 S_p 、 S_n 和 M_{cc} 的值分别为 100%、99.5% 和 0.995,表现出良好的测试结果。其中出现了 1 次将无故障识别为故障的情况,这是由于为了提高 SVM 模型在工程应用中的识别效果而选用了十分相近的正、负样本,实际运行中无故障与故障时的相似度向量分布差异很大,不会出现错误识别。

3.5 k -均值聚类法聚类

经过对大量故障时的相似度向量 \mathbf{S} 各维坐标 s_i 的统计分析发现,故障时 s_i 的分布趋向于 3 类:第一类为实时向量与不相关样本向量的相似度,相似度很低;第二类为实时向量与相似样本向量的相似度,相似度较低;第三类为实时向量与当前故障样本向量的相似度,相似度很高。其中,相似样本指与当前故障相似的故障样本,例如,当前故障为某线路 A 相跳闸,一个相似的故障样本为该线路 B 相跳闸。

因此,故障诊断算法第二层使用 k -均值聚类法将故障时的所有 s_i 聚为 3 类。做如下定义:相似度向量 \mathbf{S} 中最小相似度为 s_{min} ,最大相似度为 s_{max} ;第一类相似度集为 S_{min} ,第二类相似度集为 S_{mid} ,第三类相似度集为 S_{max} ; S_{min} 的凝聚点为 C_{min} ,初始化赋值 s_{min} ; S_{max} 的凝聚点为 C_{max} ,初始化赋值 s_{max} ; S_{mid} 的凝聚点为 C_{mid} ,初始化赋值 $[s_{min}, s_{max}]$ 的区间中点,即 $C_{mid} = (s_{min} + s_{max}) / 2$ 。每次循环中各相似度集的重心定为其中包含所有相似度的平均值。算法详述如下:

a. 初始化 C_{min} 、 C_{mid} 和 C_{max} ;

b. 对于任意 \mathbf{S} 中元素 s_i ,计算其与各凝聚点的欧氏距离 $|s_i - C_{min}|$ 、 $|s_i - C_{mid}|$ 和 $|s_i - C_{max}|$,求最小值,将 s_i 归入最近的凝聚点所代表的相似度集;

c. 更新凝聚点,求 S_{min} 、 S_{mid} 和 S_{max} 的重心,分别赋值给 C_{min} 、 C_{mid} 和 C_{max} ;

d. 用更新后的凝聚点重新聚类,循环执行步骤 b、c,直到各次循环中 S_{min} 、 S_{mid} 和 S_{max} 均不再变化,结束循环,完成聚类。

k -均值聚类后,相似度 $s_i \in S_{max}$ 对应的故障样本就是当前正在发生的故障; S_{max} 中相似度的数目就是当前同时发生的故障数目。输出所有 $s_i \in S_{max}$ 对应的故障样本的故障描述,完成故障诊断。

4 算例分析

4.1 算例设置

为了验证本文提出的故障诊断算法,使用 C++ 编程语言开发实现了该故障诊断程序,并在配置为 Intel Core i5-4250U 1.30 GHz CPU,4 GB 内存的 PC 机上进行算例的测试和验证。

为了确保与实际电力调度运行情况相符,算例所用的实时告警信号取自某省电力调控中心的调度系统数据库中 2014 年 3 月至 2017 年 4 月间的所有信号。

基于 3.2 节的分析,算例中滑动时间窗的 t_w 取为 10 s, t_s 取为 5 s。3.4 节中 SVM 的训练集中的相似度向量由上述数据库中的告警信号计算得到。

算例分析时,首先使用本故障诊断程序遍历 2014 年 3 月至 2017 年 4 月间的所有告警信号,找出该时间段发生的故障样本已包含的所有故障;接着挑选单一故障、相同地点多故障、不同地点多故障这 3 种典型故障形式作为算例展示。

4.2 故障诊断结果统计

故障诊断程序遍历 2014 年 3 月至 2017 年 4 月间的所有告警信号,得到各类故障次数和该时间段实际发生的故障样本已包含的故障次数,如表 5 所示。

表 5 故障诊断结果统计

Table 5 Statistics of fault diagnosis result

故障类型	故障发生次数		漏诊次数	误诊次数
	故障诊断	实际发生		
输电线路故障	195	195	0	0
主变压器故障	23	23	0	0
所用变压器故障	6	6	0	0
直流换流站故障	2	2	0	0
总计	226	226	0	0

结果显示,在程序模拟了共 38 个月的故障诊断后无漏诊和误诊发生,故障诊断结果准确可靠。

4.3 单一故障诊断结果

2017-04-25T09:21:40 受大风天气的影响,某电网由拳变电站由民 4R21 线 B 相事故跳闸,线路第一、二套保护正确动作,重合闸启动,由于重合闸不成功,随后线路三相跳闸。滑动时间窗位于 2017-04-25T09:21:40—2017-04-25T09:21:49 位置时,其内实时告警信号按相关故障分类整理见附录 A。

程序显示,正在发生 1 个事故:由拳变,由民 4R21 线 B 相事故跳闸,第一、二套线路正确动作,重合闸启动,重合不成功三相跳闸。故障诊断用时 0.579 s。中间计算结果见附录 A。

4.4 相同地点多故障诊断结果

2014-06-27T14:44:17 受雷雨大风影响,某电网双龙变电站发生 2 条线路同时跳闸的情况。其中

双兰 5427 线 A 相事故跳闸,线路第一、二套保护正确动作,重合闸启动,重合成功;龙鹿 2375 线 C 相事故跳闸,线路第一、二套保护正确动作,重合闸启动,重合不成功。滑动时间窗位于 2014-06-27T14:44:17—2014-06-27T14:44:26 位置时,其内实时告警信号按相关故障分类整理见附录 B。

程序显示,正在发生 2 个事故:事故 1,双龙变,双兰 5427 线 A 相事故跳闸,第一、二套线路保护动作,重合闸启动,重合成功;事故 2,双龙变,龙鹿 2375 线 C 相事故跳闸,第一、二套线路保护动作,重合闸启动,重合不成功。故障诊断用时 0.802 s。中间计算结果见附录 B。

4.5 不同地点多故障诊断结果

2015-12-16T08:21:35 某电网瓶窑变电站 2 号主变 1 号低抗故障,2 号主变三侧开关跳闸;2015-12-16T08:21:36 某电网春晓变电站 2 号主变 3 号低抗 A 相故障,2 号主变 35 kV 开关跳闸。滑动时间窗位于 2015-12-16T08:21:35—2015-12-16T08:21:44 位置时,其内实时告警信号按相关故障分类整理见附录 C。

程序显示,正在发生 2 个事故:事故 1,瓶窑变 2 号主变 1 号低抗保护动作,2 号主变三侧开关跳闸;事故 2,春晓变 2 号主变 3 号低抗 A 相故障,2 号主变 35 kV 开关跳闸。故障诊断用时 0.927 s。中间计算结果见附录 C。

5 结论

本文提出了基于告警信号文本挖掘的电力调度故障诊断方法,该方法具有如下特点。

a. 依靠对电力调度告警信号进行文本挖掘实现高效快速的故障诊断,不依赖电气量计算,无需电力系统结构信息和保护动作逻辑,能较好地适应现代电力系统结构多变的特点。

b. 告警信号文本预处理阶段构建本体词典,对告警信号进行分词并去除停用词,使用 VSM 将告警信号簇映射到向量空间,实现告警信号文本向量化,为电力系统文本信息处理提供了方法,构建的本体词典也可用于电力系统其他自然语言处理过程。

c. 故障诊断算法分为 2 层:第一层使用 SVM,判断是否发生故障,若判断结果为发生故障,启动第二层算法判断发生何种故障,使用 k -均值聚类法提取较高可能性的故障供调度员参考,算法逻辑清晰,诊断结果准确可靠。

d. 由于本文方法采用了有监督的模型,模型的分类效果对用于训练的故障样本具有依赖性,对于故障样本未包含的故障类型,本文方法尚不能准确诊断,未来可开发用于管理和更新故障样本的方案,与本文提出的故障诊断模型配合使用,以期为调度

员提供快速高效的故障诊断。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 严胜. 智能电网变电站集中监控告警专家处理系统的研究与应用[J]. 中国科技信息, 2009(17):25-27.
YAN Sheng. Study and application of alarm expert handling systems for smart grid substation centralized monitoring [J]. China Science and Technology Information, 2009(17):25-27.
- [2] 中国电机工程学会信息化专委会. 中国电力大数据发展白皮书[M]. 北京:中国电机工程学会, 2013:9-12.
- [3] 邱剑, 王慧芳, 应高亮, 等. 文本信息挖掘技术及其在断路器全寿命状态评价中的应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 107-112.
QIU Jian, WANG Huifang, YING Gaoliang, et al. Text mining technique and application of lifecycle condition assessment for circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 107-112.
- [4] 曹靖, 陈陆燊, 邱剑, 等. 基于语义框架的电网缺陷文本挖掘技术及其应用[J]. 电网技术, 2017, 41(2):637-643.
CAO Jing, CHEN Lushen, QIU Jian, et al. Semantic framework-based defect text mining technique and application in power grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(2):637-643.
- [5] RUDIN C, WALTZ D, ANDERSON R N, et al. Machine learning for the New York City power grid [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 34(2):328-345.
- [6] SUN H, WANG Z, WANG J, et al. Data-driven power outage detection by social sensors[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5):2516-2524.
- [7] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1-8.
ZHAO Wei, BAI Xiaomin, DING Jian, et al. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi agent technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20):1-8.
- [8] GUO W, WEN F, LEDWICH G, et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):1393-1401.
- [9] 张岩, 张勇, 文福拴, 等. 融合信息理论的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2):158-164.
ZHANG Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, et al. Analytical model for power system fault diagnosis integrated with information theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 158-164.
- [10] 田方媛, 张岩, 徐兵, 等. 多代理系统框架下的主动配电系统故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6):19-26.
TIAN Fangyuan, ZHANG Yan, XU Bing, et al. Fault diagnosis based on multi agent system for active distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):19-26.
- [11] 张懿记, 焦健, 汪可, 等. 基于帝国殖民竞争算法优化支持向量机的电力变压器故障诊断模型[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1):99-104.
ZHANG Yiyi, JIAO Jian, WANG Ke, et al. Power transformer fault diagnosis model based on support vector machine optimized by imperialist competitive algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):99-104.
- [12] 张岩, 张勇, 文福拴, 等. 容纳时序约束的改进模糊 Petri 网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5):66-72.
ZHANG Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, et al. Power system fault diagnosis with an enhanced fuzzy Petri net accommodating temporal constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5):66-72.
- [13] 钟锦源, 张岩, 文福拴, 等. 利用电气量和时序信息的改进 Petri 网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11):152-159.
ZHONG Jinyuan, ZHANG Yan, WEN Fushuan, et al. An improved Petri net model for power system fault diagnosis employing electrical data and temporal constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):152-159.
- [14] 赖宏毅, 汪旸, 杨雯, 等. 基于事件起点的层次化时序 Petri 网及其电网故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 201-209.
LAI Hongyi, WANG Yang, YANG Wen, et al. Hierarchical temporal Petri net based on event-starting point and its fault diagnosis method of power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):201-209.
- [15] 熊国江, 石东源, 朱林, 等. 基于径向基函数神经网络的电网模糊元胞故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5):59-65.
XIONG Guojiang, SHI Dongyuan, ZHU Lin, et al. Fuzzy cellular fault diagnosis of power grids based on radial basis function neural network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5):59-65.
- [16] 韩迎春, 童晓阳. 基于动态推理链的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2017, 41(4):1315-1323.
HAN Yingchun, TONG Xiaoyang. Power system fault diagnosis based on dynamic reasoning chain [J]. Power System Technology, 2017, 41(4):1315-1323.
- [17] 徐兵. 利用多源信息的电力系统故障诊断方法与应用[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
XU Bing. Power system fault diagnosis methods and applications employing information from multiple sources [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [18] 马刚. 输变电设备在线状态分析与智能诊断系统的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
MA Gang. Research on power transmission and transformation equipment online status analysis and intelligent diagnosis system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [19] 杨世海, 李涛, 陈铭明, 等. 基于数据挖掘的智能电网在线故障诊断与分析[J]. 电子设计工程, 2017, 25(1):136-139.
YANG Shihai, LI Tao, CHEN Mingming, et al. On-line fault diagnosis and analysis of smart power grid based on data mining [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(1):136-139.

作者简介:



汪崔洋

汪崔洋(1992—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为电网数据挖掘、电力系统调控管理(E-mail: wangcuixiang@126.com);

江全元(1975—),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网及储能技术应用(E-mail: jqy@zju.edu.cn);

唐雅洁(1993—),女,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为智能电网、电力系统运行与控制(E-mail: tyj@zju.edu.cn)。

Fault diagnosis of power dispatching based on alarm signal text mining

WANG Cuiyang¹, JIANG Quanyuan¹, TANG Yajie¹, ZHU Bingquan², XIANG Zhongming², TANG Jian³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China;

3. State Grid Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: The power dispatching system receives massive alarm signals during the failure process of power system, and the failure range may expand if the dispatcher cannot make a decision in a short time, so a fault diagnosis method of power dispatching based on alarm signal text mining is proposed, which includes two stages of alarm signal text preprocessing and fault diagnosis. In the first stage, an ontology dictionary is constructed by segmenting the text of alarm signals based on HMM(Hidden Markov Model) and removing the stop words, and VSM(Vector Space Model) is adopted for text vectorization. In the second stage, the sliding time window is used to read the real-time alarm signals, and a two-layer algorithm is proposed. In the first layer, SVM(Support Vector Machine) is adopted to classify the alarm signals in the sliding window, if the classification result justified to be a fault, the *k*-means clustering method in the second layer is used to extract faults with higher possibility to dispatcher for reference. A practical alarm signal in a power dispatching system is taken as an example to verify the feasibility of the proposed method.

Key words: power dispatching; text mining; vector space model; support vector machine; *k*-means clustering

(上接第 125 页 continued from page 125)

Resonance modal analysis and active damping suppression method for DC microgrid

LIN Gang¹, LI Yong¹, WANG Ziya¹, CAO Yijia¹, LIU Jiayan¹,

WANG Pengcheng¹, FAN Rui^{2,3}, YANG Qianya⁴

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Power Supply Service Center(Metrology Center), Changsha 410004, China;

3. Hunan Province Key Laboratory of Intelligent Electrical Measurement and Application Technology, Changsha 410004, China;

4. State Grid Hunan Electric Power Maintenance Company, Changsha 410000, China)

Abstract: Resonance could cause harmonic instability in DC microgrid, and represents a potential cause of voltage collapse. To determine the resonance frequency of DC microgrid, the traditional frequency domain analysis requires the establishment of complicated high-order transfer function and cannot provide the information such as influence range of resonance. A resonance modal analysis method of DC microgrid under distributed control is proposed, and the resonance frequency of the system is obtained by analyzing its node admittance matrix. The effectiveness of the method is verified using the frequency domain analysis. The influence range of the resonance can be determined according to the participation factors. Besides, the influence of line parameters on system mode and resonance frequency is analyzed. Furthermore, an active damping controller is proposed, which reduces the resonance peak value of LRC(Line Regulating Converter) output impedance by injecting damping signal into the inner current loop, and improves the stability of system. Finally, the proposed method and the active damping control are verified by simulative results on PSCAD/EMTDC.

Key words: DC microgrid; modal analysis; resonance; active damping; line regulating converter

附录 A 单一故障诊断

滑动时间窗内实时告警信号

由拳变电站由民 4R21 线 B 相事故跳闸告警信号:

2017-04-25 09:21:40 华东.由拳 由民 4R21 线第二套线路保护 动作
2017-04-25 09:21:41 华东.由拳 由民 4R21 线第二套线路保护 重合闸
2017-04-25 09:21:42 华东.由拳 由民 4R21 线第一套线路保护 动作
2017-04-25 09:21:43 华东.由拳 由民 4R21 线第一套线路保护 重合闸
2017-04-25 09:21:43 华东.由拳 由民 4R21 线第二套线路保护 动作
2017-04-25 09:21:44 浙江.由拳/220kV.由民 4R21 线开关 B 相分闸
2017-04-25 09:21:45 华东.由拳 由民 4R21 线开关第一组控制回路 断线
2017-04-25 09:21:45 华东.由拳 由民 4R21 线开关第二组控制回路 断线
2017-04-25 09:21:47 华东.由拳 由民 4R21 线开关油泵 启动
2017-04-25 09:21:48 浙江.由拳/220kV.由民 4R21 线开关 B 相合闸
2017-04-25 09:21:49 浙江.由拳/220kV.由民 4R21 线开关 分闸
2017-04-25 09:21:49 华东.由拳 由民 4R21 线开关油压低重合闸 闭锁

与本次故障无关的告警信号:

2017-04-25 09:21:42 华东.明州/35kV.3 号主变 1 号低抗 331 开关 分闸
2017-04-25 09:21:46 华东.瓯海 莲海线 5043 开关油泵 启动
2017-04-25 09:21:47 华东.明州/35kV.3 号主变 2 号低抗 332 开关 合闸
2017-04-25 09:21:48 华东.明州 3 号主变 2 号低抗开关机构弹簧 未储能

中间计算结果

(1) 滑动时间窗中实时告警信号向量化得到的实时向量经稀疏处理后储存为:

$W_{spa} = [10 1 21 1 35 11 36 1 41 1 58 6 64 3 75 1 84 1 88 2 93 1 104 1 123 4 129 1 141 1 148 1 151 1 164 1 247 3 252 1 270 2 275 2 305 1 325 1 329 1 351 2 364 14 371 3 372 3 378 1 379 1 381 1 385 3 388 2 394 2 397 6 401 1 406 1 410 1 508 1 738 13];$

W_{spa} 共 82 维。

(2) 实时向量与样本向量得到的所有相似度从小到大排列组成的相似度向量为:

$S = [0.0109517 0.0134806 0.019995 0.0221258 0.0258729 0.0264406 0.0443316 0.045978 0.0496169 0.0516682 0.0517618 0.0522998 0.0525472 0.0532994 0.0538973 0.0550997 0.0552776 0.0597401 0.0598915 0.0606303 0.0627821 0.0682373 0.0689893 0.0691421 0.0692108 0.0703586 0.0709467 0.0716054 0.0721396 0.073479 0.0735626 0.0759417 0.0772393 0.0776386 0.0795552 0.0797793 0.0805697 0.0816449 0.0825136 0.0829141 0.0834796 0.0842467 0.084684 0.0851289 0.0851843 0.0857171 0.0876768 0.0896449 0.0924777 0.0933564 0.0935951 0.094703 0.094978 0.0968721 0.0979551 0.0985996 0.0993774 0.101446 0.101654 0.102228 0.102751 0.104855 0.106596 0.107026 0.107544 0.108025 0.108236 0.109042 0.111141 0.112189 0.113259 0.114079 0.116406 0.118518 0.122888 0.124987 0.130183 0.130463 0.140498 0.140808 0.141532 0.142604 0.147555 0.150256 0.15106 0.153139 0.153748 0.155866 0.158296 0.159273 0.162156 0.163577 0.172895 0.176876 0.183874 0.188042 0.191124 0.193933 0.198514 0.20026 0.200503 0.209199 0.20932 0.210799 0.211447 0.212546 0.213777 0.214056 0.214145 0.215445 0.215993 0.216021 0.219011 0.221301 0.221817 0.222749 0.225659 0.225879 0.22642 0.226937 0.227157 0.227232 0.227606 0.228448 0.230196 0.231043 0.232493 0.232684 0.233136 0.233197 0.234541 0.236922 0.237112 0.240371 0.243904 0.24534 0.245715 0.246511 0.248599 0.250238 0.25034 0.250829 0.252817 0.254246 0.256246 0.256555 0.256688 0.257261 0.258987 0.259502 0.261397 0.261447 0.261636 0.264991 0.265487 0.265804 0.265829 0.268749 0.272494 0.272704 0.274611 0.275792 0.276282 0.280759 0.281214 0.281574 0.2819 0.282145 0.282501 0.283507 0.285372 0.285576 0.286145 0.287962 0.288668 0.294273 0.29439 0.296188 0.297415 0.300161 0.304521 0.306332 0.311507 0.312906 0.313281 0.317774 0.321646 0.323111 0.3239 0.328298 0.329153 0.335042 0.335284 0.338111 0.342375 0.343496 0.360774 0.366114 0.370824 0.387013 0.396568 0.409327]$

S_{\min} = [0.428693 0.438479 0.973444];

S 共 205 维。

(3) 支持向量机 (SVM) 分类算法判断发生故障。

(4) k -均值聚类算法聚类结果:

S_{\min} = [0.0109517 0.0134806 0.019995 0.0221258 0.0258729 0.0264406 0.0443316 0.045978 0.0496169 0.0516682 0.0517618 0.0522998 0.0525472 0.0532994 0.0538973 0.0550997 0.0552776 0.0597401 0.0598915 0.0606303 0.0627821 0.0682373 0.0689893 0.0691421 0.0692108 0.0703586 0.0709467 0.0716054 0.0721396 0.073479 0.0735626 0.0759417 0.0772393 0.0776386 0.0795552 0.0797793 0.0805697 0.0816449 0.0825136 0.0829141 0.0834796 0.0842467 0.084684 0.0851289 0.0851843 0.0857171 0.0876768 0.0896449 0.0924777 0.0933564 0.0935951 0.094703 0.094978 0.0968721 0.0979551 0.0985996 0.0993774 0.101446 0.101654 0.102228 0.102751 0.104855 0.106596 0.107026 0.107544 0.108025 0.108236 0.109042 0.111141 0.112189 0.113259 0.114079 0.116406 0.118518 0.122888 0.124987 0.130183 0.130463 0.140498 0.140808 0.141532 0.142604 0.147555 0.150256 0.15106 0.153139 0.153748 0.155866 0.158296 0.159273 0.162156 0.163577 0.172895 0.176876 0.183874 0.188042 0.191124 0.193933 0.198514 0.20026 0.200503 0.209199 0.20932 0.210799 0.211447 0.212546 0.213777 0.214056 0.214145 0.215445 0.215993 0.216021 0.219011 0.221301 0.221817 0.222749 0.225659 0.225879 0.22642 0.226937 0.227157 0.227232 0.227606 0.228448 0.230196 0.231043 0.232493 0.232684 0.233136 0.233197 0.234541 0.236922 0.237112 0.240371 0.243904 0.24534 0.245715 0.246511 0.248599 0.250238 0.25034 0.250829 0.252817 0.254246 0.256246 0.256555 0.256688 0.257261 0.258987 0.259502 0.261397 0.261447 0.261636 0.264991 0.265487 0.265804 0.265829 0.268749 0.272494 0.272704 0.274611 0.275792 0.276282 0.280759 0.281214 0.281574 0.2819 0.282145 0.282501 0.283507 0.285372 0.285576 0.286145 0.287962 0.288668 0.294273 0.29439 0.296188 0.297415 0.300161 0.304521 0.306332 0.311507 0.312906 0.313281];

S_{\min} 共 185 维;

S_{mid} =[0.317774 0.321646 0.323111 0.3239 0.328298 0.329153 0.335042 0.335284 0.338111 0.342375 0.343496 0.360774 0.366114 0.370824 0.387013 0.396568 0.409327 0.428693 0.438479];

S_{mid} 共 19 维;

S_{\max} =[0.973444];

S_{\max} 共 1 维。

(5) 相似度集 S_{\max} 中的相似度对应第 78 号故障样本, 输出故障样本的故障描述。

附录 B 相同地点多故障诊断

滑动时间窗内实时告警信号

双兰 5427 线 A 相事故跳闸告警信号:

2014-06-27 14:44:17 华东.双龙 双兰线/2 号主变 5012 开关保护 动作
2014-06-27 14:44:17 华东.双龙/500kV.双兰线 5011 开关 A 相分闸
2014-06-27 14:44:17 华东.双龙 双兰 5427 线第二套线路保护 A 相跳闸
2014-06-27 14:44:18 华东.双龙 双兰 5427 线第一套线路保护 跳闸
2014-06-27 14:44:18 华东.双龙 双兰线 5011 开关保护 动作
2014-06-27 14:44:18 华东.双龙/500kV.双兰线 2 号主变 5012 开关 分闸
2014-06-27 14:44:20 华东.双龙 双兰线 5011 开关重合闸 动作
2014-06-27 14:44:21 华东.双龙 双兰线/2 号主变 5012 开关重合闸 动作
2014-06-27 14:44:25 华东.双龙/500kV.双兰线/2 号主变 5012 开关 合闸
2014-06-27 14:44:25 华东.双龙 双兰线/2 号主变 5012 开关油泵 启动
2014-06-27 14:44:25 华东.双龙 双兰线 5011 开关油泵 启动
2014-06-27 14:44:25 华东.双龙/500kV.双兰线 5011 开关 A 相合闸

龙鹿 2375 线 C 相事故跳闸告警信号:

2014-06-27 14:44:19 华东.双龙 龙鹿 2375 线开关第一组控制回路 断线
2014-06-27 14:44:20 华东.双龙 龙鹿 2375 线开关第二组控制回路 断线
2014-06-27 14:44:21 华东.双龙 龙鹿 2375 线第一套线路保护 动作
2014-06-27 14:44:21 华东.双龙 龙鹿 2375 线第二套线路保护 动作
2014-06-27 14:44:21 华东.双龙 龙鹿 2375 线开关重合闸 动作
2014-06-27 14:44:22 华东.双龙/220kV.龙鹿 2375 线开关 分闸
2014-06-27 14:44:23 华东.双龙/220kV.龙鹿 2375 线开关 C 相合闸
2014-06-27 14:44:26 华东.双龙/220kV.龙鹿 2375 线开关 C 相分闸
2014-06-27 14:44:26 华东.双龙 龙鹿 2375 线开关油压低重合闸 闭锁

与本次故障无关的告警信号:

2014-06-27 14:44:19 浙江.三溪口 #2 机有功低限越限告警信号 动作
2014-06-27 14:44:19 浙江.三溪口 #3 机有功高限越限告警信号 动作
2014-06-27 14:44:20 浙江.三溪口 #2 机组下调节闭锁信号 动作
2014-06-27 14:44:20 浙江.三溪口 #3 机组上调节闭锁信号 动作

中间计算结果

(1) 滑动时间窗中实时告警信号向量化得到的实时向量经稀疏处理后储存为:

$W_{spa} = [2\ 4\ 35\ 10\ 41\ 2\ 43\ 8\ 58\ 3\ 64\ 5\ 81\ 6\ 82\ 2\ 93\ 7\ 123\ 1\ 135\ 7\ 136\ 6\ 245\ 4\ 247\ 2\ 252\ 2\ 268\ 4\ 270\ 2\ 275\ 2\ 338\ 37\ 371\ 3\ 374\ 4\ 375\ 2\ 376\ 2\ 377\ 1\ 381\ 3\ 382\ 1\ 383\ 1\ 385\ 12\ 388\ 1\ 389\ 10\ 397\ 3\ 401\ 2\ 404\ 1\ 410\ 1\ 529\ 12\ 607\ 2\ 608\ 13];$

W_{spa} 共 74 维。

(2) 实时向量与样本向量得到的所有相似度从小到大排列组成的相似度向量:

$S = [0.00212568\ 0.0028677\ 0.00523567\ 0.0160309\ 0.0250313\ 0.0260713\ 0.0292388\ 0.0335732\ 0.0368184\ 0.0427573\ 0.0429268\ 0.0480927\ 0.0484641\ 0.0492079\ 0.0513856\ 0.0534971\ 0.0547497\ 0.0554396\ 0.0584924\ 0.0639639\ 0.0651283\ 0.0671461\ 0.0679432\ 0.0689461\ 0.0763704\ 0.076545\ 0.0766934\ 0.0771707\ 0.0782377\ 0.0823379\ 0.0830964\ 0.0839416\ 0.0855008\ 0.0859415\ 0.0873344\ 0.087588\ 0.0882473\ 0.0894479\ 0.0925175\ 0.0929338\ 0.0938194\ 0.0957494\ 0.0983506\ 0.0985576\ 0.0989183\ 0.0991925\ 0.0999762\ 0.101312\ 0.102416\ 0.102767\ 0.103003\ 0.103111\ 0.103479\ 0.103665\ 0.103802\ 0.105366\ 0.105652\ 0.106186\ 0.106305\ 0.108175\ 0.108652\ 0.10878\ 0.109127\ 0.109395\ 0.109399\ 0.110232\ 0.110248\ 0.112067\ 0.11232\ 0.113133\ 0.11339\ 0.116049\ 0.116819\ 0.117405\ 0.119152\ 0.119254\ 0.119438\ 0.119474\ 0.120402\ 0.120492\ 0.120997\ 0.122731\ 0.123065\ 0.123242\ 0.123387\ 0.123838\ 0.124047\ 0.124157\ 0.124469\ 0.125469\ 0.126567\ 0.130748\ 0.13402\ 0.134078\ 0.134383\ 0.136961\ 0.137015\ 0.138205\ 0.139288\ 0.139935\ 0.141121\ 0.141289\ 0.141711\ 0.142489\ 0.143701\ 0.144067\ 0.144315\ 0.145612\ 0.146213\ 0.146404\ 0.148516\ 0.148925\ 0.14926\ 0.149719\ 0.149898\ 0.150817\ 0.151329\ 0.151552\ 0.152166\ 0.15218\ 0.152849\ 0.153366\ 0.153707\ 0.153849\ 0.154099\ 0.156325]$

0.157378 0.158062 0.158313 0.159667 0.160733 0.161108 0.16182 0.16194 0.162385 0.163314 0.164065
 0.164089 0.165452 0.166045 0.167002 0.167515 0.170001 0.170126 0.170537 0.171244 0.171439 0.171692
 0.172994 0.17379 0.174477 0.175464 0.176488 0.17845 0.17904 0.179208 0.180904 0.181473 0.181565 0.1848
 0.188087 0.189142 0.190008 0.191023 0.191846 0.194216 0.196566 0.196675 0.196693 0.197966 0.198164
 0.198603 0.200469 0.202897 0.202987 0.203951 0.204683 0.205019 0.205694 0.208142 0.20857 0.210199
 0.210755 0.21361 0.215097 0.215866 0.219736 0.220043 0.226036 0.227663 0.228688 0.232719 0.234969
 0.235959 0.256138 0.2601 0.267455 0.529298 0.56382 0.585803 0.598306 0.60576 0.62771 0.885315 0.891598];
 S 共 205 维。

(3) 支持向量机 (SVM) 分类算法判断发生故障。

(4) k -均值聚类算法聚类结果:

$S_{\min} = [0.00212568 \ 0.0028677 \ 0.00523567 \ 0.0160309 \ 0.0250313 \ 0.0260713 \ 0.0292388 \ 0.0335732 \ 0.0368184 \ 0.0427573 \ 0.0429268 \ 0.0480927 \ 0.0484641 \ 0.0492079 \ 0.0513856 \ 0.0534971 \ 0.0547497 \ 0.0554396 \ 0.0584924 \ 0.0639639 \ 0.0651283 \ 0.0671461 \ 0.0679432 \ 0.0689461 \ 0.0763704 \ 0.076545 \ 0.0766934 \ 0.0771707 \ 0.0782377 \ 0.0823379 \ 0.0830964 \ 0.0839416 \ 0.0855008 \ 0.0859415 \ 0.0873344 \ 0.087588 \ 0.0882473 \ 0.0894479 \ 0.0925175 \ 0.0929338 \ 0.0938194 \ 0.0957494 \ 0.0983506 \ 0.0985576 \ 0.0989183 \ 0.0991925 \ 0.0999762 \ 0.101312 \ 0.102416 \ 0.102767 \ 0.103003 \ 0.103111 \ 0.103479 \ 0.103665 \ 0.103802 \ 0.105366 \ 0.105652 \ 0.106186 \ 0.106305 \ 0.108175 \ 0.108652 \ 0.10878 \ 0.109127 \ 0.109395 \ 0.109399 \ 0.110232 \ 0.110248 \ 0.112067 \ 0.11232 \ 0.113133 \ 0.11339 \ 0.116049 \ 0.116819 \ 0.117405 \ 0.119152 \ 0.119254 \ 0.119438 \ 0.119474 \ 0.120402 \ 0.120492 \ 0.120997 \ 0.122731 \ 0.123065 \ 0.123242 \ 0.123387 \ 0.123838 \ 0.124047 \ 0.124157 \ 0.124469 \ 0.125469 \ 0.126567 \ 0.130748 \ 0.13402 \ 0.134078 \ 0.134383 \ 0.136961 \ 0.137015 \ 0.138205 \ 0.139288 \ 0.139935 \ 0.141121 \ 0.141289 \ 0.141711 \ 0.142489 \ 0.143701 \ 0.144067 \ 0.144315 \ 0.145612 \ 0.146213 \ 0.146404 \ 0.148516 \ 0.148925 \ 0.14926 \ 0.149719 \ 0.149898 \ 0.150817 \ 0.151329 \ 0.151552 \ 0.152166 \ 0.15218 \ 0.152849 \ 0.153366 \ 0.153707 \ 0.153849 \ 0.154099 \ 0.156325 \ 0.157378 \ 0.158062 \ 0.158313 \ 0.159667 \ 0.160733 \ 0.161108 \ 0.16182 \ 0.16194 \ 0.162385 \ 0.163314 \ 0.164065 \ 0.164089 \ 0.165452 \ 0.166045 \ 0.167002 \ 0.167515 \ 0.170001 \ 0.170126 \ 0.170537 \ 0.171244 \ 0.171439 \ 0.171692 \ 0.172994 \ 0.17379 \ 0.174477 \ 0.175464 \ 0.176488 \ 0.17845 \ 0.17904 \ 0.179208 \ 0.180904 \ 0.181473 \ 0.181565 \ 0.1848 \ 0.188087 \ 0.189142 \ 0.190008 \ 0.191023 \ 0.191846 \ 0.194216 \ 0.196566 \ 0.196675 \ 0.196693 \ 0.197966 \ 0.198164 \ 0.198603 \ 0.200469 \ 0.202897 \ 0.202987 \ 0.203951 \ 0.204683 \ 0.205019 \ 0.205694 \ 0.208142 \ 0.20857 \ 0.210199 \ 0.210755 \ 0.21361 \ 0.215097 \ 0.215866 \ 0.219736 \ 0.220043 \ 0.226036 \ 0.227663 \ 0.228688 \ 0.232719 \ 0.234969 \ 0.235959 \ 0.256138 \ 0.2601 \ 0.267455];$

S_{\min} 共 197 维;

$S_{\text{mid}} = [0.529298 \ 0.56382 \ 0.585803 \ 0.598306 \ 0.60576 \ 0.62771];$

S_{mid} 共 6 维;

$S_{\max} = [0.891598 \ 0.885315];$

S_{\max} 共 2 维。

(5) 相似度集 S_{\max} 中的两个相似度分别对应第 32 号和 27 号故障样本，分别输出故障样本的故障描述。

附录 C 不同地点多故障诊断

滑动时间窗内实时告警信号

瓶窑变电站低抗故障告警信号:

2015-12-16 08:21:35 华东.瓶窑/500kV.2号主变 5002 开关 分闸
2015-12-16 08:21:35 华东.瓶窑 2号主变 1号低抗保护 动作
2015-12-16 08:21:36 华东.瓶窑 2号主变 1号低抗控制回路 断线
2015-12-16 08:21:37 华东.瓶窑/220kV.2号主变 220kV 开关 分闸
2015-12-16 08:21:38 华东.瓶窑 2号主变 5002 开关间隔事故信号 动作
2015-12-16 08:21:38 华东.瓶窑 全站事故总信号 动作
2015-12-16 08:21:39 华东.瓶窑/15kV.2号主变 1号低抗 121 开关 分闸
2015-12-16 08:21:41 华东.瓶窑 2号主变 220kV 侧间隔事故信号 动作
2015-12-16 08:21:42 华东.瓶窑 2号主变 1号低抗间隔事故信号 动作
2015-12-16 08:21:43 华东.瓶窑 2号主变 1号低抗保护装置 故障

春晓变电站低抗故障告警信号:

2015-12-16 08:21:36 华东.春晓 2号主变 3号低抗保护 动作
2015-12-16 08:21:37 华东.春晓 2号主变 35kV 开关控制电源 消失
2015-12-16 08:21:38 华东.春晓 2号主变 3号低抗开关控制回路 断线
2015-12-16 08:21:38 华东.春晓/35kV.2号主变 3520 开关 分闸
2015-12-16 08:21:40 华东.春晓 35kV II母 PT 失压
2015-12-16 08:21:40 华东.春晓/35kV.2号主变 3号低抗 323 开关 分闸
2015-12-16 08:21:42 华东.春晓 2号主变 3号间隔低抗事故信号 动作
2015-12-16 08:21:43 华东.春晓 2号主变 35kV 侧事故信号 动作
2015-12-16 08:21:43 华东.春晓 全站事故总信号 动作

与本次故障无关的告警信号:

2015-12-16 08:21:37 华东.天柱 220kV 副母 I 段压变接地闸刀 合闸
2015-12-16 08:21:39 浙江.宏山变/220kV.#2 主变 220kV 开关 合闸
2015-12-16 08:21:40 华东.白鹿/35kV.1号主变 1号低抗 311 开关 分闸

中间计算结果

(1) 滑动时间窗中实时告警信号向量化得到的实时向量经稀疏处理后储存为:

$W_{spa} = [2\ 2\ 3\ 1\ 12\ 1\ 13\ 1\ 29\ 3\ 31\ 3\ 34\ 1\ 35\ 1\ 39\ 1\ 40\ 2\ 41\ 2\ 43\ 1\ 45\ 2\ 47\ 5\ 58\ 1\ 60\ 1\ 61\ 2\ 65\ 1\ 74\ 1\ 75\ 6\ 80\ 1\ 83\ 1\ 84\ 1\ 85\ 5\ 92\ 1\ 93\ 24\ 95\ 1\ 101\ 1\ 107\ 1\ 110\ 1\ 114\ 1\ 115\ 1\ 118\ 3\ 120\ 1\ 131\ 5\ 198\ 2\ 252\ 2\ 275\ 2\ 287\ 1\ 292\ 14\ 331\ 15\ 332\ 3\ 371\ 2\ 372\ 3\ 374\ 2\ 385\ 6\ 388\ 7\ 390\ 3\ 394\ 2\ 397\ 1\ 401\ 2\ 402\ 1\ 407\ 1\ 409\ 3];$

W_{spa} 共 108 维。

(2) 实时向量与样本向量得到的所有相似度从小到大排列组成的相似度向量为:

$S = [0\ 0.02136\ 0.0252011\ 0.0351083\ 0.0352324\ 0.0409447\ 0.0442529\ 0.0448772\ 0.0474936\ 0.0495595\ 0.0527308\ 0.054043\ 0.0549044\ 0.055337\ 0.0574839\ 0.0575804\ 0.0581675\ 0.0589392\ 0.0595039\ 0.0596792\ 0.0597072\ 0.0599811\ 0.062052\ 0.0621991\ 0.0628895\ 0.0639938\ 0.0643735\ 0.0651534\ 0.0655164\ 0.066161\ 0.0662708\ 0.0665077\ 0.0665118\ 0.0665118\ 0.0669433\ 0.0669808\ 0.067186\ 0.0677967\ 0.0678621\ 0.0696572\ 0.0697736\ 0.0703211\ 0.07056\ 0.0708981\ 0.0725885\ 0.0726895\ 0.0730427\ 0.0735208\ 0.0739358\ 0.0742099\ 0.0744269\ 0.0744975\ 0.0749769\ 0.0750569\ 0.0752145\ 0.0753715\ 0.0755987\ 0.0759785\ 0.0763501\ 0.0774525\ 0.0775883\ 0.078023\ 0.078225\ 0.0783593\ 0.0785323\ 0.0794517\ 0.0798004\ 0.0800135\ 0.0800458\ 0.0803517\ 0.080584\ 0.0809914\ 0.0810149\ 0.0820791\ 0.0835237\ 0.0835237\ 0.0835343\ 0.0837107\ 0.0838772\ 0.083955\ 0.0842376\ 0.0846213\ 0.0846375\ 0.0851867\ 0.085406\ 0.085676\ 0.0856778\ 0.0858663\ 0.0859291\ 0.0861785\ 0.0866292\ 0.0867072\ 0.0871039\ 0.0874335\ 0.0876807\ 0.088197\ 0.0883562\ 0.0883793\ 0.0885221\ 0.0887794\ 0.0891164\ 0.0894384\ 0.0897093\ 0.090602\ 0.0908287\ 0.0914974\ 0.0916395\ 0.0916614\ 0.0918293\ 0.0922309\ 0.0930902\ 0.0931652\ 0.0934787\ 0.0936124\ 0.0940135\ 0.0948744\ 0.0953821\ 0.0953849\ 0.0954657\ 0.0960066\ 0.0962569\ 0.0963358\ 0.0964753\ 0.0965972\ 0.0980521\ 0.0987135\ 0.0988099\ 0.0989\ 0.0993658\ 0.100545\ 0.100633\ 0.100691\ 0.101186\ 0.101255\ 0.102392\ 0.102537\ 0.103731\ 0.103945\ 0.104198\ 0.106708\ 0.107017]$

0.107304 0.107799 0.108389 0.108579 0.109686 0.110057 0.110103 0.110243 0.111517 0.113526 0.113736
 0.114368 0.115128 0.11634 0.118307 0.118784 0.118903 0.119781 0.12676 0.12877 0.128959 0.130692
 0.131192 0.131578 0.133131 0.136914 0.139441 0.139916 0.141966 0.148255 0.148325 0.149083 0.151183
 0.152745 0.166108 0.16999 0.171769 0.174828 0.175341 0.1853 0.188507 0.204622 0.208395 0.210311
 0.212681 0.256298 0.286383 0.290687 0.325912 0.348859 0.367731 0.381998 0.402351 0.402541 0.408894
 0.415152 0.426562 0.432896 0.439705 0.448266 0.504946 0.562195 0.837681 0.880621];

S 共 205 维。

(3) 支持向量机 (SVM) 分类算法判断发生故障。

(4) k -均值聚类算法聚类结果:

$S_{\min} = [0 \ 0.02136 \ 0.0252011 \ 0.0351083 \ 0.0352324 \ 0.0409447 \ 0.0442529 \ 0.0448772 \ 0.0474936 \ 0.0495595 \ 0.0527308 \ 0.054043 \ 0.0549044 \ 0.055337 \ 0.0574839 \ 0.0575804 \ 0.0581675 \ 0.0589392 \ 0.0595039 \ 0.0596792 \ 0.0597072 \ 0.0599811 \ 0.062052 \ 0.0621991 \ 0.0628895 \ 0.0639938 \ 0.0643735 \ 0.0651534 \ 0.0655164 \ 0.066161 \ 0.0662708 \ 0.0665077 \ 0.0665118 \ 0.0665118 \ 0.0669433 \ 0.0669808 \ 0.067186 \ 0.0677967 \ 0.0678621 \ 0.0696572 \ 0.0697736 \ 0.0703211 \ 0.07056 \ 0.0708981 \ 0.0725885 \ 0.0726895 \ 0.0730427 \ 0.0735208 \ 0.0739358 \ 0.0742099 \ 0.0744269 \ 0.0744975 \ 0.0749769 \ 0.0750569 \ 0.0752145 \ 0.0753715 \ 0.0755987 \ 0.0759785 \ 0.0763501 \ 0.0774525 \ 0.0775883 \ 0.078023 \ 0.078225 \ 0.0783593 \ 0.0785323 \ 0.0794517 \ 0.0798004 \ 0.0800135 \ 0.0800458 \ 0.0803517 \ 0.080584 \ 0.0809914 \ 0.0810149 \ 0.0820791 \ 0.0835237 \ 0.0835237 \ 0.0835343 \ 0.0837107 \ 0.0838772 \ 0.083955 \ 0.0842376 \ 0.0846213 \ 0.0846375 \ 0.0851867 \ 0.085406 \ 0.085676 \ 0.0856778 \ 0.0858663 \ 0.0859291 \ 0.0861785 \ 0.0866292 \ 0.0867072 \ 0.0871039 \ 0.0874335 \ 0.0876807 \ 0.088197 \ 0.0883562 \ 0.0883793 \ 0.0885221 \ 0.0887794 \ 0.0891164 \ 0.0894384 \ 0.0897093 \ 0.090602 \ 0.0908287 \ 0.0914974 \ 0.0916395 \ 0.0916614 \ 0.0918293 \ 0.0922309 \ 0.0930902 \ 0.0931652 \ 0.0934787 \ 0.0936124 \ 0.0940135 \ 0.0948744 \ 0.0953821 \ 0.0953849 \ 0.0954657 \ 0.0960066 \ 0.0962569 \ 0.0963358 \ 0.0964753 \ 0.0965972 \ 0.0980521 \ 0.0987135 \ 0.0988099 \ 0.0989 \ 0.0993658 \ 0.100545 \ 0.100633 \ 0.100691 \ 0.101186 \ 0.101255 \ 0.102392 \ 0.102537 \ 0.103731 \ 0.103945 \ 0.104198 \ 0.106708 \ 0.107017 \ 0.107304 \ 0.107799 \ 0.108389 \ 0.108579 \ 0.109686 \ 0.110057 \ 0.110103 \ 0.110243 \ 0.111517 \ 0.113526 \ 0.113736 \ 0.114368 \ 0.115128 \ 0.11634 \ 0.118307 \ 0.118784 \ 0.118903 \ 0.119781 \ 0.12676 \ 0.12877 \ 0.128959 \ 0.130692 \ 0.131192 \ 0.131578 \ 0.133131 \ 0.136914 \ 0.139441 \ 0.139916 \ 0.141966 \ 0.148255 \ 0.148325 \ 0.149083 \ 0.151183 \ 0.152745 \ 0.166108 \ 0.16999 \ 0.171769 \ 0.174828 \ 0.175341 \ 0.1853 \ 0.188507 \ 0.204622 \ 0.208395 \ 0.210311 \ 0.212681 0.256298];$

S_{\min} 共 187 维;

$S_{\text{mid}} = [0.286383 \ 0.290687 \ 0.325912 \ 0.348859 \ 0.367731 \ 0.381998 \ 0.402351 \ 0.402541 \ 0.408894 \ 0.415152 \ 0.426562 \ 0.432896 \ 0.439705 \ 0.448266 \ 0.504946 \ 0.562195]$;

S_{mid} 共 16 维;

$S_{\max} = [0.880621 \ 0.837681]$;

S_{\max} 共 2 维。

(5) 相似度集 S_{\max} 中的两个相似度分别对应第 17 号和 15 号故障样本，分别输出故障样本的故障描述。