

# 配电网实时建模技术及关键问题研究综述

余佳<sup>1</sup>, 王晓荣<sup>2</sup>, 戴月升<sup>3</sup>, 李轩<sup>1</sup>

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古工业大学  
信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010080; 3. 内蒙古电力(集团)  
有限责任公司呼和浩特供电公司, 内蒙古 呼和浩特 010050)

**摘要:**随着智能电网建设的推进,智能采集设备终端铺设率大大提高,需求侧终端电气化已成为不可逆转的发展趋势。近年来,低压配电网由于系统信息更新不及时和管理的无序性导致配网拓扑与实际配置信息出现偏差。这些问题的出现影响配电网安全运行的同时,也对供电企业经营风险造成了影响,迫切需要探索配电网的实时建模技术,以精准辨识用户的接入信息,保障配电网的安全稳定运行。为此,首先从配电网结构特点、供电方式和配电网模型信息集成技术三方面分析了配电网的技术概况。在此基础上,从物理拓扑分析、拓扑辨识以及拓扑关键校验技术综述了配电网实时建模关键问题的研究现状,并进一步围绕配电网实时建模关键技术对未来可能的研究方向进行了展望,以期对未来研究提供参考。

**关键词:**配电网;实时建模技术;拓扑辨识;无功补偿;拓扑关键校验技术

**中图分类号:** TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23542

## Review on Real-time Modeling Technology and Key Issues of Distribution Network

YU Jia<sup>1</sup>, Wang Xiaorong<sup>2</sup>, Dai Yueheng<sup>3</sup>, LI Xuan<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, Nei Monggol, China; 2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, Nei Monggol, China; 3. Hohhot Power Supply Branch of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010050, Nei Monggol, China)

**Abstract:** With the advance of smart power grid construction, the terminal laying rate of intelligent acquisition equipment has been greatly improved, and the demand-side terminal electrification has become an irreversible trend. In recent years, the problems of users' default power supply and private overlapped lines in low-voltage distribution system frequently appear. The emergence of these problems not only affects the safe operation of the distribution network, but also affects the operation risks of power supply enterprises. It is urgent to explore the real-time modeling technology of the distribution network to accurately identify the access information of users and ensure the safe and stable operation of the distribution network. Firstly, the technical situation of distribution network was analyzed from three aspects: structure characteristics, power supply mode and information integration technology of distribution network model. On this basis, the research status of the key issues of distribution network real-time modeling was summarized from the physical topology analysis, topology identification and topology key verification technologies. Furthermore, the possible future research directions were prospected based on the key technologies of distribution network real-time modeling, in order to provide reference for future research.

**Key words:** distribution network; real-time modeling technique; topology identification; reactive power compensation; topology key verification technology

随着智能电网建设的推进,智能采集设备终端铺设率大大提高,需求侧终端电气化已成为不可逆转的发展趋势<sup>[1]</sup>。然而,现有配电系统已经不能适应城市建设和发展的用电要求,除此之

外,近年来低压配电系统中用户违约用电、私自搭接线路等问题频繁出现<sup>[2-3]</sup>,影响配电网安全运行的同时,也对供电企业经营风险以及配网运行经济性产生了影响。在日常的生产实践中若想

**基金项目:**内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(2020-02)

**作者简介:**余佳(1981—),女,本科,工程师,Email:yu999jia@126.com

尽可能避免上述问题,首先需要明确台区的拓扑结构,进而保障台区分布智能化监控。然而,在日常的配电运维管理工作中,往往存在户变连接关系不清晰,尤其是新建台区,部分拓扑根本无法直接获取,需要采取人工摸查,工作量巨大,造成了人力物力的浪费,而且这种方式也存在获取台区拓扑不准确的风险,同时,当台区拓扑发生变动时,不能及时发现问题,造成了台区拓扑接线图、单线图质量下降、台区线损不正确、停电定位准确率降低等诸多问题<sup>[4]</sup>。有效的配电网实时建模对于台区负荷平衡管理、降低配电网线损率、提升设备使用寿命、促进配电网安全高效运行具有重要的意义。

为此,首先从配电网结构特点、供电方式和配电网模型信息集成技术三方面分析了配电网的技术概况。在此基础上,从线变关系、户变关系以及用户间拓扑辨识技术等三方面综述了配电网实时建模关键问题的研究现状,并进一步围绕配电网实时建模关键技术,从配电网无功优化补偿和三相不平衡管理、基于地理信息系统(geographic information system, GIS)的配电网实时建模技术以及配电网信息模型与自动校核等方面对未来可能的研究方向进行了展望,希望能为未来的研究提供参考。

## 1 配电网信息集成技术

配电网信息集成技术可在配电网自动化系统与外部系统模块间建立有效链接,实现两者间的信息交互与共享机制,主要包括模块融合技术、系统多版本协同技术、多累模型导入技术以及异质化图形转换技术等几类。

配电网自动化系统的功能结构如图1所示。其中,模型版本管理负责可分为离线版和在线版

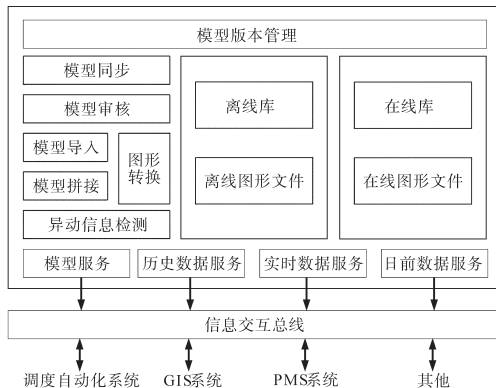


图1 配电网自动化系统的功能结构图

Fig.1 Distribution network automation system diagram

两部分,分别包含离线图形文件和在线图形文件的全过程管控,具体实现过程包含模型同步、模型审核、模型导入、模型拼接以及异动信息检测5部分。系统包含2个数据库:离线库和在线库,分别对应不同的图形文件。此外,模型可通过信息交互总线与外部系统模块对接,具体包括模型服务、历史数据服务、实时数据服务以及日前数据服务。

## 2 配电网实时建模研究

配电网实时建模的关键在于如何利用两侧数据辨识配电网拓扑结构,进而实现配电网的实时建模。配电网实时建模中的物理拓扑分析方法主要可分为以下3类:1)线变关系,即线路与配电网台区变压器的所述关系;2)变户关系,即配电网用户与所属配电网台区变压器之间的关系;3)配电网台区馈线关系,即配电网用户的拓扑链接关系。配电网物理拓扑研究分类框架如图2所示。

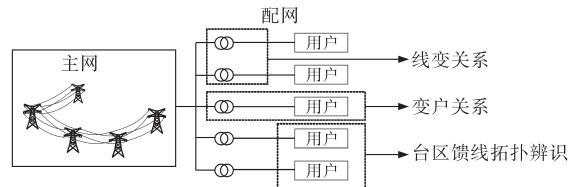


图2 配电网物理拓扑研究分类框架

Fig.2 Research framework of distribution network physical topology analysis

### 2.1 线变关系辨识

线变关系辨识指的是线路与所属配电网台区变压器对应关系的识别,线变关系的精准辨识是保障配电网安全运行的关键要素之一<sup>[5-7]</sup>。在低压配电网运行中,为了解决配网线路间负荷的不平衡问题以最小化供电损耗,配变倒闸操作可能使线路与附近变压器的对应所属关系有临时的改变,此时若相应的线变关系数据更新不及时,则会造成系统中线变关系与实际数据产生差异。此外,若同一配电网区域存在变压器增设或线路调整的情况,同样会出现上述差异,最终会对配网安全运行管理产生影响<sup>[8-9]</sup>。

传统的线变关系辨识一般采用人工巡检的方式校验,主要依靠望远镜或红外线设备对杆塔进行检查,存在排查面积大、效率低、出错率高、人力成本较高等缺陷。也有研究依据停电纪录对系统内的线变关系进行更新调整校核,相比于人工巡检具有较好的准确度,然而此类方式对完整停电数据记录的要求极高,在实际中适应性较差。随着智能电网的建设和低压配电网量测表

计安装的大范围、高密度普及,配网运行时产生的数据在广度和精度方面都有了极大的提高,为线变关系的辨识提供了新的解决途径。文献[10]基于台区能量守恒原理,构建了基于偏相关系数的配电网台区线变关系特性分析模型,能够极大提高线变关系辨识的精度;文献[11]以配电网台区出口电压在三相负荷平衡与不平衡的差异性为切入点,提出了基于出口电压归算的线变关系校验方法,有效解决了原有单相方法中,出口单相电压不对称所导致的线变关系校验失效的难题。

## 2.2 变户关系辨识

变户关系辨识指的是用户与所属配电网台区变压器对应关系的识别,用户作为配电网台区供电的终端,变户关系的精准辨识同样是保障配电网安全运行的关键要素之一<sup>[12]</sup>。为了匹配配电网用户规模和类型的快速增长,近年来配电网台区设备的扩容更新非常频繁,由于相关数据更新的不及时和管理的不完善,与上述“线变关系”的问题类似,同样存在用户的配电网台区归属的系统数据与实际情况不匹配的问题,这种不匹配关系会影响线损率的计算,进而影响结算的公平性,同时也会对配电网的高效运行管理产生影响,也会在一定程度上降低供电企业的用户满意度,影响企业形象<sup>[13]</sup>。

目前,在实际中变户关系的辨识主要采用基于载波通信的信号检测和基于停电校核的现场检测两种方式<sup>[14]</sup>。其中,停电校核的方式需要分区按计划停电,通过分析统一台区下用户停电时间的差异性,可确定当前时刻配电网台区变压器与各用户的关系,该种方式目前仍用于智能电表或量测设备尚未普及的老旧小区,然而,这种方式会影响台区居民的正常用电,会降低用户满意度,且效率低下,同样存在一定误差。基于载波通信的方式主要依靠对变压器与用户两端的载波数据进行分析,进而分析实际的变户关系,但这种方式一方面容易受到干扰,实际中存在一定的误差;另一方面,受负荷波动性的影响,对于某些负荷波动较大的台区依然需要人工走访校核,实际应用效率差<sup>[15-16]</sup>。

随着用户信息采集系统的完善和普及,也有研究试图通过对用户用电数据的深度挖掘或一致性分析,实现变户关系拓扑的精准高效辨识<sup>[17-18]</sup>。

## 2.3 配电网台区馈线拓扑辨识

现阶段,相比于前述的“线变”和“变户”关

系,由于配电网台区用户分布的分散性和随机性以及用户间还存在所接相位的差异性,台区馈线拓扑信息的不一致问题最为严重,极大影响了配电网的安全高效运行。传统的实际工作中依然依靠人力逐步排查实现系统拓扑数据与实际信息的校核,此类以人工为主的校核方式依旧存在成本较高、效率低且受人为因素影响、校核精度较低等一系列问题。随着智能电网建设的推荐和各类量测仪表的普及,基于数据驱动的配电网台区馈线拓扑辨识的算法研究已成为目前的主要趋势<sup>[19]</sup>。

基于数据驱动的拓扑辨识算法注重挖掘用户间量测信息的相关性以及多元变量的耦合特性,进而实现馈线拓扑的精准辨识。文献[20]构建了用户电压信息的相关性分析模型,通过分析各个量测点电压信息的相关性和梯度,实现了用户邻接点的精准识别,并以此为基础还原台区馈线拓扑。文献[16]和文献[21]以台区用户的相对所属关系为切入点,分别构建了考虑分接点耦合效应的回归分析模型和考量量测信息幅值与相角相关性的误差分析模型,从而实现台区馈线的拓扑辨识。文献[22]提出一种能有效辨识低压配电网用户差异性的识别系统。文献[23]通过检验电压曲线的离散点明确各区县相似性关系,进而实现低压配电网的用户拓扑关系辨识。文献[24]基于海量智能电表的量测数据,提出了一种基于数据驱动的低压配电网拓扑辨识方法。

## 3 配电网实时建模关键技术

### 3.1 配电网无功补偿优化及三相不平衡管理技术

配电网无功优化是保障配电网安全稳定经济运行的重要途径之一,一方面涉及无功补偿设备的投资决策优化,另一方面也涉及到配电网中各元件的协调优化运行,均可表示为多目标、多关键约束的非线性优化问题<sup>[25-29]</sup>。近年来,针对配电网无功优化的研究主要涉及到以下几方面:

1)优化目标。目标函数的选择是配电网无功优化问题的核心,目标函数既可能涉及到配电网台区云运行费用、配电网运行网损等经济性问题,也需要考虑配电网电压偏差、设备投切次数最小等安全性问题,恰当的目标函数对选择最优最终的优化结果和解决实际问题具有重要意义<sup>[30-33]</sup>。

2)关键约束。由上述分析可知,配电网的无功优化问题涉及到配网运行的诸多方面,在不同

的目标函数下,均涉及多类型约束,具体的关键约束分类如图3所示。

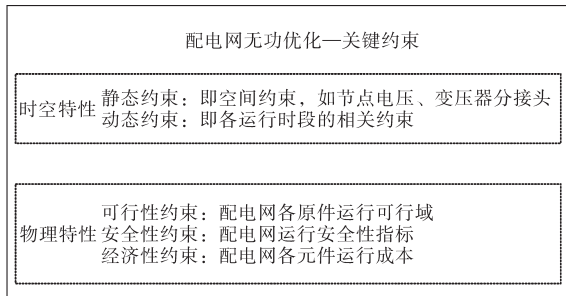


图3 配电网无功优化关键约束

Fig.3 Key constraints of reactive power optimization in distribution network

3)求解算法。配电网的无功优化问题本身是一个涉及到多变量的问题,其中包括连续变量、离散变量以及多类型约束的混合非线性规划问题,且大多数情况下目标函数复杂,甚至不可微,这对常规的优化求解过程造成了非常大的困难。一般可通过非线性约束的线性化,将非线性问题转化为线性规划问题或混合整数问题进行求解,或通过遗传算法、粒子群算法等启发式算法进行求解<sup>[34-36]</sup>。考虑到某些问题初始数据少,建模困难,也有研究采用模糊优化法和专家系统法进行分析求解<sup>[37]</sup>。

随着需求侧电气化程度的增高,配电网结构日趋复杂的同时,多样性的用户类型以及对电压质量需求的变高给低压配电网台区的三相平衡带来了新的挑战。三相平衡指的是配电网负荷被均匀分配在三相上,使得电压和电流指标趋于一致,此时配电网系统运行效率较高。针对三相不平衡问题,国内外展开了大量研究并取得一定成果。文献[38]给出了三相不平衡的定义,并进一步分析了三相不平衡台区的判定在实际中的应用方式,进而从4个方面概述分析了三相不平衡的原因及危害,如图4所示。

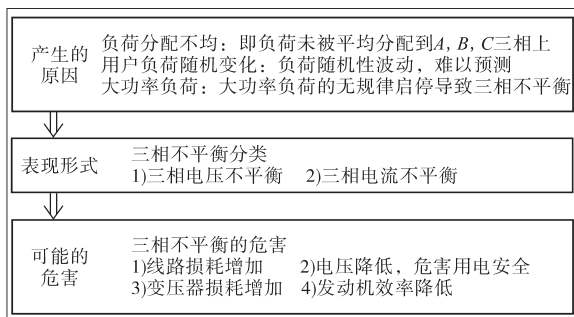


图4 配电网三相不平衡原因及危害

Fig.4 Cause and harm of three-phase unbalance in distribution network

已有的配电网无功优化研究中鲜有考虑配电网三相不平衡情况,然而随着需求侧电气化程度的不断增加,三相不平衡问题将逐渐成为未来影响配电网无功优化的关键要素之一<sup>[39-43]</sup>。如何基于台区量测信息的客户低电压分析技术,采用数据驱动的分析方式,基于海量智能电表的量测信息,通过配变终端完成边缘分析,研究不同配电网潮流情况下,设备参数、无功补偿设备和换相开关投切情况对电压的影响,进而根据分析结果调节台区内换相开关和无功补偿装置,实现就地优化和处理是未来需要深入研究的方向之一。

### 3.2 基于GIS的配电网实时建模技术应用

配电网模型主要依靠地理信息系统(GIS)作为源端支撑,在物理拓扑分析和识别的基础上,结合GIS地理信息、计量基础档案模型、设备物理参数等数据,建立表箱聚合负荷与用户曲线的映射模型,辨识用户与表箱的物理连接关系,对低压配电网的逻辑拓扑模型及关联关系进行拓扑参数修正。通过结合一体化GIS的公共信息模型(common information model, CIM)信息,实时联动配电系统各个环节的信息,在GIS上呈现出对应的配置信息和实时告警信息具有重要的意义<sup>[44]</sup>。

现有涉及配电网的信息系统暂未统一地理拓扑模型及公共信息模型,导致不同横向业务系统之间信息数据无法灵活交互,无法有效支撑台区拓扑关联校验。如何根据业务需求对系统数据进行预处理是台区拓扑关联校验的难点。如何利用配网自动化的开关遥信状态,结合一体化GIS的CIM模型信息,实时拆分馈线单元,构建精确化的实时配电网动态模型,支撑线损精细化计算是未来需要深入研究的方向之一。

### 3.3 低压配电网信息模型与自动校核技术

基于用电信息采集载波通道上送的低压配电网信息模型与自动校核技术,是在电力载波通信技术的基础上,将自动化采集的配电信息数据传送到主站,从而进行大数据分析、系统建模的配电网台区多业务边缘计算技术。目前适用于配电网低压台区的精准线损计算、负荷与分布式电源预测、无功优化等基础模型较为复杂,工程实用性较弱<sup>[45-48]</sup>。

如何提供一种识别率高、操作方便的台区识别方法,在有效利用海量数据分析计算的同时有效降低计算成本是亟待解决的难题。具体而言,

海量数据的科学聚类分析、复杂模型的快速求解以及高精度的预测技术是目前需要突破的技术瓶颈。基于载波技术,结合计量自动化系统、低压配电网信息模型,以及低压集抄准实时识别技术,通过自研智慧台区系统进行多源数据融合,可实现台区侧、低压线路侧、用户侧等感知信息自动采集,通过部署台区总监测、分支监测终端、分支监测单元等端设备实现台区状态的感知,由集中器、边缘代理等设备实现信息边缘计算,采用无线专网/公网等通信方式将采集数据传送至物联管理平台或智慧台区应用系统。基于大数据分析和算法研究,自动识别台区拓扑结构,解决台区户变关系需要未来深入研究。

## 4 结论

近年来,低压配电网由于系统信息更新不及时和管理的无序性导致配网拓扑与实际配置信息出现偏差。这些问题的出现影响配电网安全运行的同时,也对供电企业经营风险造成了影响。特别是针对某些偏远地区,基础设施融合薄弱,交通不便利,容易面临供电可靠性低、私自线路改造多发等问题,有效的配电网的实时建模技术,通过精准辨识用户的接入信息,能有效保障配网的安全稳定运行。首先从配电网结构特点、供电方式和配网模型信息集成技术三方面分析了配电网的技术概况。在此基础上,从线变关系、变户关系以及用户间拓扑辨识技术等三方面综述了配电网实时建模关键问题的研究现状,并进一步围绕配电网实时建模关键技术,从配电网无功优化补偿和三相不平衡管理、基于GIS的配电网实时建模技术以及配电网信息模型与自动校核等方面对未来可能的研究方向进行了展望,希望能为未来的研究提供参考。

### 参考文献

- [1] 徐晓春,王栋,李佑伟,等.考虑配电网级联故障的分布式电源选址方法研究[J].电气传动,2021,51(8):65-70,76.  
Xu Xiaochun, Wang Dong, Li Youwei, *et al.* Research on distributed power source location in electricity distribution networks with the consideration of cascading failures[J]. Electric Drive, 2021, 51(8): 65-70, 76.
- [2] Li G, Li N, Liu S, *et al.* Compressive sensing-based topology identification of multilayer networks[J]. Chaos, 2019, 29(5): 053117.
- [3] 高闰国,匡洪海,钟浩,等.适用于直流配电网的改进下垂电压控制策略[J].电气传动,2021,51(21):53-58.  
Gao Runguo, Kuang Honghai, Zhong Hao, *et al.* Improved droop voltage control strategy for DC distribution network[J]. Electric Drive, 2021, 51(21): 53-58.
- [4] Farajollahi M, Shahsavari A, Mohsenian-Rad H. Topology identification in distribution systems using line current sensors: an MILP approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1159-1170.
- [5] Liang D, Zeng L, Chiang H D, *et al.* Power flow matching-based topology identification of medium-voltage distribution networks via AMI measurements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130(3): 106938.
- [6] 李国昌.基于LoRa技术和GPU加速的台区拓扑辨识方法[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.
- [7] 徐伟,王斌,姜元建,等.低压电力线载波通信技术在用电信息采集系统中的应用[J].电测与仪表,2010,47(S2):44-47.  
Xu Wei, Wang Bin, Jiang Yuanjian. Power line carrier communication technology and its applications in electric energy data acquisition system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(S2): 44-47.
- [8] Choi J K. The design of a control & measurement system for the driving of wheel-in motor[J]. Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, 2015, 25(4): 405-411.
- [9] Cavraro G, Bernstein A. Bus clustering for distribution grid topology identification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4080-4089.
- [10] 唐泽洋,周鲲鹏,曹侃,等.基于配电网运行数据的线变关系校验方法[J].高电压技术,2018,44(4):1059-1068.  
Tang Zeyang, Zhou Kunpeng, Cao Kan, *et al.* Substation area topology verification method based on distribution network operation data[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1059-1068.
- [11] 宋宇,余永忠,梁旭常,等.基于电能计量管理系统数据分析的配电网线变关系校验方法[J].高电压技术,2021,47(12):4461-4470.  
Song Yu, Yu Yongzhong, Liang Xuchang, *et al.* Calibration method of line transformer relationship in distribution network based on data analysis of electric energy metering management system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4461-4470.
- [12] Shen Y, Fu X, Giannakis G B, *et al.* Topology identification of directed graphs via joint diagonalization of correlation matrices[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2020, 6: 271-283.
- [13] Wu Y, Wang H, Wang Y, *et al.* Graphical topology autonomic identification method for human-machine interface modelling based on quadratic space mapping[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108691-108704.
- [14] Weng Y, Liao Y, Rajagopal R. Distributed energy resources topology identification via graphical modeling[J]. IEEE Transac-

- tions on Power Systems, 2016, 32(4):2682-2694.
- [15] 沈煜,程建翼,杨志淳,等.湖北省农村配电网低电压治理实例[J].供用电,2017,7(1):13-17.  
Shen Yu, Cheng Jianyi, Yang Zhichun, *et al.* Cases of "low voltage" governance of rural distribution network in hubei province[J]. Distribution & Utilization, 2017, 7(1):13-17.
- [16] Short T A. Advanced metering for phase identification, transformer identification, and secondary modeling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2):651-658.
- [17] 耿俊成,张小斐,郭志民,等.基于离散 Fréchet 距离和剪辑近邻法的低压配电网拓扑结构校验方法[J].电测与仪表,2017,54(5):50-55.  
Geng Juncheng, Zhang Xiaofei, Guo Zhimin, *et al.* Topology verification of low-voltage transformer areas based on discrete Fréchet distance and editing nearest-neighbors method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(5):50-55.
- [18] 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, *et al.* AMI data analytic [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1):29-36.
- [19] 李琮琮,范学忠,王清,等.基于用电信息采集系统的配电网台区识别[J].电测与仪表,2019,56(24):109-114.  
Li Congcong, Fan Xuezhong, Wang Qing, *et al.* Station area recognition of distribution network based on electricity information acquisition system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24):109-114.
- [20] Luan W, Peng J, Maras M, *et al.* Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4):1964-1971.
- [21] Luan W, Peng J, Maras M, *et al.* Distribution network topology error correction using smart meter data analytics[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, Canada, 2013:1-5.
- [22] 张远来,易文韬,范启俊,等.基于调度运行管理系统的配电网故障研判方案[J].电力系统自动化,2015,39(1):220-224.  
Zhang Yuanlai, Yi Wentao, Fan Qijun, *et al.* Distribution network fault analysis scheme based on dispatching operation management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1):220-224.
- [23] 阿辽沙·叶,顾君,张小秋.基于数据时空相关性的智能台区识别技术[J].现代电子技术,2018,41(4):30-33.  
Ye Aliaosha, Gu Jun, Zhang Xiaoqi. Intelligent transformer room recognition technology based on temporal and spatial data correlation[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(4):30-33.
- [24] 李亚,樊汝森,蒋伟,等.基于 BP 神经网络的智能台区识别方法研究[J].电测与仪表,2017,54(3):25-30.  
Li Ya, Fan Rusen, Jiang Wei, *et al.* Research on the intelligent transformer area recognition method based on BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(3):25-30.
- [25] 耿俊成,吴博,万迪明,等.基于离群点检测的低压配电网拓扑结构校验[J].电力信息与通信技术,2017,15(5):61-65.  
Geng Juncheng, Wu Bo, Wan Diming, *et al.* Low-voltage transformer area topology verification based on outlier detection[J]. Electric Power ICT, 2017, 15(5):61-65.
- [26] 李建,赵汉昌.多功能低压台区识别设备的研制[J].电测与仪表,2014,51(13):107-111.  
Li Jian, Zhao Hanchang. The development and manufacture of a multi-function equipment for low voltage area identified[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(13):107-111.
- [27] 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. 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.
- [28] 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.
- [29] 郝思鹏,邹添天,陈婷,等.农网配电台区智能监控系统研发[J].电测与仪表,2014,51(23):94-98.  
Hao Sipeng, Zou Tiantian, Chen Ting, *et al.* Development of the intelligent monitoring system of the rural power grid distribution substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(23):94-98.
- [30] Kas N, Tor O B, Cebeci M E, *et al.* Theoretical and practical aspects of implementing a low voltage express feeder between nearby distribution transformers to reduce annual losses[C]// Smart Grid and Cities Congress and Fair Istanbul, IEEE, 2017:70-74.
- [31] 张磐,黄旭,高强伟,等.基于运行扰动数据分析的低压台区拓扑辨识方法研究[J/OL].电测与仪表, [2021-02-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DCYQ20210223004&uniplatform=NZKPT&v=fzYhayA03xapvoni0Zb0p6ktOnOz32cvJGvZO-su36JgMzuCUhlxWHDgIxzNBd422>.
- [32] Zhang Pan, Huang Xu, Gao Weiqiang, *et al.* Research on topology identification method of low-voltage station based on operational disturbance data analysis[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, [2021-02-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DCYQ20210223004&uniplatform=NZKPT&v=fzYhayA03xapvoni0Zb0p6ktOnOz32cvJGvZO-su36JgMzuCUhlxWHDgIxzNBd422>.
- [32] Mahrooghi A, Lakzian E. Optimization of wells turbine performance using a hybrid artificial neural fuzzy inference system (ANFIS)-genetic algorithm (GA)[J]. Ocean Engineering, 2021, 226(1):108861.
- [33] Preschon J, Piercy D S, Tveit O J, *et al.* Optimal control of reac-

- tive power flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(1):40-48.
- [34] Kou G, Xiao H, Cao M, *et al.* Optimal computing budget allocation for the vector evaluated genetic algorithm in multi-objective simulation optimization[J]. Automatica, 2021, 129(5): 109599.
- [35] Li J, Dai Y, Gu L, *et al.* Genetic algorithm based temperature control of the dense granular spallation target in China initiative accelerator driven system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 154(2):108127.
- [36] 姚小寅,孙元章,王志芳. 电力系统无功源最佳配置地点的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3):12-15.  
Yao Xiaoyin, Sun Yuanzhang, Wang Zhifang. Studies on the optimal allocation of reactive power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3):12-15.
- [37] 杨磊,刘天纵,张兆娴,等. 配电网三相不平衡常见原因分析[J]. 科技风, 2017(2):124-136.  
Yang Lei, Liu Tianzong, Zhang Zhaoxian, *et al.* Analysis of common causes of three-phase unbalance in distribution network[J]. Technology Wind, 2017(2):124-136.
- [38] 周丽莹,夏昌浩. 三相桥式变流器负序电流补偿策略[J]. 电气传动, 2022, 52(9):39-45.  
Zhou Liying, Xia Changhao. Negative sequence current compensation strategy for three-phase bridge converter[J]. Electric Drive, 2022, 52(9):39-45.
- [39] 施荣,王涛,李宁,等. 孤岛微电网中的虚拟同步发电机并联控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(6):44-50.  
Shi Rong, Wang Tao, Li Ning, *et al.* Parallel control strategy of virtual synchronous generator in isolated microgrid[J]. Electric Drive, 2021, 51(6):44-50.
- [40] 林东敏,孙永彦,张小莉,等. 电压不对称骤升下DFIG暂态特性及无功协调控制[J]. 电气传动, 2021, 51(4):34-39.  
Lin Dongmin, Sun Yongyan, Zhang Xiaoli, *et al.* Transient characteristics and reactive power coordination control of DFIG under asymmetric voltage swell[J]. Electric Drive, 2021, 51(4): 34-39.
- [41] 苗海东,王金梅,马文涛,等. 一种改进的微电网无功分配控制策略研究[J]. 电气传动, 2021, 51(1):51-55.  
Miao Haidong, Wang Jinmei, Ma Wentao, *et al.* Research on an improved control strategy of reactive power distribution in microgrids[J]. Electric Drive, 2021, 51(1):51-55.
- [42] 黄雷. 基于模型设计方法的两级式光伏并网系统开发[J]. 电气传动, 2020, 50(11):95-100.  
Huang Lei. Development of model-based design of double stage grid connected PV system[J]. Electric Drive, 2020, 50(11):95-100.
- [43] Chu C T, Hawkes A D. A geographic information system-based global variable renewable potential assessment using spatially resolved simulation[J]. Energy, 2020, 193:116630.
- [44] Lin R, Ye Z, Wu B. The application of hydrogen and photovoltaic for reactive power optimization[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(17):10280-10291.
- [45] Wu J, Wen P, Sun X, *et al.* Reactive power optimization control for bidirectional dual-tank resonant DC-DC converters for fuel cells systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9):9202-9214.
- [46] Ma W, Wang W, Chen Z, *et al.* Voltage regulation methods for active distribution networks considering the reactive power optimization of substations[J]. Applied Energy, 2021, 284:116347.
- [47] 王晓文,申凯,高强,等. 配电网三相不平衡抑制方法综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2016, 12(1):40-47, 60.  
Wang Xiaowen, Shen Kai, Gao Qiang, *et al.* Summary on suppression methods for three-phase unbalance in distribution network[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2016, 12(1):40-47, 60.
- [48] 房雪涛. 配电网三相不平衡负载的无功补偿技术研究[D]. 南京:东南大学, 2015.  
Fang Xuetao. Research on reactive power compensation applied to the three-phase unbalanced loads in distribution network[D]. Nanjing: School of Electrical Engineering Southeast University, 2015.

收稿日期:2021-05-22  
修改稿日期:2021-06-10