

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210075

基于层次聚类法与皮尔逊相关系数的配电网拓扑校验方法

张华¹, 龙呈¹, 胡思洋², 廖凯², 高艺文¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 配电网拓扑日益复杂, 且新投异动量不断增长, 导致配电网拓扑频繁变化, 传统的人工校验方式难以满足快速性和准确性的要求。针对该问题提出了一种基于模型文件和实测数据相关性的中低压配电网拓扑在线校验方法。首先, 将配电网设计图纸的拓扑模型文件作为校验基础, 以分析开关量状态的方式建立简化模型。其次, 采用层次聚类法划分出多个供电区域。然后, 使用皮尔逊相关系数算法校验同一供电区域内各节点数据的相关性, 以此判断模型拓扑连接关系的正确性。最后, 通过仿真验证和实际案例计算, 验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 拓扑校验; 层次聚类法; 皮尔逊相关系数

Topology verification method of a distribution network based on hierarchical clustering and the Pearson correlation coefficient

ZHANG Hua¹, LONG Cheng¹, HU Siyang², LIAO Kai², GAO Yiwen¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Distribution network complexity increases. This, along with the number of new switchings results in the frequent changes of network topology. Traditional verification method is difficult to meet the requirements of rapidity and accuracy. In this paper, an online verification method of medium and low voltage distribution network topology based on a model file and the correlation of measured data is proposed. First, the topology model file of the distribution network design drawing is used as the verification basis, and a simplified model is established by analyzing the switching state. Secondly, a hierarchical clustering method is used to divide multiple power supply areas. Then the Pearson correlation coefficient algorithm is used to verify the correlation of the measured data of each node in the same power supply area, so as to judge the correctness of the topological connection relationship of the model. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by simulation and actual case calculation.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521997190014) and the National Natural Science Foundation of China (No. U1766208).

Key words: distribution network; topology verification; hierarchical clustering method; Pearson correlation coefficient

0 引言

随着泛在电力物联网、主动配电网等技术的发展及国家相关建设的需求^[1], 配电网除配送电任务外, 还将承担连接用户与供应商、完成信息共享、传递控制指令、进行设备监测等工作, 正确的配电网拓扑结构是配电网顺利完成的基本保障, 也是配电网保护方案实施的前提^[2-3], 因此配电网中正

确的拓扑关系至关重要^[4-7]。近年来配电网线路规划数量不断增长, 分布式电源(DG)等设备投入量提升, 致使配电网结构日趋复杂^[8-10], 同时, 随着主动配电网和智能电网的建设与发展, 配网拓扑灵活性提高, 变电站和 DG 等设备投切量增大^[11-12], 进而导致电力设备的新投异动量逐渐攀升, 在一定程度上改变了配电网原有的网架拓扑结构与源荷连接关系, 使其与设计图纸间出现明显的区别, 若无法掌握配电网拓扑结构的实时信息, 将难以进行配电网的控制与调度等工作, 从而影响了配电网的智能化建设, 因此, 对配电网拓扑结构进行校验, 获得

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(521997190014); 国家自然科学基金项目资助(U1766208)

实时准确的网架信息具有重要的意义。

对于配电网拓扑结构的校验工作, 目前大多依赖人工现场识别的方式进行校验与维护^[13], 此方式需派遣相关人员沿配电网线路至各现场进行识别, 主要包括人工现场清理和台区识别仪现场处理两种方法^[14-15], 人工现场识别方式存在识别效率低下、工作量巨大、时间成本和人力成本较高^[16]、校验结果的完整性和实时性难以得到保证等问题, 基于此, 国内外众多学者展开了配电网拓扑结构在线校验的相关研究。文献[17]基于配电网主站系统, 利用统计服务及拓扑服务, 针对全局性网络模型设计了一种配电网模型校验方法, 但其中涉及数据类型和服务算法种类较多, 对系统维护要求较高且流程较为复杂, 不利于推广使用; 文献[18]提出了一种基于动态时间序列分割的电压相关性分析方法, 用于低压配电网的拓扑校核, 此方法在相关性判别的阈值选择上缺少明确的阈值选择依据, 因此存在误判隐患, 且在面对大规模的配电网时, 校验效率较低; 文献[19]根据在一天内系统中各处电压谐波的变化规律, 识别出各个用户在拓扑中的位置, 进而对整个拓扑结构进行识别, 文献[20]采用了基于主成分分析法的拓扑校验方法, 通过对负荷数据进行奇异值分解来得到电网拓扑结构, 此类方法具有较高的智能化和自动化水平, 但对数据记录的精确度有较高的要求; 文献[21]利用 LoRa 通信技术、高性能计算技术以及大数据方法, 对于大规模安装的智能电能表的数据进行获取和分析, 有效辨识台户之间的对应关系, 进而实现拓扑校验, 文献[22]用台区区分和相位识别技术获取了台区归属及相别分支的基本信息, 基于此恢复了台区内的分支, 用节点电力线测距辅助获得更加贴近物理现实的拓扑信息, 依据以上获得的信息重构台区电网的拓扑结构, 此类研究以相似性识别为基础, 结合大数据统计进行分析, 是近年的热点研究, 但当前大数据算法不够成熟, 大数据处理对设备要求较高, 应用难度较大。

针对上述问题, 本文以实测数据的相关性为拓扑校验的基本准则, 从模型文件出发, 对供电区域进行划分, 提出了一种分区进行的配电网拓扑结构在线校验方法, 解决了现有研究中数据要求高、算法复杂难以推广及可靠性和效率较低的问题。首先基于配电网拓扑结构的模型文件, 分析开关的状态, 建立简化模型去除冗余的工作量; 然后用层次聚类的思想对供电区域进行划分; 之后计算各供电区域内所有节点实测数据的皮尔逊相关系数, 通过比较其相关性来校验模型拓扑连接的正确性; 最后根据 10 kV 配电网实测数据来验证该算法, 证实了本文

所提算法能准确高效地识别出拓扑中的错误单元, 并具有实际应用价值。

1 配电网拓扑图的构建与简化

配电网拓扑图的正确构建是拓扑分析的基础, 其内容主要包括电气设备属性和拓扑信息。模型文件和 GIS 系统模型存在着同构异形关系, 需要校验拓扑对象电气设备的完整性和拓扑连接关系的正确性。电力系统中的断路器和隔离开关等电气设备增加了拓扑结构的广度和复杂度, 并且闭合状态下两侧拓扑节点的电气特性差异较小。为了规范拓扑结构和提高运算效率, 需要合并连接状态下电气开关设备两侧的节点, 简化并生成配电网拓扑模型。

1.1 拓扑信息的校验

拓扑信息的校验内容包括拓扑对象的完整性和拓扑连接关系的正确性, 拓扑对象主要包含厂站、变压器、断路器、隔离开关、母线和杆塔等, 拓扑连接关系为拓扑对象之间的电气连接状态。从设备的类型、编号和参数等属性校验拓扑对象的完整性, 输出校验结果异常的拓扑对象, 并提示操作人员进行修正。其次, 根据模型文件和 GIS 系统模型中拓扑对象的连接关系, 以及开关量的开断状态, 检查拓扑连通性是否一致。拓扑图校验过程如图 1 所示。

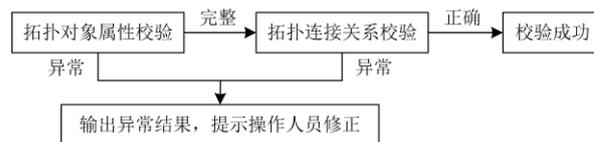


图 1 拓扑信息的校验过程

Fig. 1 Verification process of topological information

1.2 拓扑图的简化

拓扑图通常以厂站、母线、杆塔等为节点, 变压器、断路器、隔离开关、导线等为支路构建而成。在拓扑图中, 断路器和隔离开关两侧节点的电气量基本相同, 可将其归并为同一节点。此时, 配网拓扑图中的节点数将显著减少, 节点间的区分度也更明确。

拓扑图的简化过程通过形成并修正节点连接表 E 来实现, 节点连接表 E 包含系统节点编号、连接电气设备的类型和编号。逐次判断电气开关设备的连接位置和开关状态, 并将所有闭合开关设备连接两侧的节点归并, 断开开关设备从节点连接表 E 中剔除, 最终形成简化的节点连接表。简化的节点连接表中的不再含有开关设备类型, 闭合开关设备两侧节点被合并, 断开开关设备支路被移除, 配电网拓扑结构被简化, 节点间的电气差异更清晰。拓扑

图简化过程的流程图如图 2 所示。

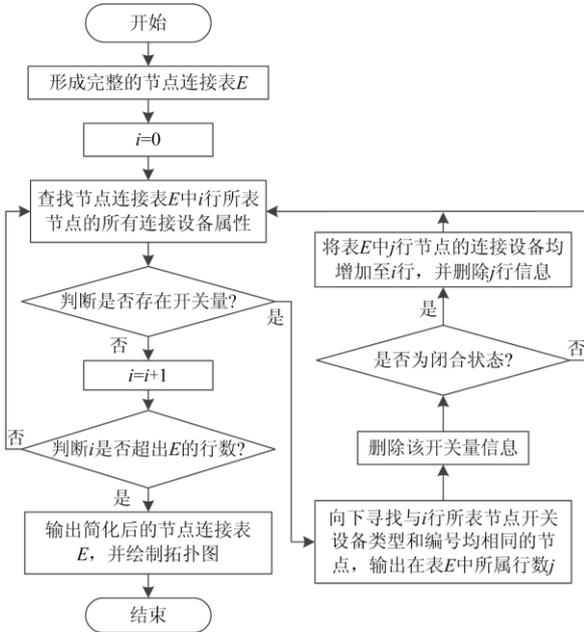


图 2 拓扑图简化过程的流程图

Fig. 2 Flow chart of topological graph simplification process

以一个典型的 3/2 断路器接线(图 3)为例, 验证拓扑图简化过程。未经简化的拓扑图中有 8 个节点, 6 条断路器闭合支路(实心), 3 条断路器断开支路(空心)。由图 3 可知, 馈线 b_1 、 b_2 和 b_5 均连接至母线节点 1, 拥有相同的电压特性, 同时, 连接至母线节点 2 的馈线 b_3 、 b_4 和 b_6 也拥有相同的电压特性。

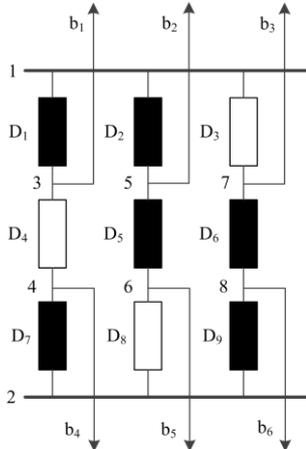


图 3 典型的 3/2 断路器接线图

Fig. 3 Typical 3/2 circuit breaker wiring diagram

若将图 3 作为 8 节点 6 支路的拓扑结构, 则拓扑分析过程较为复杂。根据如上所述的拓扑图简化过程, 生成节点连接表 E , 如表 1 所示。

表 1 中, D 表示设备类型为断路器, b 表示馈线。执行拓扑图简化算法获得简化的节点连接表

E' , 如表 2 所示。

表 1 节点连接表 E

Table 1 Node connection table E

节点编号	连接设备类型	连接设备编号
1	D、D、D	1、2、3
2	D、D、D	7、8、9
3	D、D、b	1、4、1
4	D、D、b	4、7、4
5	D、D、b	2、5、2
6	D、D、b	5、8、5
7	D、D、b	3、6、3
8	D、D、b	6、9、6

表 2 简化的节点连接表 E'

Table 2 Simplified node connection table E'

节点编号	连接设备类型	连接设备编号
1	b、b、b	1、2、5
2	b、b、b	3、4、6

从表 2 可以看出, 原拓扑网络中 8 个节点被等效为 2 个节点, 连接设备也仅有馈线, 拓扑结构被划分为 2 个连通片, 结果较为直观地体现了拓扑图简化的正确性。

2 配电网拓扑分区

配电网的网络节点和分支众多, 不同节点测量的电气量差异较大。如果利用整个配电网的实测数据进行校验, 区分度较低, 难以准确校验系统模型与实际工况的差异, 因此在校验前, 需要对实测数据进行归类处理。本文采用凝聚的层次聚类算法对简化后的配电网拓扑图进行分区, 将属于同一分区内的量测节点实测数据归为一组并进行校验。

2.1 拓扑结构表征

层次聚类算法的核心是定义网络节点对象的坐标和距离算法, 通过不断求解不同节点间的距离或簇间的距离, 按相似度由高到低逐次归类。配电网电压等级较为单一, 线路参数差异较小, 设备电气参数对分区结果影响较小, 因此, 拓扑分区主要考虑拓扑网络结构, 忽略设备参数, 将配电网视为均一网络, 边权均设为 1。根据配电网拓扑图的网络结构, 将节点到系统其他节点的最短距离作为元素, 构建各个节点的坐标拓扑矩阵 P 。

$$P = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: P 为一个 $n \times n$ 阶矩阵; d_{ij} 表示在拓扑图中节

点 i 到节点 j 的最短距离。

节点对象间距离的计算方法采用式(2)定义。

$$D(i, j) = \sqrt{(d_{i1} - d_{j1})^2 + (d_{i2} - d_{j2})^2 + \dots + (d_{im} - d_{jm})^2} \quad (2)$$

式中, i, j 分别为任意的第 i 个和第 j 个节点。

层次聚类算法的凝聚过程是通过计算任意两个簇合并后的离差平方和, 取离差平方和最小的两个簇进行合并, 逐次合并为一个整簇的过程。离差平方和实质为样本方差, 如式(3)所示, 通过节点对象合并后样本方差数值变化的大小判断节点合并为同一区域的合理性, 能考虑整体划分区域的离散程度。

$$\text{Var}(X) = \sum_{i=1}^{n-1} E(x_i - E(X))^2 \quad (3)$$

2.2 凝聚的层次聚类算法

配电网拓扑分区的具体步骤如下:

- 1) 形成坐标拓扑矩阵 \mathbf{P} , 并将 \mathbf{P} 中各行代表的节点作为单独的簇;
- 2) 采用节点对象间距离的计算方法, 计算所有的两簇合并后系统总离差平方和;
- 3) 选择离差平方和增量最小的两簇组成新簇, 并将该数值作为合并距离;
- 4) 返回 2), 重复步骤 2)到 4), 直到最终合并为一个整簇;
- 5) 根据预设的合并距离增量限值划分拓扑节点区域, 并输出结果。

3 基于实测数据相关性的拓扑校验方法

3.1 基于数据相关性的拓扑校验原理

在实际工程应用中, 各个时刻配电网中的负荷具有一定的不确定性, 中低压配电网中各节点的电压会呈现出一定程度的波动性。在配电网拓扑中, 对于电气距离较近, 位于同一供电区域, 即在第 2 节中属于同一分区内的节点, 其电压波动的幅值大小会呈现出较高的相似度, 在数据相关性方面表现为相关性较强, 对于电气距离较远的节点, 其电压波动幅值的相似度较低, 相关性较弱^[23-26]。

当配电网由于新投异动等导致配电网拓扑结构发生改变时, 电气连接关系发生变化的节点将脱离原有的供电区域, 并连接至新的供电区域, 此时, 其电压波动幅值和原所属供电区域中其他节点间存在明显不同, 且其数据相关性也明显弱于其他节点。故通过比较每个供电区域内所有节点与该区域内其他节点间电压波动幅值及数据的相关性, 即可判断各区域中是否有电气连接关系发生变化的节点, 以此

作为校验配电网拓扑结构和设计图纸是否一致的判断依据。此判断过程如图 4 所示。

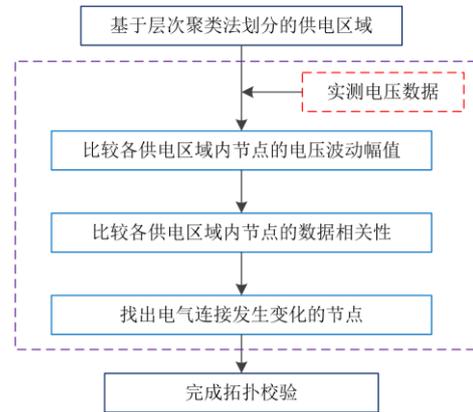


图 4 基于数据相关性的拓扑校验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of topology verification based on data correlation

3.2 数据波动特征和相关性比较方法

在数据波动幅值的实际分析中, 本文采用了 10 kV 雪大线的实测数据, 在 00:00—23:30 时间段内, 每 15 min 进行一次数据采集, 按时序对各节点各相序电压电流数据进行了统计。

对实测数据进行筛选, 选取 4 个电气距离较远的开关, 即 45#杆#4 开关、57#杆#3 开关、青泉寺支线 01#杆#1 开关和桑林支线 07#杆#1 开关, 分别提取其 A 相电压在各统计时刻的数据, 研究电压数据的波动幅值和电压数据波动情况, 如图 5 所示。

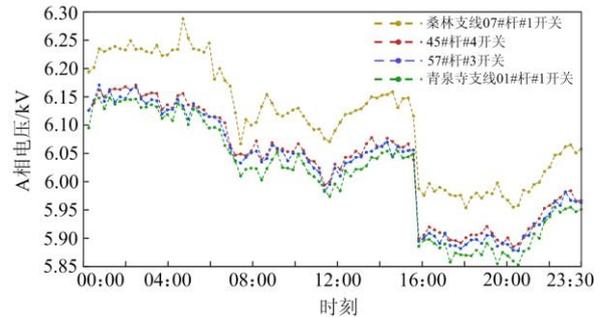


图 5 45#杆#4、57#杆#3、青泉寺支线 01#杆#1 和桑林支线 07#杆#1 开关 A 相电压波动图

Fig. 5 A-phase voltage fluctuation diagram of switches of 45#4, 57#3, 01#1 of Qingquansi branch line and 07#1 of Sanglin branch line

从图 5 中可以看出, 随着时间的推移, 同属一个系统内 4 个开关的 A 相电压波动趋势大致相同, 但由于电气距离较远, 各开关 A 相电压的波动幅值仍存在明显的区别, 因此可通过电压波动幅值确定

电气距离较远的节点。

当各节点的电压波动幅值相似，难以直接从图中判别其间的差异时，引入皮尔逊相关系数来协助判断。皮尔逊相关系数用来衡量各组数据间相关程度的评价指标，按积差方法计算，以两组数据与各自平均值的离差为基础，通过两个离差相乘来反映两变量之间相关程度。皮尔逊相关系数的定义为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式(4)中： X 、 Y 为待确定相关程度的两组数据，分别有 m 个元素； \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为两组数据的平均值； K 为皮尔逊相关系数，其取值为 $[-1,1]$ ，数据间的相关程度由 K 的绝对值反映，绝对值越大表示数据 X 与 Y 间的相关程度越高。

将待确定数据相关程度的两开关实测数据分别作为数组 X 、 Y ，代入式(4)，计算实测数据中 45#杆#4 开关、57#杆#3 开关、青泉寺支线 01#杆#1 开关和桑林支线 07#杆#1 开关的 A 相电压间的相关性，计算流程如图 6 所示。

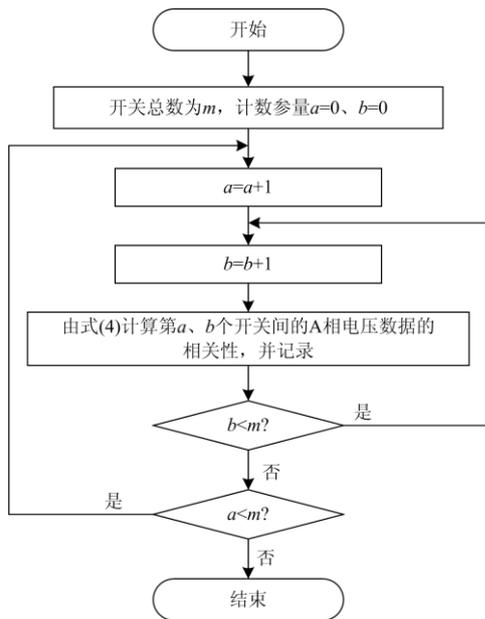


图 6 各开关 A 相电压数据相关性计算流程图

Fig. 6 Flow chart of correlation calculation of A-phase voltage data of each switch

计算结果见表 3，从表 3 中可以看出，在 45#杆#4 开关、57#杆#3 开关和青泉寺支线 01#杆#1 开关的 A 相电压数据中，每两组数据间的皮尔逊相关系数值很接近，且其绝对值较大(大于 0.99)；桑林

支线 07#杆#1 开关的 A 相电压数据与其他开关间的皮尔逊相关系数明显小于表中其他数据。

表 3 45#杆#4、57#杆#3、青泉寺支线 01#杆#1 和桑林支线 07#杆#1 开关 A 相电压相关系数

Table 3 A-phase voltage correlation coefficient of switches of 45#4, 57#3, 01#1 of Qingquansi branch line and 07#1 of Sanglin branch line

	45#杆#4	57#杆#3	青泉寺支线 01#杆#1	桑林支线 07#杆#1
45#杆#4	1.000 0	0.996 4	0.994 6	0.985 4
57#杆#3	0.996 4	1.000 0	0.996 2	0.982 9
青泉寺支线 01#杆#1	0.994 6	0.996 2	1.000 0	0.983 9
桑林支线 07#杆#1	0.985 4	0.982 9	0.983 9	1.000 0

此时，设定相关性判别阈值 k ，若皮尔逊相关系数小于 k ，则二者间的相关性较弱。因此，可以判断桑林支线 07#杆#1 开关的 A 相电压数据与其他开关数据的相关性相对较弱，其电压的波动幅度与其他开关间有较明显的区别；其他开关间的电压波动幅度区别相对较小，呈现出较强的相关性，此结论与图 5 中的数据折线变化情况相符。

4 算例分析

4.1 仿真算例分析

针对本文采用的基于数据相关性的拓扑校验方法，在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型来验证该方法的有效性。模型拓扑结构如图 7 所示。

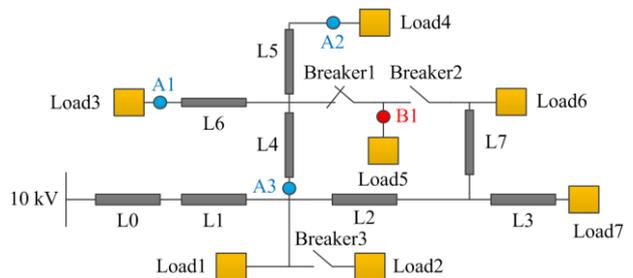


图 7 某 10 kV 配电网拓扑结构图

Fig. 7 Topological structure of a 10 kV distribution network

在图 7 所示的 10 kV 配电网中： $L0 \sim L7$ 为线路，其线路长度分别为 2 km、2 km、4.5 km、2 km、2.5 km、1.5 km、1.5 km、5 km，单位阻抗为 $0.38 \Omega/\text{km}$ ； $\text{Load1} \sim \text{Load7}$ 为负荷，其容量分别为 2 MW、2 MW、1.5 MW、0.8 MW、2.5 MW、0.6 MW、1 MW；开关 Breaker1 初始状态为闭合，在 0.5 s 时断开，开关 Breaker2 初始状态为断开，在 0.5 s 时

闭合, 开关 Breaker3 初始状态为断开, 在 0.7 s 时闭合。监测节点 A1、A2、A3 和 B1 处 A 相电压有效值变化情况, 如图 8 所示。

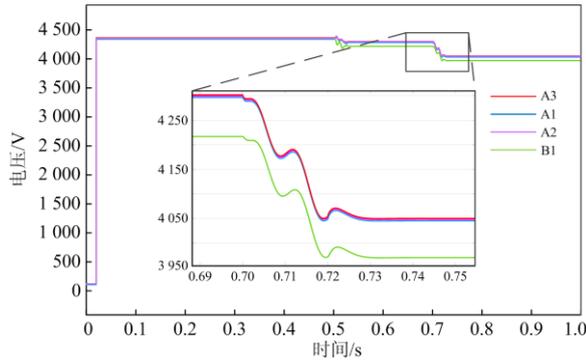


图 8 A1、A2、A3、B1 处 A 相电压有效值变化趋势图
Fig. 8 Change trend of A-phase voltage RMS
at A1, A2, A3 and B1

从图 8 中可以看出, 在 0.5 s 时, 由于第一次开关变化(Breaker1、Breaker2), 各节点的 A 相电压有效值出现了第一次波动, 此时节点 B1 从 L4 所在的支路切换到了 L7 所在的支路, 因此节点 B1 与节点 A1、A2、A3 间的电气距离变大; 在 0.7 s 时, 开关第二次变化(Breaker3), 此时负荷 Load2 接入, 系统的总负荷容量发生波动, 各节点的 A 相电压再次出现波动, 由于 B1 节点与 A1、A2、A3 节点间的电气距离较远, 其 A 相电压在波动后的幅值与其他节点明显不同, 由图 8 可看出 B1 节点与其他节点的 A 相电压波动曲线重合度较低, 即相关性较弱。

由此可知, 本文采用的基于数据相关性的拓扑校验方法是有效的, 当新投异动使节点所在供电区域改变时, 该节点与原所在供电区域内的其他节点间的电气距离增大, 在数据相关性上会呈现出相关性变弱的现象。

4.2 实际算例验证

本文实际算例针对真实的 10 kV 雪大线拓扑进行校验。

4.2.1 基于模型文件的配电网拓扑分区

在雪大线拓扑模型文件的基础上, 利用本文提出的拓扑简化与分区方法, 参考节点间的电气距离对模型文件进行简化和供电区域的划分, 结果如图 9 所示。

图 9 用不同的颜色的节点和线段对拓扑中不同供电区域进行区分, 为便于观察, 进一步将图 9 展开, 结果如图 10 所示。

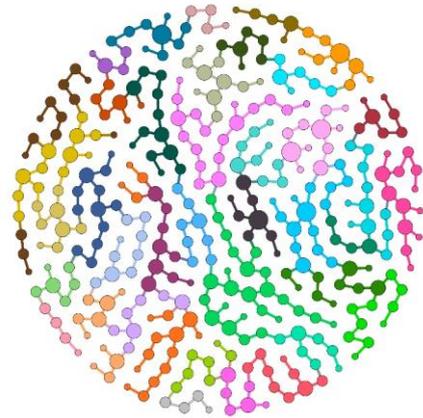


图 9 雪大线简化分区结果示意图
Fig. 9 Schematic diagram of simplified zoning
results of XueDa line

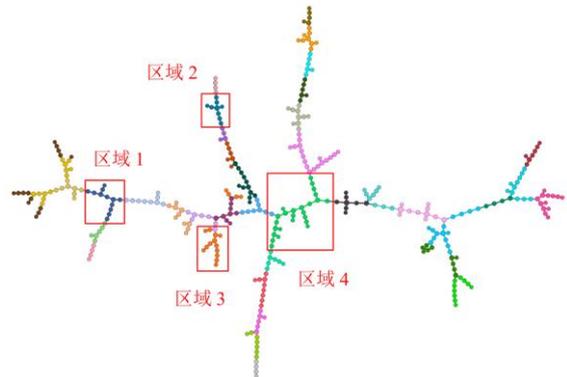


图 10 雪大线分区展开图
Fig. 10 Expansion map of XueDa line

图 10 在雪大线拓扑结构的基础上完成了拓扑简化, 并以不同颜色标记了不同的供电区域, 区域 1~4 为其中的 4 个供电区域。

4.2.2 基于实测数据相关性的拓扑校验结果

在供电区域划分的基础上, 以供电区域为单位分别对各区域内所有节点与该区域内其他节点间数据的相关性进行校验, 并进行有关分析。

以图 10 中 4 个区域为例, 分别从各个不同供电区域中各取一个节点, 记录其 A 相电压数据的波动情况, 如图 11 所示。

由图 11 可知, 各区域的 A 相电压波动折线基本无重合部分, 表明各供电区域的 A 相电压波动幅值的差异性能够被直接识别, 可起到区分各供电区域节点的作用。

以供电区域 1 为例, 对区域内所有节点的 A 相电压数据进行统计并记录于图 12 中。

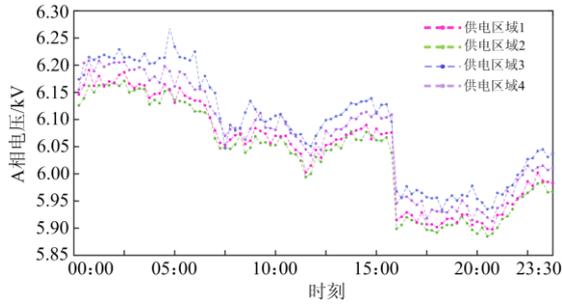


图 11 供电区域 1-4 的 A 相电压波动图
Fig. 11 Voltage fluctuation diagram of phase A in power supply area 1-4

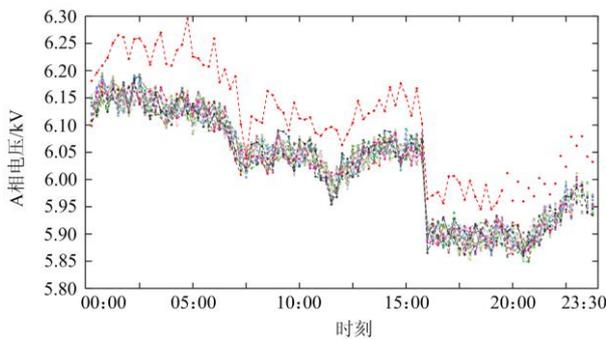


图 12 供电区域 1 中各节点的 A 相电压值波动图
Fig. 12 A-phase voltage fluctuation diagram of each node in power supply area 1

根据 3.2 节介绍的方法，计算区域 1 内所有节点的 A 相电压数据的皮尔逊相关系数，结果如附表 A1 所示。对附表 A1 中数据作图，结果如图 13 所示。

图 13 以柱状图的形式展示了各节点间的皮尔逊相关系数，各节点与其自身的相关系数为 1。结合表 A1 和图 13，可知第 12 号节点和其余所有节点间的皮尔逊相关系数(图 13 中红色部分)明显低于其他节点相互间的相关系数。因此，判断第 12 号节点的电气距离明显远于区域 1 中其他节点间的电气距离，所以第 12 号节点在实际拓扑中不属于区域 1，故判定在设计图纸中供电区域 1 的第 12 号节点拓扑连接错误。

附录

表 A1 供电区域 1 中各节点的 A 相电压相关系数

Table A1 A-phase voltage correlation coefficient of each node in power supply area 1

节点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.966 938	0.970 3	0.962 343	0.963 082	0.966 322	0.960 63	0.952 859	0.959 132	0.966 501	0.968 547	0.950 727
2	0.966 938	1	0.962 92	0.961 774	0.956 422	0.963 152	0.962 479	0.959 76	0.957 021	0.961 53	0.966 375	0.956 362
3	0.970 3	0.962 92	1	0.975 092	0.960 867	0.972 99	0.968 603	0.973 818	0.964 723	0.965 741	0.961 777	0.952 741
4	0.962 343	0.961 774	0.975 092	1	0.964 082	0.964 95	0.967 804	0.968 484	0.962 406	0.965 569	0.965 384	0.950 417
5	0.963 082	0.956 422	0.960 867	0.964 082	1	0.959 708	0.964 413	0.964 517	0.958 727	0.958 586	0.964 403	0.946 954

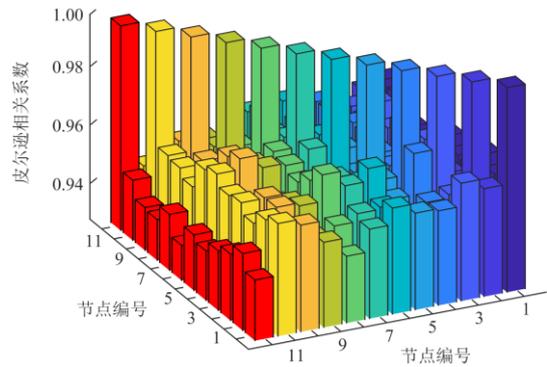


图 13 供电区域 1 中各节点的 A 相电压相关系数
Fig. 13 A-phase voltage correlation coefficient of each node in power supply area 1

5 结论

本文基于模型文件和实测数据相关性，结合层次聚类法和皮尔逊相关系数，提出了一种配电网在线拓扑校验方法，并通过仿真实验和实际案例分析，验证了所提方法的可行性与有效性。文章结论如下：

- 1) 通过结合校验后的拓扑信息和开关量的状态对拓扑图的结构进行简化，并对拓扑结构实时划分供电区域，可使节点间的电气差异更明显，拓扑结构更清晰，提高了皮尔逊校验的可靠性；
 - 2) 根据配电网的拓扑结构，采用基于层次聚类算法的拓扑分区方法划分供电区域，能够初步划分测量节点间的电气距离差异，提高皮尔逊算法的准确性。
 - 3) 通过仿真实验分析，证实了电气距离增大会使节点间数据的相关性减弱，以此作为拓扑校验的基本依据；
 - 4) 通过实际案例分析，验证了皮尔逊相关系数可在各实测数据相关性差异较小的情况下以具体数据的方式衡量各实测数据间相关性的差异大小。
- 本文所提的拓扑校验方法具有数据要求较低、算法简便可靠、易于推广等优势，为配电网控制调度等工作提供基础服务。

续表 A1

节点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	0.966 322	0.963 152	0.972 99	0.964 95	0.959 708	1	0.970 796	0.966 766	0.967 533	0.972 081	0.968 367	0.949 065
7	0.960 63	0.962 479	0.968 603	0.967 804	0.964 413	0.970 796	1	0.968 041	0.965 356	0.969 403	0.966 428	0.942 019
8	0.952 859	0.959 76	0.973 818	0.968 484	0.964 517	0.966 766	0.968 041	1	0.956 249	0.959 486	0.957 142	0.949 203
9	0.959 132	0.957 021	0.964 723	0.962 406	0.958 727	0.967 533	0.965 356	0.956 249	1	0.960 977	0.960 109	0.943 958
10	0.966 501	0.961 53	0.965 741	0.965 569	0.958 586	0.972 081	0.969 403	0.959 486	0.960 977	1	0.960 956	0.944 662
11	0.968 547	0.966 375	0.961 777	0.965 384	0.964 403	0.968 367	0.966 428	0.957 142	0.960 109	0.960 956	1	0.950 577
12	0.950 727	0.956 362	0.952 741	0.950 417	0.946 954	0.949 065	0.942 019	0.949 203	0.943 958	0.944 662	0.950 577	1

参考文献

- [1] 肖振锋, 辛培哲, 刘志刚, 等. 泛在电力物联网形势下的主动配电网规划技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 43-48.
XIAO Zhenfeng, XIN Peizhe, LIU Zhigang, et al. An overview of planning technology for active distribution network under the situation of ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 43-48.
- [2] KUMAR D S, SAVIER J S, BIJU S S. Micro-synchrophasor based special protection scheme for distribution system automation in a smart city[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 97-110. DOI: 10.1186/s41601-020-0153-1.
- [3] 林志超. 自适应配电网拓扑与开关配置的智能分布式保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 149-156.
LIN Zhichao. Intelligent-distributed distribution network protection strategy for self-adaptive topology and different switch configurations[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 149-156.
- [4] 高泽璞, 赵云, 余伊兰, 等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 34-43.
GAO Zepu, ZHAO Yun, YU Yilan, et al. Low-voltage distribution network topology identification method based on knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 34-43.
- [5] 邹时容, 陆慧, 洪梓铭, 等. 基于三维时空特性的低压配电网拓扑识别方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 34-42, 56.
ZOU Shirong, LU Hui, HONG Ziming, et al. Low voltage topology identification based on three-dimensional space-time rules[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 34-42, 56.
- [6] 戴观权, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 基于动态拓扑的配电网分布式保护自愈方法[J]. 供用电, 2019, 36(9): 22-27.
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Distributed protection and self-healing method for distribution network based on dynamic topology[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 22-27.
- [7] 胡列翔, 郑伟民, 王蕾, 等. 基于配网拓扑矩阵的供电可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2): 44-51.
HU Liexiang, ZHENG Weimin, WANG Lei, et al. Power supply reliability assessment based on distribution network topology matrix[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2): 44-51.
- [8] 王丰收. 试论配电网可靠性对用户的影响研究[J]. 信息系统工程, 2012(3): 44-45.
WANG Fengshou. Discussion on the influence of distribution network reliability on users[J]. China CIO News, 2012(3): 44-45.
- [9] 贾健飞, 李博通, 孔祥平, 等. 计及逆变型分布式电源输出特性的配电网自适应电流保护研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 149-155.
JIA Jianfei, LI Botong, KONG Xiangping, et al. Research on adaptive current protection for distribution network considering the output characteristics of inverter-interfaced distributed generator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 149-155.
- [10] 金鑫. 种群规模自适应的遗传算法在配电网重构中的应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2011.
JIN Xin. Application of population size adaptive genetic algorithm in distribution network reconfiguration[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.
- [11] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2273-2280.
ZOU Hongliang, HAN Xiangyu, LIAO Qingfen, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [12] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 184-192.

- PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Key issues of fault analysis on distribution system with high-density distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 184-192.
- [13] 刘文霞, 徐慧婷. 考虑电压控制成本的分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2998-3005.
- LIU Wenxia, XU Huiting. Optimal distributed generator allocation method considering voltage control cost[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2998-3005.
- [14] 李国昌, 宋玮琼, 姜慧竹, 等. 基于过零时刻与 SNR 算法的电能表台区识别方法研究与应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(7): 148-152.
- LI Guochang, SONG Weiqiong, XIAN Huizhu, et al. Research and application based on zero-crossing and SNR algorithm of electric energy meter station area identification[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7): 148-152.
- [15] 孙乐乐, 杨鹏举, 童仁莉, 等. 电力相位识别技术研究与应用[J]. 机电信息, 2017(30): 90-91.
- SUN Lele, YANG Pengju, TONG Renli, et al. Research and implementation of power phase identification technology[J]. Electromechanical Information, 2017(30): 90-91.
- [16] 肖勇, 赵云, 涂治东, 等. 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 37-43.
- XIAO Yong, ZHAO Yun, TU Zhidong, et al. Topology checking method for low voltage distribution network based on improved Pearson correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 37-43.
- [17] 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.
- [18] 邹时容, 陆慧, 洪梓铭, 等. 基于动态时间序列电压相关性分析的低压配电网拓扑校核[J]. 广东电力, 2020, 33(5): 52-59.
- ZOU Shirong, LU Hui, HONG Ziming, et al. Topology check for low voltage distribution network based on dynamic time series voltage correction[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5): 52-59.
- [19] SATYA J P, NIRA V B, RAMKRISHNA P, et al. Identifying topology of low voltage distribution networks based on smart meter data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5113-5122.
- [20] DOMAGK M, MEYER J, SCHEGNER P, et al. Identification of consumer topologies in low voltage grids by time series analysis of harmonic currents[C] // 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, October 17-19, 2011, Lisbon, Portugal.
- [21] 李国昌. 基于 LoRa 技术和 GPU 加速的台区拓扑识别方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(21): 88-95.
- LI Guochang. Transformer topology identification method based on LoRa and GPU acceleration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 88-95.
- [22] 夏水斌, 余鹤, 董重重, 等. 基于集抄系统深化应用的低压台区电网拓扑重构方案[J]. 电测与仪表, 2017, 54(20): 110-115.
- XIA Shuibin, YU He, DONG Chongchong, et al. Low-voltage district topology reconstruction scheme based on extended application of remote centralized meter reading system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(20): 110-115.
- [23] 栾文鹏, 余贻鑫, 王兵. AMI 数据分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 29-36.
- LUAN Wenpeng, YU Yixin, WANG Bing. AMI data analytics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 29-36.
- [24] LUAN W P, PENG J S, MARAS M, et al. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1964-1971.
- [25] LUAN W P, PENG J S, MARAS M, et al. Distribution network topology error correction using smart meter data analytics[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada: 1-5.
- [26] BOLOGNANI S, BOF N, MICHELOTTI D, et al. Identification of power distribution network topology via voltage correlation analysis[C] // IEEE Conference on Decision and Control, December 10-13, 2013, Firenze, Italy: 1659-1664.

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-04-27

作者简介:

张 华(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网物联网、电力系统分析; E-mail: zhanghua0002@163.com

龙 呈(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网运行及自动化; E-mail: 17828186876@163.com

胡思洋(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障诊断与保护。E-mail: hsy2687@outlook.com

(编辑 姜新丽)