

基于多源异构数据挖掘的配电网故障信息统计分析

宋杰, 谢海宁, 杨增辉, 周健, 鲍伟, 柳劲松, 周德生, 方陈, 蔡霖

(国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 针对目前城市配电网建设的现状, 研发了基于多源异构数据环境的配网故障信息统计分析系统。该系统通过抓取调度自动化系统(OMS)、设备资产管理系统(PMS)和故障抢修系统(TCM)中的故障信息、设备运行数据、设备状态数据进行挖掘和智能处理, 在广域专网上打通了跨专业、跨单位、跨区域的现实壁垒, 实现了对上海市配电网运行状态在不同季节、不同负荷、不同运行方式等条件下故障信息统计分析的目标。通过对上述配电网故障信息统计分析的结果, 进而指导配网运维检修、技改规划、网架优化等配网提升工程。

关键词: 数据挖掘; 配网故障信息统计分析系统; 调度自动化系统; 设备资产管理系统; 故障抢修系统; 网架优化

Statistical analysis of the distribution fault based on multiple source and isomerism data mining technology

SONG Jie, XIE Haining, YANG Zenghui, ZHOU Jian, BAO Wei, LIU Jinsong, ZHOU Desheng, FANG Chen, CAI Lin
(State Grid Electric Power Research Institute, SMEPC, Shanghai 200437, China)

Abstract: A fault information statistical analysis system of distribution network is developed based on multi source and isomerism data environment over backwardness of the present city distribution network construction. The target of dynamic monitoring distribution network operation mode of Shanghai city has been realized by mining and intelligent processing the fault information, equipment operating data, equipment condition data under different season, different load and different operation mode in power dispatching management system (OMS), products management system (PMS) and trouble call management system (TCM). Realities barriers of multi-disciplinary, cross-unit and inter-regional are opened up in the WAN private network. Distribution upgrade projects, such as distribution operation maintenance, technical planning and network frame optimization, are then guided through the fault information statistical analysis system of distribution network.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2013BAA01B04).

Key words: data mining; fault information statistical analysis system of distribution network; power dispatching management system; products management system; trouble call management system; network frame optimization

0 引言

国家电网公司在十三五规划中明确提出了切实提升配电网发展质量的要求, 与当前电源建设、输变电建设相比, 配电网的建设相对滞后, 与我国当前的大规模城市化发展对配网的高要求不相适应。配电网如何积极应对突发事件, 不仅需要对自身运行状态有科学准确的评估^[1-7], 还要针对不断变化的工况及时作出必要的调整, 这就需要掌握覆盖辖区

内配网的准确、可靠、全面、及时的状态信息, 对其进行专业的分析判断, 获得故障类型、故障分布、故障与负荷关系、故障季节关联等方面的统计数据, 对配网运行状态进行动态评估, 为配网应急抢修、配网建设、网架改造的决策提供参考依据。

1 配电网大数据挖掘

一个地区反应和影响配网运行状态的相关信息纷繁复杂, 广泛分布于电网众多的应用系统中, 包括生产调度系统(EMS)、配网自动化系统(DMS)、设备资产管理系统(PMS)、设备维护检修/报修系统等, 跨专业、跨单位、跨部门; 数据类型有结构化

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目(2013BAA01B04)
(以大规模可再生能源利用为特征的智能电网综合示范工程)

数据,有非结构化数据,设备对象以数十万/百万计,这样的特性构成了本研究项目的大数据环境。我们需要从这些海量数据中发现挖掘出对配网运行状态研究有用的信息,针对不同的数据源设计适当的数据发现挖掘策略^[8],实现从业务系统中搜寻配网运行状态数据的目标。

1.1 生产调度系统数据挖掘规则

生产调度系统数据包含了直采数据、计算数据、分析数据、告警数据、负荷预测数据、仿真数据、网络拓扑数据等,其数据库系统的数据表有数百个之多,各数据表之间的逻辑索引关联非常复杂。本文以上海电网采用的 OPEN3000 系统为例,配网故障需要的主数据与辅助判断信息在 OPEN3000 的原系统中没有相关线索可用,需要我们根据基于对数据库结构的分析建立这种联系,这就使得数据的挖掘更复杂和繁琐。

通过对所需数据和 OPEN3000 系统数据结构的解析,明确了需要挖掘的数据分布于这样的数据集中,包括电压类型表、厂站信息表、间隔信息表、断路器信息表、测点遥信信息表、负荷表、SOE 登录表、遥控操作告警表、遥测采样定义表等。

由于 OPEN3000 系统是为调度服务的,上述数据集中的数据是要有选择性的抓取,主要规则如下。

遥信变位告警:选择事故分闸记录发生时间前后两个小时内关联的遥信变位数据列表,前后规定时间内不存在其事故分闸记录,二次遥信保护或遥信 SOE 数据中有包含保护动作关键字的记录,线路电流值出现非零现象(一般是指电流值不小于 5 A 的情况)。

二次遥信告警:选择事故分闸记录的发生时间前后两个小时内关联的二次遥信告警数据列表。

遥信 SOE:选择事故分闸记录的发生时间前后两个小时内关联的遥信 SOE 数据列表。

遥测采样数据:选择事故分闸记录的发生时间前后三个自然天的遥测数据曲线。

遥控操作告警:选择事故分闸记录的发生时间前后两个小时内关联的遥控操作数据列表。

TCM 故障分闸信息:选择事故分闸记录的发生时间前后十二个小时内对应厂站下的所有 TCM 故障分闸数据列表。

主变保护专项:选择事故分闸记录的发生时间前后五分钟内对应厂站下包含主变保护关键字列表的二次遥信告警数据列表和遥信 SOE 数据列表;

事故分闸信息:抓取选择时间段内的全部数据。

在上述规则中含有大量的时间参数,鉴于配网实际运行状态的多样性和复杂性,参数及参数的具

体数值是可以变化的,不同参数选择及数值选择都会关系到结果的准确性和数据的完整性。

1.2 设备资产管理系统(PMS)数据挖掘规则

PMS 生产管理系统中的数据来源几乎包括了电力系统的各个专业、部门和单位,有生产数据,有管理数据,有办公数据,有实验数据;有的是结构化数据,有的是非结构化数据;有系统自动生成的数据,有人工填报的数据,具有非常高的不准确性;不仅如此,系统中还存在很多干扰数据,即脏数据,从这样的系统中挖掘数据具有很大挑战性。

根据配网运行状态动态评估的需要及 PMS 系统数据状况,我们设计了在 PMS 系统中的代理数据挖掘规则如表 1 所示。

表 1 PMS 系统代理数据挖掘规则表

Table 1 PMS proxy data mining rules table

名称	数据类型	备注
FAULT_ID	BIGINT	故障分闸 ID
LINE_ID	BIGINT	线路 ID
SB_ID	BIGINT	设备 ID
LINE_NAME	VARCHAR(128)	线路名称
DDBH	VARCHAR(64)	调度编号
CITY_NAME	VARCHAR(60)	供电公司名称
FROM_CITY_NAME	VARCHAR(60)	起点供电公司名称
TO_CITY_NAME	VARCHAR(60)	终点供电公司名称
FROM_BDZ_ID	BIGINT	起点变电站 ID
FROM_BDZ_NAME	VARCHAR(128)	起点变电站名称
TO_BDZ_ID	BIGINT	终点变电站 ID
TO_BDZ_NAME	VARCHAR(128)	终点变电站名称
FROM_BAY_ID	BIGINT	起点间隔 ID
FROM_BAY_NAME	VARCHAR(128)	起点间隔名称
TO_BAY_ID	BIGINT	终点间隔 ID
TO_BAY_NAME	VARCHAR(128)	终点间隔名称
FROM_SWITCH_ID	BIGINT	起点开关 ID
FROM_SWITCH_NAME	VARCHAR(128)	起点开关名称
TO_SWITCH_ID	BIGINT	终点开关 ID
TO_SWITCH_NAME	VARCHAR(128)	终点开关名称

在 PMS 系统中按照上表中的要求从故障报告、检修报告、检修工单、调度故障填报、设备台账、线路资产、设备管理等子系统、子模块中进行数据的过滤查询,得到符合要求的数据流。

对满足 1.1 和 1.2 规则的数据,运用自带的专家系统判断逻辑对数据进行筛选、比对和匹配等智能处理操作,形成高度疑似配网故障数据集,送至电科院进行人工干预得到最终的判断结果。

2 数据智能处理

数据智能处理实质是指配网运行状态的逻辑判断分析处理,这个过程从数据抓取开始。数据的智能处理由两部分组成:一个是系统的自动判断处理,由系统根据所获得的信息,依据设计的判据逻辑进行处理得到配网的运行状态,即是否发生了事故跳闸;另一个部分是专业人员的判断处理,在系统的处理基础之上对故障信息的认定,其依据有系统

自动判断的基础,采集的辅助数据信息以及配网运行现场的回访调研、检修过程检查等^[9]。

在数据智能处理业务中,最为重要的是运行状态的定义,也就是配网故障的判断逻辑和依据^[10]。依据是比较好确定的,就是我们从各业务系统获取到的配网运行的数据,难以确定的是故障的判断逻辑。图1是故障抢修管理系统(TCM)中的事件与SCADA数据进行匹配的故障判断逻辑框图。

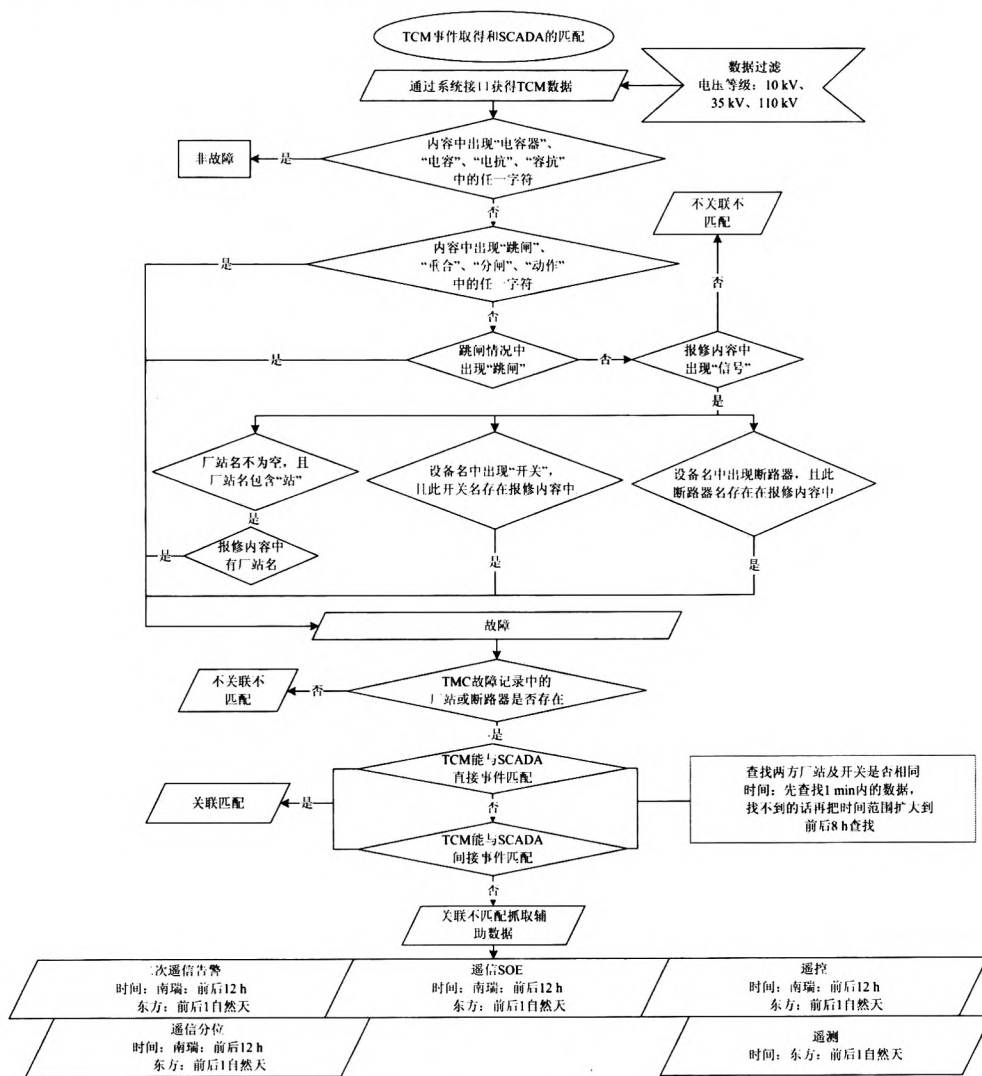


图1 TCM事件与SCADA数据的匹配

Fig. 1 Matching between TCM events and SACDA data

目前配网的设备状态信息主要来自于地调的自动化系统,配网的故障统计主要还以人工填报为主,这些信息分属不同的生产部门和生产系统,跨部门、跨平台,现实的数据分布状态不满足全面掌握配网运行动态数据的要求。

本系统根据配网运行管理这方面的需求,利用

调度自动化系统、故障抢修系统中的故障信息、设备运行数据、设备状态数据开展配网运行状态动态评估关键技术的研究,并在此基础上开展实用化应用。

2.1 线路非故障疑为检修智能处理

针对断路器类型为线路的事故分闸,根据遥信

分位和遥测数据,判断事故分闸是否疑为检修,如果符合疑为检修条件,设置事故分闸记录的标注为“疑为检修”,并且在前台展示画面高亮显示(橙色),供专业人员判断处理。具体判断逻辑参照以下规则。

1) 遥信变位:前后 15 min(时间可调)内出现 5 次(次数可调)及以上分闸记录。

2) 遥测数据:前后 30 min(时间可调)内,遥测电流值始终处于掉零状态(电流值小于等于 5 A 的情况)。

2.2 主变保护专项分析

针对主变断路器的事故分闸进行专项分析,根据以下判断规则,获取主变保护数据标记和遥测由有流变为无流标记^[11-13],保存两个标记的逻辑与、逻辑或结果,在前台展示画面高亮显示,供专业人员判断处理。

判据条件:

1) 前后一定时段内主变开关所在厂站出现包含“变”关键字,并且包含“保护”、“差动”、“瓦斯”、“压力释放”、“后备”、“分支过流”、“分支电流”、“过流”、“零流”、“零压”、“速断”、“有载”、“接地变过流”和“接地变零流”中的任何一个关键字的保护数据。

2) 以发生时间为中心,取指定时间段共三个点的电流值,出现由有流变为无流现象。

2.3 小电流接地故障判断

对于母线小电流永久单相接地故障判断处理^[14](永久故障一般指需人工处理的接地故障,故障期间接地信号是保持着的,由人工将其复归),过程如下。

1) 对 SCADA 的 3U0 阈值进行管理,并对 TCM、SCADA 数据进行抓取,根据抓取的数据进行故障匹配,匹配规则为:根据地市 ID 和厂站 ID 匹配 TCM 事件发生时间前后 1 min 内有无 SCADA 母线接地事件,如果有,就匹配第一条 SCADA 母线接地事件。如果没有,把时间扩大到 TCM 事件发生时间前后 2 h 内查找有无 SCADA 母线接地事件,如果有,就匹配第一个 SCADA 母线接地事件。

2) 如果匹配上了,就建立 TCM 与 SCADA 数据之间的关联关系,设置 TCM 数据为已匹配,设置 SCADA 数据的数据来源为 PMS、匹配标记为已与 TCM 匹配、添加提示信息为从 TCM 匹配自动化系统中匹配成功。

3) 如果没有匹配上,就根据 TCM 数据转换成一条 SCADA 数据,添加提示信息为从 TCM 中导入。

2.4 判据缺失补偿

在配网故障研判的实践过程中常常会出现关键或非关键判据的缺失,导致故障分析受阻,甚或停

滞。一种典型的情况是变位信号缺失,这可由多种原因引起,如变电站、开关站的综自系统水平参差不齐,信号传输过程中信号丢失或根本未上传,信号捕捉出现异常等等,变电站/开关站处于建设改造过程中也是此类现象发生的原因之一。为此需要对所缺失的判据进行补偿处理,方法之一就是 SOE 信号转换及事故总结,由此得到原本缺失的变位信号,继而进行下一步的逻辑处理。

2.5 多源故障校验

系统设计成从不只一个源头获取配网故障直接信息和辅助信息,在分别对其进行辨识、认证的基础之上,对源于不同渠道的故障信息进行发生时间、故障内容(描述)、故障对象、故障判断辅助信息(保护动作、SOE、电流变化等)等的多维度验证,在无歧义时自动设定其为确定性故障,在出现歧义时可以在允许的范围内调整参数二次判断,如仍有歧义存在,则提交人工干预,结合遥控、检修及现场查访对故障进行认定或撤除,经过此法检验后的统计分析结果具有极高的准确性,以及极低的故障遗漏概率。

3 配电网故障信息统计分析

通过配网运行状态动态分析系统,形成了配网故障跳闸统计日报、周报、月报,为供电企业相关部门提供了客观、全面、准确的配网运行状态数据。各专业管理部门通过对故障原因的专业分析,完成跳闸故障原因分析、停电分析及停电影响、极端天气故障跳闸分析等专项评估工作,以掌握配网运行情况,形成整改要求,督促设备业主单位进行整改,使配网设备检修、配网改造工作的开展有据可循,运营模式如图 2 所示。

3.1 10 kV 变电故障分析

综合故障抢修系统(TCM)中的数据,针对箱变、环网柜、流变、压变、套管、用户变电设备等变电一次设备故障进行统计分析,通过分析数据对各变电设备的运行状态和更换周期做出更加准确的判断。

按变电故障按照故障原因分,有细化到外力因素、设备质量、设备老化及设备安装不当等原因。外力因素,主要为野蛮施工;设备质量问题;设备老化;设计安装不当,主要为施工工艺不良造成故障;用户原因等。按照这些条件进行分类评估,可以对设备的运行状态和更换周期、生产厂商的资质、施工队伍的技术水平等指标进行更加科学和精确的评估^[15]。

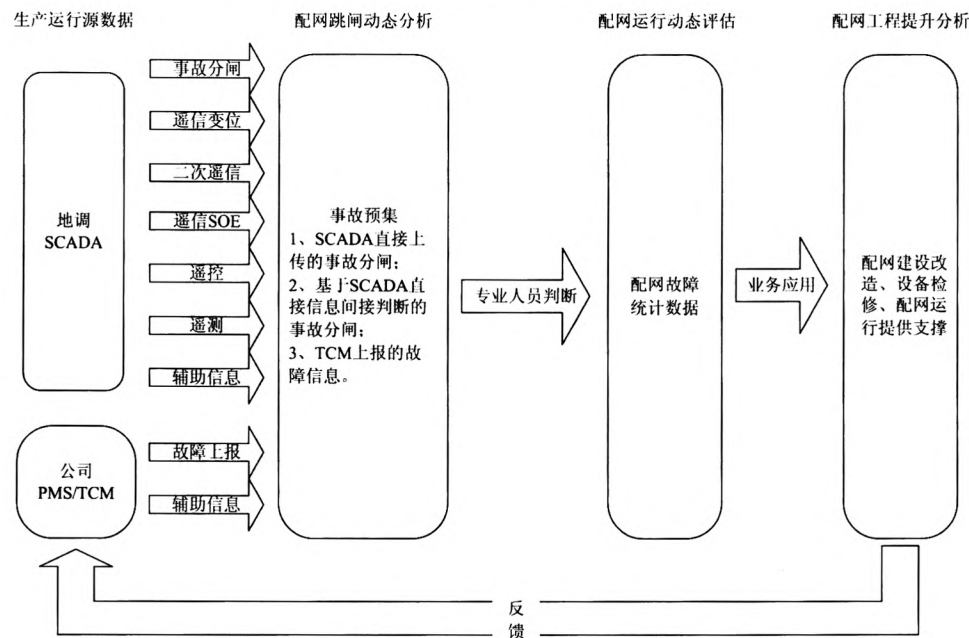


图 2 基于多源异构数据的配电网运行状态动态评估技术路线

Fig. 2 Technological route of dynamic evaluation of the distribution operation condition based on multiple source and isomerism data

3.2 故障停电影响分析及网架优化指导

配网运行状态动态评估对跳闸重合不成功/直接跳闸均做了影响用户分析。按照电压等级将用户分为 10 kV 用户和 380 V 用户，其中 10 kV 用户主

要为工矿企业等大用户，380 V 用户主要为商业用户和居民用户，同时对平均每起跳闸影响 10 kV 用户数、380 V 用户数均做了统计分析。某月各公司故障影响用户统计情况见表 2。

表 2 XX 月各供电公司故障影响用户统计

Table 2 Failure effect statistics of power companies in one month

供电 公司	重合不成功/直接跳闸								
	跳闸 次数	故障 次数	占比	影响用户数		跳闸平均 影响用户数		影响用户 分析情况	
				10 kV	380 V	10 V	380 V	未分析数	分析率
供电公司 1	11	9	81.82%	33	3 485	3.00	316.82	0	100%
供电公司 2	4	4	100.00%	7	4 381	1.75	1 095.25	0	100%
供电公司 3	9	9	100.00%	19	9 338	2.11	1 037.56	0	100%
供电公司 4	7	5	71.43%	13	430	1.86	61.43	0	100%
供电公司 5	8	7	87.50%	23	6 664	2.88	833.00	0	100%
供电公司 6	3	2	66.67%	25	836	8.33	278.67	0	100%
供电公司 7	4	1	25.00%	33	3 667	8.25	916.75	0	100%
供电公司 8	0	0	0.00%	-	-	-	-	0	100%
供电公司 9	5	4	80.00%	28	1 896	5.60	379.20	0	100%
供电公司 10	6	5	83.33%	19	5 152	3.17	858.67	0	100%
供电公司 11	2	2	100.00%	20	4 236	10.00	2 118.00	0	100%
合计	59	48	81.36%	220	40 085	3.73	679.41	0	100%

配网故障信息统计分析对跳闸总数、故障总数、重合不成/直接跳闸数、影响 10 kV/380 V 用户数均逐月进行了波动趋势分析，按照上述各指标的浮动对供电公司进行考核和评比。各指标在考核中所占权重不同，考核结果也会不同，各单位对停电率的重视程度也大大提高。

故障停电对用户的影响最直接，社会影响也最直接。电网规划水平直接或间接影响停电的用户数，通过对故障停电分析，停电时户数可以反映电网网架结构的优劣。将电网的规划与供电可靠性的管理有机地结合起来。规划配网时，考虑电源的布点、负荷的分布、负荷的性质对供电可靠性的要求^[16-21]。

同时,进一步将配网规划深化和细化,网络结构考虑网络的联络转供能力,实现分区供电,事故后便于网架重构,缩小停电范围。根据配网停电分析的结果,有针对性地消除供电瓶颈、提高配电网输送能力和可靠性,35 kV 及以上电网达到一级双电源标准,重要用户的电源应满足计划检修方式下的“N-1”准则,部分满足“N-1-1”准则;在负荷密度较高的区域采用在两个开关站间环进环出串接多个环网站的双环网网络接线模式;部分 10 kV 开关站的母线与其他开关站的母线构成环网连接、开环运行。

3.3 极端天气对配网故障影响的专项分析

极端天气情况下,如遇台风或者雷暴,配网跳闸事件较平时成倍增长,配网运行状态动态评估工作量将变得十分繁重。结合各雷击观测点的数据及 SCADA 上报的配网跳闸数据进行比对分析,积累长期的恶劣天气中配网跳闸数据,从中总结统计学规律,对于掌握地区电网应对不可抗拒极端天气的能力和提升配网安全运行水平有着重要的意义,下面以雷暴天气为例进行阐述。

3.3.1 雷电情况分析

为了提高配网故障信息统计分析系统的可信度和说服力,动态评估引入了雷电定位分析系统数据,并与中心气象台联网,统计供电区域内每月的有雷日、雷击地闪落雷数量等数据,对各单位管辖地域地闪参数如有雷日、有雷小时、密度、平均电流和平均回击数进行统计分析,对雷暴日进行重点监测。某日上海辖区内的遭受雷击分布如图 3 所示。

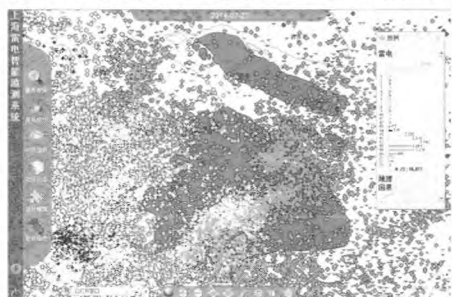


图 3 XX 日上海地区雷击分布图

Fig. 3 Lightning maps of Shanghai

3.3.2 雷击跳闸故障情况分析

掌握了雷击日的具体数据后,配网故障信息统计分析系统对雷击日造成的 10 kV 变电站出线跳闸数、重合成功数、重合成功率、造成的设备故障、对不同电压等级用户的影响进行统计分析。

通过统计上述数据与雷电分析系统提供的落雷时间及分布进行对比分析,并对上述数据吻合的区域故障设备进行分析,可以得出在雷击日中主要故障的设备类型,通常情况下受包括导线、绝缘子、柱上隔离开关遭雷击影响的统计分析。

4 结论

配网故障信息统计分析系统在广域专网上打通了跨专业、跨单位、跨区域的现实壁垒,创新性地 将配网运行状态信息在数据挖掘的基础上集成在统一的生产信息平台。建立了一个基于多元信息的配网故障智能判断方法,研发了一套模糊匹配规则库,可对线路疑似故障检修、主变故障、母线故障进行智能专题分析。实现了从不同业务系统中挖掘反映配网运行状态数据的目标,逐渐贯通配网跳闸动态分析、停电分析、故障分析、工程提升等各个环节,以配网跳闸动态信息为触发,以配网故障动态分析为信息传导,从运维检修、技改规划、网架优化多维度开展配网提升工程,大幅提升了配网运营效率和管理水平。

参考文献

- [1] 熊文,武鹏,余浩斌.基于负荷测录系统的配电网状态估计[J].电力系统保护与控制,2012,40(7):84-87.
XIONG Wen, WU Peng, YU Haobin. State estimation of distribution network by the load monitor system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 84-87.
- [2] 郑涛,潘玉美,郭昆亚,等.基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):77-83.
ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 77-83.
- [3] 黄佳乐,杨冠鲁.配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):41-45.
HUANG Jiale, YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 41-45.
- [4] 刘莉,陈学锋,翟登辉.智能配电网故障恢复的现状与展望[J].电力系统保护与控制,2011,39(13):148-154.
LIU Li, CHEN Xuefeng, ZHAI Denghui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 148-154.
- [5] 郑涛,潘玉美,郭昆亚,等.基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):77-83.
ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [6] 武鹏,徐群,沈忠旗,等.基于负荷监测系统的配电网

- 故障测寻方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 111-115.
- WU Peng, XU Qun, SHEN Zhongqi, et al. Application of load monitoring system in disposing fault of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 111-115.
- [7] 高赐威, 孔峰, 陈昆薇, 等. 一种配电网状态估计实用算法的探讨[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 80-83.
- GAO Ciwei, KONG Feng, CHEN Kunwei, et al. A novel and practical state estimation algorithm for power distribution network with complicated structure[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 80-83.
- [8] 朱明. 数据挖掘[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2002.
- [9] 王艳松, 衣良. 基于小波变换和强跟踪滤波器的配电网短路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 76-81.
- WANG Yansong, YI Liang. Location for interphase short circuit fault in distribution network based on wavelet transforms and strong tracking filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 76-81.
- [10] 李学平, 卢志刚, 刘照拯. 含分布式电源的配电网多故障抢修的多代理策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 48-55.
- LI Xueping, LU Zhigang, LIU Zhaozheng. Multi-agent strategy of distribution networks multi-faults rush-repair with distributed generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 48-55.
- [11] 杜辉, 王清亮, 张璐. 采用希尔伯特黄变换方法实现配电网故障选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 60-64.
- DU Hui, WANG Qingliang, ZHANG Lu. Fault line selection of distribution network based on Hilbert-Huang Transform[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(5): 60-64.
- [12] 廖志伟, 孙雅明. 基于事件序列数据挖掘原理的高压输电线路系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 22-27.
- LIAO Zhiwei, SUN Yaming. A new data mining approach for fault diagnosis of HV transmission line system based on sequence of events[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 22-27.
- [13] 殷万良, 刘万顺, 杨奇逊. 基于 IEC 61850 的通用变电站事件模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 45-50.
- YIN Wanliang, LIU Wanshun, YANG Qixun. Generic substation event model based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 45-50.
- [14] 刘道兵, 顾雪平. 基于配电自动化系统的单相接地故障定位[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 77-80.
- LIU Daobing, GU Xueping. Location technique of single phase grounding fault based on distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 77-80.
- [15] 康忠健, 田爱娜, 冯艳艳. 含DG配电网故障测距技术综述[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 7-12.
- KANG Zhongjian, TIAN Aina, FENG Yanyan. A review of fault location technology in distribution network with DG[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 7-12.
- [16] 王佳贤, 王建民, 程浩忠, 等. 配网设备年度更替决策方法的研究[J]. 华东电力, 2008, 36(2): 82-85.
- WANG Jiaxian, WANG Jianmin, CHENG Haozhong, et al. Annual replacement decision-making methods for distribution network equipment[J]. East China Electric Power, 2008, 36(2): 82-85.
- [17] 任明辉. 配网励磁涌流导致保护误动原因分析与抑制方法研究[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 59-63, 68.
- REN Minghui. Analysis and restraining method of protection malfunction caused by distribution network magnetizing inrush current[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 59-63, 68.
- [18] 肖峻, 高海霞, 葛少云, 等. 城市中低压配电网评估方法与实例研究[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 77-81.
- XIAO Jun, GAO Haixia, GE Shaoyun, et al. Evaluation method and case study of urban medium voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 77-81.
- [19] 杨滨. 配电网运行方式优化方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [20] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-31.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-31.
- [21] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PACAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2015-04-22; 修回日期: 2015-07-07

作者简介:

宋杰(1984-), 男, 通信作者, 工程师, 主要研究方向为配电自动化、调度自动化及计算机信息处理、智能配用电、电力系统继电保护、智能电网等; E-mail: songjie@sh.sgcc.com.cn

周健(1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为配电自动化及配电管理系统、变电站综合自动化、继电保护等。

(编辑 葛艳娜)