

# 基于LoRa技术的特高压直流换流站多角度联合监控技术

胡俊华<sup>1</sup>, 魏华兵<sup>2</sup>, 富银芳<sup>2</sup>, 乔敏<sup>1</sup>, 高宝龙<sup>3</sup>

(1. 国网浙江电力有限公司, 浙江 杭州 310007;

2. 国网浙江电力有限公司超高压分公司, 浙江 杭州 311199;

3. 航天极创物联网研究院(南京)有限公司, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 现有特高压直流换流站的安全监测多采用人工现场检测, 存在较大的安全隐患, 人工成本高。为满足输电系统的安全需要, 设计了基于远距离无线电(LoRa)技术的特高压直流换流站多角度联合监控系统, 监测模块对换流站的重要系统进行多角度联合监测, 采用LoRa无线传输技术进行通信传输。实验结果表明, 该方案监测数据准确率高, 工作功耗低, 传输距离远, 可以有效提高换流站的无线监控管理的智能水平。

**关键词:** 远距离无线电技术; 监控系统; 通信传输

**中图分类号:** TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24391

## Multi-angle Joint Monitoring Technology of UHVDC Converter Station Based on LoRa Technology

HU Junhua<sup>1</sup>, WEI Huabing<sup>2</sup>, FU Yinfang<sup>2</sup>, QIAO Min<sup>1</sup>, GAO Baolong<sup>3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang, China; 2. EHV Branch

Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311199, Zhejiang, China;

3. Aerospace Technophilia IOT Academy (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 211100,

Jiangsu, China)

**Abstract:** The safety monitoring of existing ultra-high voltage direct current (UHVDC) converter stations mostly adopts manual on-site detection, which presents major safety hazards and high labor costs. In order to meet the safety needs of the power transmission system, a multi-angle joint monitoring system was designed for UHVDC converter station based on long range radio (LoRa) technology. The monitoring module conducted multi-angle joint monitoring of important systems of the converter station, and used LoRa wireless transmission technology for communication and transmission. Experimental results show that the program has high monitoring data accuracy, low power consumption, and long transmission distance, which improves the intelligent level of wireless monitoring and management of the converter station.

**Key words:** long range radio (LoRa) technology; monitoring system; communication transmission

特高压直流换流站是电力运作活动中至关重要的环节<sup>[1]</sup>。其中大部分运行设备机制复杂, 价格昂贵, 一旦出现故障, 不仅会导致输电系统停止运作, 影响基本的生产, 严重时可能会导致整个电力系统瘫痪, 进而引发重大的安全事故。而监控系统可以帮助工作人员实现异地、及时地了解现场情况和采集各种数据, 辅助人为决策支持和故障诊断分析, 是特高压直流换流站安全稳定运行的重要指挥中枢<sup>[2]</sup>。目前换流站的大部分监测手段仍然采用传统的人工采集, 无法满足现

代化特高压直流换流站系统的快速发展, 且已有的特高压直流换流站监控系统仍然存在一些缺陷, 例如通信能力受限、灵敏度低和电源功耗有限。因此, 对特高压直流换流站的监控系统进行合理化的设计和构建, 采用适合的通信技术, 对促进电力工程活动良好的进行、确保系统安全稳定运行和保障电力行业的可持续发展有着重要作用<sup>[3]</sup>。本文针对上述缺陷提出了一种基于远距离无线电(long range radio, LoRa)技术的特高压直流换流站监控系统, 结合换流站设备工作特

**作者简介:** 胡俊华(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为变电和信息化管理、特高压直流输电技术等, Email: liaogaipa7e@163.com

点,通过多角度联合仿真构建了一个满足覆盖范围需求、抗干扰性强的监控系统。

随着物联网的兴起,LoRa通信的优势特性与物联网低成本、碎片化、广泛连接的需求相结合<sup>[4]</sup>,使得基于LoRa的物联网通信技术已取得了长足的发展,进而已经广泛应用于各个监测领域。文献[5]以分数阶滤波系统为基础,提出了一种基于LoRa的新型抗干扰SF<sub>6</sub>气体密度继电器。文献[6]结合实际中对灌溉用水的需求,通过固定站点搭配移动站点的方式测试LoRa的通信距离,帮助设计实现了远程水质实时监测系统。文献[7]将LoRa级联组网结构应用到路灯自动监控系统的总体设计体系中,实现了路灯系统之间的组网和通信。文献[8]针对特高压直流换流站的应用场景提出了基于全景数据系统的监控方案,对重要构件以及相应的监控策略进行了详细阐明,对换流站的重要区域和设备进行了三维建模,在可视化方面取得了较好的效果。

然而,已有的研究工作未将LoRa通信技术应用于特高压直流换流站,即已有的特高压直流换流站的监控系统无法满足灵敏度高、远距离传输和低功耗等需求。因此本文的研究十分迫切。

### 1 LoRa 通信技术

随着低功耗广域网络技术的发展,通过物联网技术对设备进行远程监控和操作成为各行业智能化发展的趋势<sup>[9]</sup>。表1对比了最有发展前景的3个低功耗广域技术,包括Sigfox, NB-IoT和LoRa技术<sup>[10]</sup>。

表1 低功耗广域网络技术

Tab.1 Low power wide area network technologies			
	Sigfox	NB-IoT	LoRa
传输距离	远距离	远距离	远距离
技术特点	超窄带频谱调制	蜂窝网络技术	线性扩频
速率	小于100 b/s	小于100 kb/s	0.3~62.5 kb/s
频段	100 Hz	200 kHz	150 MHz~1GHz
终端电池寿命	约20 a	约10 a	约10 a
组网最大节点数	百万	200 k/cell	200~300 k/hub
模组成本	...	30~90 元	10~40 元

经过对3种技术进行对比分析可知,LoRa通信可以在满足信息传输速率、延迟率的同时,做到低功耗和低成本,因此,对于特高压直流换流站的监测数据传输,选择应用LoRa通信技术。

采用型号为E22-400T30S1C的LoRa芯片,这款芯片基于SX1262射频芯片<sup>[11]</sup>的无线窗口模块,发射功率为30 dBm,工作频段为433/470 MHz,通信距离为10 km,十分符合本文的应用场景。其需要的工作电压为2.5~5.5 V,接收电流仅为15.2 mA,发射状态下的电流为650 mA,其连线电路如图1所示。

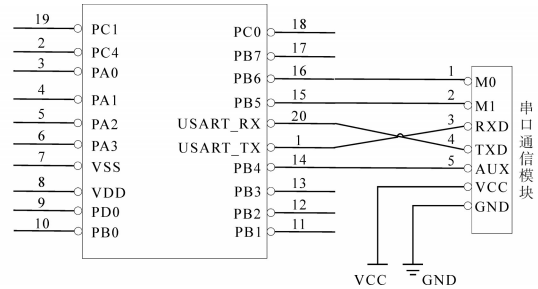


图1 LoRa芯片连线图

Fig.1 Circuit diagram of LoRa chip

与传统单频通信最大的不同是这款扩频技术的传输距离和抗干扰能力是原来的2倍以上,其功能特点如图2所示。扩频技术表现为在信道1和信道2受阻的情况下自动切换到信道3,具有传输距离远、抗干扰能力强、保障通信稳定等特点<sup>[12]</sup>。

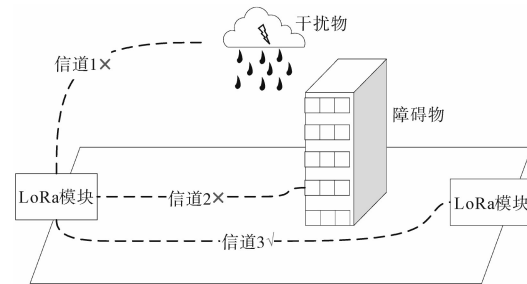


图2 LoRa芯片功能特点

Fig.2 Features of LoRa chip

具有这一功能特点是因为LoRa采用的调制技术可将原始信号展宽,即使在保持发射功率不变时,仍能增大传输距离、提高接受灵敏度、增强抗干扰能力<sup>[13]</sup>,这一方案改变了传统关于传输距离与功耗无法兼顾的缺点。另外采用具有自动纠正传输误码优点的前向纠错编码技术<sup>[14]</sup>,可为用户提供一种更准确的传输方式。

### 2 特高压直流换流站监控系统设计

通过分析目前国内外特高压直流换流站监测系统研究现状,研究电气感知、处理、传输中的关键技术<sup>[15]</sup>,结合实际应用需求,确定了特高压直流换流站监测系统的主要监测范围,其监控范围如图3所示。

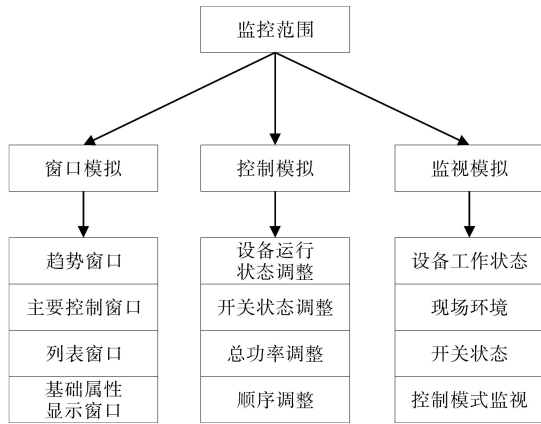


图3 监控范围

Fig.3 Monitoring range

以下是本文的主要监测对象并对选择相应传感器的理由进行了解释。

1)设备温度。由于大部分电气设备在发生故障前都会出现温度异常,通过对重要部位进行测温监测并分析其热成像趋势,提前预防设备出现故障<sup>[16]</sup>。

2)SF<sub>6</sub>气体。电路元件采用SF<sub>6</sub>气体进行绝缘,一旦泄露存在电路安全问题。

3)局部放电。局部放电通常是变压器产生绝缘缺陷的主要原因,通过局部放电监测可有效预防这一状况的发生<sup>[17]</sup>。

4)压力、振动。可根据设备内部压力测试和振动现象监测内部结构是否出现松动。

5)视频监控。通过视频监控可以真实反映设备的外观以及所处的现场环境和重要设备的开关状态。

本文所研究的基于LoRa技术的特高压直流

换流站监控系统总体架构如图4所示。

其硬件终端包括微控制处理单元 (micro controller unit, MCU)<sup>[18]</sup>、LoRa通信电路、电源管理模块、直流场高压设备监测模块、阀厅监测模块、换流变监测模块、高压直流穿墙套管监测模块、220 kV 气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, GIS)及避雷器监测模块、35 kV 补偿区监测模块、500 kV 主变监测模块、500 kV 交流场监测模块、500 kV 混合气体绝缘开关设备 (hybrid gas insulated switchgear, HGIS)监测模块等。通过监测可以得到有限离散无序列的数据。

通信回路负责传送监测装置的监测数据以及控制中心的各项指令,处理单元负责将监测数据统一进行收集、处理及存储,为后续的客户终端提供辅助决策支持,监测模块便于对系统的各个重要组成进行综合分析和评估诊断。监测时需要根据设备不同的工况和自身结构特点,设置不同的监测策略,针对设备较多的区域,采用单体监测的方式难以全方位兼顾监测。因此,本文结合了区域监测的策略对直流场、交流场等高压设备进行监测,且针对各个模块采用多角度联合的方式采集异源数据。例如,针对换流变压器,由于其绝缘系统比普通变压系统环境更为复杂,是运行中的绝缘损坏高频发生位置,因此需要从不同角度对它实施联合监测,根据该设备的结构特性和工作特点对换流变压器实施了特有的监测策略,如图5所示。

由于换流变压器设备结构复杂,通过振动监测可以有效监测内部结构是否松动,温度监测帮

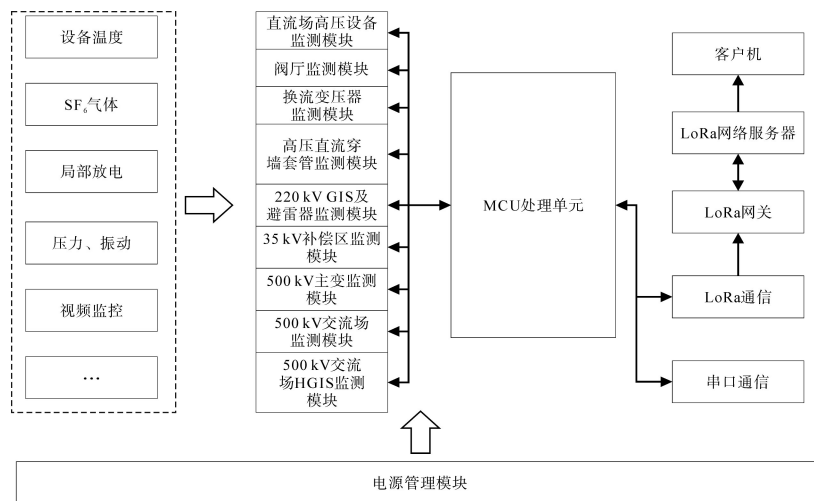


图4 基于LoRa技术的特高压直流换流站监控系统架构图

Fig.4 LoRa technology-based monitoring system architecture for UHVDC converter stations

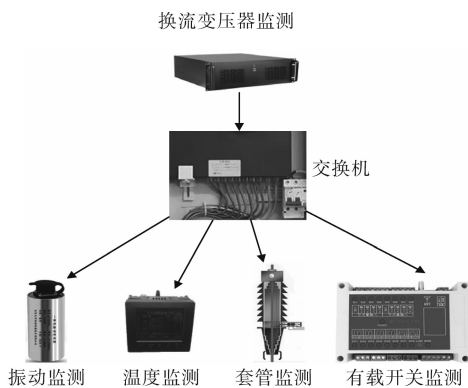


图5 换流变压器的监测策略

Fig.5 Monitoring strategy of the converter transformer

助提前预防是否存在温度失常,套管中的电容量和介质损耗监测能够帮助用户了解绝缘系统的状态。利用有载开关在切换时产生的驱动电机信号和超声信号以监测有载开关的电气特性和机械特性的潜在缺陷。

### 3 实验测试和分析

为了探究应用在特高压直流换流站的LoRa通信是否能够准确传输数据,本文测试了各个监测模块在同一距离位置采集的数据接收率,监测模块总计9类,具体结果如表2。

表2 数据接收率测试结果

Tab.2 Data reception rate test result

监测模块	发包量	收包量	接收率/%
直流场高压设备监测模块	500	490	98
阀厅监测模块	500	480	96
换流变压器监测模块	500	500	100
高压直流穿墙套管监测模块	500	500	100
220 kV GIS及避雷器监测模块	500	455	91
35 kV 补偿区监测模块	500	500	100
500 kV 主变监测模块	500	440	88
500 kV 交流场监测模块	500	500	100
500 kV 交流场 HGIS 监测模块	500	480	96

由测试结果可知,除了500 kV 主变监测模块低于90%,直流场高压设备监测、阀厅监测、220 kV GIS 及避雷器监测、500 kV 交流场 HGIS 监测模块的接收率出现轻微偏差,其余的发包量和收包量结果保持高度一致,说明本文的方法可以满足换流站数据传输准确的需求。

为了测试数据传输距离的表现情况,通过改变传输距离观察传输效果,具体结果如表3所示。

由实验结果可知,当传输距离在7 km 以内,即使收发大量数据也可保证较高的数据传送准

确性,超过一定传输距离成功率会逐渐降低,所以为了保证数据传输的稳定性,客户终端最好设立在换流站7 km 以内。

表3 距离传输测试结果

Tab.3 Distance transmission test result

传输距离/km	时长/h	传输频率/Hz	收发次数	成功率/%
2	12	2	86 400	100
4	12	2	86 400	100
6	12	2	86 400	100
7	12	2	86 400	100
8	12	2	83 808	97
9	12	2	79 488	92
10	12	2	73 400	85

另外LoRa通信模块组网的电流小于15 mA,工作时间小于40 ms,连接频率为10 min/次,则其平均电流如下式所示:

$$\bar{I}_{LoRa} = \frac{15 \text{ mA} \times 40 \text{ ms}}{10 \times 60 \text{ s}} = 1 \mu\text{A} \quad (1)$$

传感器消耗的电流小于280 mA,工作时间小于40 ms,采集频率为10 min/次,则其平均电流如下式所示:

$$\bar{I}_{传感器} = \frac{280 \text{ mA} \times 40 \text{ ms}}{10 \times 60 \text{ s}} = 18.6 \mu\text{A} \quad (2)$$

1 μA 年耗能为8.67 mA·h,因此通过理论计算可得出通信模块加传感器的年功率消耗为

$$Q = 19.6 \times 8.67 = 169.9 \text{ mA} \cdot \text{h} \quad (3)$$

按照电压为12 V、容量为2.2 A·h的蓄电池计算,理论上可以使用13 a。

同时使用NLECloud云平台仿真构建了客户终端界面,如图6所示。仿真设计了具有智能分析功能的监控后台管理系统,可将采集的设备运行状态信息、趋势图数据等进行自动保存,并供客户机实时观察,提供及时决策。插上LoRa模块后写入代码,进行上电测试,即可进入构建好的客户终端界面。



图6 监控界面

Fig.6 Monitoring interface

## 4 结论

本文所设计的基于LoRa技术的特高压直流换流站多角度联合监控系统通过分析实际应用场景,针对不同需求采用不同监控策略进行数据采集并传输,通过实验验证了采用LoRa无线通信技术的优势,结果表明本文设计的基于LoRa技术的特高压直流换流站多角度联合监控技术具有传输距离远、工作功耗低、传输准确率高等特点。监控仿真系统在实现可视化功能的同时,满足了工业应用的部分需求,具有很好的实际应用参考价值,为特高压直流换流站的安全提供了可靠保证。但是这一仿真系统展现的功能还不够完善,需要在未来的工作中进一步探索。

### 参考文献

- [1] 马为民,樊纪超.特高压直流输电系统规划设计[J].高电压技术,2015,41(8):2545-2549.  
MA W M, FAN J C. Planning and design of UHVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2545-2549.
- [2] 葛贤军,蒲天骄,徐正清,等.特高压直流换流站培训模拟系统的研究与应用[J].电力建设,2014,35(8):113-118.  
GE X J, PU T J, XU Z Q. Research and application of training simulation system for UHVDC converter station[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(8): 113-118.
- [3] 彭道刚,赵晨洋,关欣蕾,等.基于IEC61850的智能配电网主站级通信系统研究[J].电气传动,2018,48(12):44-48.  
PENG D G, ZHAO C Y, GUAN X L, et al. Research on master station communication system of smart distribution based on IEC61850[J]. Electric Drive, 2018, 48(12): 44-48.
- [4] 张云勇,贾雪琴.物联网业务发展挑战及NB-IoT运营策略[J].物联网学报,2017,1(1):76-80.  
ZHANG Yunyong, JIA Xueqin. Low power enabled IoT services faced challenges and NB-IoT operation strategies[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1): 76-80.
- [5] 刘畅,郭帅,武倩男.基于分数阶滤波系统的LoRa新型抗干扰SF<sub>6</sub>密度继电器[J].电气传动,2022,52(6):65-72.  
LIU C, GUO S, WU Q N. The new LoRa anti-interference SF<sub>6</sub> gas density relay based on order filtering system[J]. Electric Drive, 2022, 52(6): 65-72.
- [6] 耿云鸿.基于LoRa的水质实时监测系统的研究与实现[D].西安:西安邮电大学,2021.  
GENG Y H. Research and implementation of water quality real monitoring system based on LoRa[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [7] 田旭飞,姚凯学,王凯鹏,等.基于LoRa和STM32的路灯自动监控系统的研究[J].计算机工程与科学,2021,43(8):1470-1478.  
TIAN Xufei, YAO Kaixue, WANG Kaipeng, et al. An automatic streetlight monitoring system based on LoRa and STM32[J]. Computer Engineering & Science, 2021, 43(8): 1470-1478.
- [8] 任众楷.基于全景数据系统的特高压直流换流站设备监控方案[D].青岛:青岛大学,2016.  
REN Z K. Equipment monitoring scheme of UHVDC converter station based on panoramic data system[D]. Qingdao: Qingdao University, 2016.
- [9] 李钦豪,张勇军,陈佳琦,等.泛在电力物联网发展形态与挑战[J].电力系统自动化,2020,44(1):13-22.  
LI Qin hao, ZHANG Yongjun, CHEN Jiaqi, et al. Ubiquitous power Internet of things development and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 13-22.
- [10] VEJLGAARD B, LAURIDSEN M, NGUYEN H, et al. Coverage and capacity analysis of sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT[C]//2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE, 2017: 1-5.
- [11] BÄUMKER E, GARCIA A M, WOIAS P. Minimizing power consumption of LoRa® and LoRaWAN for low-power wireless sensor nodes[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1407(1): 012092.
- [12] SINHA Rashmi Sharan, WEI Yiqiao, HWANG Seung Hoon. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT[J]. ICT Express, 2017, 3(1): 14-21.
- [13] ZHANG Chengwen, WANG Liankai, JIAO Libin, et al. A novel orthogonal LoRa multiple access algorithm for satellite internet of things[J]. China Communications, 2022, 19(3): 279-289.
- [14] 祝永晋,尹飞,豆龙龙,等.基于前向纠错的自适应网络传输机制[J].计算机应用,2021,41(3):825-832.  
ZHU Y J, YIN F, DOU L L, et al. Adaptive network transmission mechanism based on forward error correction[J]. Computer Applications, 2021, 41(3): 825-832.
- [15] 赵月爱,郭兴原.基于多源数据协同感知的电气火灾预警算法研究[J].太原理工大学学报,2021,52(6):907-912.  
ZHAO Y A, GUO X Y. Research on electrical fire warning algorithm based on multi-source data collaborative sensing[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(6): 907-912.
- [16] 王海宝,王峥,周娴姊,等.基于脉冲转换温度传感方法的电力设备温度监测系统研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):180-187.  
WANG Haibao, WANG Zheng, Zhou Xianzi, et al. Temperature monitoring system for distribution network equipment using a pulse conversion temperature sensing method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 180-187.
- [17] OH D H, KIM H S, LEE B W. A novel diagnosis method for void defects in HVDC mass-impregnated PPLP cable based on partial discharge measurement[J]. Energies, 2021, 14(8): 1-18.
- [18] STMicroelectronics, STM32L0x3datasheet[EB/OL]. (2019-03-07)[2022-05-24]. <http://www.st.com>.

收稿日期:2022-05-24

修改稿日期:2022-07-13