

DOI: 10.7667/PSPC170393

配电主站馈线拓扑模型校核方法研究

应俊¹, 梅军¹, 王勇², 嵇文路², 徐迅¹, 吴夕纯¹, 张明², 刘明祥³

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京供电公司, 江苏 南京 210019;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘要: 智能分布式馈线自动化(feeder automation, FA)与主站集中式 FA 协同控制能够实现故障的最优处理。在协同控制下, 馈线侧拓扑来源于配电终端的自动识别, 主站侧拓扑由地理信息系统(geographic information system, GIS)或生产管理系统(production management system, PMS)通过增量导入, 存在连通混乱, 与实际的拓扑运行方式不一致等问题。为实现基于智能分布式 FA 与主站后备的故障隔离和非故障区域恢复供电技术, 促使拓扑模型统一, 提出了在静态拓扑或者拓扑运行方式发生变化的情况下, 由主控智能配电终端启动拓扑查询功能并生成馈线拓扑文件。进而将该模型文件上传至配电自动化主站, 对主站侧的静态拓扑模型和动态拓扑模型进行校核, 实现了对主站侧拓扑模型的纠正。同时通过实验验证了该校核方案的可行性, 完全满足配电网的要求。

关键词: 智能分布式 FA; 主站集中式 FA; 拓扑模型; 拓扑查询; 静态拓扑; 动态拓扑; 校核

Research on verification method of feeder topology model for distribution main station

YING Jun¹, MEI Jun¹, WANG Yong², JI Wenlu², XU Xun¹, WU Xichun¹, ZHANG Ming², LIU Mingxiang³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China; 3. Nanjing NARI Technology Development Co., Nanjing 210061, China)

Abstract: Cooperative control between intelligent distributed FA and main station centralized FA can achieve the optimal fault handling. In the case of cooperative control, the feeder topology is derived from the automatic identification of distribution terminals. The main station topology is derived from the incremental import of geographic information system or production management system, which is chaotic and inconsistent with the actual topology operation mode. In order to realize the power supply technology of fault isolation and non fault area restoration based on intelligent distributed FA and main station reserve, and unify the feeder topology model, this paper presents a method that once the static topology or topology operation mode is changed, the main smart terminal unit initiates the function of topology query and generates the feeder topology file, the model file is uploaded to the distribution main station, the static topology model and dynamic topology model of the main station are checked, which can achieve the correction of main station topology. The feasibility of the verification scheme is verified by experiments, which fully meets the requirements of the distribution network.

This work is supported by 2016 State Grid Science & Technology project "research on technology of intelligent distribution terminal with the ability of Ad hoc network for distribution line".

Key words: intelligent distributed FA; main station centralized FA; topology model; topology query; static topology; dynamic topology; verification

0 引言

随着我国建设智能电网步伐的不断加快, 配电系统作为电网的薄弱环节, 引发了众多学者的探讨^[1-4]。目前, 在配电网中研究比较热门的馈线自动

化技术主要有两种^[5-9], 一种是分布式馈线自动化技术(feeder automation, FA), 其动作迅速、定位准确, 但缺乏精细隔离故障和优化恢复非故障区域的能力; 另一种是集中式 FA, 其对全网系统进行分析, 能给出最优控制策略, 但集齐全部故障信息是其做出判断的前提条件, 故障处理时间较长。在配电自动化系统架构下将主站集中式 FA 和智能分布式 FA 两种故障处理模式进行协同处理, 主站集中式 FA

基金项目: 国家电网 2016 年科技项目资助“具备配电线路自组网能力的智能配电监控终端技术研究”

作为后备控制,采用智能配电终端对配电网故障的快速处理与面向全网的主站优化分析相结合,能够相互取长补短,从而提高故障的处理性能^[10],其中统一、准确的拓扑模型是二者能够实现协同控制的基础。在智能分布式 FA 系统内,馈线拓扑模型主要通过配电终端自动识别的方式获取而不依赖主站下发。在主站集中式 FA 系统内,主站侧拓扑来源于地理信息系统(GIS)或生产管理系统(PMS)^[11],再由主站下发至配电终端,而主站中存在拓扑连接错误、馈线范围维护不对、孤岛结点及运行方式不一致等诸多问题^[12],与现场实际运行的拓扑存在模型不一致的情况。因此,为促使拓扑模型的统一,保证配电主站网络模型的准确性,亟需对主站侧拓扑进行校核。

针对配电网中馈线拓扑识别和校核的研究尚处于起步阶段。文献[13-15]分别提出了堆栈式查询、逐级式查询和接力式查询的方法,用于识别馈线拓扑结构。文献[16-17]介绍了馈线、静态拓扑以及动态拓扑的含义,提出了基于公共信息模型的馈线建模方法。文献[18]针对由 GIS 或 PMS 导入配电主站的网络模型缺乏全局性的校核手段问题,研究并设计了一种完整性的校核方法。文献[19]探讨了数据变化后调度自动化主备系统之间的模型数据校验流程,提出并制定了具体的校验方案。文献[20]针对调控一体化运行模式,提出了智能防误拓扑计算的环路拓扑搜索算法和开关单元模型。

本文针对在智能分布式 FA 与主站集中式 FA 协同控制下,如何建立准确、统一的拓扑模型问题,提出了采用馈线静态拓扑矩阵和微元拓扑矩阵,分别从整体和局部的角度分析馈线拓扑模型的方法。研究并设计了一种校核方案,即在静态拓扑或者拓扑运行方式发生变化时,以现场实际查询得到的拓扑为准,由主控配电终端启动拓扑查询功能,生成馈线拓扑文件并上传至主站,对主站侧馈线拓扑模型进行纠正和更新。

1 馈线拓扑

1.1 拓扑来源

1.1.1 主站下发

在主站集中式FA系统内,馈线的拓扑模型主要从GIS或者PMS导入主站,主站将拓扑信息下发给配电终端。

1.1.2 人工配置

馈线拓扑信息可以通过人工手段为配电终端配置,而在配电线路拓扑频繁变更的情况下,该方式工作量较大、灵活性较差。

1.1.3 自动识别

智能分布式FA提倡馈线自治,主控智能配电终端(STU)通过对等通信网络自动识别区域内拓扑信息。

1.2 拓扑查询

1.2.1 主控 STU 的选取

当配电网正常运行时,在馈线上选择一个配电终端作为代理配电终端即主控 STU,其主要负责该馈线拓扑模型的建立。本文将主控 STU 指定为出线断路器邻接开关所对应的配电终端,一旦该终端出现故障,则其相邻的配电终端临时转为主控 STU。如图 1(a)所示,STU2 和 STU2'分别是馈线 F1 和 F2 的主控 STU。

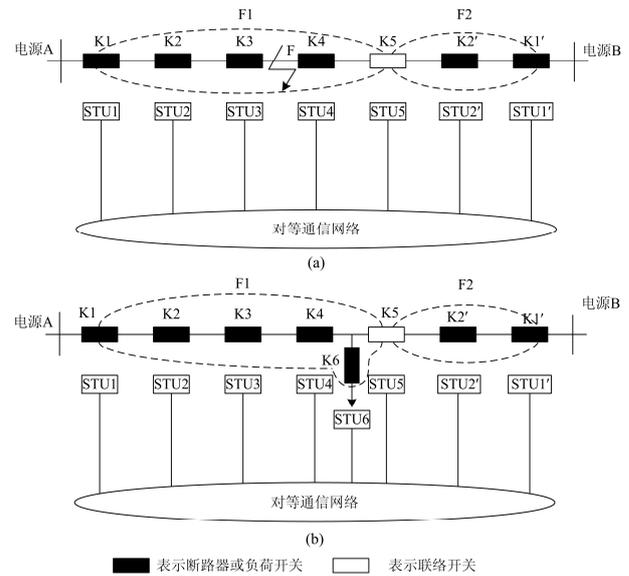


图 1 典型配电线路

Fig. 1 Typical distribution lines

1.2.2 查询方式

STU2 与 STU1 通信,判断出 STU1 监测的开关为出线断路器,该侧查询结束。STU2 同 STU3 通信,获取 STU3 的局部网络拓扑、开关状态以及 STU4 的通信地址等信息,接着与 STU4 通信,获取其局部网络拓扑、开关状态以及 STU5 的通信地址等信息,最后同 STU5 通信,知晓其监测的开关为联络开关,该侧查询结束。全部查询完毕后,拓扑文件由主控 STU 生成,包含该馈线拓扑、各开关状态以及供电电源点等信息。

1.3 拓扑分析

1.3.1 静态拓扑模型

静态拓扑指馈线正常运行时的网络元件的连接关系,静态拓扑的变化表现在网络元件的连接关系的变化,譬如开关的增减、设备名称的变更。如图 1 所示。

基于矩阵的馈线拓扑分析是以矩阵的运算为基础, 其结构描述清晰、适应性较强。对于图 1(a)的馈线 F1 的静态拓扑描述如下。

$$\begin{cases} J_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \\ J_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} J_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \\ J_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)对应于图 1(a)中馈线 F1 的静态拓扑, 式(2)对应于图 1(b)中馈线 F1 新增支线开关 K6 后的静态拓扑, J_1 是 STU2 左侧查询结果, J_2 是 STU2 全部查询结果。开关分为支线开关、干线开关和电源开关, 若新增开关为支线开关, 将其配置为干线开关和电源开关的下游开关。若新增开关为电源开关或者干线开关, 上下游关系则在电网正常运行条件下, 按照功率方向依次配置。 J_{ij} 取值为

$$J_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点相邻且 } K_i \text{ 位于 } K_j \text{ 上游} \\ 0 & \text{其他} \\ -1 & \text{节点相邻且 } K_i \text{ 位于 } K_j \text{ 下游} \end{cases}$$

1.3.2 动态拓扑模型

动态拓扑指配电线路发生故障或拓扑运行方式发生变化, 由开关分合形成的电网动态组合关系。从配电线路拓扑变化的角度看, 不管是故障前的负荷转供、线路检修, 还是故障发生后故障隔离、隔离后的非故障区域恢复供电等各种工况, 究其本质特征, 拓扑运行方式变化都是开关状态的突发“分合”变化所致。如图 1(a)所示, 当 F 点发生故障, 配电终端向相邻的配电终端发送检测到的电流信息。STU3 检测到故障电流信息, 而 STU4 未检测到该信息, 判断出故障发生在 K3 与 K4 之间。此时 STU3 和 STU4 分别控制 K3、K4 断开, STU5 控制联络开关 K5 闭合。此时原馈线的 K4-K5 段由电源 A 供电变为由电源 B 供电, 馈线重新建立其维护范围。

1.3.3 微元拓扑模型

馈线是配电系统的基本单元, 而微元拓扑模型是研究馈线的基本单元。微元拓扑模型, 包含线路具有直接电气连接的相邻节点的对象描述, 当配电线路拓扑发生变化时, 仅需修改变化点及相邻节点的模型信息, 而其他节点模型则完全保持不变, 更加适应配电线路拓扑的频繁改动。馈线的静态拓扑模型是从主控 STU 角度描述整条馈线网络元件连接关系, 微元拓扑模型是从各终端的角度描述局部网络元件连接关系, 两者之间存在一定的联系。

1) 正常运行: 如图 1(a)所示, 馈线 F1 包含以 K1、K2、K3、K4 为中心节点的四个静态微元拓扑, 微元拓扑模型如图 2。

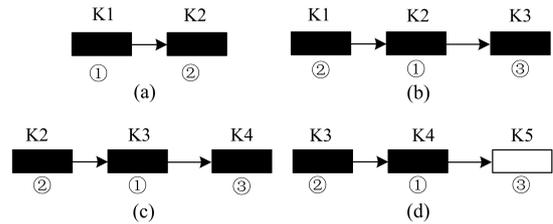


图 2 微元拓扑模型

Fig. 2 Infinitesimal topology model

$$B_1 = \begin{matrix} & k1 & k2 \\ k1 & \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

$$B_2 = \begin{matrix} & k2 & k1 & k3 \\ k2 & \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ k1 & & & \\ k3 & & & \end{matrix} \quad (4)$$

$$B_2 = B_3 = B_4 \quad (5)$$

2) 新增开关 K6: 如图 1(b)所示, 即新增一个以 K6 为中心节点的微元拓扑模型, 以 K4 为中心节点的微元拓扑模型发生变化, 如图 3。

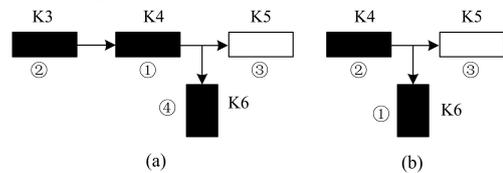


图 3 微元拓扑变更模型

Fig. 3 Infinitesimal topology change model

$$B'_4 = \begin{matrix} & k4 & k3 & k5 & k6 \\ k4 & \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \\ k3 & & & & \\ k5 & & & & \\ k6 & & & & \end{matrix} \quad (6)$$

$$B'_6 = \begin{matrix} & k6 & k4 & k5 \\ \begin{matrix} k6 \\ k4 \\ k5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

矩阵中的 B_{ij} 取值为

$$B_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点相邻且} K_i \text{位于} K_j \text{上游} \\ 0 & \text{其他} \\ -1 & \text{节点相邻且} K_i \text{位于} K_j \text{下游} \end{cases}$$

3) 线路 F 点故障: 如图 1(a)所示, 当 F 点发生故障, K3、K4 断开, K5 闭合。此时原馈线分别以 K2、K3、K4 为中心节点的微元拓扑模型发生变化, 如图 4 所示。

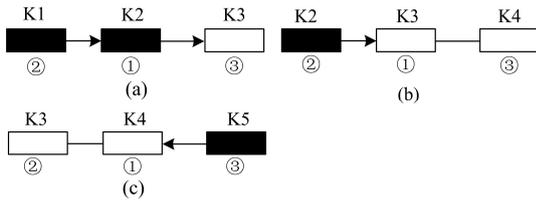


图 4 实时微元拓扑模型

Fig. 4 Real time infinitesimal topology model

用 S 来表示开关状态, 0 表示断开, 1 表示闭合。按照以下形式定义。

$$S_2 = (K2 \ K1 \ K3) \quad (8)$$

$$S_3 = (K3 \ K2 \ K4) \quad (9)$$

$$S_4 = (K4 \ K3 \ K5) \quad (10)$$

分别将其构建为对角矩阵 S_2^* 、 S_3^* 、 S_4^* , 于是将 B 与 S^* 相乘, 得到实时微元拓扑矩阵 C 。

$$C_2 = B_2 \times S_2^* = \begin{matrix} & k2 & k1 & k3 \\ \begin{matrix} k2 \\ k1 \\ k3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

$$C_3 = B_3 \times S_3^* = \begin{matrix} & k3 & k2 & k4 \\ \begin{matrix} k3 \\ k2 \\ k4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

$$C_4 = B_4 \times S_4^* = \begin{matrix} & k4 & k3 & k5 \\ \begin{matrix} k4 \\ k3 \\ k5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (13)$$

以式(12)为例, C_3 为实时的微元拓扑模型, $C_{12} = -1$, 其余均为 0。结合 B_3 可知, K2-K3 段处于连通状态, 由 $C_{21} = 0$ 可知, K2 或 K3 某个开关处

于断开状态。再由 $C_{13} = 0$, $C_{31} = 0$ 可知, K3-K4 段是故障区域。

1.4 模型传输

配电网中常用的通信规约包含 IEC60870-5 系列规约、DL451-91 规约等。国家电网推荐使用 IEC60870-5-104, 虽然 IEC60870-5-104 比较好地支持即时信息的传输, 但并不支持模型信息的传输, 不利于拓扑信息的传输。对此, 国网电科院已编纂 IEC60870-5-104 扩展协议, 并在南京江北新区市域“O 型双环”配电示范线路采用其实现了模型文件的传输。Web Service 虽然支持模型文件传输却存在严重的安全性问题, 目前 IEC TC57 工作组明确表示不再支持 Web Service, 同时工作组还提出了采用安全性较好的 XMPP 协议取代 Web Service 用于模型文件传输的构想。

表 1 四种通信协议比较

Table 2 Comparison of four kinds of communication protocol

	实时性	安全性	带宽占用	模型支持
XMPP	好	好	高	好
Web Service	一般	差	高	好
IEC 104	好	好	低	差
扩展 IEC 104	好	好	低	好

由表 1 可知, 本文宜采用 IEC60870-5-104 扩展协议传输拓扑模型。

2 拓扑校核

2.1 校核框架

能量管理系统(EMS)包含厂站、母线、断路器等校核对象, 配电管理系统(DMS)包含馈线、开关、负荷等校核对象。触发拓扑查询并校核的条件: 静态拓扑或拓扑运行方式发生变化, 同时根据需要可设置定时校核。按照处理顺序总体分为三个步骤, 如图 5 所示。

步骤一: 主控 STU 启动拓扑查询功能, 进而生成拓扑文件并上传至配电自动化主站, 一旦开关动作, STU 实时上传开关动作信息给主站。

步骤二: 校核程序从 EMS/DMS 数据库抽取该馈线同时时间层次下的拓扑信息与馈线侧上传的拓扑文件校对, 根据结果对 EMS/DMS 数据库进行更新, 重新生成新的网络拓扑运行信息模型。

步骤三: 由消息中心向相关应用程序推送拓扑校核结果以及 EMS/DMS 数据库更新信息。

2.2 校核项目

拓扑校核分为配电线路属性、开关等设备属性、静态拓扑以及动态拓扑的校核。校核项目具体如表 2 所示。

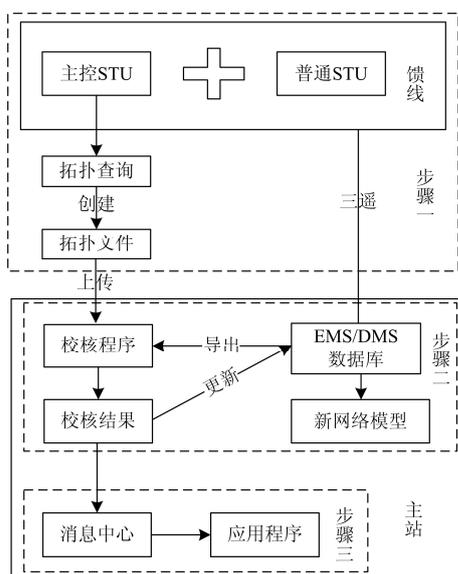


图5 拓扑校核框架

Fig. 5 Topology check framework

表2 校核项目

Table 2 Verification items

类别	依据	项目
线路属性	线路命名原则 馈线定义	线路编号
		线路名称
		电压等级
		厂站编号
开关等设备属性	开关等设备命名原则	开关等设备编号
		开关等设备名称 各个STU属性
静态拓扑	静态拓扑定义	主控STU的IP地址
		静态微元拓扑模型
		馈线静态拓扑模型
动态拓扑	动态拓扑定义	各个开关状态
		各节点供电电源点 实时微元拓扑模型

线路属性校核根据线路命名原则和馈线定义，对线路编号、线路名称、电压等级和厂站编号进行校核，确保线路属性正确；开关等设备属性校核主要统计出各个开关设备编号、名称以及监测各个开关的STU属性，保证馈线拓扑模型的完整性，为静态和动态拓扑校核做铺垫；静态拓扑校核主要从整体和局部考虑馈线的网络元件连接关系，是动态拓扑校核基础；动态拓扑校核重点关注于开关状态信息、供电电源点以及拓扑运行方式的变化，是拓扑校核的核心。

2.3 校核核心算法

关于线路属性以及开关等设备属性的校核可以通过语义识别技术实现校核，本文不作详述。

1) 静态拓扑校核算法描述

(1) 根据主控STU上传至主站的拓扑信息，构建静态微元拓扑模型集 A 和静态拓扑矩阵 J 。

(2) 根据主站EMS/DMS数据库的拓扑信息，构建静态微元拓扑模型集 A' 和 J' 。

(3) 比较 J 和 J' ，若 $J = J'$ ，则静态拓扑未发生变化。若 $J \neq J'$ ，则核实主控STU的身份信息，如果身份无误，则静态拓扑发生变化，将 J 保存至EMS/DMS数据库并转至第(4)步，如果主控STU身份变化，将该代理配电终端记为主控STU并发出“原主控STU异常”信息，由人工对异常终端进行维护。

(4) 比较 A 和 A' ，若 $cardA = cardA'$ ，表明节点数量一致。若 $cardA \neq cardA'$ ，表明节点数量发生变化，静态拓扑结构有变。对集合 A 和 A' 中的每个静态微元拓扑模型 B 和 B' ，检查其所属节点。对同属某个节点的 B 和 B' 进行校核，若 $B = B'$ ，则合法，否则将其记录在异常集 H 中。

2) 动态拓扑校核算法描述

(1) 根据主控STU上传的拓扑文件及实时上传的开关位置信息，构建待校核的实时微元拓扑模型集 T 、开关状态集 S 以及供电电源点对应的开关设备集 M 。

(2) 根据主站EMS/DMS数据库的信息，构建待校核的实时微元拓扑模型集 T' 、开关状态 S' 以及供电电源点对应的开关设备集 M' 。

(3) 比较 S 和 S' ，对集合 S 和 S' 中的每个开关状态检查其所属节点。对同属某个节点的状态 s 和 s' (取0或1)进行校核，若 $s = s'$ ，则合法，否则将其记录在异常集 E 中。

(4) 比较 T 和 T' ，对集合 T 和 T' 中的每个微元拓扑模型 C 和 C' ，检查其所属节点。对同属某个节点的 C 和 C' 进行校核，若 $C = C'$ ，则合法，否则将其记录在异常集 F 中。

(5) 比较 M 和 M' ，若 $M = M'$ ，则合法，否则将满足 $k \in M$ 且 $k \notin M'$ 的 k 置于 M' 以及满足 $k' \notin M$ 且 $k' \in M'$ 的 k' 于 M' 删除。

根据获取的异常集合，进行馈线拓扑分析，对EMS/DMS数据库进行选择性的更新，人工确认后，生成新的网络拓扑运行信息模型，将由消息中心通知高级应用软件关于网络模型更新的信息。

3 实验验证

根据上述总体设计框架以及校核算法，采用某D5200配电主站系统以及新研发的PDZ900系列终端，同时开发了一套IEC61850标准到IEC61968标准的映射转换软件，便于拓扑文件由SCL模型到CIM模型的转换。拓扑查询和校核应用程序均采用

了 C++ 编程。

如图 6 所示, 正常运行时, K7 处于分闸状态即联络开关, RMU1 和 RMU2 为环网柜。在以下两种情况下各进行 10 次实验: 1) 线路增加分段开关; 2) 线路各处设置故障。

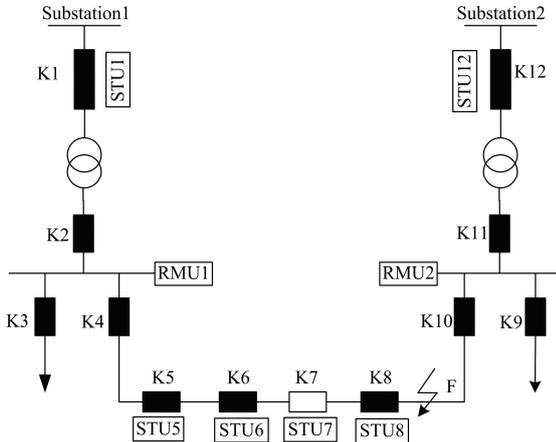


图 6 配电线路测试系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of test system for distribution line

观察配电终端拓扑查询结果, 记录查询及校核时间。实验结果表明, 当增加开关时, 其中一次出现静态拓扑模型不匹配, 其他情况下, 拓扑模型均表现一致; 当线路发生故障时, 其中二次出现馈线维护范围以及联络开关状态信息异常情况, 经人工确认后, 消息中心推送了校核结果和 EMS/DMS 数据库更新信息, 实现了对主站侧的拓扑纠正, 重新生成了新的网络拓扑模型。经过多次反复测试, 实时性能够满足配电网的基本要求。

4 结论

本文阐述了智能分布式 FA 与主站集中式 FA 协同控制优点, 为实现基于智能分布式 FA 与主站后备的故障隔离和非故障区域恢复供电技术, 确保馈线拓扑模型的一致性以及准确性, 提出了在静态拓扑或者拓扑运行方式发生变化时, 由馈线侧的主控配电终端发起拓扑查询生成拓扑文件并通过 IEC60870-5-104 扩展协议上传至配电自动化主站, 进行了静态拓扑和动态拓扑的校核, 实现了对主站侧的拓扑模型纠正和更新。后期工作会对实验方案以及算法性能加以完善。

参考文献

[1] 冯语晴, 杨建华, 黄磊, 等. 配电网智能化评价指标体系研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(3): 84-90.
FENG Yuqing, YANG Jianhua, HUANG Lei, et al. Study on evaluation index system of intelligent distribution

networks[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(3): 84-90.

[2] 杨江. 电网发展协调性评价指标体系研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 55-59.
YANG Jiang. Study on development coordination evaluation indicators system of power grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 55-59.

[3] 李艳, 李德强, 陈育良, 等. 含分布式电源的配电网供电可靠性评估方法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 25-28.
LI Yan, LI Deqiang, CHEN Yuliang, et al. Research on the method of power supply reliability evaluation of distribution network with distributed generation[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 25-28.

[4] 李文汗, 赵冬梅, 王心, 等. 考虑分布式电源并网的配电网适应性评价方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 117-123.
LI Wenhao, ZHAO Dongmei, WANG Xin, et al. Adaptability evaluation for the distribution equipment considering distributed generations[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 117-123.

[5] 郝洪震. 分布式馈线自动化原理与方案设计[D]. 济南: 山东大学, 2015.
HAO Hongzhen. Theory and design of distributed feeder automation system[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[6] 杜东威, 叶志锋, 许永军. 基于 GOOSE 的综合型智能分布式馈线自动化方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 183-190.
DU Dongwei, YE Zhifeng, XU Yongjun. A solution of integrated intelligent distributed feeder automation based on GOOSE[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 183-190.

[7] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 一种馈线自动化仿真培训系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 131-136.
GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. A simulation training platform for feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 131-136.

[8] 王良. 智能配电网自动化应用实践的几点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 12-16.
WANG Liang. Discussion on application practice of distribution automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 12-16.

[9] 高孟友. 智能配电网分布式馈线自动化技术[D]. 济南: 山东大学, 2016.
GAO Mengyou. Distributed feeder automation technology for smart distribution network[D]. Jinan: Shandong

- University, 2016.
- [10] 刘健, 张小庆, 陈星莺, 等. 集中智能与分布智能协调配合的配电网故障处理模式[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2608-2614.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, CHEN Xingying, et al. Fault location and service restoration for distribution networks based on coordination of centralized intelligence and distributed intelligence[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2608-2614.
- [11] 樊俊言. 馈线自动化终端设备的信息模型及接入方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
FAN Junyan. Research for the information model and access method of feeder automation terminal equipment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
- [12] 陈连杰, 韩冰, 赵家庆, 等. 利用自动成图的配电网模型拓扑校核技术及实现[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 160-164.
CHEN Lianjie, HAN Bing, ZHAO Jiaqing, et al. Automatic graphing based verification techniques for model topology of distribution network and implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 160-164.
- [13] 李培亮, 王敬华, 张新慧, 等. 网络拓扑识别在配电网分布式控制中的应用[J]. 齐鲁工业大学学报, 2015(2): 61-65.
LI Peiliang, WANG Jinghua, ZHANG Xinhui, et al. Distribution network topology automatic identification technology for distribution grid distributed control application[J]. Journal of Qilu University of Technology, 2015(2): 61-65.
- [14] 范开俊, 徐丙垠, 董俊, 等. 基于智能终端逐级查询的馈线拓扑识别方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 13(11): 180-186.
FAN Kaijun, XU Bingyin, DONG Jun, et al. Identification method for feeder topology based on successive polling of smart terminal unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 33(3): 180-186.
- [15] 高孟友, 徐丙垠, 范开俊, 等. 基于实时拓扑识别的分布式馈线自动化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 127-131.
GAO Mengyou, XU Bingyin, FAN Kaijun, et al. Distributed feeder automation based on automatic recognition of real-time feeder topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 127-131.
- [16] 王伊晓, 刘东, 赵江河, 等. 基于 IEC61968 的电网静态拓扑模型表达方式研究[J]. 华东电力, 2013, 41(12): 2449-2455.
WANG Yixiao, LIU Dong, ZHAO Jianghe, et al. Representation method of static electrical network topology based on IEC61968[J]. East China Electric Power, 2013, 41(12): 2449-2455.
- [17] 陆一鸣, 刘东, 黄玉辉, 等. 基于 CIM 的馈线建模和应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 157-163.
LU Yiming, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Feeder modeling and application based on CIM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 157-163.
- [18] 韩冰, 韩韬, 陈连杰, 等. 配电网主站网络模型校核方法设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 75-79.
HAN Bing, HAN Tao, CHEN Lianjie, et al. Design and implementation of network model verification method for distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 75-79.
- [19] 赵家庆, 赵裕啸, 丁宏恩, 等. 电网调度自动化主备系统间模型正确性校验技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 139-144.
ZHAO Jiaqing, ZHAO Yuxiao, DING Hongen, et al. Technical scheme for the verification of grid models between the active and standby systems in power dispatching automation system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 139-144.
- [20] 李功新, 黄文英, 任晓辉, 等. 调控一体化系统防误校核研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 97-102.
LI Gongxin, HUANG Wenying, REN Xiaohui, et al. Research on anti-misoperation check in integrated dispatching and control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 97-102.

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-06-22

作者简介:

应俊(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网; E-mail: 878417046@qq.com

梅军(1971—), 男, 教授, 研究方向为智能配电网。
E-mail: 1520592170@qq.com

(编辑 周金梅)