

电网设备防御强电磁脉冲试验平台建设

厉天威¹, 刘磊¹, 贾磊¹, 田君杨², 李恩文¹, 范才进¹, 冯瑞发¹, 李海勇², 蒋连钿²

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 广西电网有限责任公司电力调度控制中心, 南宁 530023)

摘要: 国家层面成立电磁脉冲委员会并积极推进强电磁脉冲防御计划, 南方电网公司高度重视电网设施遭受强电磁脉冲攻击风险。为加强电网安全防御并提升供电可靠性, 亟需建立电网设备防御强电磁脉冲试验平台开展相关试验研究。首先研究了强电磁脉冲试验平台功能定位和总平面布置方案。然后依次从场区用电和试验电源、电磁屏蔽室和控制室建设、发输电设备和输电线路配置、接地网设计、消防和给排水等方面开展研究和建设。最后进行了设备现场调试和电磁环境测试。首次在国内建立了面向电网设备的强电磁脉冲平台, 完全满足强电磁脉冲各项试验需求, 为强电磁脉冲产生和传播特性、对电网主设备 and 控制保护设备影响规律、防御装置研发等研究提供了平台保障。

关键词: 强电磁脉冲; 电网设备; 安全防御; 平台建设; 屏蔽室

Construction of the Strong Electromagnetic Pulse Defense Test Platform for Power Grid Equipment

LI Tianwei¹, LIU Lei¹, JIA Lei¹, TIAN Junyang², LI Enwen¹, FAN Caijin¹, FENG Ruifa¹, LI Haiyong², JIANG Liandian²

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Power Dispatching and Control Center of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: At the national level, the Electromagnetic Pulse Committee has been established and the strong electromagnetic pulse defense plan has been actively promoted. China Southern Power Grid attaches great importance to the risk of power grid equipments being attacked by strong electromagnetic pulse. In order to strengthen the security defense of power grid and improve the reliability of power supply, it is urgent to establish strong electromagnetic pulse test platform to carry out relevant experimental research. Firstly, the functional positioning and general layout of the strong electromagnetic pulse test platform have been studied. Then, research and construction have been carried out from field power consumption and test power supply, electromagnetic shielding chamber and control room, substation equipment and transmission line, ground network design, fire protection and water supply. Finally, field debugging and electromagnetic environment testing are carried out. The strong electromagnetic pulse platform for power grid equipment is established for the first time in China, fully meeting the needs of various tests of strong electromagnetic pulse and providing platform support for research on the generation and propagation characteristics of strong electromagnetic pulse, the influence law on power grid main equipment and control & protection equipment, and the research and development of defense devices.

Key words: strong electromagnetic pulse; power grid equipment; security denfense; platform construction; shielding chamber

0 引言

新型电力系统形势下电力装置的自动化、信息

化程度高, 易受到电磁脉冲干扰和攻击^[1-4]。强电磁脉冲具有隐蔽性强、波形陡度高(上升沿纳秒级), 幅值高以及作用范围广等特点, 产生的电磁场耦合到传输线缆后在线缆上产生感应电流和电压并破坏相关电子设备^[5-9]。作为电网关键基础设施, 电力装置受攻击后的级联效应将会造成巨大的经济损失, 亟需开展强电磁脉冲对电力装置的风险评估^[10-14]和防护研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20221); 广西电网有限责任公司科技项目资助项目(046000KK52210030)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22A20221); the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd. (046000KK52210030).

特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心(以下简称“工程中心”)配置有全套电磁兼容试验设备,包括高精度示波器等,具备开展电力系统电磁兼容试验条件,但无法满足强电磁脉冲试验要求。

本项目依托工程中心首次建设面向电网主设备和控制保护装置的强电磁脉冲试验平台^[15-18]。平台建设须满足安全可靠、经济适用、技术先进、工程优质的要求,具有通用性、统一性、兼顾性和前瞻性^[19-21];通过技术、经济等因素综合比较选用综合指标最有方案;采用技术先进、成熟可靠的新技术、新工艺、新材料、新设备;充分体现环境保护和节能降耗的理念。

平台建设分为三大部分:建设方案、建设内容和平台测试。其中,建设内容包括四大部分:试验电源和用电电源、接地、集装箱和电磁屏蔽室、10 kV光伏发电和输电线路。

1 建设方案

1.1 本项目功能定位

首次在国内建立了面向电网的强电磁脉冲试验平台,开展了强电磁脉冲对高压设备、架空线路和信号电缆干扰特性研究;制定了强电磁脉冲试验测量规程;研制并校核了智能化电磁辐射检测装置;研制了强电磁脉冲防御装置浪涌抑制装置;构建了电网防护强电磁脉冲的技术体系,形成了南方电网对强电磁脉冲的第一道防御系统,可满足电网抵御强电磁脉冲的安全防护研究需求。

1) 开展了强电磁脉冲对绝缘子冲击闪络特性试验,绘制50%闪络电压的伏秒特性曲线,改进绝缘子伞裙结构和布置方式预防强电磁脉冲作用下线路跳闸。

2) 研究了强电磁脉冲感应电压下线路避雷器的动作响应特性,评估了常规避雷器抵抗强电磁脉冲的有效性。

3) 开展了变电站信号电缆的电磁脉冲干扰试验,研究在不同的电磁脉冲源、电缆长度、电缆走向等工况下强电磁脉冲对电缆的动态耦合响应特性并校核电路仿真计算结果。

4) 制定了强电磁脉冲试验程序和测量方法标准,结合仿真并通过测量空间场量分布验证程序的合理性和方法的准确性。

5) 研制了强电磁辐射敏感检测系统,试验验证了脉冲源波形的近似度和脉冲源控制系统灵敏度。

6) 基于大量的试验数据建立了量化指标体系,开展了强电磁脉冲作用下设备的耐受特性评估。综合考虑了电磁屏蔽、滤波、限幅、隔离和接地等防护措施,采用电网设备的壳体屏蔽、端口浪涌保护、端口快瞬响应技术,研制了应对强电磁脉冲初期、中期两级辐射的浪涌防护系统。

7) 研制了强电磁脉冲防御装置并通过了试验验证,提出了电网设备应对强电磁脉冲的防护技术体系。

作为保障电网安全和稳定运行的创新性试验平台,基于此构建了产学研长效机制,形成了电磁环境领域的平台支撑,培养了相关领域的技术人才,研发了国家和公司级重大项目,引领了强电磁脉冲防御产品的自主创新并促进成果转化,逐步成为电网领域的重要研发平台。

1.2 总平面布置

该强电磁脉冲试验平台项目位置位于某工程中心二期预留场地边角处,远离居民区,占地面积为100 m×70 m,所处位置鸟瞰图如图1所示。

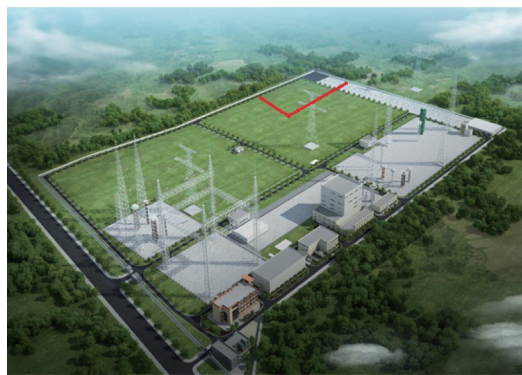


图1 强电磁脉冲试验平台位置图

Fig. 1 Location of strong electromagnetic pulse test platform

该项目总平面布置如图2所示。

已建设600 kV辐照电源并预留二期场地。电磁屏蔽室和监控测量室远离辐照电源位于平台上方并嵌入到同一个集装箱内。光伏发电组件和10 kV输电线路均为移动式,可随意调整位置和方向,满足强电磁辐射全面研究需求。户外和户内各设置一台配电箱,户外配电箱为辐照电源施工和运行供电,户内配电箱布置在监控测量室内。平面图设计

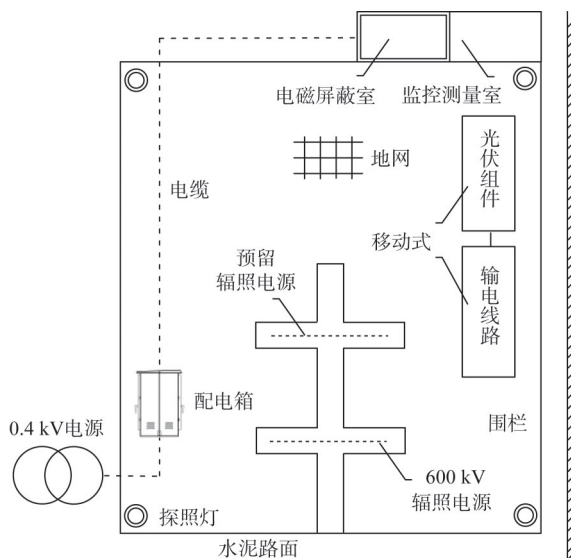


图2 强电磁脉冲试验平台总体布置

Fig. 2 Overall layout for the strong electromagnetic pulse test platform

还包括接地网、探照灯和围栏等。

2 建设内容

2.1 场区供电

电网设备防御强电磁脉冲试验平台场区供电主要分为三部分：辐照电源安装和运行供电、户外监控摄像头和探照灯供电、集装箱(电磁屏蔽室和控制室)内设备供电。电磁屏蔽室用电设备包括防火门、服务器两台、波形分析仪、视频监控装置、空调、日光灯；控制室用电设备包括门禁系统两套、火灾报警装置、视频监控装置、UPS 两台、照明装置等。

辐照电源装置吊装和用电功率为 24 kW，计算设备或装置功率并预留 30% 裕度，总计用电需求为 55.6 kW， $55.6/0.4/1.732 \approx 81$ A，而 10 kV/0.4 kV 箱式变压器副边侧开关额定电流 200 A，满足场区用电需求。从远端箱式变压器沿着电缆沟依次引入辐照电源附近户外配电箱，和集装箱监控测量室内的户内配电箱，两台 UPS 配合形成场区稳定的供电系统。场区用电电气主接线如图 3 所示。

2.2 试验电源

电网设备防御强电磁脉冲试验平台试验电源即辐照电源产生的快波前脉冲电压信号通过自带的天线装置向周围辐射形成空间电场。脉冲电压信号波形满足 GJB8848—2016^[22]强电磁脉冲辐射和试验要

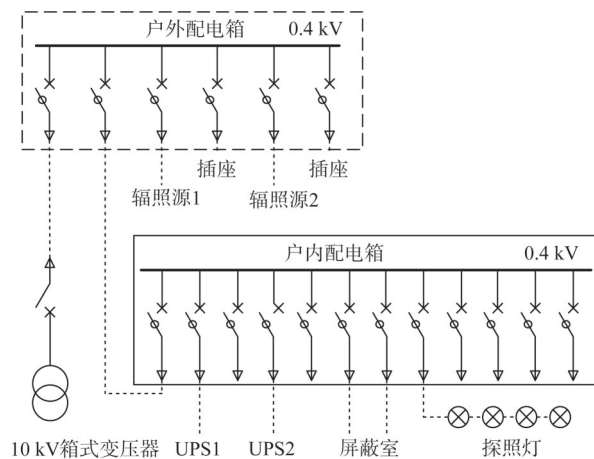


图3 场区电气主接线图

Fig. 3 Main electrical wiring diagram in the field

求。辐照电源悬吊于门型钢结构下方，电源锥形天线转接结构连接着扩展天线，多根扩展天线形成一组固定于地面，如图 4 所示。

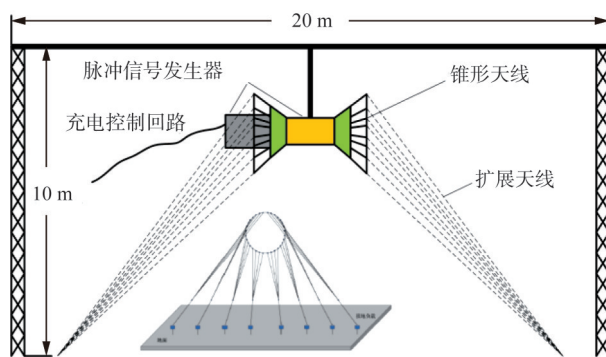


图4 辐照电源安装示意图

Fig. 4 Irradiation power supply installation diagram

辐照电源主要包括脉冲信号发生器、充电和控制系统等。脉冲电压信号发生器主要包括 SF₆ 绝缘 Marx 发生器、陡化电容器、输出开关和输出绝缘件等。充电和控制系统是由充电箱和控制终端组成。充电系统提供初级充电电压，触发和控制电源充电和放电。控制系统分为人机界面、可编程制单元、数据采集单元、输入传感器及输出执行单元等。脉冲电源模拟电路如图 5 所示， C_m 为 Marx 建立电容， L_m 为 Marx 建立电感， R_m 为 Marx 放电回路电阻， L_t 为调波电感， S 为输出开关， C_p 为峰化电容器， L_p 为峰化回路电感， R_L 为负载。

通过配置并调整参数，使脉冲电压信号满足技术参数要求：双指数波，峰值 ≥ 600 kV，波形上升 (10%~90%) 时间 ≤ 10 ns，波形半高宽 ≥ 100 ns。辐照

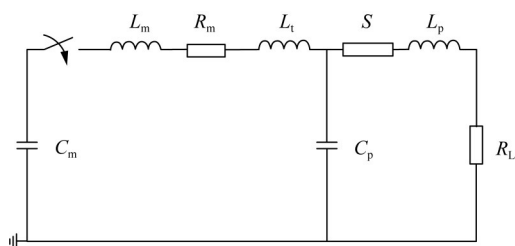


图5 辐照电源电气接线图

Fig. 5 Irradiation power supply electrical wiring diagram

电源通过试验平台测量输出的脉冲波形的上升时间和半高宽如图6所示。

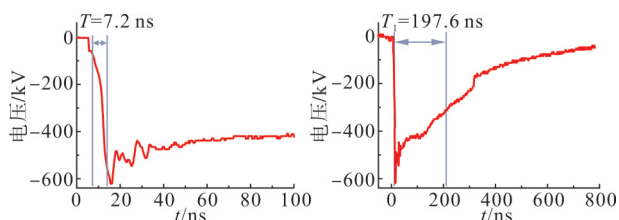


图6 脉冲电压信号上升时间和半高宽

Fig. 6 Pulse voltage signal rise time and half height width

辐照电源电路设计合理,可满足技术指标要求,输出电压 ≥ 600 kV,理论上输出最大电压幅值达到700 kV。扩展天线对电磁场具有很强的范围限制,可以将脉冲电磁场辐射集中到场区内部附近。为确保人员安全,试验操作均需在屏蔽室内进行,项目将按照实验室管理要求开展场区周围电磁环境评估。

2.3 集装箱

因项目远离居民区周围无房屋,在户外安装集装箱以建设电磁屏蔽室和控制室。集装箱长宽高为12 m $\times$ 3 m $\times$ 3 m,在长度方向分为电磁屏蔽室和控制室两大部分。集装箱通过吊装放置在8根0.3 m高的水泥柱上垫高以防防水防潮,调平各水泥柱高度并进行钢板接缝焊接,内部地面采用静电地板敷设,门口外面设置钢制坡道方便设备和人员进出。整体设计须满足《外壳防护等级(IP代码)》(GB/T4208—2017)^[23]标准的要求,IP54防水防尘测试合格。电磁屏蔽室和控制室在集装箱安装试验完后进行安装和建设。集装箱、电磁屏蔽室和控制室内部设备和装置布置如图7所示。

2.3.1 电磁屏蔽室

电磁屏蔽室长宽高尺寸为6 m $\times$ 3 m $\times$ 2.8 m,内嵌于集装箱,四周和顶部主龙骨采用20 m $\times$ 40 m $\times$ 3 mm方形钢管,内部墙面全部采用2 mm厚钢的电磁屏蔽壳体。电磁屏蔽室内部配置有空调、工作台

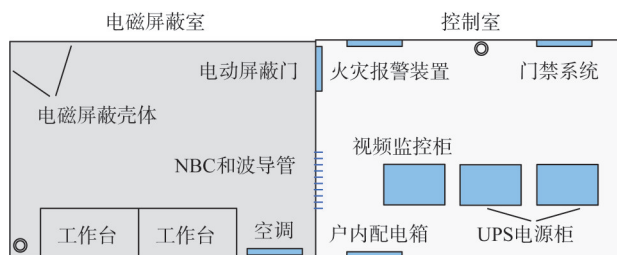


图7 集装箱内部设备布置图

Fig. 7 Device layout diagram inside containers

(2台电脑终端和波形分析仪等)、监控装置等基本设施,同时配置有电动电磁屏蔽门,通过NBC接口板和波导管等进行动力电源和现场测试信号传输等。电磁屏蔽室和外界隔离墙,即电磁屏蔽室和控制室之间墙面(由室外向室内看)布置如图8所示。其中光纤波导管40根,NBC接口板接口40根,同时为了滤除高次谐波,分别设置有空调电源滤波器、空调信号滤波器、电源滤波器、接地滤波器和门禁滤波器等。左开屏蔽门门洞尺寸为1 m $\times$ 2 m,门框尺寸1.4 m $\times$ 2.5 m,采用UPS后备供电保证开关的可靠性。

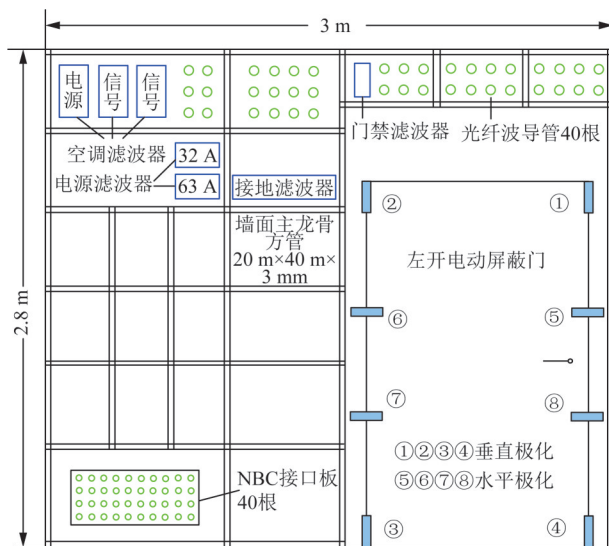


图8 两室分隔面和屏蔽门天线极化布置图

Fig. 8 Polarization layout of two compartments interface and shielding door antenna

按照建设要求,依据《电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法》(GB/T12190—2021)^[24]标准的要求对电磁屏蔽室的电磁屏蔽效能进行测试。本文采用适用于不同频段的多个磁环天线、偶极子天线、喇叭天线等分别对两室隔离墙的滤波器、接口板和电动屏蔽门等关键位置进行电磁屏蔽效能测试,电磁屏蔽

室的另外 3 个墙面、天花板和地面屏蔽层等均采用焊缝连接屏蔽性能良好。左开电动屏蔽门的天线测试位置和天线极化方向布置如图 8 所示, 8 个测试点对称位于门的铰链侧和门把手侧, 其中①—④为垂直极化方向, ⑤—⑧为水平极化方向。3 类天线的测试频段和在门外接收信号的测试距离如表 1。距离测试点为 0.6 m 或 1 m, 频率基本能覆盖 9 kHz~1.2 GHz 范围。

表 1 3 种不同天线测试参数

Tab. 1 Testing parameters of three different antennas

测试参数	频率范围	测试距离/m
磁环天线	9 kHz~30 MHz	0.6
偶极子天线	30 MHz~1.2 GHz	1.0
喇叭天线	300 MHz~30 GHz	1.0

电磁屏蔽室设计使用年限为 50 a。电磁屏蔽室整体性能要求工作频率范围为 14 kHz~1 GHz, 通过在电磁屏蔽室内信号发生器产生信号, 根据以上测试方法通过不同的天线测量得到结果如表 2 所示。通过测试分析可知电磁屏蔽门 8 个测试点的屏蔽效能结果很接近, 表 2 为电磁屏蔽室关键位置屏蔽效能测试结果。由表 2 可知, 屏蔽门、滤波器和接口板在工作频率范围内的屏蔽性能都大于 60 dB 且满足各频段的限值要求, 电磁屏蔽室总体满足现场试验人员防强电磁脉冲辐射的安全需求。

表 2 电磁屏蔽室关键位置屏蔽效能测试结果

Fig. 2 Test results of shielding effectiveness at key positions of electromagnetic shielding room

频率	屏蔽门	滤波器	接口板	限值
14 kHz	92	94	92	≥61
150 kHz	105	105	109	≥71
15 MHz	84	96	96	≥79
100 MHz	123	123	124	≥90
450 MHz	98	109	103	≥90
1 GHz	106	106	97	≥90

2.3.2 控制室

控制室室长宽高尺寸为 6 m×3 m×3 m, 内嵌于集装箱和电磁屏蔽室紧紧相联, 如图 7 所示。控制室内户内配电箱引入 220 V 电源对控制室各设备进行供电, 且电源通过滤波器后接入电磁屏蔽室供空调等内部设施使用。控制室内配置有三大控制系统, 包括视频监控系统、安防监控系统、火灾自动

报警系统。视频监控系统实时采集图像数据并监控电磁屏蔽室、控制室和试验现场运行情况; 集装箱大门和控制室共采用两套安防系统; 在电磁屏蔽室和控制室分别设置火灾感应装置并在控制室安装自动报警系统, 符合试验平台建设防火要求。另外, 试验现场包括辐照电源下方场强和输变电设备电气线路上电压、电流等数据信号通过光纤传输先引入控制室再通过光纤波导管等接入波形分析仪等。

为满足供电可靠性, 在控制室配置两台 UPS 不间断电源, 分别对电磁屏蔽室和控制室内装置等进行供电, UPS 电源接线如图 9 所示。电磁屏蔽室除对工作台的工作站和测试分析仪器进行供电外, 还需要对电动屏蔽门进行稳态供电, 防止外界电源突然断电造成门闭锁等问题。在控制室内需要对视频监控系统 and 火灾报警系统进行不间断供电保障供电的可靠性。UPS 在外界电源正常时交流旁路开关闭合, 交流输入开关断开; 在外界电源异常时交流旁路开关断开, 交流输入开关和直流开关打开, 由 220 V 直流电源同时对负载和母线供电。

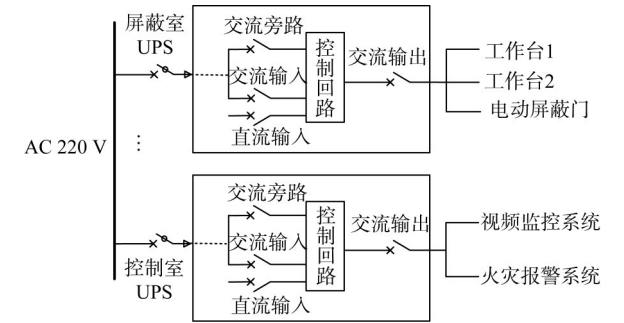


图 9 UPS 供电线路图

Fig. 9 Circuit diagram of UPS power supply

2.4 发电设备

为开展强电磁脉冲对电网设备的干扰影响试验, 项目建设 10 kV 光伏发电装置、配电装置和一个耐张段的输电线路, 放置于场区的辐照电源另一侧, 且可灵活移动或改变方向, 适应不同的试验工况需求。

2.4.1 光伏发电装置

项目采用便携式光伏系统, 集发电、储能功能于一体, 包括太阳能光伏电池板、控制器、光伏专用蓄电池、光伏逆变器和直流变换器等设备, 如图 10 所示。通过控制器将太阳能板的光能转换为电能, 而后通过光伏逆变器后供给交流负载或通过直

流变换器供给直流负载。便携式光伏系统方便存放和移动,不用时集成缩放到集装箱里,需要做试验可以随意张开组装,且可整体自由移动。

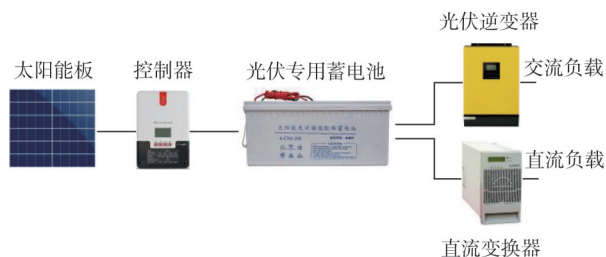


图 10 便携式光伏发电系统

Fig. 10 Portable photovoltaic power generation system

每块电池均安装电池数据采集模块,用户可远程检测电池性能;内部自备工业变频空调,随时调节工作环境温度等;利用非固定式新能源发电系统为本项目提供电源供应解决方案。

2.4.2 输配电设备

该项目配置了 10 kV 输电线路和测量装置,如图 11 所示,①—⑤依次为输电线路、隔离开关、电流互感器、电压互感器和避雷器,用于模拟真实的 10kV 配电系统。当场区强电磁脉冲源产生强电磁脉冲信号时输电线路和配电装置母线上会感应产生高频电场、电压和电流信号。通过强电磁脉冲电场探头配合光电传输系统测量强电磁脉冲时域波形,采用强电磁脉冲电压探头测量耦合过电压,采用不同测量范围的 3 种强电磁脉冲电流探头测量电流。基于测得的电场和电压电流值,评估强电磁脉冲对电网设备的影响。同时,在试验场区也可以布置控制保护装置用电信号线,开展强电磁脉冲对电缆信号线的影响试验。掌握强电磁脉冲作用机理后有针对性地研发变电站内主设备和控制保护设备的强电磁脉冲防御装置。

2.5 接地网

本试验平台采用场地原有的以水平接地体为主

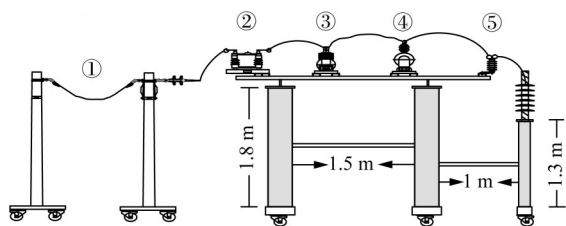


图 11 10 kV 输配电装置

Fig. 11 10 kV transmission and distribution units

的人工接地极,采取 20 m×20 m 网格布置,接地体采用 80 cm×8 cm 的热镀锌扁钢,埋深为 0.8 m,水平接地体外缘敷设成闭合环形,外缘各角呈圆弧形,在需要做冲击试验区域,地网采用十字交叉的加强布置方案,以满足接地电阻需求。

试验平台根据设备布置区域不同共设置 3 个接地点,分别为强电磁脉冲电源工作接地、集装箱和监测装置保护接地、输配电设备的工作接地,如图 12 所示,分别位于场区两侧和两段,出于安全考虑并避免相互干扰,脉冲电源接地与另外两个接地点的距离尽量设置得远些。防雷接地、保护接地和工作接地共用接地装置,接地系统电阻值不宜大于 4 Ω。通过对地网进行测量,3 个接地点的接地电阻均不大于 0.5 Ω。

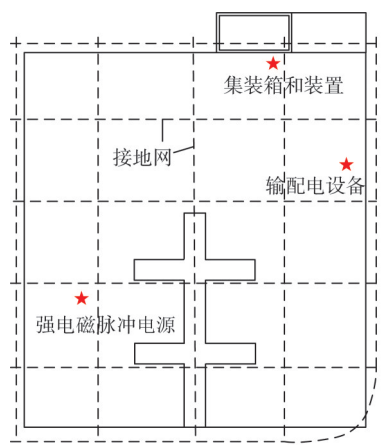


图 12 试验场地接地布置

Fig. 12 Ground layout of test site

2.6 消防和给排水

消防设计贯彻“预防为主,消防结合”方针,立足自防自救。在设计、装置选用和布置方面均遵循《建筑设计防火规范》(GB50016—2018)^[25],项目配置 1 套火灾报警系统并配合视频监控系统确保场区消防安全。依据《变电所给水排水设计规范》(DLT 5143—2002)^[26],本试验场地不考虑给水,排水利用自然排散及原有场地排水系统进行。

3 结语

电网设备防御强电磁脉冲试验平台建设目标是开展强电磁脉冲试验,评估现有电网设备耐受能力并提出防御措施,从而提升电网抗风险水平。本文研究了强电磁脉冲试验平台的建设方案和主要建设

内容等,充分考虑了平台的功能性和安全可靠。

该平台建设项目选址远离人口密集区域且周围空旷无建筑物构筑物,主要分为强电磁脉冲试验电源区、发输电设备区域和电磁屏蔽室。

场区用电电源来自基地已有的变压器,通过计算核实变压器预留容量满足场区用电需求。完成了600 kV脉冲试验电源建设,并预留场地用于建设更高电压等级的脉冲试验电源。

将电磁屏蔽室和控制室独立分开并集成到集装箱是基于现场环境而进行的创新性设计。屏蔽室设置光纤波导管、NEC管和电磁屏蔽门,通过对关键测试点进行测试,结果满足规程在14 kHz~1 GHz频率范围的屏蔽效能要求。控制室内配置视频、安防和火灾三大控制系统以及UPS电源等,可为集装箱提供临时供电和安全保障。

场区配置完善的发输电设备和输电线路以及高频测量探头以测量电场、电压和电流等参数。接地网、消防和给排水均已详细设计和建设。

经测试平台完全满足电网防御强电磁脉冲冲击的各项试验要求。

参考文献

- [1] 毛从光,程引会,谢彦召. 高空电磁脉冲技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [2] 翟守阳, 金字, 刘晏平, 等. 高空核电磁脉冲对变压器耦合效应的研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 15-20.
ZHAI Shouyang, JIN Yu, LIU Yanping, et al. The study on coupling effect of high altitude nuclear electromagnetic pulse on transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 15-20.
- [3] 刘青,徐婷,韩康康,等. 电磁脉冲在地上及地下的传播规律[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 51-56, 63.
LIU Qing, XU Ting, HAN Kangkang, et al. Propagation law of electromagnetic pulse on the ground and underground[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 51-56, 63.
- [4] 祁树峰,李夕海,韩绍卿,等. 核爆与雷电电磁脉冲识别[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2935-2940.
QI Shufeng, LI Xihai, HAN Shaoqing, et al. Discrimination of nuclear-explosion and lightning electromagnetic pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2935-2940.
- [5] 秦锋,王旭桐,陈伟,等. 高空电磁脉冲作用下配电变压器瞬态响应与失效机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6924-6933.
QIN Feng, WANG Xutong, CHEN Wei, et al. Transient response and failure mechanism of distribution transformer under high-altitude electromagnetic pulse[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6924-6933.
- [6] 张鸣,吴卫堃,李甜,等. 考虑频变参数的交联聚乙烯电缆中典型电磁脉冲的传播特性[J]. 南方电网技术, 2020, 14(9): 29-36.
ZHANG Ming, WU Weikun, LI Tian, et al. Propagation characteristics of typical electromagnetic pulses in cross-linked polyethylene cable with frequency-dependent parameters[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(9): 29-36.
- [7] 陈宇浩,谢彦召,刘民周,等. 高空电磁脉冲作用下电力系统主要效应模式分析[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(7): 49-54.
CHEN Yuhao, XIE Yanzhao, LIU Minzhou, et al. Analysis of high-altitude electromagnetic effect models on power system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(7): 49-54.
- [8] 张汉花,邹军,田蓓,等. 高空核爆电磁脉冲激励下架空输电线路绝缘子闪络情况分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 435-443.
ZHANG Hanhua, ZOU Jun, TIAN Bei, et al. Flashover possibility analysis of overhead power transmission and distribution line insulators with the excitation of high altitude electromagnetic pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 435-443.
- [9] 赵志斌,柯俊吉,马丽斌. 高空核电磁脉冲晚期效应对电网稳定性影响的研究[J]. 电气技术, 2015(9): 16-19.
ZHAO Zhibin, KE Junji, MA Libin. Research on impact of late-time HEMP to stability of power grids[J]. Electrical Engineering, 2015(9): 16-19.
- [10] 陈宇浩,王宗扬,王禹博,等. 10 kV 配电变压器高空电磁脉冲效应实验研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3119-3124.
CHEN Yuhao, WANG Zongyang, WANG Yubo, et al. Effect experiments of 10 kV distribution transformer excited by high-altitude electromagnetic pulse[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3119-3124.
- [11] 秦锋,王旭桐,陈伟,等. 强电磁脉冲下线路绝缘子闪络特性试验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3640-3650.
QIN Feng, WANG Xutong, CHEN Wei, et al. Experimental study on flashover characteristics of line insulator under strong electromagnetic pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 43(17): 3640-3650.
- [12] 秦锋,王旭桐,陈伟,等. 高空电磁脉冲作用下配电变压器瞬态响应与失效机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6924-6932.
QIN Feng, WANG Xutong, CHEN Wei, et al. Transient response and failure mechanism of distribution transformer under high-altitude electromagnetic pulse[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6924-6932.
- [13] 刘彤宇,李丽,王亚楠,等. 高空电磁脉冲晚期环境下电力系统效应研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(5): 1-17.
LIU Tongyu, LI Li, WANG Ya'nan, et al. Research progress on power system effects in late-time high-altitude electromagnetic pulses environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(5): 1-17.
- [14] 杨嘉伟,易杨,姜浩,等. 基于随机载波脉冲宽度调制的变换器群超高次谐波抑制机理[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 160-167.
YANG Jiawei, YI Yang, JIANG Hao, et al. Principle of supraharmmonic elimination based on random carrier sinusoidal pulse width modulation for converter clusters[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 160-167.
- [15] 王国利,李锐海,陆国庆,等. 特高压工程技术(昆明)国家工程实验室的功能和研究框架[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3):

- 23-27.
WANG Guoli, LI Ruihai, LU Guoqing, et al. Function and key research works of national engineering laboratory (Kunming) for UHV Engineering technology [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(3): 23-27.
- [16] 王国利,陆国庆,李锐海,等.特高压工程技术(昆明)国家工程实验室的建设[J].南方电网技术,2009,3(7): 1553-1558.
WANG Guoli, LU Guoqing, LI Ruihai, et al. Construction of national engineering laboratory for UHV engineering Technology (Kunming) [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(7): 1553-1558.
- [17] 秦锋,毛从光,崔志同,等. HEMP 传导环境下变压器等效电路模型的建立及验证[J]. 现代应用物理, 2021, 12(2): 41-46.
QIN Feng, MAO Congguang, CUI Zhitong, et al. Design and verification of equivalent circuit model of transformer under HEMP conduction environment [J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(2): 41-46.
- [18] 贾伟,陈志强,王发强,等. 低阻抗负载强电磁脉冲驱动源一级脉冲压缩电路的参数设计[J]. 现代应用物理, 2022, 13(3): 3-10.
JIA Wei, CHEN Zhiqiang, WANG Faqiang, et al. Parameters design of one-stage pulse compression circuit of electromagnetic pulse source with low impedance load [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(3): 3-10.
- [19] 王皓怀,邓韦斯,戴仲覆,等. 面向新能源功率多时空尺度精确预测的机制创新与平台建设探索[J]. 南方电网技术, 2023, 17(2): 3-10.
WANG Haohuai, DENG Weisi, DAI Zhongfu, et al. Mechanism innovation and platform construction for accurate prediction of new energy power at multiple temporal and spatial scales [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(2): 3-10.
- [20] 黎小林,周保荣,赵文猛,等. 电力市场仿真平台建设的关键问题与功能设计[J]. 南方电网技术, 2018, 12(12): 23-29.
LI Xiaolin, ZHOU Baorong, ZHAO Wenmeng, et al. Key problems and function design for the construction of electricity market simulation platform [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(12): 23-29.
- [21] 中央军委装备发展部. 系统电磁环境效应试验方法: GJB8848—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 外壳防护等级 (IP 代码): GB/T4208—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法: GB/T12190—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范: GB50016—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [25] 国电华北电力设计院工程有限公司. 变电所给水排水设计规范: DLT 5143—2002[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

收稿日期: 2023-11-16; 网络首发日期: 2024-06-08

作者简介:

厉天威(1980), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电磁环境、高压设备数值计算, llttww@qq.com;

刘磊(1978), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力系统电磁环境、带电作业, liulei@csg.cn;

贾磊(1982), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力系统防雷、过电压与绝缘配合、电磁环境, jialei@csg.cn.

广 告

直流输电技术全国重点实验室 封二
南方电网仿真重点实验室 封三

广东中大管理咨询集团股份有限公司 A2-A3