

无线传感器网络应用于智能电网的探讨

王阳光, 尹项根, 游大海

(电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Application of Wireless Sensor Networks in Smart Grid

WANG Yang-guang, YIN Xiang-gen, YOU Da-hai

(Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab (Huazhong University of Science & Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: In accordance with the performance of smart grid and actual conditions of power networks, and combining with main technical characteristics of wireless sensor network (WSN), the applications of WSN in condition-based maintenance, intelligent metering and intelligent home, coping with grid catastrophe, fault location and distributed busbar protection are discussed; the basic design philosophy of application of WSN in various fields is described and the superiority of applying WSN in the construction of communication system for smart grid as well as concrete structure of such a communication system are expounded. The communication system of smart grid, in which WSN technology is utilized, will possess such advantages as low cost, low power consumption, self-organization and high flexibility.

KEY WORDS: smart grid; wireless sensor network (WSN); condition-based maintenance; smart metering; catastrophe; fault location; distributed busbar protection

摘要: 针对智能电网的绩效目标与电网的实际情况, 结合无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)的主要技术特点, 探讨了 WSN 在状态检修、智能计量与智能家居、应对电网灾变、故障定位、分布式母线保护等方面的应用, 给出了 WSN 在各领域中应用的基本设计理念, 阐述了应用 WSN 构建智能电网通信系统的优势, 以及通信系统的具体结构。采用 WSN 技术的智能电网通信系统将具有成本低、功耗低、自组织、灵活性强的特点。

关键词: 智能电网; 无线传感器网络; 状态检修; 智能计量; 灾变; 故障定位; 分布式母线保护

0 引言

当前, 电力行业的发展面临投资效率不高、供电可靠性不高、灵活应变能力不强、环境破坏严重

等诸多问题的挑战^[1]。美国、欧盟等发达国家认为最佳的解决途径是建设一个基于全新技术和架构的“智能电网(smart grid)”^[1-3]。智能电网概念一经提出, 就立即风靡全球, 在各国得到了蓬勃发展, 成为下一代电网的发展趋势^[4-6]。

当前, 关于智能电网的文献层出不穷, 多集中在智能电网概念、发展历程、体系结构等方面^[7-14], 关于具体实现技术的研究报道很少。要实现智能电网的开放、互动的目标, 必须具备一个可靠、高效的通信网络。智能电网的功能覆盖电能传输的各个环节, 数据在发电、输电、配电和用户等不同主体及各类应用系统之间的传递必须依靠通信载体。常见的通信载体包括铜芯线、光纤、电力线通信、无线通信等, 它们在不同的应用环境下具有各自的优势。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)作为通信领域的新兴技术, 具有分布式处理系统的高监测精度、高容错性、覆盖区域大、可远程遥测遥控、自组织、多跳路由等优点^[15], 在多目标、短距离通信方面得到广泛应用, 在建设智能电网的过程中也将扮演非常重要的角色。

本文将针对智能电网不同应用领域的具体情况, 探讨 WSN 在智能电网中的具体应用, 旨在为建设智能电网的通信网络提供一种新的思路。

1 WSN 的网络架构及其特点

WSN 通常是指由一组带有嵌入式处理器、传感器以及无线收发装置的节点以自组织的方式构成的无线网络, 通过节点间的协同工作来采集和处理网络覆盖区域中的目标信息。图 1 是经常被引用的一个典型的 WSN 网络架构^[16]。

在图 1 中, 传感器节点部署在一个目标区域内

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877031)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877031).

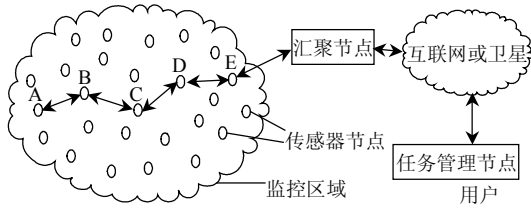


图1 WSN的典型网络架构

Fig. 1 Typical network architecture of WSN

部或附近，能够通过自组织方式构成网络。传感器节点测得的信息通过多跳的方式传送到汇聚节点，通过汇聚点连入 Internet 或卫星，最后接入任务管理节点。传感器节点是一个具有测量能力、处理能力、存储能力、通信能力的嵌入式系统，兼顾传统网络节点终端和路由的双重功能，不仅进行信息的收集与处理，还要对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合。汇聚节点是拥有较强通信能力、计算能力和丰富资源的系统，它连接传感器网络与 Internet 等外部网络，实现两种通信协议之间的转换，负责将管理节点的监控任务下发，并将收集到的数据转发至外部网络，它可以是一个增强功能的传感器节点，也可以是一个没有监测功能的专用网关设备。任务管理节点具有人机界面，可以进行干预、遥控和管理。

WSN 与无线自组网(mobile ad-hoc network)有许多相似之处，但也具有其自身很多的特点，主要体现在大规模、自组织、动态性、可靠性、应用相关、以数据为中心等方面^[15]。

2 WSN 在设备状态检修中的应用

造成电力行业资产运行维护和管理水平偏低的主要原因之一是设备检修模式滞后。目前，设备检修普遍采用的是一种定期检修策略，多年的生产实践证明，这一策略存在着严重缺陷，如检修不足和检修过剩。因此，设备检修要积极向状态检修过渡，提高资产运行维护和管理水平。IBM 全球企业咨询服务部制定的智能电网白皮书认为，电力行业提高资产运维和管理水平的关键技术是设计一个远程资产监视和控制(remote asset monitoring and control)系统。远程资产监视和控制通过传感装置检测到电力设备状态数据，根据检测数据对设备状态进行评估，判断可能出现的故障(比如，通过对变压器油温、油色谱的监测，判断是否出现绝缘裂化)，并提示运行维护人员设备可能存在的不安全因素，依据设备状态，帮助运行维护人员优化设备检

修和设备更换时机，减少维修成本和停电时间^[14]。

通过传感器检测到的设备状态必须通过通信网络发送给远程资产监视和控制系统，然后对设备进行状态评估，以确定是否需要对其进行修复或更换。许多设备的状态传感器安装在设备内部，环境复杂，传统的有线通信载体存在安装不方便、运行不灵活等缺点。因此，WSN 可以应用到设备状态检修当中，充分发挥其不需布线、灵活多变的优点。图 2 以监测断路器的温度为例，说明 WSN 在设备状态检修中的应用。温度传感器节点的传感头由热敏电阻 Pt100 构成，通过 A/D 芯片 TLC7135 检测热敏电阻的电压，然后通过 MCU 芯片 C8051F020 计算出温度。检测到的温度通过通信芯片 CC1000 按照 WSN 的控制方式发送给汇聚节点，汇聚节点将监测区域内收集到的温度数据进行打包，通过网关进行协议转换，将全部数据通过以太网传送至远程资产监视和控制系统，远程资产监视和控制系统对采集到的数据进行分析，评估设备的运行情况，当发现设备出现故障，需要进行修复或更换时，通过 GPRS 网络将需要进行修复的设备的详细内容发送至现场工作人员随身携带的移动作业管理设备，使得现场作业人员快速反应，提高修复效率，降低作业成本。

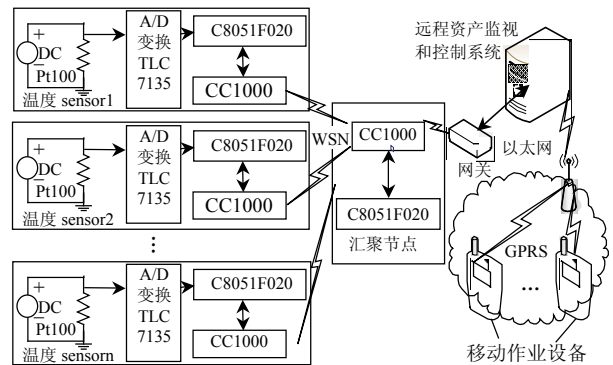


图2 状态检修系统总体结构

Fig. 2 Overall framework of condition-based maintenance system

3 WSN 在智能计量与智能家居中的应用

传统的电能计量主要目的是完成电费计算，对客户计量数据的采集精细度不够，数据没有得到充分的深度利用。智能计量管理系统通过为居民用户和工业、商业用户安装智能电表，采集更为全面和详细的计量信息，与分时电价措施配合，抑制峰值负荷，从而减少用电高峰负荷需要的增长；并能根据对负荷情况更细致、实时的掌握，指导电网建设，

减少电网扩容和建设费用。同时,智能计量管理还可以帮助电网企业有效定位和防止窃电^[14]。此外,通过引入智能计量技术,可以加强需求侧管理,通过让客户随时看到其所消耗能源的实际成本,使他们能够相应地做出调整,关闭一些设备,将能耗从高价格时段转换至低价格时段。这一错峰用电和限电机能够降低消费者成本。

另外,激励设备制造厂商开发能够更高效监控和管理用电的家居商品。例如,一台电冰箱和空调压缩机能“相互通信”,以确保它们不会同时启动,以便降低高峰电量需求。还可以通过研制远程监控系统,对家电设备进行远程遥控,例如可以在离家之前关闭空调,回家之前0.5h打开空调,这样不仅可以营造一个舒适、方便的智能家居环境,还可以更加高效地利用电能。

智能计量与智能家居系统具有数量多、通信距离短的特点,完全可以将WSN应用到智能计量与智能家居系统,通过WSN收集一个区域内的电能计量情况,再利用电力通信网络传送给计量管理系统,并将实时电价返回给用户。同时在智能家电中嵌入传感器节点,利用WSN接收智能电表发送过来的电价信息,各智能家电之间利用WSN进行协商,决定智能家电的开启与关闭。此外,通过传感器网络与Internet或其他无线网络(GSM、GPRS等)连接在一起,构成智能家居远程监控系统。图3示出了利用WSN构建的典型智能计量与智能家居系统。

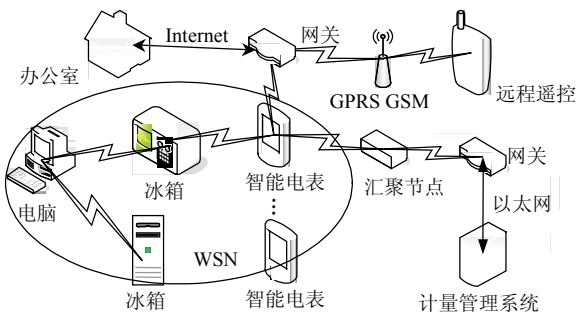


图3 传感器网络在智能计量与智能家居系统中的应用
Fig.3 WSN in smart metering and smart-home system

4 WSN在应对电网灾变中的应用

4.1 应用背景

提高电网的安全、可靠性是智能电网的首要目标。而极端自然灾害对电网基础设施的摧毁是导致电网大面积停电事故的重要因素之一。2008年我国南方大部分地区发生严重的冰雪灾害,对电力基础设施造成严重破坏,并导致大面积停电事故的发生。

分析极端自然灾害导致电网大面积停电的原因,主要包括:电力设施的毁坏(倒塔、断线等)导致供电中断,以及电网网架不规则改变造成保护误动作,纵联保护通道受损致使主保护不能动作等。2008年冰雪灾害造成电网大面积停电的一个主要原因是电力通信网络的完全毁坏,这一方面导致电力设施监测预警系统失效,未能及时采取有效的防灾减灾措施,另一方面纵联保护通道受损致使主保护不能动作,造成保护性能严重下降。现有电力通信网络主要采用有线通信方式,在极端自然灾害下容易造成网络失效,少量的无线网络也依靠基站转发信息,在极端自然灾害时发生的基站失电、倒塔等现象同样致使无线网络失效。因而,利用WSN具有的无主站、自组织、自治、自适应、多跳等优点,构建新型电力通信网络,是应对电网灾变的有效手段之一。

4.2 采用WSN的冰灾监测预警系统

根据电力设施冰灾监测预警系统的监测内容与目标,选择合适的传感器节点,依据地理环境特点和杆塔类型,在满足系统覆盖范围的条件下,按照成本最优原则,对传感器节点进行合理的布置^[17]。利用传感器网络多跳路由的特点,各杆塔上的监测数据通过多跳方式传送给监控中心进行处理。一套采用WSN构建的冰灾监测预警系统如图4所示。

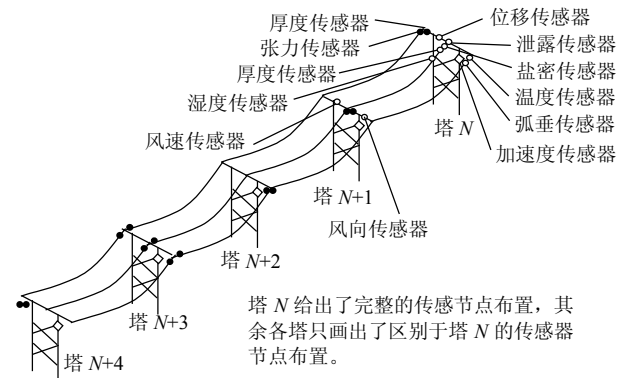


图4 监测预警系统中各传感器节点的布置
Fig.4 Sketch of the sensor placement in monitoring and forwarning system

考虑整个输电走廊像一条“狭长的带子”,以及传感器节点的布置方案,监测预警系统传感器网络适合采用2层的拓扑结构,在这种体系结构下,传感器节点被分为多个簇,每个簇至少有1个簇头,簇内为第1层,簇间为第2层。显然,监测预警系统传感器网络中,同一杆塔上的传感器节点可划分为1个簇,称之为本地通信簇(local communication cluster, LCC),在一个LCC中必然有1个簇头,它

用来整合簇内各节点的数据并进行转发。各个杆塔的簇头节点之间形成第 2 层，称之为塔间层 (inter-tap cluster, ITC)，这一层主要按要求处理与传递各簇头节点之间的数据，各自维护它们相互之间的路由表，负责报文的转发，通过“接力”的方式将数据传递给变电站。图 5 是监测预警系统传感器网络的 2 层架构示意图，图中传感器未全部给出。

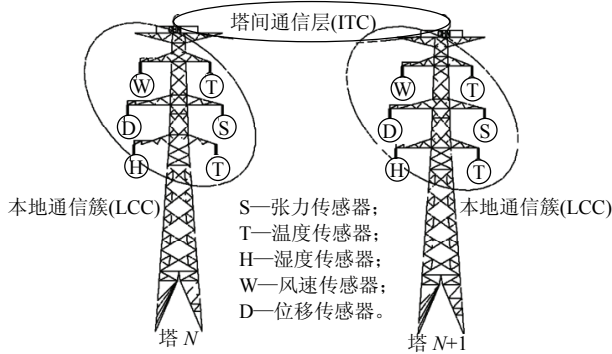


图 5 监测预警系统传感器网络的 2 层结构模型
Fig. 5 Two layers model of WSN for monitoring and forewarning system

4.3 构建应对灾变的有限广域智能保护

线路纵联保护的通道易受极端自然灾害的影响，通信通道的断开导致保护退出，由于短时间内恢复纵联保护的通信通道不太可能，为了避免线路由于主保护退出而停运，可以在受灾地点利用 WSN 自动组网形成一条临时采集信息的通道，由 WSN 采集的信息在时间性能等方面可能不一定能满足纵联保护的要求，但是可用于构建有限广域智能保护，作为灾害条件下电网的临时主保护来运行，以保证电网运行的安全稳定。

5 WSN 在电力系统故障定位中的应用

自愈是智能电网的主要特征之一，当故障发生时，在没有或少量人工干预下，能够快速隔离故障、自我恢复，避免大面积停电的发生。及时发现故障点并清除故障是构建自愈型智能电网的重要前提。芬兰 Helsinki 大学电力系统与高压工程实验室的 Mikael M. Nordman 博士提出利用在开关站或二级变电站的分支线路上布置能够检测相电流的传感器节点，将传感器节点采集到的相电流信息通过多跳路由的方式发送给网络控制中心，网络控制中心通过比较各节点之间的相电流信息确定故障的位置，其系统配置结构见图 6^[18]，具体算法见文献[18]。仿真实验证明该方法能在单相接地后故障信号较弱的情况下有效地定位故障。该定位方法的精度取决于节点的布置密度，节点布置得越多，节点间距

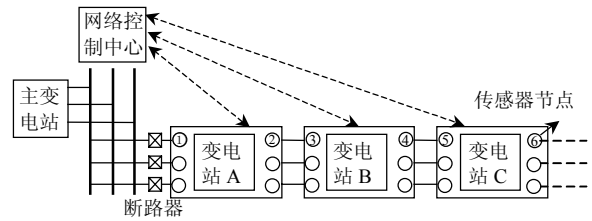


图 6 故障定位系统组成结构
Fig. 6 An example of the fault locating architecture

离越短，精度越高。

6 WSN 在分布式母线保护中的应用

母线是电力系统中非常重要的元件之一，母线工作的可靠性直接影响到整个电力系统运行的可靠性。作为保证母线安全运行的母线保护，只在重要变电站与大型发电厂专门装设，且传统集中式母线保护需要敷设电缆，成本较高；控制信号易受分布电容的影响；电流互感器二次回路负载较大；母线保护装置误动作，会切除整个母线的的所有分支，造成大面积停电；此外，还存在二次接线复杂、灵活性低等缺点。基于成本的考虑，配电网的母线故障一般由相应的发电机或变压器过流保护隔离，不装设专门的母线保护，配电网直接面向用户，是控制、保证用户供电质量的关键环节，用户要求装设母线保护的呼声越来越高。分布式方向母线保护利用通信网络交换各线路保护的的动作信息完成故障判断，不需要增设专门的保护装置，既可以解决集中式母线保护存在的弊端，又不需要增加成本，可以适用于配电网。

通信网络是分布式母线保护得以实现的基本前提。现有通信网络大多采用有线载体，需要布线，组网不灵活。采用 WSN 组建分布式母线保护，适合母线出线多、相互间距离短、连接方式易发生变化等特点。由于 WSN 采用多跳路由方式，当母线上出线较多时，信息传递时间过长，可能不满足保护速动性的要求，为此，采用 2 层通信架构能提高通信效率。以有 16 条出线的母线为例，对各出线进行编号，将 16 条出线分为 4 组(分别为 1~4, 5~8, 9~12, 13~16)，选择编号最大的出线上的节点作为每组的汇聚节点(分别为 4、8、12、16)，各汇聚节点间进行数据交换，一个循环完毕(4-8-12-16-4)，各汇聚节点即得到所有出线的节点信息，再由汇聚节点传送给各区内的所有节点，至此，每个节点都得到了完备的方向信息，就可以完成故障判断了。图 7 给出了基于 WSN 的分布式母线保护结构。

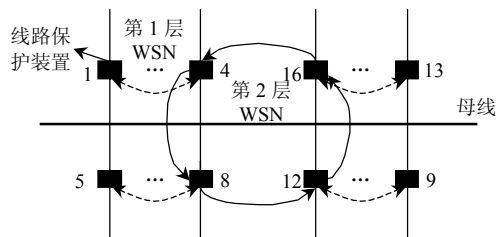


图7 基于 WSN 的分布式母线保护

Fig. 7 Distributed busbar protection based on WSN

7 结语

建设一个具有灵活、清洁、安全、经济、友好等性能的新一代智能电网已得到国际电力行业的广泛认同,通信网络的建设与完善是实现智能电网的关键业务之一。本文结合智能电网的绩效目标,考虑电网的实际情况,就 WSN 在智能电网中的一些实际应用业务进行了初步探讨。相信随着智能电网建设的推进,WSN 将具有更加广阔的应用舞台。针对实际应用情况,WSN 中诸如拓扑控制、能量管理、路由算法、网络安全等关键技术问题,将随着智能电网建设的深入而逐步得到解决。

参考文献

- [1] Smart grid working group. Challenge and opportunity: charting a new energy future, appendix A: working group reports[R]. USA: Energy Future Coalition, 2003.
- [2] EPRI. Technical and system requirements of advanced distribution automation[R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2004.
- [3] European commission. European technology platform smart grids: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. [2008-10-10]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
- [4] Obama. Obama's speech on the economy[N]. New York Times, 2009-01-09.
- [5] 国家电网公司. 加快推进两个转变,提高科学发展水平[N]. 国家电网报, 2009-03-25.
- [6] 谢开,刘永奇,朱治中,等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.
Xie kai, Liu Yongqi, Zhu Zhizhong, et al. The vision of future smart grid[J]. Electric Power, 2008, 41(6): 19-22(in Chinese).
- [7] 廖斌,仇宏祥. 标准化的智能电网提升电网安全[J]. 上海电力, 2006(6): 584-588.
Liao Bin, Qiu Hongxiang. The standardized smart grid to enhance the security of grid[J]. Shanghai Electric Power, 2006(6): 584-588(in Chinese).
- [8] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
Yu Yixing, Luan Wenpeng. Smart grid[J]. Power System and Clean

Energy, 2009, 25(1): 7-11(in Chinese).

- [9] 王明俊. 自愈电网与分布能源[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 1-7.
Wang Mingjun. Self healing grid and distributed energy resource[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 1-7(in Chinese).
- [10] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
Xiao Shijie. Consideration of technology for constructing chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4(in Chinese).
- [11] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7(in Chinese).
- [12] Research Reports International. Understanding the smart grid [R]. Research Reports International, 2007.
- [13] Alternative Technologies Workgroup. Smart power grid [R/OL]. [2007-08-13]. http://www.michigan.gov/documents/mpsc/21cep_spg_report_205506_7.pdf.
- [14] 孙福杰,雷鸣,杨诚彬. 建设智能电网创新运营管理[R]. 北京: IBM 全球企业咨询服务部, 2006.
- [15] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-5.
- [16] 王阳光,尹项根,游大海,等. 应用于变电站自动化的无线传感器网络技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 20-26.
Wang Yangguang, Yin Xianggen, You Dahai, et al. Application of Wireless sensor networks in substation automation systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 20-26(in Chinese).
- [17] 王阳光,尹项根,游大海,等. 冰冻气候下电力设施的实时监测与预警系统研究[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 14-20.
Wang Yangguang, Yin Xianggen, You Dahai, et al. A real-time monitoring and warning system for electric power facilities icing disaster based on wireless sensor network[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 14-20(in Chinese).
- [18] Nordma M M, Korhonen T. Design of a concept and a wireless ASIC sensor for location earth faults in unearthed electrical distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1074-1082.



王阳光

收稿日期: 2009-10-14.

作者简介:

王阳光(1982—),男,博士研究生,主要研究方向为微机继电保护、数字化变电站、广域保护及智能电网等, E-mail: yanniwang@163.com;

尹项根(1954—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、故障仿真与状态监测等;

游大海(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统继电保护及电力系统综合自动化、电力系统风险评估等。

(责任编辑 李兰欣)