

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801999

## 基于AMI数据的城市低压配电网拓扑校验方法研究\*

张波<sup>1</sup> 赵永红<sup>1</sup> 唐亮<sup>1</sup> 疏奇奇<sup>2</sup> 张良<sup>3</sup>

(1.国网安徽省电力公司 合肥 230022; 2.国网安徽省电力公司电力科学研究院 合肥 230022;

3.国电南瑞科技股份有限公司 南京 211100)

**摘要:**高级测量体系(AMI)用户量测数据的深度挖掘是当前研究热点,本文聚焦于应用AMI数据解决城市低压配电网拓扑校验的运行难题。首先分析了我国城市低压配电网的典型拓扑结构,指出低压配网拓扑中的户变和相变的内涵。然后建立了低压配电网的拓扑分析模型,包括等值电路模型和数学模型,并研究了基于多元线性回归的数学模型优化求解方法。结合电网的业务运行框架,构建电网运行中低压配电网拓扑校验框架,并针对性地详细给出了户变关系和相变关系校验流程方法。最后以合肥3个典型小区为例,进行了详细的拓扑校验分析并给出户变和相变的校验判断结果,算例表明户变校验准确率达100%,而相变校验准确率达95%。

**关键词:**AMI;低压配电网;多元线性回归;拓扑校验;户变校验;相变校验

**中图分类号:**TN98 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**470.40

## Research on topology verification of city LV power distribution network based on AMI

Zhang Bo<sup>1</sup> Zhao Yonghong<sup>1</sup> Tang Liang<sup>1</sup> Shu Qiqi<sup>2</sup> Zhang Liang<sup>3</sup>

(1.State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Hefei 230022, China; 2.State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China; 3. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Based on the advanced metering infrastructure (AMI) user measurement data, this paper aims solve topology verification of city LV power distribution network. Firstly, the typical structure of city lv power distribution network was analyzed, and belonging topology and phase topology were defined. Then the topology verification models were researched, including circuit model and math model, and the method of multi-variate linear regression is studied. Combining the power network operation, topology verification framework was given, and the detail verifications of belonging topology and phase topology were proposed. Finally, taking the three typical communities in Hefei as an example, the verification results were demonstrate. The example shows that the accuracy of belonging topology verification is 100%, and that of the phase topology is 95%.

**Keywords:** AMI; LV power distribution network; linear optimization; topology verification; belonging topology; phase topology

## 0 引言

随着社会的发展,用户对更可靠更优质的电能供应、更优质更贴心的供电服务的要求日益提升。而技术进步推进了智能配电网建设快速发展,给电网公司管理电网运行及提升服务提供了技术支撑。

配电网的拓扑结构是配电网进行线损分析、故障诊断、潮流计算、三相平衡等应用功能的基础<sup>[1-2]</sup>。然而,配电网拓扑结构繁杂并且节点分支体量巨大,配电自动化采集控

制布点有限且仅部署在中压配电网,配网分析缺少必要的数据支撑,因此多基于关键节点的供需平衡关系来进行故障、线损、三相平衡、负荷转供的分析<sup>[2-4]</sup>。用户拓扑关系也是基于原始的档案记录人工排查,台区普查过程中,电表所属台区不清和所属相线记录错误的现象屡见不鲜,这种现象在城乡结合部尤为突出,据澳洲报告统计有46%用户连接情况信息,缺失,另外54%用户连接需要重新评估其GIS数据是否准确,困扰了配电网优化经济运行。

如何进行拓扑识别与校验,解决末端电网拓扑混乱现

收稿日期:2018-11-09

\* 基金项目:国网公司科技项目“用电信息采集系统支撑配网运行高级应用”资助。

状,开始引起电网的关注,但目前研究多关注在中压配电网,文献[5]基于 GIS 地理系统去构建拓扑关系,文献[6-9]通过配电监测系统中的 iPMU 数据、测控终端等信息数据,进行中压配网拓扑识别构建。而体量巨大的低压配网拓扑错误更为严重,文献[10-11]从电力载波通信着手分析了用户相位识别,但在实际运行中受限。如何在不增加设备成本的情况下,实现低压拓扑的检验识别,是低压电网运行中的技术难题。本文通过聚焦挖掘高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)数据的应用价值来解决这一问题。高级量测体系 AMI 的迅速发展至当前接近全覆盖,使得配用电数据逐渐呈现体量大、类型多、增速快等大数据特征<sup>[12-13]</sup>。

本文定位于解决城市低压配电网拓扑校验问题,首先分析了我国城市低压配电网的典型拓扑结构,然后结合楼宇用户智能电表安装位置,建立低压配电网拓扑检验分析模型,包括等值电路模型和数学模型,并研究了基于多元线性回归的数学模型优化求解方法。并结合电网的业务运行框架,建立低压配电网拓扑校验框架,给出了具体的校验流程方法。最后以合肥 3 个典型小区为例,进行了详细拓扑校验分析验证。

### 1 城市低压配电网结构

城市低压配电网是指 10 kV/400 V 台区公变变压器以下的网络结构,10 kV 中压母线经过台区变压器后降为 400 V 低压母线,400 V 低压母线经若干出线柜分成多条 400 V 分支馈线,通过各 400 V 分支馈线将电能分配至不同的楼宇单元,各分支馈线再通过若干分支箱或低压母排将电能最终送至各终端用户。

图 1 所示为我国典型城市低压配电网的放射式网络结构,其中 1 号变压器下是分支箱式结构,各分支箱并列接多个表箱,2 号变压器是低压干线式的结构,通过密集型母排转接箱将线缆转接成低压母排,各表箱串联在母排上。图中黑色线条均为三相线缆,从表箱到用户,分化为单相线,红黄绿分别代表不同相别用户。

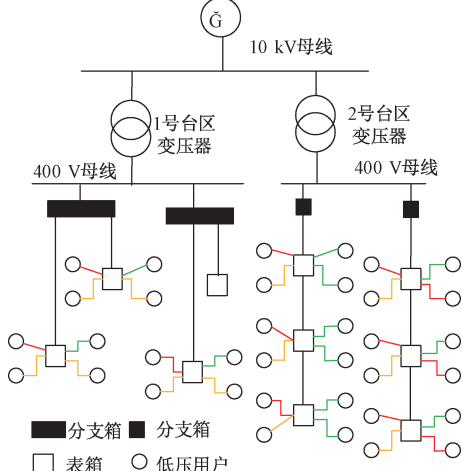


图 1 典型城市低压配电网拓扑结构

本文所分析的拓扑检验包含两类拓扑关系:1)户变关系校验,即校验用户所属的分支线及变压器。2)相变关系,即校验某用户分属于变压器的某一相。AMI 量测体系中用户智能电表安装于所属表箱内,测取表箱处的用户端口电压、电流、功率和电量数据。

### 2 低压配网拓扑分析模型

#### 2.1 等值电路模型

对城市电压配电网进行建模分析时,可以各条分支出线为单位进行。以 2 号台区变压器的其中一条分支出线为例,建立线路模型,如图 2 所示。其中变压器出口位置  $L_1$  为根节点, $L_2, L_5$  为母排转接点, $L_3, L_4, L_6$  各表箱在母排中连接的位置,均为中间茎节点, $C_1, C_2$  为表箱处的各用户,末端叶节点,该末端通过智能电表读取该处的电压  $U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}$  等,及获取各用户电流,即图中的  $I_{C1}, I_{C2}, I_{C3}$  等。

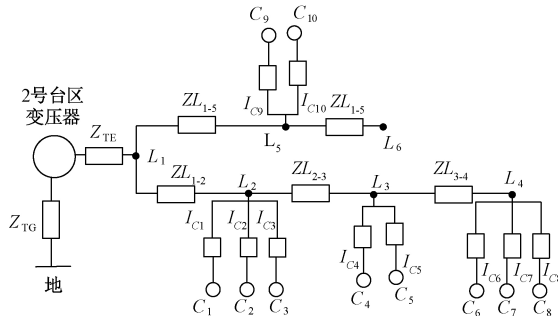


图 2 低压配网电路模型

#### 2.2 数学模型

针对图 2 中的电路模型,建立其对应的数学模型。由于低压线路电抗值较小,并且用户设备功率因素都在 0.9 以上,因此可假定电网三相平衡、线路阻抗角和用户功率因素相同,在电路分析时可以主要考虑线路阻抗的阻性部分,根据欧姆定律,建立回路电压方程。

数学模型分两步,首先建立从根节点到各个茎节点的电压方程:

$$\begin{cases} L_1 \rightarrow L_2: U_{L1} = .ZL_{1-2} \cdot \sum_{i=1}^8 I_i + U_{L2} \\ L_1 \rightarrow L_3: U_{L1} = ZL_{1-2} \cdot \sum_{i=1}^8 I_i + ZL_{2-3} \cdot \sum_{i=4}^8 I_i + U_{L3} \\ L_1 \rightarrow L_4: U_{L1} = ZL_{1-2} \cdot \sum_{i=1}^8 I_i + ZL_{2-3} \cdot \sum_{i=4}^8 I_i + \\ ZL_{3-4} \cdot \sum_{i=6}^8 I_i + U_{L4} \\ L_1 \rightarrow L_5: U_{L1} = ZL_{1-5} \cdot \sum_{i=9}^{10} I_i + U_{L5} \end{cases} \quad (1)$$

然后针对各茎节点,建立茎节点到末端叶节点的方程。

以分支箱节点  $L_2$  为例,建立从茎节点  $L_2$  至叶节点  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  的回路电压方程:

$$\begin{cases} L_2 \rightarrow C_1: U_{L_2} = I_{C_1} \cdot ZL_{C_1} + U_{C_1} \\ L_2 \rightarrow C_2: U_{L_2} = I_{C_2} \cdot ZL_{C_2} + U_{C_2} \\ L_2 \rightarrow C_3: U_{L_2} = I_{C_3} \cdot ZL_{C_3} + U_{C_3} \end{cases} \quad (2)$$

式中:由于终端节点都装备有智能电表,因此节点电压、电流、功率均为已知数据。根据线路阻抗和节点数据可以反推上游节点的电压,从而得到变压器最终二次侧出口电压。

### 2.3 线性规划求解算法

将 2.2 节的分层建立的数学模型,进行联立,整理得到全局矩阵方程<sup>[14-15]</sup>,形为:

$$u_j = u_0 + z_1 i_{j1} + z_2 i_{j2} + \dots + z_k i_{jk} + \epsilon_j \quad (3)$$

写成矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & i_{11} & i_{21} & \dots & i_{k1} \\ 1 & i_{12} & i_{22} & \dots & i_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & i_{1n} & i_{2n} & \dots & i_{kn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中  $\epsilon$  为残差,残差平方和为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (u_i - u_0 - z_1 i_{i1} + z_2 i_{i2} + \dots + z_k i_{ik})^2 \quad (5)$$

为寻找使  $Q$  最小的  $z_0, z_1, \dots, z_k$ , 利用  $Q$  分别对  $z_0, z_1, \dots, z_k$  分别求偏导并等于 0。整理后用矩阵形式表示:

$$I^T = (u - IZ) = 0 \quad (6)$$

即获得回归参数最小二乘解为:

$$\bar{Z} = (I^T I)^{-1} I^T u \quad (7)$$

从而获取各线路阻抗值,代回原方程并求得根节点处的电压值。

## 3 低压配电网拓扑校验方法

### 3.1 拓扑校验框架

在实际的电网运行应用中,拓扑校验功能模块基于用采系统框架开发并与基础平台集成,为用电信息采集系统的高级应用功能。图 3 所示为该拓扑校验功能的组织运行框架,通过与 SG186 系统和 PMS 系统获取最初的拓扑关系,并利用用电信息采集系统自身的采集框架,进行用户负荷数据的高密度采集,计算校验之后,将正确的相变关系和户变关系分别返回给 SG186 系统和 PMS 系统进行更正。

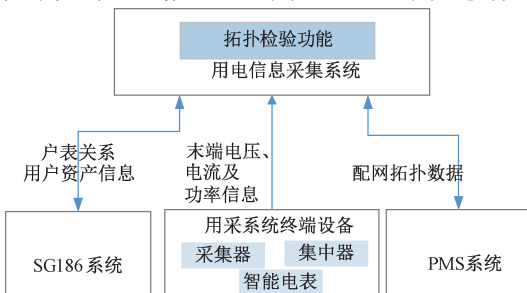


图 3 低压拓扑校验组织框架

### 3.2 拓扑分析过程

低压拓扑校验流程如图 4 所示,整个拓扑分析的过程如下:

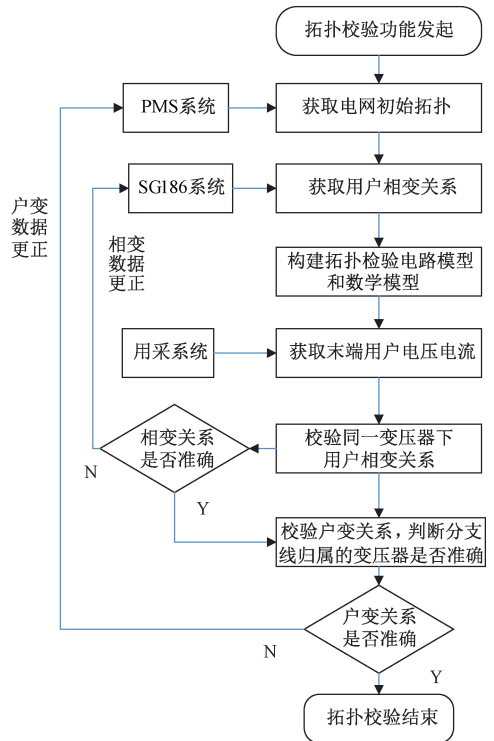


图 4 低压拓扑校验流程

1) 选择目标小区和目标低压台区,进行低压拓扑校验事件发起;

2) 系统与 PMS 系统进行对接,获取该小区各低压台区的配网拓扑关系;

3) 系统与 SG186 系统进行对接,获取该小区内所有用户的户表关系、资产信息、相位信息等;

4) 利用 2.1 及 2.2 节的电路模型和数学模型建立方法,对目标校验台区进行建模,建模时对各分支线进行单相建模;

5) 对用采系统采集设备进行高频召测,获取一日 96 点的用户负荷数据,主要是电压电流值;

6) 将数据代入模型,利用式(3)~(7)所介绍的方法进行模型求解,获取电网中各线段阻抗值,并进一步计算根节点电压值;

7) 利用同一变压器同一相用户的反解出的端电压曲线相同为原则,判断用户是否在同一相,若校验出错误相变关系,则通知 SG186 系统更正;

8) 利用同一变压器不同分支线的反解出的端电压曲线的聚类曲线相同为原则,判断各分支线是否属于同一变压器,若校验出错误拓扑关系,则通知 PMS 系统更正。

## 4 案例分析

在合肥蜀山区挑选 3 个居民小区,进行低压配电网拓

拓扑校验分析,3 个小区的主要信息如表 1 所示。挑选的几个小区配网结构均为分支箱式,低压母排分接若干分支线开关柜,每条馈线分支开关柜分出若干条电缆直接进楼到楼内的分支箱,再由分支箱分线至楼层表箱。

表 1 拓扑校验试验小区基本信息

序号	小区类型	建设年代	台变/个	分支线/条	用户/户
A	高层	2012	6	49	1 764
B	小高层	2006	8	55	1 320
C	多层	1995	3	17	510

### 4.1 相位校验

对每条分支线同一相位用户建立电路模型进行线路阻抗分析及端电压分析,观察各用户反推出的根节点的电压曲线,若某一用户算出的端电压,则怀疑该用户相位有问题。

B 小区 1 台变第 3 条分支线在验证 B 相用户相位时,发现该一表箱用户算出的端电压与其他用户算出的端电压差距较大,建立其电路模型,如图 5 所示。初步判断该用户相位有可能有问题,试着将该用户调整到 C 相,曲线重合度依然类似图 5 出现偏差,而将该户调整到 A 相时,则端电压曲线类似图 6。由此可判定这用户实际相位在 A 相。

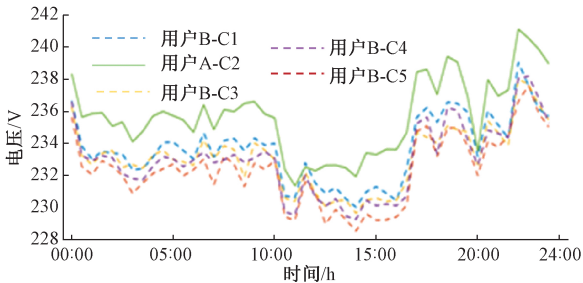


图 5 B 小区 1 号台变第 3 条分支线根节点电压曲线

此外在分析时发现,若用户相别出现差错,则会导致入户段的线路阻抗偏差与正常值,上例中 C2 为相别错误用户(实为 A 相,错记为 B 相),将 C2 用户放在 A、B、C 相时进行阻抗计算,发现相别错误时阻抗也会有明显变化,同时也会影响相邻线路的阻抗计算。如表 2 所示,表中  $Z_{C1}$ 、 $Z_{C2}$ 、 $Z_{C3}$  分别表示 C1、C2、C3 的入户段阻抗。通过阻抗值的对比分析辅助判断用户相别关系。

表 2  $L_3$  分支箱拓扑异常校验分析

阻抗	A 相	B 相	C 相
$Z_{C1}$	0.004 503	0.003 128	0.004 837
$Z_{C2}$	0.013 351	0.000 649	0.001 253
$Z_{C3}$	0.040 858	0.090 128	0.094 418

### 4.2 户变校验

以各条分支线同一相位的用户建立拓扑校验模型,分

别计算变压器出口根节点的电压曲线,并进行对比分析。同样是 B 小区 1 台变第 3 条分支线和第 4 条分支线,经计算根节点电压的聚合曲线并不相同,分别如图 6 和图 7 所示,图 8 所示为分支线 3 和 4 的聚合电压曲线对比。经对比,发现 4 号分支线的根节点的电压曲线与 2 号变压器下出线的计算结合重合度较好,因此可判断出该分支线的拓扑关系错误,并进行纠正。

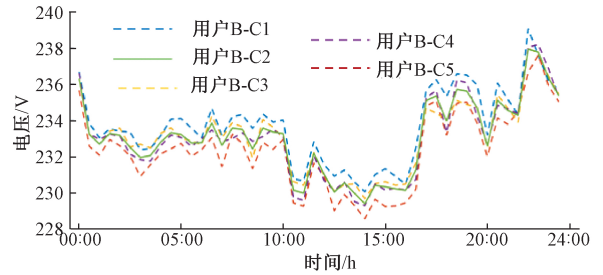


图 6 B 小区 1 号台变第 3 条分支线根节点电压曲线

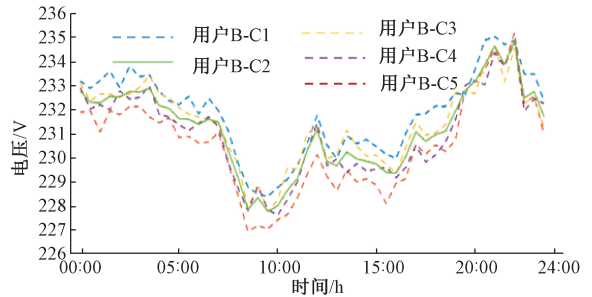


图 7 B 小区 1 号台变第 4 条分支线根节点电压曲线

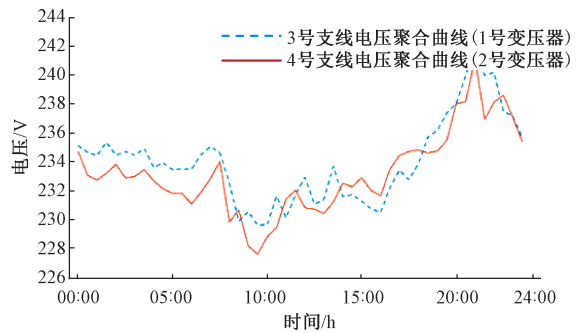


图 8 分支线 3 和 4 的聚合电压曲线对比

### 4.3 整体校验结果统计

图 9,图 10 及表 3 所示为 3 个小区拓扑校验的总体统计结果,通过统计结果可见,低压配电网中拓扑关系错误率较小,但用户相别档案错误率很高。新小区拓扑关系维护较好,错误率很小,但老小区拓扑关系错误率很高,个别甚至高达 30%。

对于拓扑校验的准确率,由于各个变压器的根节点电压曲线相同的概率很小,校正准确率达 100%,但对于用户

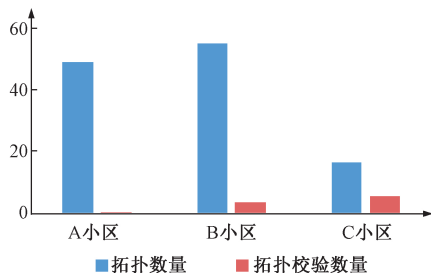


图9 3个小区拓扑校验对比

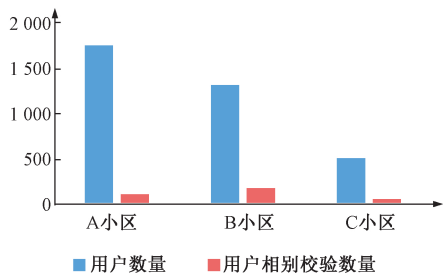


图10 3个小区相变校验对比

表3 3个小区整体拓扑校验结果

小区	分支线/ 条	错误分支线/ 条	用户/ 户	相别错误 用户/户
A	49	1	1 764	117
B	55	4	1 320	186
C	17	6	510	58

相别校正,个别情况下三相电压平衡度高,并且每条分支线用户数相对较少,个别情况下会发生相变错误漏判或误判现象,相变关系校验的准确率约95%。

## 5 结 论

本文研究利用AMI用户信息数据进行配网阻抗和电压分析,解决配电网量测数据不足的现状,助力低压配电网拓扑混乱难以克服的难题。

首先分析了我国城市低压配电网的典型拓扑结构,指出低压配网拓扑中的户变和相变关系的内涵。然后结合楼宇用户智能电表安装位置,建立了低压配电网的拓扑分析模型,包括等值电路模型和数学模型。然后研究了多元线性回归的优化求解方法,将各层级方程联立,并以方差最小为优化目标进行求解及结果验证。接着从而实际运行使用角度,结合电网的业务运行框架,构建电网运行中低压配电网拓扑校验框架,并针对性地详细给出了户变关系和相变关系校验流程方法。

最后以合肥3个典型小区为例,进行了详细的拓扑校验分析,演示了户变和相变的校验判断结果,通过根节点电压分析辅以阻抗变化,可以明显校验出相变拓扑错误;同样通过两条分支线计算出的根节点电压聚合曲线,可以明显

判断出户变拓扑的错误。本文介绍的方法户变校验准确率达100%,而相变校验准确率达95%。

## 参考文献

- [1] 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(自然科学版),2015,29(2):61-65.
- [2] 刘常澍,杜倩.配电网故障定位系统[J].电子测量技术,2005(3):22-23.
- [3] 张韬,田斌,宗志刚,等.配电自动化规划研究及工程实践[J].中国电力,2017,50(9):44-51.
- [4] PAK KHONG, JOHN THEUNISSEN, JETHR KAIRYS, et al.基于高级量测体系的数据分析研究与应用开发[J].供用电,2015,32(8):37-44.
- [5] 杨群,李伟,闫国年.基于GIS构建配电网拓扑关系的方法[J].电力系统自动化,2003(18):79-82.
- [6] 李昂,刘亚东,孙鹏,等.基于 $\mu$ PMU相位数据的配电网拓扑识别方法[J].智慧电力,2017,45(11):31-36.
- [7] 王哲.城市高压配电网接线模式自动识别[J].电力建设,2014,35(9):59-64.
- [8] 黄维芳,文安,金鑫,等.基于配电网测控终端的动态主体拓扑识别和就地化保护技术[J].电器与能效管理技术,2017(15):38-42.
- [9] 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.
- [10] 梁万荣.载波技术在台区用户识别中的应用[J].江西电力职业技术学院学报,2007(2):31-33.
- [11] 刘桐然,常晓华,冯婧.低压载波抄表运行调试和通信技术探讨[J].电子测量技术,2011,34(12):117-120.
- [12] ANDREW J B. A tale of two transformers: An algorithm for estimating[C]. 2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), IEEE, DOI: 10.1109/CCECE.2013.6567690.
- [13] LUAN W, PENG J, MARAS M, et al. Distribution network topology error correction using smart meter data analytics[C]. Power and Energy Society General Meeting (PES), IEEE, 2013.
- [14] 盛仲飙.基于MATLAB的线性规划问题求解[J].计算机与数字工程,2012,40(10):26-27,80.
- [15] 李骏俊,王厚军,周龙甫,等.基于多目标线性规划的模拟电路软故障诊断方法[J].电子测量与仪器学报,2009,23(3):9-14.

## 作者简介

张波,硕士、高级工程师,主要研究方向为电力营销等。

赵永红,本科、工程师,主要研究方向为用电信息采集。

唐亮,硕士、工程师,主要研究方向为用电信息采集。

疏奇奇,本科、高级工程师,主要研究方向为电能计量与用电采集等。

张良,本科、工程师,主要研究方向为用电信息采集、智能用电。

E-mail: zl\_nari@163.com