

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200984

基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法

王日宁¹, 武一¹, 魏浩铭², 王成伟²

(1. 河北工业大学, 天津 300401; 2. 珠海许继电气有限公司, 广东 珠海 519060)

摘要: 针对低压配电网台区拓扑结构混乱、更新不及时的问题, 提出了一种基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法。首先利用低压智能终端(LTU)的通信地址关联各级开关子节点, 并注入高辨识度的无功补偿特征信号, 改变各开关处的无功功率值。配变智能终端(TTU)根据台区拓扑识别策略, 对各开关处的无功功率检测结果进行边缘计算, 得出台区内开关的各级连接关系, 实现低压台区自下而上的就地拓扑结构识别。根据试点台区的实践结果, 验证了所提台区拓扑识别方法具有可推广的工程应用价值。

关键词: 低压台区; 配电网物联网; 智能终端; 特征信号; 拓扑识别; 自下而上

Topology identification method for a distribution network area based on the characteristic signal of a smart terminal unit

WANG Rining¹, WU Yi¹, WEI Haoming², WANG Chengwei²

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Zhuhai Xuji Electric Co., Ltd., Zhuhai 519060, China)

Abstract: To solve the problem of badly wired and low real-time performance of a low voltage distribution network topology structure, this paper proposes a topology identification method for the distribution network based on the characteristic signal of a smart terminal unit. First, the communication address of the Low-Voltage Intelligent Terminal (LTU) is used to correlate each level switch, and the reactive values at each switch are changed by injecting reactive compensation characteristic signals. Then for the detection results of reactive value in each switch, based on a topology identification strategy, edge computing is performed in the distribution Transformer supervisory Terminal Unit (TTU). The result of the edge computing is the connection relation of switches in the area. The topological structure of low-voltage areas is identified from bottom to top. Finally, the practical engineering value of the topology identification method is proved according to the results from a pilot area.

This work is supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51977059).

Key words: low-voltage area; distribution internet of things; smart terminal unit; characteristic signal; topology identification; from bottom to up

0 引言

低压配电网要实现智能管控及精益运营, 必须依赖台区的实时拓扑结构信息。目前配电网台区拓扑结构在实际应用中, 大部分仍主要依靠配电主站自上而下成图或人工录入信息^[1-3], 无法应对现场一次设备接入增长量和位置变动需求, 与实际物理结构不对应时难以及时发现问题。随着近几年配电网

物联网智能终端的大规模应用, 低压配网的自动化水平得以提升^[4-7], 配电网拓扑结构自动识别成为一个热点研究问题。

文献[8]利用 CIM 对配电网馈线建立模型, 根据模型形成拓扑岛及拓扑岛子树, 基于开关状态选择合适的拓扑岛子树组装构成配电网拓扑结构, 该方法需要开关状态变位信息, 一般情况下配网实际运行时, 开关频繁变换的情况极少, 且某些开关为拒动开关。文献[9]对用户电压和台区变压器出线电压进行皮尔逊相似性分析, 通过相似系数判定台区拓扑归属关系, 基于数据相关性的拓扑分析是近几年的热点研究方法, 但因为数据量要求大, 采集样

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51977059); 珠海市产业核心和关键技术攻关方向项目资助(ZH2204470219 0058HJL)“配电网在电力物联网关键技术研究及应用”

本时间长，效率较低。文献[10-14]皆研究了基于智能终端的拓扑识别方法，文献[10-11]摆脱了配台区拓扑结构对主站依赖性强的缺点，但逐级查询的方式在网络路由节点数多时延时较大，拓扑更新缓慢。文献[12]利用了智能终端的分布式优点，加快了拓扑识别的效率。文献[13]利用智能终端发出脉冲电流信号进行拓扑识别，此种方法脉冲电流信号由智能终端自身晶闸管产生，晶闸管易损程度高，易造成短路停电风险。文献[14]利用智能终端发出高频信号进行拓扑识别，而在相邻台区之间高频信号具有串台区通信的特点，影响识别结果的准确率。除此之外，关于台区拓扑结构识别的方法还有基于知识图谱^[15-16]和基于数据关联分析的方法^[17-18]等。这些方法在拓扑识别过程中，需要借助配电网营销及用采系统等多种数据信息，在实际低压配网领域，配电系统、营销系统、用采系统目前并未融合，跨系统获取数据不利于拓扑结构的及时更新。

本文提出了一种基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法。该方法面向需物联网化改造的存量台区，利用一对一通信消除多级延时影响，可自适应台区馈线及一次设备安装情况，自下而上辨识台区物理拓扑结构。若系统内出现新增线路，可根据实际安装对识别的拓扑结构进行动态调整，解决了低压配电网设备异动频率高和拓扑更新慢的矛盾，为低压配电网台区高级业务功能的开展提供基础支撑。

1 配电物联网智能终端及拓扑识别系统

1.1 配电物联网智能终端

随着配电网的物联网化建设，配电物联网智能终端的概念及产品应运而生。与传统终端功能相对单一的特点比较，智能终端为满足配电物联网云、管、边、端的系统架构，具备更强大的数据处理能力和信息交互能力^[19-21]。

本文 TTU 采用 WPZD-135 型智能配变终端，LTU 采用 WPZD-135/F 型低压智能终端。作为云平台的网络边缘节点，TTU 不低于 700 MHz 的核心 CPU 主频保证了终端对程序及数据的执行计算速度，不低于 512M 的内存和不低于 4GB 的 FLASH 提供给数据大容量接入的能力。LTU 作为系统中的最后一级终端，自带电容无功补偿电容和套管式电流互感器，具备状态感知能力，实时测量各相电压、电流、功率、频率等电网运行参数。

结合台区现有存量，在不对台区电气设备和电气连接结构进行改动的情况下，借助智能终端 TTU 和 LTU 的优势，开展对台区拓扑就地识别的研究。

1.2 拓扑识别系统

低压配电网台区由 380/220 V 架空线路或电缆线路构成^[22]，典型低压台区结构，依次包括变压器，开关 S₁、S₂、S₃、S₄ 组成的配电柜，开关 S₅、S₆、S₇、S₈ 组成的分支箱，电表 D₁、D₂、D₃、D₄ 组成的用户表箱四部分，如图 1 所示。拓扑识别系统由各部分开关节点及其无功补偿电容 C、LTU、TTU 及物联网云平台组成，如图 2 所示。

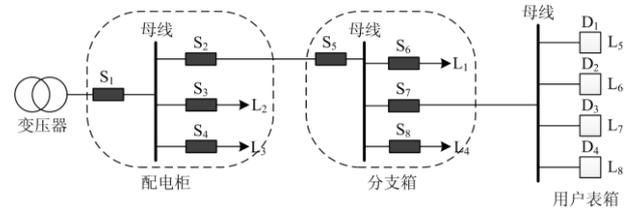


图 1 典型低压台区结构

Fig. 1 Structure of typical low-voltage area

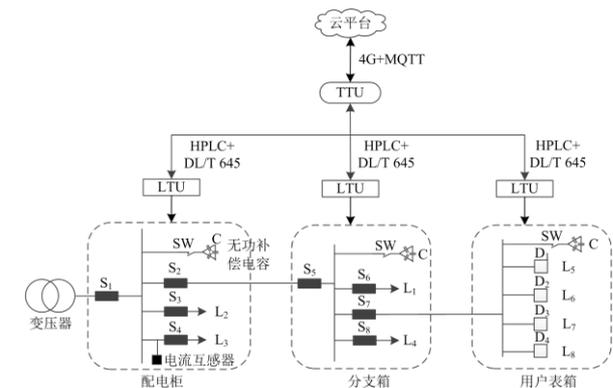


图 2 台区拓扑识别系统

Fig. 2 Topology identification system in an area

本方法在电源侧配电柜、线路侧分支箱、用户侧表箱安装 LTU。图 2 所示系统是典型的物联网架构在配电网中的应用。无功补偿电容 C 在开关侧产生周期性无功特征信号的波动，引起上游开关无功功率的变化。1 台 LTU 通过自身的 4 路通信地址连接 4 个开关，实时检测各开关的无功功率，经宽带载波(HPLC)模块和 DL/T 645 协议报文将检测到的无功功率结果一对一通信上报至 TTU。TTU 将根据本文第 2.2 节拓扑识别策略对 LTU 传送的检测数据进行本地化边缘计算处理，实现拓扑结构的本地成图。

TTU 部署在台区内部，距离端设备和被感知节点最大距离不超过 1 km，空间近距离的优势很好地解决了数据传输时延问题。另外，本方法中，TTU 侧的边缘计算将数据直接就地决策，只将最后分析完成的拓扑结果通过 4G 网络和 MQTT 协议传回云平台，大大缓解了数据传回云平台处理的网络带宽需求和数据计算压力^[23-25]。

2 特征信号注入及拓扑识别策略

2.1 无功补偿特征信号注入

图2台区拓扑识别系统L₁支路可等效为如图3所示电路。

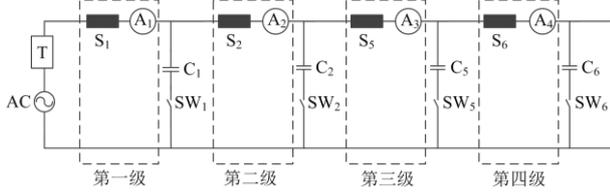


图3 L₁支路等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of L₁ branch

其中AC为变压器交流电源，T为TTU，S₁为配电柜进线开关，S₂为配电柜出线开关，S₅为分支箱进线开关，S₆为分支箱出线开关，A₁、A₂、A₃、A₄分别为对应LTU在各级处的同步无功功率采样，C₁、C₂、C₅、C₆分别为对应各级无功补偿电容，电容值大小为100 μF，SW₁、SW₂、SW₅、SW₆为光耦电子开关，分别控制各级电容的投切。

电容投切策略如下：

1) TTU 下发指令控制电容 C₁ 投入 ΔT₁ 时长，在 ΔT₁ 时间段结束时断开电容 500 ms，将(ΔT₁+500 ms)时间段的功率变化作为一个短脉冲信号投入线路。

2) TTU 在 ΔT₂ 时间段结束时控制电容 C₁ 投入 ΔT₁ 时长，在 ΔT₁ 时间段结束时断开电容 700 ms，将(ΔT₁+700 ms)时间段的功率变化作为一个长脉冲信号投入线路。

3) 短脉冲及长脉冲共同组成一个周波信号，为了提高无功补偿信号的辨识度，降低干扰信号误差，一次投入5个周波，投入信号如图4所示。

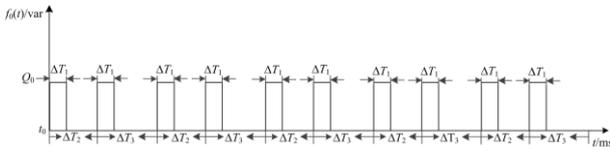


图4 无功补偿信号

Fig. 4 Reactive compensation signal

图中：ΔT₁=200 ms，ΔT₂=700 ms，ΔT₃=900 ms。

其信号表达式为

$$f_0(t) = Q \left[\varepsilon(t - nT) - \varepsilon(t - 200 - nT) + \varepsilon(t - 700 - nT) - \varepsilon(t - 900 - nT) \right] \quad (1)$$

式中：T=ΔT₂+ΔT₃=1600 ms；n=0, 1, 2, 3, 4；Q为投入电容时的无功功率。

$$Q = u^2 |j\omega C| \quad (2)$$

式中：u为线路电压220 V；为电网角频率100；C为电容大小100 μF；代入式(2)；求得Q=1519.76 var。

$$f_0(t) = 1519.76 \left[\varepsilon(t - nT) - \varepsilon(t - 200 - nT) + \varepsilon(t - 700 - nT) - \varepsilon(t - 900 - nT) \right] \quad (3)$$

在电网非业务繁忙时段稳定运行时，未投入电容时线路无功信号接近于稳定信号，如图5所示。

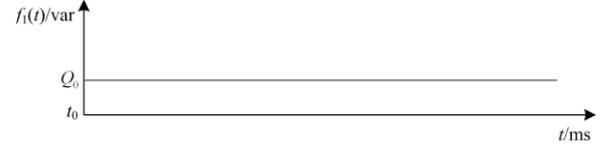


图5 线路无功信号

Fig. 5 Reactive signal of line

其信号表达式为

$$f_1(t) = Q_0 \quad (4)$$

式中：Q₀为线路稳定时无功功率值，其值由电网友线路稳定时接入的负荷大小决定。电容C₁周期性投入产生的补偿信号及线路无功信号最终在支路上叠加成周期性无功补偿特征信号，如图6所示。

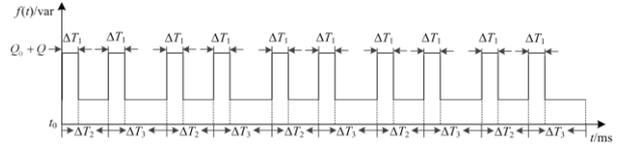


图6 无功补偿特征信号

Fig. 6 Reactive power characteristic signal

其信号表达式为

$$f(t) = f_1(t) + f_0(t) = Q_0 + 1519.76 \left[\varepsilon(t - nT) - \varepsilon(t - 200 - nT) + \varepsilon(t - 700 - nT) - \varepsilon(t - 900 - nT) \right] \quad (5)$$

式中：T=ΔT₂+ΔT₃=1600 ms；n=0, 1, 2, 3, 4。

2.2 台区拓扑识别策略

按照2.1节规则闭合光耦开关SW₁，仅投入电容C₁，如图7所示，R₁回路阻抗发生改变，S₁节点处无功功率与图6保持一致变化。U点处电压大小为线路电压220 V不变，R₂支路上各级电容皆为断开状态，线路阻抗不变，S₂、S₅、S₆无功功率皆无变化。

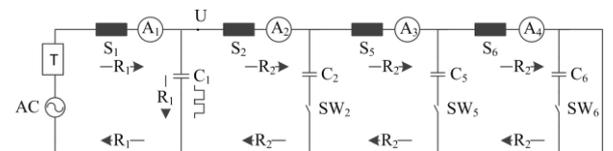


图7 电容C₁投入

Fig. 7 Circuit diagram of C₁ input

同理，断开电容 C_1 ，仅投入电容 C_2 ， S_1 、 S_2 处将检测到图 6 所示的周期性无功补偿特征信号， S_5 、 S_6 处无功功率无变化；仅投入电容 C_5 时， S_1 、 S_2 、 S_5 处将检测到图 6 所示的周期性无功补偿特征信号， S_6 处无功功率无变化；仅投入电容 C_6 时， S_1 、 S_2 、 S_5 、 S_6 处皆检测到图 6 所示的周期性无功补偿特征信号。

各级电容投入完成后， A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别将以上检测结果上报至 TTU，TTU 侧集成如式(6)所示的电容投入与开关关联矩阵。

$$Z_0 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_5 & C_6 \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \leftarrow S_1 \\ \leftarrow S_2 \\ \leftarrow S_5 \\ \leftarrow S_6 \end{matrix} \end{matrix} \quad (6)$$

式中： i 行代表 S_i 开关； j 列代表 C_j 电容； $Z_{ij}=1$ 为电容 C_j 投入时，开关 S_i 检测到图 6 所示无功补偿特征信号。

由式(6) Z_{i4} 可知， C_6 电容的投入引起了 S_1 、 S_2 、 S_5 线路无功功率的波动，即 S_1 、 S_2 、 S_5 、 S_6 处于同一条支路，此结论可覆盖 Z_{i1} 、 Z_{i2} 、 Z_{i3} 列分析结果；比较矩阵各行，“1”的个数越多，该行代表的开关处于拓扑结构中的上级，即式(6)中开关拓扑结构为 S_1 - S_2 - S_5 - S_6 ，该结果与图 1 中 L_1 支路拓扑结构完全一致。假设图 1 中新增 L_2 ~ L_8 支路，采用上述方法进行拓扑识别，将获得式(7)所示的电容投入与开关关联矩阵。

$$Z_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 & C_9 & C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ \uparrow & \uparrow \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \leftarrow S_1 \\ \leftarrow S_2 \\ \leftarrow S_3 \\ \leftarrow S_4 \\ \leftarrow S_5 \\ \leftarrow S_6 \\ \leftarrow S_7 \\ \leftarrow S_8 \\ \leftarrow D_1 \\ \leftarrow D_2 \\ \leftarrow D_3 \\ \leftarrow D_4 \end{matrix} \end{matrix} \quad (7)$$

同理，按列求解式(7)矩阵，可得 8 条支路信息，分别为(括号中排序不分先后)： (S_3, S_1) ， (S_4, S_1) ， (S_1, S_2, S_5, S_6) ， (S_1, S_8, S_2, S_5) ， $(S_1, S_2, S_7, S_5, D_1)$ ， $(S_1, D_2, S_7, S_5, S_2)$ ， $(S_1, S_2, D_3, S_5, S_7)$ ， $(S_1, S_2, D_4, S_5, S_7)$ ；按行求解式(7)矩阵，可得上述 8 条支路拓扑结构为： S_1 - S_3 、 S_1 - S_4 、 S_1 - S_2 - S_5 - S_6 、 S_1 - S_2 - S_5 - S_8 、 S_1 - S_2 - S_5 - S_7 - D_1 、 S_1 - S_2 - S_5 - S_7 - D_2 、 S_1 - S_2 - S_5 - S_7 - D_3 、 S_1 - S_2 - S_5 - S_7 - D_4 ，以上结果与图 1 中 8 条支路拓扑结构一致。

对于此类台区，5~6 min 可完成拓扑结构的识别。在此基础上扩展至含 m 条支路的 n 级台区，台区内共有 K 个低压节点设备。其电容投入与开关关联矩阵如式(8)所示。

$$Z_{k \times k} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & \dots & C_n & \dots & C_k \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} (0,1) & (0,1) & (0,1) & \dots & (0,1) & \dots & (0,1) \\ (0,1) & (0,1) & (0,1) & \dots & (0,1) & \dots & (0,1) \\ (0,1) & (0,1) & (0,1) & \dots & (0,1) & \dots & (0,1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (0,1) & (0,1) & (0,1) & \dots & (0,1) & \dots & (0,1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (0,1) & (0,1) & (0,1) & \dots & (0,1) & \dots & (0,1) \end{bmatrix} & \begin{matrix} \leftarrow S_1 \\ \leftarrow S_2 \\ \leftarrow S_3 \\ \vdots \\ \leftarrow S_n \\ \vdots \\ \leftarrow S_k \end{matrix} \end{matrix} \quad (8)$$

式中： $Z_{ij}=(0,1)$ 表示 Z_{ij} 存在 0 和 1 两种可能取值，由 LTU 实际检测结果决定。

同理，矩阵行列变化求解即可得出台区内拓扑结构。

3 工程案例

3.1 试点小区概况

某小区 1# 配变台区变压器供电范围包括 16~18 共 3 栋单元楼和 1 个地下车库，即配电室 1# 配电柜包含 1 条变压器进线和 4 条供电出线。每栋单元楼均为 12 层，配电由各栋的分支箱转接至用户表箱，每 3 层用户共 1 个表箱，拓扑结构如图 8 所示。

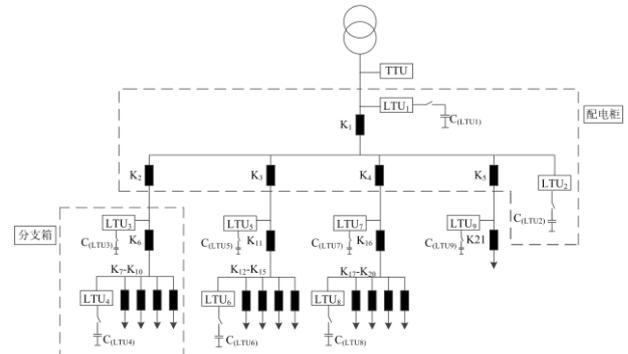


图 8 小区 1# 配变台区拓扑结构

Fig. 8 Topology of 1# distribution transformer area

解析式(9), 得出拓扑识别结果如图 11 所示, 数据格式为 XML 格式。

```

<Sub infoSum="10">
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K2" second="进线开关K6" third="分支开关K7"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K2" second="进线开关K6" third="分支开关K8"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K2" second="进线开关K6" third="分支开关K9"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K2" second="进线开关K6" third="分支开关K10"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K3" second="进线开关K11" third="分支开关K12"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K3" second="进线开关K11" third="分支开关K13"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K3" second="进线开关K11" third="分支开关K14"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K3" second="进线开关K11" third="分支开关K15"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K4" second="进线开关K16" third="分支开关K17"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K4" second="进线开关K16" third="分支开关K18"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K4" second="进线开关K16" third="分支开关K19"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K4" second="进线开关K16" third="分支开关K20"/>
  <DI main="进线开关K1" first="出线开关K5" second="进线开关K21" />
</Sub>

```

图 11 1#配变台区拓扑识别结果

Fig. 11 Topology identification result of 1# distribution transformer areas

由图 11 可以看出: 共有 12 条拓扑支路, 其拓扑结构分别为: $K_1-K_2-K_6-K_7$ 、 $K_1-K_2-K_6-K_8$ 、 $K_1-K_2-K_6-K_9$ 、 $K_1-K_2-K_6-K_{10}$ 、 $K_1-K_3-K_{11}-K_{12}$ 、 $K_1-K_3-K_{11}-K_{13}$ 、 $K_1-K_3-K_{11}-K_{14}$ 、 $K_1-K_3-K_{11}-K_{15}$ 、 $K_1-K_4-K_{16}-K_{17}$ 、 $K_1-K_4-K_{16}-K_{18}$ 、 $K_1-K_4-K_{16}-K_{19}$ 、 $K_1-K_4-K_{16}-K_{20}$ 、 $K_1-K_5-K_{21}$, 与 1#配变台区 12 支路实际拓扑结构一致。

4 结论

本文基于配电物联网智能终端设计了台区拓扑识别系统, 实现了台区拓扑结构的辨识。所提出的方法无需对台区进行大力改造; 不依赖于主站信息, 完全依靠各开关的现场安装情况, 实现自下而上拓扑成图, 分担了主站侧的计算压力。其发展应用前景包括以下几个方面:

- 1) 拓扑信息配置中扩展一次设备的基础信息, 随拓扑信息一起上报, 形成台区全台账管理。
- 2) 基于台区拓扑结构的实时动态识别, 开展物联网高级 APP 应用, 就地完成台区分段线损分析、台区分段扩容分析、谐波污染分布分析等。

配电物联网的高级分析始终绕不开对台区拓扑结构的动态实时识别, 本文所提方法具有较大的工程应用价值。

参考文献

[1] 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.

[2] 沈依婷, 张菁, 武鹏, 等. 含电动汽车的配电网双重不确定性网架规划方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 139-146.
 SHEN Yiting, ZHANG Jing, WU Peng, et al. Bi-uncertainty network frame planning method for distribution network with electric vehicles[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 139-146.

[3] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.

[4] 肖新华, 黄明烨, 宋志强. 基于智能配变终端的低压配电网智能运检体系构建研究[J]. 供用电, 2019, 36(6): 55-61.
 XIAO Xinhua, HUANG Mingye, SONG Zhiqiang. Research on construction of intelligent transportation inspection system for low-voltage distribution network based on intelligent distribution terminal[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(6): 55-61.

[5] 张丽虹, 常成, 熊炜, 等. 基于智能控制终端的主动配电网故障处理方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 22-29.
 ZHANG Lihong, CHANG Cheng, XIONG Wei, et al. Research on fault processing of active power distribution network based on intelligent control terminal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 22-29.

[6] 彭跃辉, 韩建沛, 刘念. 考虑需求响应和边缘计算的配电网分布式优化调度[J]. 华北电力大学学报, 2020, 47(4): 154-161.
 PENG Yuehui, HAN Jianpei, LIU Nian. Distributed optimal scheduling of distribution network considering demand response and edge computing[J]. Journal of North China Electric Power University, 2020, 47(4): 154-161.

[7] 楼宗明, 章坚民, 庄晓丹, 等. 基于在线开关状态和 DG 角色的动态配电网拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 64-69.
 LOU Zongming, ZHANG Jianmin, ZHUANG Xiaodan, et al. Dynamic topologic analysis of distribution network based on on-line switch and DG states[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 64-69.

[8] 张航, 王振岳, 陈星. 基于智能电表的低压电网故障预判系统[J]. 华电技术, 2019, 41(2): 14-17.
 ZHANG Hang, WANG Zhenyue, CHEN Xing. Fault prediction system for low voltage power grid based on smart meters[J]. Huadian Technology, 2019, 41(2): 14-17.

[9] 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 correlation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5): 52-59.

- [10] 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, 39(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, 2015, 39(11): 180-186.
- [11] 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.
- [12] 武亦彤. 智能配电网分布式拓扑识别与应用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16):136-142.
WU Yitong. Distributed topology identification and application method of smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 136-142.
- [13] 徐湛. 台区用户识别仪应用分析[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(11): 26-28.
XU Zhan. Application analysis of area users identify apparatus[J]. Metrology & Measurement Technique, 2009, 36(11): 26-28.
- [14] 蔡耀年, 李京凤, 孟世杰, 等. 低压台区电表检查中电力载波 OFDM 技术应用[J]. 中国电业, 2015(2): 33-35.
CAI Yaonian, LI Jingfeng, MENG Shijie, et al. Power line carrier OFDM technology application in low voltage courts meter detection[J]. China Electric Power, 2015(2): 33-35.
- [15] LUAN W, PENG J, MARAS M, et al. Distribution network topology error correction using smart meter data analytics[C] // 2013 Power and Energy Society General Meeting (PES), July 21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada: 1-5.
- [16] SHI B, WENINGER T. Discriminative predicate path mining for fact checking in knowledge graphs[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 104(7): 123-133.
- [17] 张波, 赵永红, 唐亮, 等. 基于 AMI 数据的城市低压配电网拓扑校验方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(6): 67-71.
ZHANG Bo, ZHAO Yonghong, TANG Liang, et al. Research on topology verification of city LV power distribution network based on AMI[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(6): 67-71.
- [18] LOURENCO E M, COELHO E P R, PAL B C. Topology error and bad data processing in generalized state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3190-3200.
- [19] 赵中华, 艾绍伟, 冯昊, 等. 虚实结合的配电主站测试平台设计[J]. 华电技术, 2019, 41(9): 39-41.
ZHAO Zhonghua, AI Shaowei, FENG Hao, et al. Design of test platform for power distribution master station combining virtuality and reality[J]. Huadian Technology, 2019, 41(9): 39-41.
- [20] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [21] 刘喜梅, 马俊杰. 泛在电力物联网在电力设备状态监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 69-75.
LIU Ximei, MA Junjie. Application of the ubiquitous power internet of things in state monitoring of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 69-75.
- [22] 徐丙垠, 李有天, 薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [23] 金涛. 云计算在电力信息化中的应用与展望[J]. 华电技术, 2012, 34(增刊 1): 38-41.
JIN Tao. Application of cloud computing in informatization of electric power industry and prospect[J]. Huadian Technology, 2012, 34(S1): 38-41.
- [24] PAN J, MCELHANNON J. Future edge cloud and edge computing for internet of things applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 439-449.
- [25] OKAY F Y, OZDEMIR S. A fog computing based smart grid model[C] // 2016 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), May 11-13, 2016, Yasmine Hammamet, Tunisia: 1-6.

收稿日期: 2020-08-13; 修回日期: 2020-10-16

作者简介:

王日宁(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网物联网; E-mail: 575568777@qq.com

武一(1964—), 女, 通信作者, 工学博士, 教授, 主要研究方向为智能控制系统研究与应用; E-mail: hebut06@163.com

魏浩铭(1984—), 男, 本科, 电气工程师, 主要研究方向为配电网物联网技术在中低压配电网中的实用化应用。

E-mail: whm996@126.com

(编辑 张爱琴)