

设备的关联关系。

c. 通信系统模型:描述了访问点(AccessPoint)、子网(Subnetwork)等,及其与物理装置的连接关系。

基于 IEC61850 的智能变电站,具有全站统一模型 SCD。SCD 是变电站模型之源,站控层各个应用都可以基于此模型建设,也是上级调度模型之源和源端维护之源^[11]。

2 拓扑模型建立及拓扑算法

2.1 传统拓扑生成方法

目前,系统拓扑分析模型^[16-17]通常基于 IEC61970 CIM 模型构建,由图、模、库一体化平台根据一次接线图绘制过程中图元的连接关系自动生成元件、端点、节点,并分别为它们编号,由此电力网络模型就简化成了由拓扑节点和元件组成的网络形式。这种方法的主要优点是拓扑模型自动生成,效率高;缺点是对绘图工具的依赖性强,维护工作量较大,拓扑元素表示和存储方法没有统一标准,兼容性较差。

2.2 拓扑模型的构建

基于智能变电站,本文设计由 SCD 文件直接构建拓扑关系。

分析 SCD 文件中的变电站规范描述(SSD)部分,读取全站所有一次设备的主要信息。在 SCD 文件中一次设备之间的连接关系通过端点(Terminal)和连接点(ConnectivityNode)表示,每个导电设备(ConductingEquipment)包含 1 个或多个端点,每个端点连到一个连接点上。读取 SCD 文件中端点和连接点信息即形成一次设备的连接关系。设计 2 张表存放端点信息和连接点信息:端点表包含的属性有端点名、所属设备、所连接的连接点名,见表 1;连接点表包含的属性有连接点名、连接点路径,见表 2。

拓扑关系抽象为顶点集和边集构成的图论模型,根据需要设计顶点和边的数据结构,将实体信息

中的设备映射成边,连接点映射成顶点。数学模型中的边有且只有 2 个端点,所以需要不符合“边”模型的设备进行归一化处理,将单端设备、多端设备进行等效处理统一转化为双端设备模型。

2.3 归一化处理

变电站一次设备从功能上可以分为 2 类:零阻抗电气元件,用于切断或隔离电荷,有分、合 2 种状态,称作开关设备,如断路器、隔离刀闸等;非零阻抗电气元件,没有分、合状态,称作非开关设备,如电压互感器、变压器、线路等。开关设备在连接关系表示中都有 2 个端点,即 Term1 和 Term2,称为双端设备,而非开关设备的端点个数是根据其功能确定的,不一定为 2 个,称为非双端设备,如线路、电容器、电压互感器等属于终端设备,只有 1 个端点;两圈变压器有 2 个端点;三圈变压器有 3 个端点;母线有多个端点,端点个数取决于其上所连接的支路个数。

进行拓扑模型映射时要求所有一次设备都为双端设备,即有且只有 2 个端点。在不改变现有连接关系的前提下将非双端设备模型转化成双端设备模型。

2.3.1 单端设备的处理

针对单端设备虚拟 1 个端点使之成为双端设备,然后虚拟 1 个连接点,将虚拟端点关联到该虚拟连接点上。虚拟端点和虚拟连接点仅用作顺利建立拓扑模型和辅助计算,实时拓扑计算时并不赋予其实际意义。

以表 1 中的进线 1 为例,它是单端设备,只有 1 个端点 Term1。首先为进线 1 增加一个端点 Term2,创建一个虚拟连接点 N_Virtual,把 Term2 连接到 N_Virtual 上。处理后表 1 中对应增加一条记录如下:Term2,进线 1,N_Virtual。同时在表 2 中增加一条记录如下: $n,N_Virtual$,测试站/500 kV-1/进线 1/N_Virtual。其中, $n=k+1,k$ 为表 2 中的最后 1 个序号。

2.3.2 多端设备的处理

以三圈变压器处理为例,把变压器分解成 3 个独立设备,分别为该变压器的每个绕组先后增加 1 个虚拟端点和 1 个虚拟连接点,并将虚拟端点连接到上述虚拟连接点。假设某三圈变的端点和连接点分别如表 3、4 所示,分别为该变压器的每个绕组增加一个虚拟端点,然后增加一个虚拟连接点,命名为 N_Transformer1,并将该端点连接到 N_Transformer1 上,经过处理后的变压器端点表和连接点见表 5、6。

表 1 端点信息
Tab.1 Information of Terminals

端点名	所属设备	所连接的连接点名
Term1	进线 1	N0
Term1	50012	N1
Term2	50012	N0
Term1	5001	N1
Term2	5001	N2
⋮	⋮	⋮

表 2 连接点信息
Tab.2 Information of ConnectivityNodes

序号	连接点名	连接点路径
0	N0	测试站/500 kV-1/进线 1/N0
1	N1	测试站/500 kV-1/进线 1/N1
2	N2	测试站/500 kV-1/进线 1/N2
3	grounded	测试站/500 kV-1/进线 1/grounded
⋮	⋮	⋮

表 3 三圈变压器的端点
Tab.3 Terminals of three-winding transformer

端点名	所属设备	所连接的连接点名
Term1	变压器绕组相 1	N8
Term1	变压器绕组相 2	N9
Term1	变压器绕组相 3	N10

表 4 三圈变压器的连接点
Tab.4 ConnectivityNodes of three-winding transformer

序号	连接点名	连接点路径
0	N8	测试站/500 kV-1/1 号主变/N8
1	N9	测试站/220 kV-1/1 号主变/N9
2	N10	测试站/110 kV-1/1 号主变/N10

表 5 三圈变压器增加的虚拟端点
Tab.5 Virtual Terminals added to three-winding transformer

端点名	所属设备	所连接的连接点名
Term1	变压器绕组相 1	N8
Term1	变压器绕组相 2	N9
Term1	变压器绕组相 3	N10
Term2	变压器绕组相 1	N_Transformer1
Term2	变压器绕组相 2	N_Transformer1
Term2	变压器绕组相 3	N_Transformer1

表 6 三圈变压器增加的虚拟连接点
Tab.6 Virtual ConnectivityNodes added to three-winding transformer

序号	连接点名	连接点路径
0	N8	测试站/500 kV-1/1 号主变/N8
1	N9	测试站/220 kV-1/1 号主变/N9
2	N10	测试站/110 kV-1/1 号主变/N10
3	N_Transformer1	测试站/110 kV-1/1 号主变/ N_Transformer1

上述处理既维护了变压器在拓扑模型中的实际意义,又解决了双端建模的问题。

2.3.3 母线处理

母线的作用是汇集和分配电荷,在物理上它将多条支路连接在一起,而在拓扑模型中也没有将其看作一次设备,而是将其视为一个连接点(仅在拓扑分析中这样处理,其他应用未必如此)。因此无需处理母线设备,将其作为连接点添加到连接点表即可。

经过归一化处理后,设备和连接点对应图论中的顶点集和边集,将它们以数据库或数据文件的形式存储起来,就完成了拓扑建模的准备工作。

2.4 实时拓扑方法

实际拓扑建模时将顶点和边的数据读入,并分别进行编号,然后根据连接关系构造邻接矩阵形成静态拓扑模型。从监控系统实时库中采集开关、刀闸等设备的状态,状态取值 0 或 1,其中 0 表示该边不存在,1 表示该边存在。过滤静态拓扑模型中的邻接矩阵中不存在的边,得到新的邻接矩阵,该矩阵描述了各设备之间的动态连接关系,即实时拓扑关系。

实时拓扑图中相互连通的电气设备所组成的集合称为电气岛,电气岛可分为电源岛(岛内存在发电机或等效电源)、接地岛(岛内存在接地点)、负载岛(岛内存在负载点)、复合岛(同时具备 2 种电气岛的特征,如一个岛上既有接地点又有负载,则该复合岛既是接地岛又是负载岛)等不同类型。分析一个设备各个端点所处的岛便可以知道该设备的带电状态。

采用 SCD 模型文件构建拓扑关系,数据来源标准、直接,符合基于智能变电站开放和共享的特性及源端维护思想。同时,与传统方法相比省去了成图的中间过程,信息更准确,维护更简单。

3 拓扑防误的实现

3.1 防误元规则

有了实时拓扑的电气岛分析结果,还必须基于设备类型的元规则进行五防闭锁校验,元规则如下。

- a. 开关没有五防元规则。
- b. 隔离刀闸的五防元规则。

合规则:隔离刀闸一端处于接地岛上,另一端处于电源岛上时,不允许合操作;隔离刀闸一端处于负载岛上,另一端处于电源岛上时,不允许合操作。

分规则:假定该隔离刀闸已经分开,重新拓扑后如果一端处于负载岛上,另一端处于电源岛上时,不允许分操作。

例外情况:刀闸两侧经站内其他闭合的开关、刀闸连接为一个导通回路时(即分合刀闸之前两侧是等电位的),允许分操作。

- c. 接地刀(接地线)的五防元规则。

合规则:假定所有开关都合上,如果接地刀的非地端处于电源岛上,则不允许合接地刀(挂接地线)。

接地刀(接地线)无分规则。

3.2 拓扑防误的过程

电气岛的划分不需要在整站范围内进行,根据元规则的描述可知,只需判别待操作设备两端点所处的电气岛性质即可。过程如下:

- a. 从监控后台实时数据库中获取设备状态,更新到动态拓扑图上,形成反映实时连接关系拓扑图;
- b. 在实时拓扑图上分别以待操作设备两端点为起点向两侧搜索,搜索的结果为 2 个节点集合,每个节点集合即为 1 个电气岛;
- c. 遍历电气岛上的每个节点,根据节点属性确定该电气岛的属性,例如电气岛上有电源则为电源岛;
- d. 根据待操作设备类型匹配元规则,例如某设备为隔离刀闸,且两端分别处于电源岛和负载岛上,则该设备不能进行分合操作。

3.3 拓扑防误效果举例

如图 2 所示,假如进线 1 间隔处于运行状态,开关 5001 由于执行机构损坏而不能正常分闸,需要对其进行检修,常规做法是将线路对端开关拉开使进线 I 处于失电状态,与之相连

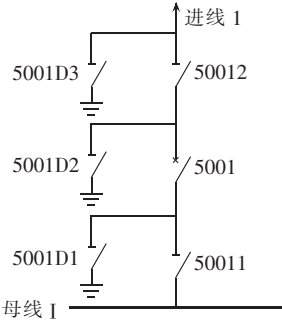


图 2 典型 110 kV 进线间隔
Fig.2 Typical 110 kV line bay

的 1 段母线也失电,然后将 50012 和 50011 拉开,再将 5001D2 和 5001D1 合上,才能对故障的开关 5001 进行检修。

对于传统的五防规则闭锁而言,开关、刀闸之间是有严格的操作闭锁逻辑的。不管该间隔是否带电,拉开刀闸 50011 或 50012 时,都会先判断开关 5001 是否已分开。假如此时开关 5001 未分开,则不允许拉开刀闸 50011 或 50012,除非特殊解锁,而解锁后会造成防误空白,带来一定的安全风险。

而基于元规则的拓扑防误是基于设备操作前后的带电状况分析来判断的,无需防误解锁。实时拓扑结构如图 3 所示(虚线表示该设备处于分位)。以 50012 为例,分别以 50012 两端点 N0、N1 为起点向两侧搜索得 2 个节点集合,分别记为岛 1 和岛 2;岛 1 包含的节点为 N0、N_Virtual;岛 2 包含的节点为 N1、N2、L0。岛 1 内的节点 N_Virtual 本来是电源点,但由于对端开关拉开导致其失电,因此岛 1 不是电源岛,岛 2 内的 3 个节点都不是电源点,因此岛 2 也不是电源岛,即 50012 两端都不位于电源岛,因此不会违反隔离刀闸的分规则,可以直接操作。拓扑防误无需解锁就能操作,体现了拓扑防误的智能性。

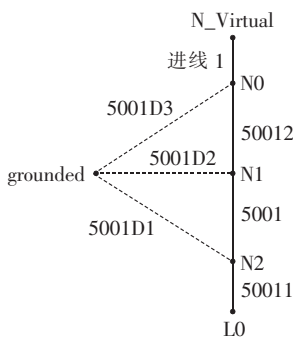


图 3 实时拓扑图
Fig.3 Real-time topology

4 在线防误的实现

4.1 主辅双引擎

变电站防误闭锁是电力网络基层的防误系统,与调度主站防误系统不同,它面对的闭锁对象更为复杂多样,不但包括一次设备、二次设备,甚至包括网门、柜门等非电设备。因此单纯的拓扑防误并不能完全满足变电站防误闭锁的要求。

在线防误系统同时具备基于拓扑和基于规则逻辑的防误闭锁,2 种防误闭锁方法分别由 2 个模块实现,也称为 2 个防误闭锁引擎,以主辅模式运行。

以基于拓扑的防误闭锁引擎为主,实现拓扑设备的防误;以基于规则逻辑的防误闭锁引擎为辅,实现非拓扑设备的防误。这种方式规则逻辑数量很少,功能上后者是前者的补充。

4.2 其他几个问题的处理

五防中的“防止误分合断路器”和“防止误入带电间隔”需结合操作票实现,系统根据模拟操作的操作序列顺序开放闭锁来防止误操作。系统还提供电脑钥匙接入功能,以实现就地操作时的防误。

远动五防的实现如下:远动通信服务器与后台监控系统都属于站控层,都能够采集全站 IED 的数据;通过软件技术的处理,站内拓扑存为文件,远动的拓扑算法、元规则、常规规则逻辑都可与监控系统共用。远动与后台监控系统的防误闭锁功能达到代码一套、算法一套、防误效果一样,仅部署不同而已。

5 现场应用

湖南长沙 110 kV 曾家冲智能变电站是国家电网公司首批试点的智能变电站,其 I 期投运的设备有:主变 1 台,110 kV 进线 2 回,10 kV 出线 12 回,无功补偿电容器组 2 组;110 kV 电气主接线采用扩大内桥接线,10 kV 采用单母线接线方式。该站的五防闭锁系统,除了有少量接地线、网门、柜门的规则逻辑之外,无其他设备的规则逻辑,体现了拓扑防误的简便性。该站于 2010 年底投运,是本文设计的一个成功案例。

6 结语

完全基于规则逻辑的防误闭锁具有诸多的缺点。结合国家电网公司《智能变电站技术导则》的要求,本文设计并实现了站控层在线防误。

SCD 模型文件描述了智能变电站的一、二次模型信息,利用 SCD 中的 SSD 部分构建静态拓扑关系,具有数据源标准、维护简单、便于集成共享的特点。

构建拓扑关系时,本文采用了图论模型,对非两端设备采用归一化的处理。在基于设备类型元规则的基础上,实现了拓扑防误。

在线防误同时具备基于拓扑和基于规则逻辑的防误闭锁引擎,它们以主辅模式运行,基于规则的逻辑引擎作为补充。

实际运行表明,上述设计的在线防误闭锁克服了完全基于规则逻辑的缺点,并且运行可靠,维护简单。

参考文献:

- [1] 黄文龙,程华,梅峰,等. 变电站五防一体化在线监控系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):112-115.
HUANG Wenlong, CHENG Hua, MEI Feng, et al. Design and realization of online substation monitoring and five-prevention integration system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23):112-115.
- [2] SACHDEV M S, DHAKAL P, SIDHU T S. A computer-aided technique for generating substation interlocking schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2):538-544.
- [3] STRUNGE C. Applying array-based logic to substation control for switch interlocking[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3):879-883.
- [4] BRAND K P, KOPAINSKY J, WIMMER W. Topology-based interlocking of electrical substations[J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 1986, 1(3): 118-126.
- [5] 余南华, 黄曙, 李先波, 等. 变电站五防控制规则自动生成技术思路[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 97-99.
YU Nanhua, HUANG Shu, LI Xianbo, et al. Technical ideas of auto-generation of misoperation prevention control rules in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 97-99.
- [6] 吴晓博. 根据变电站一次接线图导出闭锁公式的方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 73-77.
WU Xiaobo. Method of blocking formula deduction from substations primary wiring diagram[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 73-77.
- [7] 郑维明, 张沛超, 王锡生. 数字化变电站中闭锁逻辑自动生成专家系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 125-129.
ZHENG Weiming, ZHANG Peichao, WANG Xisheng. An expert system of automatic interlocking schemes generation for digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 125-129.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC61850-6:2004(E) Communication networks and systems in substations[S]. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2004.
- [9] 胡巨, 梁晓兵, 高新华, 等. 基于 GOOSE 的变电站在线式五防系统的实现[J]. 现代电力, 2010, 27(5): 12-15.
HU Ju, LIANG Xiaobing, GAO Xinhua, et al. Application of the on-line anti-maloperation system based on GOOSE in substation[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(5): 12-15.
- [10] 许先峰, 龚成明, 杜红卫, 等. EMS 中系统拓扑五防的设计和实现[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 76-79.
XU Xianfeng, GONG Chengming, DU Hongwei, et al. Plan and realization of mis-operation prevention based on topology in energy management system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 76-79.
- [11] 国家电网公司. Q/GDW383—2009 智能变电站技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [12] 张沛超, 高翔. 智能变电站[J]. 电气技术, 2010(8): 4-10.
ZHANG Peichao, GAO Xiang. Smart substation[J]. Electrical Engineering, 2010(8): 4-10.
- [13] 陈文升, 钱唯克, 楼晓东. 智能变电站实现方式研究及展望[J]. 华东电力, 2010, 38(10): 1570-1573.
CHEN Wensheng, QIAN Weike, LOU Xiaodong. Study and prospect of realization way of smart substation[J]. East China Electric Power, 2010, 38(10): 1570-1573.
- [14] 薛晨, 黎灿兵, 黄小庆, 等. 智能变电站信息一体化应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 110-114.
XUE Chen, LI Canbing, HUANG Xiaoqing, et al. Application of intelligent substation information integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 110-114.
- [15] 陈晓捷. 500 kV 智能变电站无人值班技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 149-152.
CHEN Xiaojie. Techniques of 500 kV smart unattended substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 149-152.
- [16] 韩国政, 邱洪泽. 面向间隔的电力网络拓扑分析方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 59-63.
HAN Guozheng, QIU Hongze. Bay-oriented power system network topology analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 59-63.
- [17] 于红, 朱永利, 宋少群. 图形数据库一体化的厂站接线拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 79-82.
YU Hong, ZHU Yongli, SONG Shaoqun. Station topology analysis with graphic database integrative technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 79-82.

作者简介:

蒋宏图(1972-), 男, 江西丰城人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: jhongtuly@163.com);

袁 越(1966-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为可再生能源发电技术、分布式发电与供电技术、微型电网、智能电网;

程 伟(1980-), 男, 山东平邑人, 主要从事变电站自动化系统的研发工作。

Design and implementation of online misoperation prevention for station control layer of smart substation

JIANG Hongtu¹, YUAN Yue¹, CHENG Wei²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Shanghai Siyuan Hongrui Electric Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: The present five preventive blocking is based on the rule logics, which has many shortcomings. The SSD(Substation Specification Description) of SCD(Substation Configuration Description) of IEC61850-based smart substation is analyzed to extract the topological information of all primary devices. The single-terminal or multi-terminal device is then normalized as dual-terminal device and its graph theoretical topology model is constructed. The element rules of misoperation prevention based on device types and the process of topological misoperation prevention are described. The designed online misoperation prevention mainly applies the topology-based misoperation preventive blocking engines to prevent the misoperation of topological devices while supplementarily applies the misoperation preventive blocking engines based on rule logics to prevent the misoperation of non-topological devices. Site operation shows that, the designed online misoperation prevention system runs reliably and its maintenance is simple.

Key words: smart substation; online misoperation prevention; SCD; IEC61850; topology; models