

无线传感器在智能配电网中的通信网络设计

刘茂胜¹, 姜有泉², 汤亚芳²

(1. 贵州电网有限责任公司仁怀供电局, 贵州 遵义 564500; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:智能配电网可以有效地提高配电系统的供电质量、实现分布式电源的并网优化运行与配电设备的高效运转、完成与用户之间的有效互动。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)具有建设成本低、快速自组网等特点,在智能配电网通信系统中具有广阔的应用前景。通过总结智能配电终端在配电网的分布特征以及 WSN 在电力系统中的应用现状,分析了 WSN 的网络结构及其在智能配电网中的应用特点,并以此为基础给出了智能配电网 WSN 的设计原则。根据该原则设计了智能配电网 WSN 的分层体系结构,包括终端采集网、汇聚网和信息接入网。智能配电网的通信系统通常由多种通信方式组成,该文给出了与其他通信方式联合组网的设计方案,该方案通过构建业务终端层、接入层、骨干层和配电主站层,可以有效地扩展智能配电通信网的通信范围,提高智能配电网的网络数据完整性。

关键词:智能配电网;无线传感器网络;网络设计

文章编号:2096-4633(2018)11-0057-06 **中图分类号:**TM73 **文献标志码:**B

智能配电网位于输电系统和电力消费者之间,通过先进的通信技术、控制技术和管理技术,为用户提供高质量和高可靠性的供电。智能配电通信网络是整个智能配电网的重要组成部分,是电力主干通信网络的有效延伸,但是由于配电网规模大、节点多、覆盖面广导致了配电通信系统投资规模大、建设难度高、施工周期长。无线传感器网络具备无线组网、建设成本低、网络铺设快、自愈能力强和数据安全性高等特点,被推荐为智能电网可利用的几种通信技术之一^[1-4]。

目前针对智能配电网的无线传感器网络研究主要集中在以下两个方面:一是路由层协议^[5]的研究,通过采用能量均衡的无线传感器路由算法,降低网络中节点的能量消耗,同时提高网络整体性能。二是 MAC 层协议^[6]的研究,通过在 MAC 层中设计实时性和非实时性的缓冲队列,在不增加网络开销的情况下,实现实时数据和非实时数据的高效传输。

该文从智能配电终端的分布特点和无线传感器网络结构着手,分析无线传感器在智能配电网中的网络结构特点和应用特点。根据智能配电网通信网络的设计原则要求,开展了智能配电网 WSN 的分层体系设计,并给出了 WSN 与其他通信方式的联合组网设计方案,以实现智能配电信息主站与智能配电终端设备之间的有效通信组网连接。

1 智能配电终端节点的分布特征

智能配电网采集的数据节点包括配电终端(DTU、FTU、TTU)、分布式能源站、智能电表等节点。这些节点基本上沿着配电线路平行辐射^[7-9]。在负荷密集的区域(如中心城区),10 kV 线路较为密集,终端的数量也随之增加,在负荷较少的区域(如郊区或者农村地区),各 10 kV 线路距离相对较远,终端数量少且间距也随之增大。这些智能配电终端的分布具有以下特征:

1.1 配电终端数量众多

城市配电网中,数据采集的节点包括开闭所、环网柜、柱上开关、配电变压器、配电室等区域。这些节点根据城市规模的大小,数量从几百个到上万个。

1.2 分布区域广泛

智能配电终端通常分散分布在网架结构陈旧的老城区、拓展建设的新城区和负荷密度较低的郊区^[10-11]。并根据区域电力负荷的大小,呈多间距分布,遍布城市各个角落。

1.3 地貌环境复杂

智能配电终端通常安装于杆塔上或地面的柜体内,随着 10 kV 线路的延伸。延伸的区域具有不同的建筑密度和道路网络,某些城市还有河流、湖泊等多样性的地貌特征。

智能配电网的终端设备数量多、分布区域广泛、地貌环境复杂,并且整个通信网络对数据质量有较高的要求。

2 智能配电网无线传感器网络

2.1 无线传感器网络结构

无线传感器网络是一项新兴的多学科交叉技术,它结合了通信、传感、嵌入式等多学科的先进技术,构建起数据采集、数据汇总和信息传输的多功能通信平台,是目前国内外学者的研究热点之一^[12-14]。无线传感器网络技术具有低成本、低功耗、多功能、快速自组织等优点,在各个领域都得到了广泛应用。无线传感技术将真实物理世界与信息世界融合在一起,成为沟通真实物理世界和信息世界的桥梁,也将改变人与自然交互的方式。无线传感器网络的典型结构如图 1 所示,通常包括传感器节点(Node)、汇聚节点(Sink)和管理节点。大量的传感器节点部署在监测区域附近或内部,将采集到的数据沿着其他传感器节点逐跳进行传输,在数据传输过程中可能被多个节点处理,经过多跳以后汇集到汇聚节点或远方的 Sink 节点,最后直接或通过其他通信方式到达用户管理节点。用户管理节点也可以反过来通过同样的方式下达配置和管理指令。

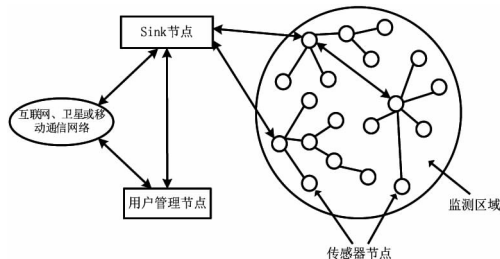


图 1 无线传感器网络结构

Fig. 1 Wireless sensor network structure

目前无线传感器网络在一些领域已经得到了广泛应用,例如军事、医疗、工业等方面^[15-17]。研究如何将无线传感器网络应用到智能配电网通信系统中,以提高现有电力信息采集系统和其他监测系统的运行效率对智能配电网的发展具有重要的意义。

2.2 智能配电网 WSN 网络结构

智能配电网无线传感器网络是指应用在智能配电网中,实现智能终端与智能配电网主站系统、智能终端与智能终端之间通信的无线传感器网络,传感器节点部署在配电终端内,以无线传输的通信方式组成网络。与配电线路的网络结构相似,有些节点的

网络拓扑结构为辐射状,有些节点的网络拓扑结构为环网状,环网状拓扑结构可以具备较高的可靠性。

智能配电网终端节点既可以是采集数据的源节点,也可以是目的节点和路由节点。一方面,智能终端可以将采集和接收到的数据进行基本处理后发送至变电站、目标配电终端或者配电线路上的光纤网关节点。网关节点接收到智能配电网终端发送来的配电数据后,对信息进行进一步整理,然后通过光纤等传输方式将信息传送到智能配电网主站系统,供运维人员进行相关数据的分析和决策。另一方面,运维人员也可以通过智能配电网信息系统主站对智能配电网终端和 WSN 下发控制和管理命令。此外,智能配电网终端之间还可以通过各个节点间组成的通信链路进行“三遥”、保护和故障等信息的交换。

通过 WSN 接入智能配电网终端的网络结构如图 2 所示。

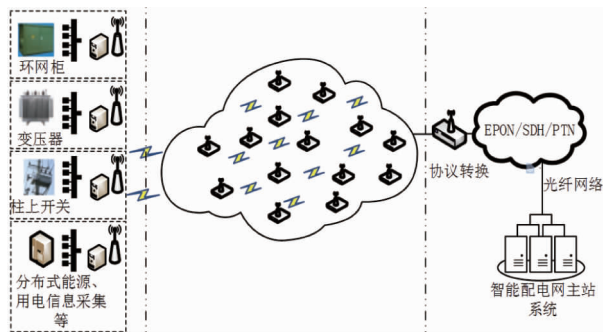


图 2 智能配电网 WSN 网络结构

Fig. 2 WSN network structure of smart distribution network

2.3 无线传感器在智能配电网的应用特点

在智能配电网的监控方面,无线传感器可采集和传送遥信、遥测、遥控、各类故障信息和保护信息等数据,但是由于智能配电网终端分布广泛,数量众多、经常处在环境恶劣的区域。因此智能配电网 WSN 在具体应用上,有以下几点:

(1)智能配电网终端通常位于开关、变压器等配电设备附近,这些设备多处于道路两侧或配电杆塔上,无线信号在该区域附近传播,会出现吸收、反射、散射等能量衰减现象。

(2)数据采集节点位于智能配电网终端内部,为了实现配电网终端与智能配电网主站通信,需要增设具有中继传输功能的无线传感器节点。

(3)复杂的部署环境,无法实现大规模地有源供电。某些无线传感器节点的能量无法得到可靠的供给,大量的传感器节点依靠电池进行供电,在电池

电量耗尽时需要人工进行电池的更换。

(4)无线传感器本身具有快速自组织性,在当前多跳传输路径中断的情况下,可通过路由的切换实现通信链路的重建。

(5)有些智能配电终端本身已经具备可靠的光纤或者载波等通信方式的连接,但是其附近区域因为建设的成本和施工难度等问题,未实现通信功能。这些终端可以通过 WSN 与最近的配电通信网络连接。

3 通信网络设计方案

3.1 设计原则

根据前述分析,智能配电网 WSN 节点分布范围广、规模大,并且具有部署环境复杂,路由方式多样等特点。因此,必须采取可靠灵活的智能配电网 WSN 设计方案,来满足智能配电通信业务的各项需求。智能配电网 WSN 的通信网络设计原则如下。

3.1.1 高可靠性

智能配电设备大多处于户外的开放空间,通信环境复杂。智能配电网 WSN 需要在恶劣的工作环境下满足智能配电终端的可靠通信。

3.1.2 经济性

智能配电网设备众多,为了减少通信网络投资成本,降低建设难度,应该在原有的配电线路基础上,搭建通信传输通道,并尽量减少新链路的开辟工作。

3.1.3 易于维护与管理

由于智能配电网 WSN 规模庞大,为了节约成本,便于巡视、维护和管理,传感器节点应尽量按照原有的配电线路分布结构进行部署。

3.1.4 高速率与低时延

实现远方抄表或计费的自动化装置所要求的传输速率较低;而公用配变的监测和负荷控制装置则要求较高的速率;进线监控、馈线、开闭所和变电站的监控要求速率最高。

3.1.5 高兼容性与适应性

智能配电终端采用的通信方式多种多样,这就要求各类通信方式之间具有良好的适应性,能够在通信体系上相互兼容。

3.1.6 高扩展性

由于城镇的快速发展,智能配电网的规模不断

增长,智能配电网通信系统也随之扩大,这就要求智能配电网 WSN 具有良好的扩展性,能够在原有网络的基础上进一步发展^[18-19]。

3.2 智能配电网 WSN 分层体系设计

由于智能配电网 WSN 规模较大,采用平面 WSN 网络架构受限于网络的扩展,并且不利于与其他通信方式的互连,因此不作为智能配电网 WSN 组网架构的优先考虑。对于大规模的应用网络,通常采用分层架构来实现 WSN 的扩展性^[20]。根据智能配电网 WSN 的结构特点,构建以终端采集网、汇聚网和信息接入网为体系的分层网络结构,如图 3 所示。

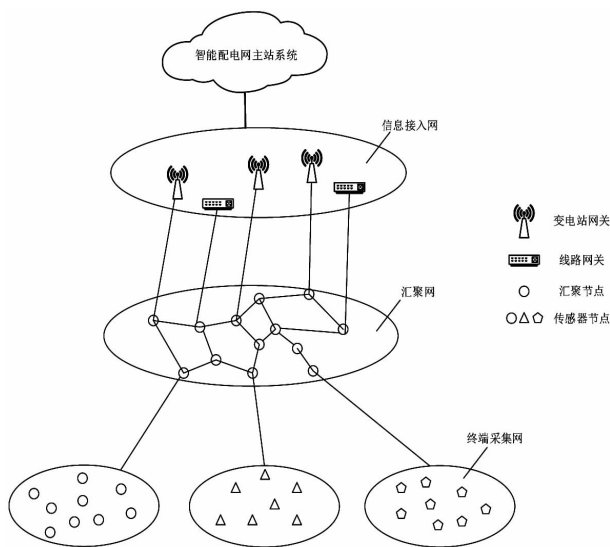


Fig. 3 WSN layered system of smart distribution network

3.2.1 终端采集网

终端采集网由若干部署在配电线路支线上的无线传感器节点组成,主要负责智能配电终端内原始数据的采集、处理,并与上级网络通信的功能。大部分节点安装在配电设备处,通过有线的方式与配电设备的数据端口连接,辅以中继节点构成最底层的通信网络。终端采集网不对通信协议和组网方式有严格的要求,不同的子网可以根据自身需求采取 Zigbee、WiFi 等通信协议,也可以单独定义路由方式。子网内的节点将数据发送至 Sink 节点,或者接收 Sink 节点下发的控制命令。但此时 Sink 节点为上级汇聚网的网络节点,并管理所属的终端采集网内的节点。

3.2.2 汇聚网

汇聚网位于网络结构的第二层,主要由若干汇

聚节点组成。汇聚节点主要处理终端采集网内的智能配电信息,具有信息分发、融合和汇聚等功能,并且能够接入下层的多种信道结构,如图 4 所示。汇聚节点之间采用无线的方式相互连接,若距离较远可以通过加入中继节点的方式通信。根据配电线路分布特点,汇聚节点可安装在环网柜、开闭所或柱上开关等负荷控制设备处,一方面可以实现数据的就地采集,另一方面也可以较为便利地融合与汇聚下层网络的智能配电数据。相对终端采集网内的节点,汇聚节点需要较高性能的微处理器、较大容量存储单元和较强通信能力的射频模块。汇聚节点的功能复杂、能耗高,因此节点安装位置应配置可靠的供电电源或者大容量的电池。

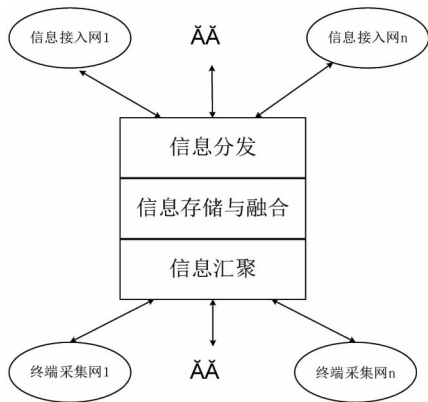


图 4 汇聚网的数据流

Fig. 4 Data flow of convergence network

汇聚网与终端采集网具有多点对多点的连接结构。单个汇聚节点可以连接多个终端采集网,单个终端采集网内,也可以根据自身需求就近连接多个汇聚节点。汇聚网所具有的多对多节点结构可以方便地接入新增的终端采集网,使智能配电网 WSN 具有良好的可扩展性,便于 WSN 的渐进式部署。

3.2.3 信息接入网

智能配电网主站系统主要负责对整个智能配电网的数据进行采集、处理与监控工作。因此智能配电网 WSN 必须与主站系统可靠地通信。考虑到智能配电网采用的多种通信方式与主站系统连接的情况,将智能配电网 WSN 接入这些通信系统的网络定义为信息接入网。信息接入网内的节点以有线的方式与其他通信系统连接,并且能够实现协议的转换和数据的汇聚功能。信息接入网将 WSN 内的网络模型进行抽象,对外不体现具体组网细节,只提供

有效的信息数据,信息接入网内的节点接收的数据更多,功能最为复杂,因此需要更高性能的微处理器和存储单元。

分层结构的设计将大规模的智能配电网 WSN 进行分层处理,各层节点分工明确,降低了网络的复杂度,便于运行人员的管理和维护。此外,当网络节点较少、结构较为简单时,汇聚网可以省略,直接由终端采集网与信息接入网通信。

3.3 智能配电网 WSN 联合组网

智能配电网的通信系统通常由多种通信方式组成,网络层次模型(业务终端层—接入层—骨干层—配电主站层)如图 5 所示。配电主站层主要实现业务数据的处理、存储和分析功能,同时将数据发送至监控平台,运维人员可以通过主站系统实现整个智能配电网的管控工作。骨干层由电力骨干光纤网络构成,骨干光纤网络通常为环网结构,途经多个变电站,并通过变电站与上下层通信。智能配电网常用的通信方式处于接入层,能够与下层的各类智能配电终端连接,同时与上层的变电站骨干网通信。业务终端层由大量的智能配电终端组成,是智能配电网实施监视、管理和控制的对象。

根据无线传感器网络灵活组网的特性,一方面可以独立组成智能配电网 WSN,另一方面可以作为其他通信方式的辅助延伸,接入其他通信方式难以到达的配电区域,完善整个智能配电网的通信系统。智能配电网 WSN 联合组网的方式如下:

(1)在其他通信方式已覆盖的配电终端单元 DTU 或馈线终端装置 FTU 处,部署网络协议转换节点,构成最上层的信息接入网。下层节点再向下延伸覆盖附近的 FTU 或配电变压器远方终端 TTU。

(2)由于光纤通信方式容量大、速率高、抗干扰能力强,所以网络协议转换节点优先选择配电线路上光纤系统的 ONU 设备上连至主站,其次再根据距离远近选择其他通信方式,如电力线载波或者无线专网(WIMAX、LTE)等上连至主站。

(3)汇聚子站应部署多业务接入路由器,汇聚来自光纤网络、电力线载波和 WSN 等多种通信方式的数据,实现统一接入和控制。

该方案使众多无法通过其他通信方式接入的智能配电终端,与智能配电通信系统连接,使智能配电网的节点数据更趋完善。

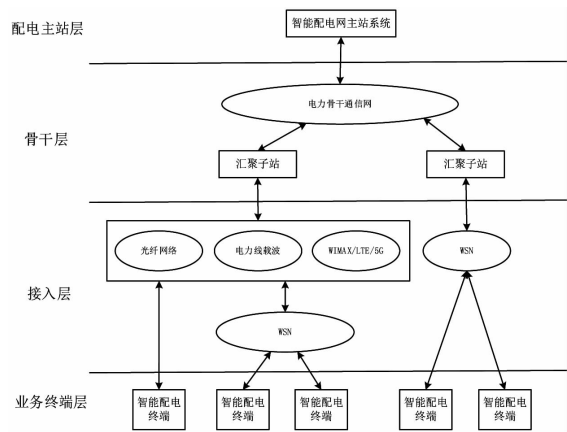


图 5 智能配电网 WSN 联合组网通信架构

Fig. 5 WSN combined network communication architecture of smart distribution network

4 结语

在当前配电网不断智能化、配电数据越发多样化的情况下,对高效灵活的通信网络需求越发迫切。智能配电网 WSN 结合了通信、传感、嵌入式等多学科的先进技术,由其所构建的多功能智能配电网通信平台,能够为运行管理人员提供更为全面完整的配电运行数据,有利于实现精准的系统控制方案和故障应对预案。

该文结合智能配电终端的分布特点和 WSN 的网络结构^[21-23],设计了由终端采集网、汇聚网和信息接入网所组成的,具有高兼容性和扩展性的分层网络结构,给出了智能配电网 WSN 与其他通信方式相结合的组网方案,极大地扩展了 WSN 在智能配电网通信系统的通信范围。

参考文献:

[1] National Institutes of Standards and Technology, USDepartment of Commerce. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0[S]. United States, 2014.

[2] 李占英. 智能配电网大数据应用技术与前景分析[J]. 电力大数据, 2017, 20(11): 18-20.

LI Zhanying. Intelligent power distribution network and prospect analysis technology of data applications[J]. Power Systems and Big Data, 2017, 20(11): 18-20.

[3] 张嵩, 刘洋, 许芳, 等. 配电网中大数据的挖掘应用[J]. 电力大数据, 2018, 21(02): 8-12.

ZHANG Song, LIU Yang, XU Fang, et al. Application of big data mining in power distribution network[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(02): 8-12.

[4] 张强, 孙雨耕, 杨挺, 等. 无线传感器网络在智能电网中的应

用[J]. 中国电力, 2010, 43(06): 31-36.

ZHANG Qiang, SUN Yugeng, YANG Ting, et al. Applications of wireless sensor networks in smart grid[J]. Electric Power, 2010, 43(06): 31-36.

[5] 龚钢军, 韩军伟, 朱娟溪, 等. 配电无线传感网功率控制路由优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 129-134.

GONG Gangjun, HAN Junwei, ZHU Juanxi, et al. Distribution power wireless sensor network control routing optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 129-134.

[6] 孙伟, 王建平, 穆道明, 等. 智能配电通信无线传感网络链路质量评估预测建模[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 61-66.

SUN Wei, WANG Jiangping, MU Daoming, et al. Link-quality estimation and prediction modeling of wireless sensor networks in smart distribution network communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 61-66.

[7] SANI A, VOSOUGHI A. Distributed vector estimation for power- and bandwidth-constrained wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(15): 3879-3894.

[8] 傅昌, 洪彬倬. 基于最小生成树算法的配电网网架优化规划[J]. 电力大数据, 2018, 21(02): 38-44.

FU Chang, HONG Binzhao. Research on distribution network optimization planning based on Minimum Spanning Tree Algorithm[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(02): 38-44.

[9] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(07): 1282-1291.

REN FengYuan, HUANG HaiNing, LIN Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(07): 1282-1291.

[10] 李祥珍, 何清素, 孙寄生. 智能配电网通信组网技术研究及应用[J]. 中国电力, 2011, 44(12): 78-81.

LI Xiangzhen, HE Qingsu, SUN Jisheng. Research and application on communication technology in smart distribution and utilization grid[J]. Electric Power, 2011, 44(12): 78-81.

[11] 孙晓雅, 李永倩, 李天. 无线传感器网络在电力系统中的应用[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(06): 5-7.

SUN Xiaoya, LI Yongqian, Li Tian. Application of wireless sensor networks in power system[J]. Transducer and Micro-system Technologies, 2012, 31(06): 5-7.

[12] 张勇, 于秋生, 赵连增. ZigBee 通信技术在智能配电网中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2013, 11(12): 88-93.

ZHANG Yong, YU QiuSheng, ZHAO Lianzeng. Application of the ZigBee technology in the intelligent distribution network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2013, 11(12): 88-93.

[13] 但刚, 赵云龙. 城市中压配电网接线方式及配电自动化探讨[J]. 华北电力技术, 2007, (01): 18-21.

DAN gang, ZHAO Yunlong. Study on connection modes of urban middle voltage distribution network and distribution automation[J]. North China Electric Power, 2007, (01): 18-21.

- [14] 黄盛. 智能配电网通信业务需求分析及技术方案[J]. 电力系统通信, 2010, 31(06): 10–17.
HUANG Sheng. Analysis on the demand for communication services in smart distribution network and communication technical scheme [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(06): 10–17.
- [15] 李胜利, 焦邵华, 秦立军, 等. 中低压电力线载波通信方案的研究[J]. 电测与仪表, 2002, 39(11): 29–33.
LI Shengli, JIAO Shaohua, QIN Lijun, et al. The research of power line communication [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2002, 39(11): 29–33.
- [16] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(06): 172–186.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(06): 172–186.
- [17] 刘丽榕. 智能配电网通信方式研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [18] 刘强. 无线传感器网络组网关键技术研究[D]. 电子科技大学, 2012.
- [19] SAXENA N, ROY A, SHIN J. Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS-MAC protocol for wireless multimedia sensor networks [J]. Computer Network. 2008, 52(13): 2532–2542.
- [20] 辛培哲, 李隽, 王玉东, 等. 智能配电网通信技术研究及应用[J]. 电力系统通信, 2010, 31(11): 14–19.
XIN Peizhe, LI Juan, WANG Yudong, et al. Research on communication technology in smart distribution grid [J]. Telecommunications for Electric Power System 2010, 31(11): 14–19.
- [21] 叶夏明, 张勇, 莫建国, 等. 基于 OPNET 的智能变电站通信网络仿真建模与性能分析[J]. 浙江电力, 2016, 35(12): 1–4.
YE Xiaming, ZHANG Yong, MO Jianguo, et al. OPNET – based simulation modeling and performance analysis of communication network in intelligent substations [J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(12): 1–4.
- [22] 张锋明, 付俊强, 李孝蕾, 等. 地区智能电网调配自动化贯通模式[J]. 广东电力, 2016, 29(04): 122–127.
ZHANG Fengming, FU Junqiang, LI Xiaolei, et al. Dispatching and distribution automation integrations patterns of regional smart grids [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(04): 122–127.
- [23] 杨羽, 张胜军, 康琪. 基于电网运维数据的智能预警系统统计[J]. 内蒙古电力技术, 2017, 35(04): 20–23.
YANG Yue, ZHANG Shengjun, KANG Qi. Design of intelligent early warning system based on grid operation and maintenance data [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2017, 35(04): 20–23.

收稿日期: 2018–09–11

作者简介:



刘茂胜(1974), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事配电网运行管理工作。

(本文责任编辑: 王 燕)

Network design of wireless sensor in smart distribution network

LIU Maosheng¹, JIANG Youquan², TANG Yafang²

(1. Guizhou Power Grid Renhuai Power Supply Bureau, Zunyi 564500 Guizhou, China;

2. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025 Guizhou, China)

Abstract: The smart distribution network can improve the power supply quality of distribution system effectively, realize the optimal operation of distribution power grid-connection and efficient operation of distribution equipment, and complete the effective interaction with users. Wireless Sensor Network (WSN) has the advantages of low construction cost and fast self-organizing. It has a broad application prospect in smart distribution network communication. By summarizing the characteristics of smart distribution terminals in distribution network, the network structure of WSN and its application in smart distribution network are analyzed, and the design principles of smart distribution network WSN are given in this paper. According to this principle, the WSN layered architecture of smart distribution network is designed, including terminal acquisition network, convergence network and information access network. Intelligent distribution network communication system is usually composed of many kinds of communication mode, this paper presents a design scheme of combined with other means of communication network. The scheme by building terminal layer, access layer, business layer and the backbone of distribution master station layer, can effectively extend the intelligent power distribution network communication range and improve the data integrity of the distribution network.

Key words: smart distribution network; wireless sensor network; network design