

# 智慧能源互联网实验平台关键科研设备研究应用

钱俊良<sup>1,2</sup>, 赵婷<sup>1,2</sup>, 刘增稷<sup>3</sup>

(1.东南大学溧阳研究院, 江苏溧阳 213300; 2.东大检测服务(常州)有限公司, 江苏溧阳 213300; 3.南京邮电大学自动化学院, 江苏南京 210000)

**摘要:** 目前电力系统解决问题的手段, 主要有理论分析、数字仿真、物理模拟和现场试验。基于目前电网含高比例新能源和高比例电力电子设备的“双高”特点, 传统数字仿真模型精度逐步降低。为进一步适应电网发展新变化, 亟需搭建一套符合新型电力系统运行特点的物理模型。

智慧能源互联网实验平台是利用相似原理与实际电力设备参数标么值一致的物理模型。平台利用现代通信与计算机科学技术, 可开展可再生能源与交直流配电网、微电网关键技术的研究和检验检测服务, 为新型电力系统研究提供技术验证基础。

**关键词:** 智慧能源互联网实验平台; 新型电力系统; 交直流配电网; 微电网; 可再生能源;

## 1 研究背景

2020年9月22日, 习近平总书记在第七十五届联合国大会上宣布, 中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和目标, 正式提出“双碳”目标。2021年10月, 《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》以及《2030年前碳达峰行动方案》两个重要文件的相继出台, 共同构建了中国碳达峰、碳中和“1+N”政策体系的顶层设计。随后在中央财经委第九次会议上, 习近平再次对碳达峰、碳中和作出重要部署, 强调要构建以新能源为主体的新型电力系统, 明确了“双碳”背景下我国能源电力转型发展的方向。

构建以新能源为主体的新型电力系统, 是党中央基于保障国家能源安全、实现可持续发展、推动碳达峰、碳中和目标实施作出的重大决策部署, 为新时期能源行业以及相关产业发展提供了重要战略指引, 有利于加快我国构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系步伐, 推动经济社会绿色转型和高质量发展。但从发电侧看, 新能源具有典型的间歇性特征, 出力随机波动性强, 从负荷侧看, 以电动汽车为代表的新型负荷尖峰化特征明显, 最大负荷与平均负荷之比持续提升。发电侧随机性和负荷侧峰谷差加大将对传统电力系统造成较大的冲击, 新型电力系统的构建必将面临诸多挑战, 因此亟需构建符合新型电力系统运行特征的动态模

拟实验平台，提供电力系统发、输、变、配、用、调、储全真模拟环境，为新型电力系统新技术研究搭建验证平台。

## 2 平台介绍

### 2.1 平台简介

智慧能源互联网实验平台采用现代化控制方式，模拟原型系统的控制设备特性，模型系统可真实反映原型系统。平台能够进行各种电压等级下的配电系统继电保护、配电自动化系统、配电网安全稳定控制装置、新能源与各种储能装置的研发试验、验证试验以及入网试验，能够开展新能源、智能电网等方面实验研究，还可以进行电力系统设备的入网实验，为研究多能接入交直流混联系统的规划、运行控制等相关前沿技术，研发相关技术检验检测平台提供多方位的支撑，更好地服务于新型电力系统建设发展。

### 2.2 平台功能

本平台目标为电力系统控制保护设备制造、科研单位提供设备功能点三方检测，主要包括：

- 1) 主动配电网、微电网继电保护功能检测；
- 2) 配电网终端功能检测；
- 3) 分布式电源接入装置功能检测；
- 4) 微电网中央控制器、能量管理系统功能检测；
- 5) 小功率变流器涉网功能检测；
- 6) 直流配电保护、测控装置功能检测。

### 2.3 平台建设标准

- [1] IEC 61850-2004 Communication networks and systems in substations.
- [2] IEC 61850 Ed.2: Communication networks and systems for power utility automation.
- [3] IEEE Std 1547.1-2005 IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems.
- [4] IEEE Std 1547.2-2008 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.
- [5] IEEE Std 1547.3-2007 IEEE guide for monitoring, information exchange, and control of distributed resources interconnected with electric power systems.
- [6] IEEE Std 1547.4-2011 IEEE guide for design, operation and integration of distributed resource island systems with electric power systems. BDEW. Technical guideline: generating

plants connected to the medium-voltage network.

[7] VDE-AR-N 4105: 2011-08 Power generation systems connected to the low voltage distribution network.

[8] EA\_ER\_G75\_1 Recommendations for the connection of embedded generating plant to public distribution systems above 20 kV or with outputs over 5MW.

[9] DL/T 860 变电站通信网络和系统

[10] Q/GDW 666-2011 分布式电源接入配电网测试技术规范

[11] Q/GDW 667-2011 分布式电源接入配电网运行控制规范

[12] Q/GDW 677-2011 分布式电源接入配电网监控系统功能规范

[13] Q/GDW 617-2011 光伏电站接入电网技术规定

[14] GB/T 19963-2011 风电场接入电力系统技术规定

[15] CGC GF004-2011 并网光伏发电专用逆变器技术条件

[16] IEC 62116-2008 并网连接式光伏逆变器孤岛防护措施测试方法

[17] DIN V VDE V 0126-1-1:2006 发电机和公共低压电网之间的自动开关设备

[18] Q/GDW 1480-2015 分布式电源接入电网技术规定

[19] Q/GDW 697-2011 储能系统接入配电网监控系统功能规范

[20] Q/GDW 1564-2014 储能系统接入配电网技术规定

[21] Q/GDW 696-2011 储能系统接入配电网运行控制规范

[22] Q/GDW 676-2011 储能系统接入配电网运行测试规范

[23] GB/T 26864-2011 电力系统继电保护产品动模试验

[24] GB/T 34129-2017 微电网接入配电网测试规范

[25] Q/GDW 11120-2014 接入分布式电源的配电网继电保护和安全自动装置技术规范

[26] Q/GDW 11073-2013 分布式电源接入配电网系统测试及验收规程

[27] Q/GDW 11147-2013 分布式电源接入配电网设计规范

[28] GB/T 26864-2011 电力系统继电保护产品动模试验

### 3 系统架构

根据交直流配电网/微电网实验平台建设思路和目标及系统运行环境的要求，基于实证、仿真和检验测试三位一体的交直流配电网/微电网试验研究检测的设计思路，构建交直流配电网/微电网实证、模拟和检测三个体系于一体的试验研究检测平台，整个试验研究检测平

台相当于一个综合性的交直流配电网/微电网运行场所、试验场所、检测场所，可以根据研究和检测的需要拆解成多个小型微电网系统，既有交流微电网，又有直流微电网，整个微电网系统可以构建对等方式、主从方式的微电网协调运行控制。

交直流配电网/微电网实验平台总体包括模拟仿真、实证研究和检测测试三个体系。物理模拟包括模拟水轮发电机组、模拟柴油发电机组、模拟风力发电机组、太阳能模拟器、模拟储能装置和各种模拟负荷装置；实证验证包括实体储能、实体负荷以及实际的微网网架；检验测试主要包括检测系统、测试仪器以及电网扰动装置等，利用物理模拟和实证部分的总体架构作为检验测试平台，实现交直流配电网/微电网装备、技术方面的研究、检验测试。其中，物理模拟和实证验证构成本实验室的主要框架，相应的理论研究、技术分析、方案验证、检验测试等，主要也是以此为基础平台来开展。

### 3.1 系统概述

#### 1) 系统构成

系统主要由底层的实验室基础设施和上层控制系统，通过通信系统（以光纤为主）实现实验室的运作。基础设施包括交直流配电网/微电网、微电源、储能、负荷、一次网架、可控组态、保护测控（包括 DSCAD、元件/微网/并网保护测控等）、待试设备接口等多个模块；上层控制系统包括微电网运行管理系统（包括基于标准信息接口的微电网运行控制、协调控制、能效管理等）、微电网测试检验系统、以及展示等。多能接入交直流配电网/微电网实验室配置视频、安防等安全监控设施，可以在多能接入交直流配电网/微电网实验室测试检验系统或微电网运行管理系统对微电网的各类设备进行紧急控制，避免一些不安全事故的发生。为了方便开展交直流配电网/微电网设备检验检测工作，在一次网架上预留交直流配电网/微电网/微电源/储能装置/保护测控装置检测接口，开展微电网孤岛/并网检测、保护测控检测、微电网的电压/频率特性检测、交直流配电网/微电网实验室装置入网检测工作；在保护测控装置与运行管理系统之间的通信系统建设时，采用双接口冗余设计，专门为交直流配电网/微电网运行控制策略检测预留接口。

#### 2) 一次架构

物理模拟和实证研究面向智慧能源互联网技术的多能接入交直流配电网/微电网实验平台采用交流 800V 系统来模拟 220(110)kV、10kV 交流配电网、直流 750V 来模拟 1500V 直流配电网。为了满足实证研究与物理模拟综合实验平台的要求，并考虑到真实微电网、分布式电源与综合能源控制的需要，实验平台主接线图设计如下：

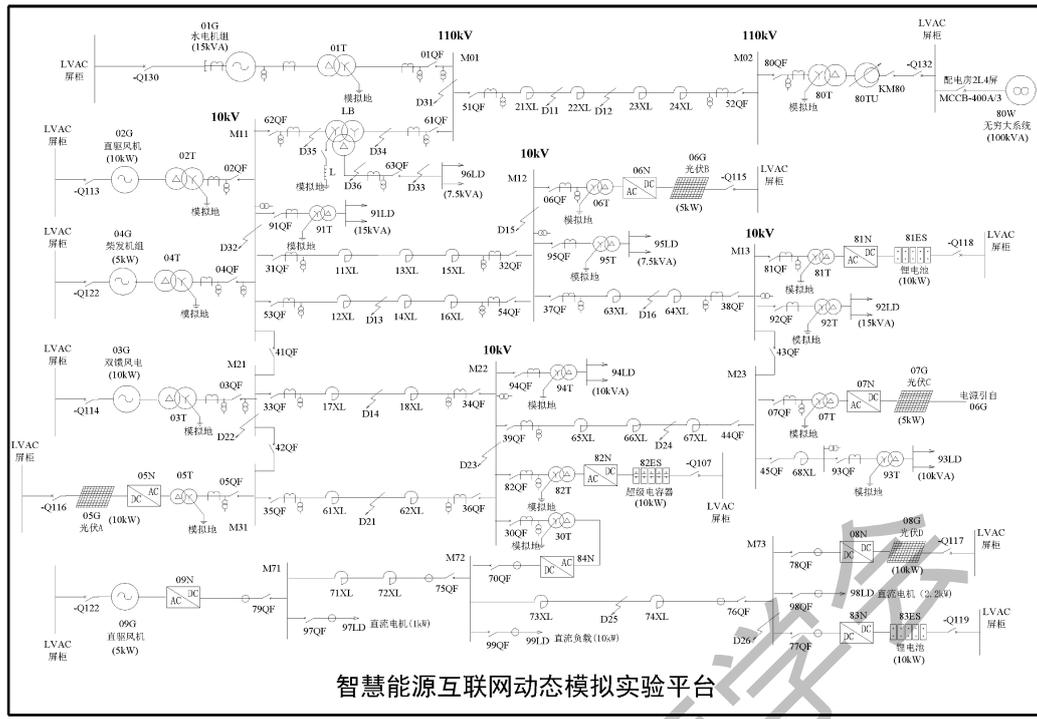


图1 智慧能源互联网实验平台典型接线图

各种分布式电源、储能、负荷分别挂接在不同的母线上，如交流配电网母线和直流配电网母线上的不同分布式电源、储能、负荷看起来是固定的，这只是一组接线组合方式，并不代表这种电源点、负荷点以及相应的各段母线容量不能改变，本实验室在目前一次网架不变的情况下，采用可控化的组态控制，尽可能实现灵活组合，实现分布式电源、储能和负荷的灵活换点和可变的配电网拓扑结构，形成不同电源、储能和负荷的微电网组合。一次系统通过组合屏组态实现不同的主接线配置组合，二次系统通过计算机的组态软件完成测控和调度自动化。

### 3.2 功能定位

智慧能源互联网实验平台构成和拓扑组网方式需求，整个平台具有灵活性、便捷性和模块化的架构特点，各个构成模块之间可以相互贯通，通过不同拓扑逻辑组成不同的交直流配电网/微电网结构。

通过人机界面，构建虚拟的微电网拓扑结构并设置各部分参数，将设置的交直流配电网/微电网拓扑结构以及各部分参数通过运行管理系统，下发给可控组态，调整交直流配电网/微电网的电源、储能和负荷等的运行参数和连接方式，构成不同容量配比、不同构成类型、不同组成容量的交直流配电网/微电网拓扑架构，形成对等/主从的单微网或多微网，用以研究和实证各种不同控制策略、模拟多种交直流配电网/微电网运行模式，检测各类不同交直流配电网/微电网装备及系统。

当然，也可以先在数字仿真系统上进行分析、研究、优化运行，得出相应仿真结果；然后，根据数字仿真环境设计及计算，调整系统拓扑及参数，通过系统实际运行来验证交直流配电网/微电网仿真结果。

结合交直流配电网/微电网仿真分析、实物验证和检验检测以及彼此之间的联合试验环境，可以开展交直流配电网/微电网不同分布式电源的容量/种类配置、直流及交直流混合配电网架构、交直流配电网/微电网接入常规电网的电压等级和接入点的布置、交直流配电网/微电网系统柔性可扩的拓扑结构、交直流配电网/微电网的储能容量配置以及电能治理补偿方式、各类分布式电源/储能/负荷合理配比等方面的分析以及交直流配电网/微电网运行控制、能量优化、多电源协调控制等技术和交直流配电网/微电网设备、系统测试检验。

## 4 实验研究

### 4.1 电网运行控制策略

运行控制主要包括：交直流配电网/微电网的运行状态及其转换；交直流配电网/微电网控制模式及控制策略的切换以及交直流配电网/微电网内各层面的协调控制策略。微电网运行控制体系分为三层，如图 2。

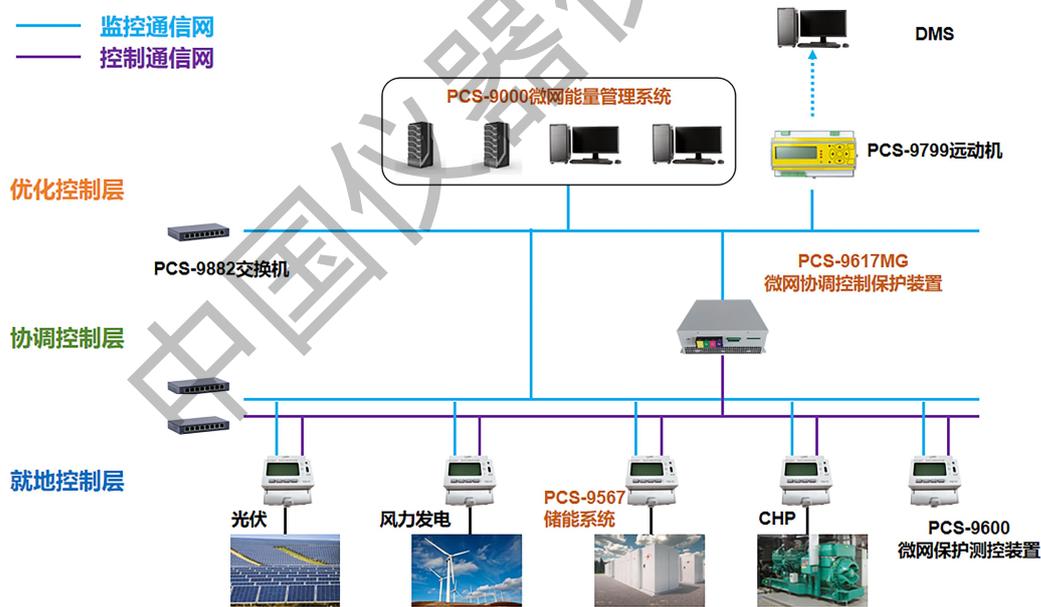


图 2 微电网三层控制架构

最上面一层为优化控制主站层，由微网能量管理系统来实现微电网系统的运行控制和能量管理策略，接受配网调度的离网/并网指令，并对微网进行能量管理；第二层为微网协调控制层，负责接受主站层的指令，实现离网/并网运行，并对就地控制层的本地控制器进行协调控制；第三层为就地控制层，包括分布式电源、储能和负荷的就地控制器，负责本地控

制器范围内的就地控制。就地协调控制器视微网整体为配网中的一个可调度单元接受来自主站的调度指令，根据相应的运行工况（并网、孤岛或切换）选择相应的算法（对等、主从），灵活安排微源及储能的出力，下发指令给微源级本地控制器，微源本地控制器接受协调控制器的指令，调节各自微源的运行模式（PQ、V/F）及出力大小。

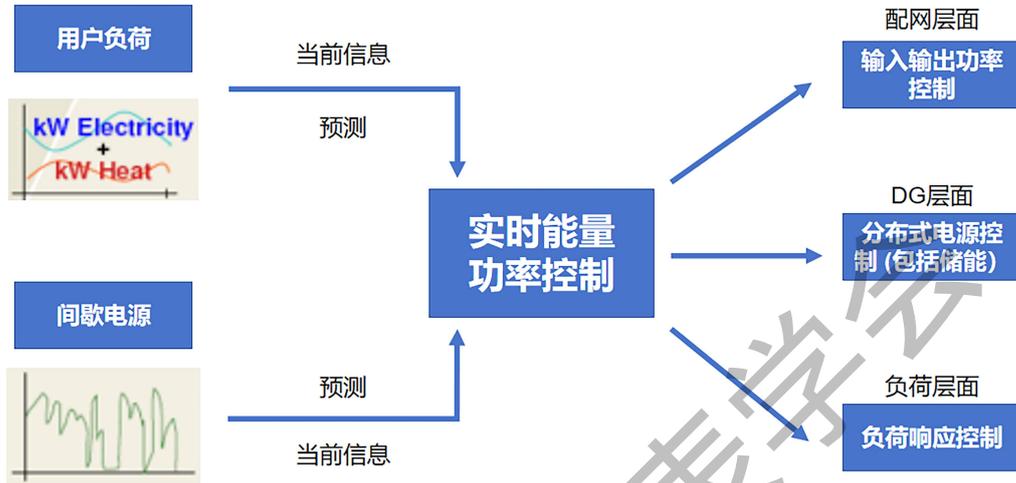


图 3 微电网控制策略示意图

根据微网特征，实验室配置不同特性的分布式电源、不同特性的储能以及可设置不同特性的电子负荷，同时与规划中的配电实验室建立了多个微电网/分布式电源的接口。微电网实验室的微电网运行管理系统，可以接受上层配网调度的指令，通过微电网运行控制子系统，下达控制策略和控制指令给微网协调控制器，实现对微电网的输入输出功率规划、运行模式切换控制。微源本地控制器对分布式电源和储能进行发电、功率控制。

图 3 中，配网层面主要指：接受配网主站的指令，对微网的发电容量、发电计划以及并网、离网进行调度。

DG 和负荷层面主要指：微网运行管理主站接受配网主站的调度，通过协调控制器和本地控制器，实现并网/离网的转换，并进行微网分布式电源（包括储能）和负荷的控制。

## 4.2 微电网运行控制技术

### 1) 微电网的运行状态及其转换

微电网并网/离网技术研究包含：并网运行状态，离网运行状态并/离网切换状态离/并网切换状态故障/检修状态。开展并网技术研究，在母线上预留电力电子装置（如 APF 等）试验、实验接口。

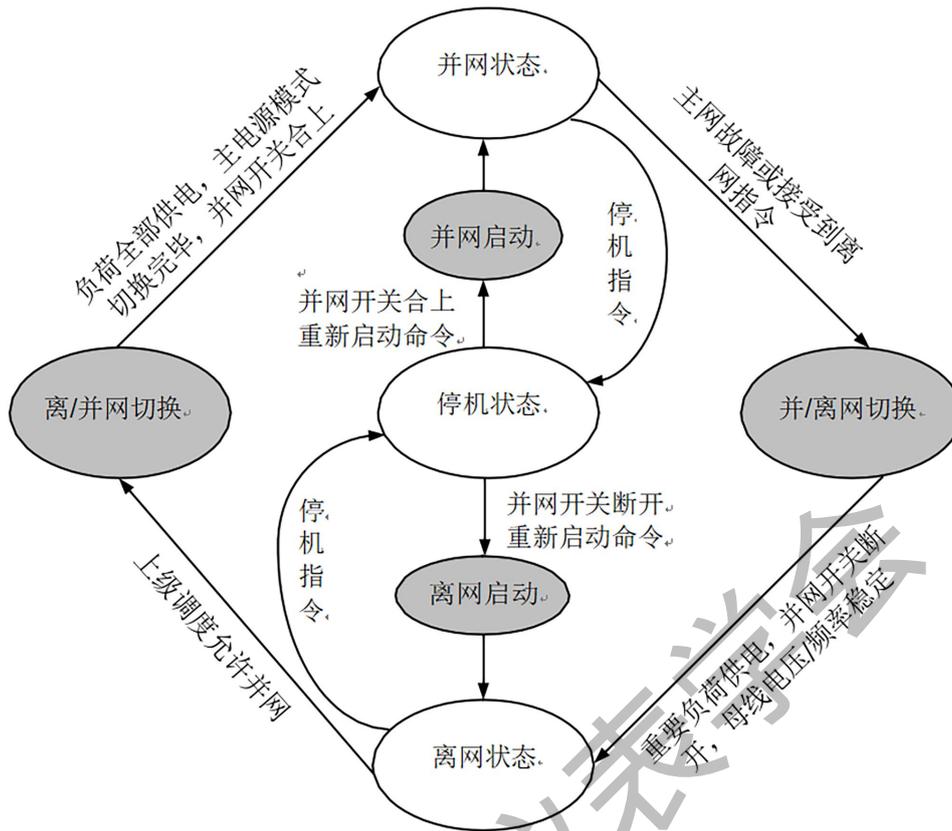


图 4 微电网运行控制技术示意图

研究微电网内多电源协调控制和多微网协调控制技术。系统框架内包含了三条支线，建立了三个微网。在孤岛运行方式，可以单个微电网运行，也可以三个微电网联合运行。通过通信管理机，利用对等的通信方式（需要满足一定的通信速率和可靠性），各分布式电源、储能之间或各微电网之间实现信息共享，研究在不依赖于上层控制器的情况下，实现基于多代理体的微电网内分布式电源和储能或微电网之间的对等协调控制方式。也可以通过分层分级的方式，利用光纤通信，自上而下进行分层分级控制。

## 2)微网控制模式及控制技术

目前，微电网控制模式主要有两种：主从控制模式和对等控制模式。

所谓主从控制模式，是指在微网处于孤岛运行模式时，其中一个 DG（或储能装置）采取定电压和定频率控制（简称 V/f 控制），用于向微网中的其它 DG 提供电压和频率参考，而其它 DG 则可采用定功率控制（简称 PQ 控制）。

所谓对等控制模式，是指微网中所有的 DG 在控制上都具有同等的地位，各控制器间不存在主和从的关系，每个 DG 都根据接入系统点电压和频率的就地信息进行控制，各个分布式电源采用下垂控制技术控制其输出，维持微电网内的电压和频率的支撑。

### 4.3 孤岛运行下的负荷管理及负荷响应

电子负荷可模拟负荷的起动、稳定、瞬态特性。研究微电网内通过储能或其它手段内响应不同特性的负荷，开展针对不同微电网发电特性下对负荷响应技术研究。微网中包含了风力发电、太阳能发电、超级电容功率型储能、铅酸电池能量型储能、交流电子负载以及 RLC 负载，在太阳能或风力发电的情况下，如何利用储能来响应不同特性的负荷，为储能在微电网中的优化布局和配置奠定基础。

在不同母线上可以设置不同重要性的负荷，在孤岛运行情况下，通过微电网协调控制系统对就地控制器进行控制，实现对重要负荷的优先供电。可以人为设置成可控负荷、重要负荷和一般负荷，在孤岛运行期间，可以根据分布式发电容量的变化和储能的容量情况，进行负荷的投切控制，通过这些研究，可以有效的对不同重要等级的负荷进行电源点的优化布局，满足非中断性、重要、紧急负荷的需要，优化分布式电源、储能的布置。

## 5 结论

智慧能源互联网实验平台采用了现代化控制方式，模拟原型系统的控制设备特性，使模型系统更真实反映原型系统。平台能够进行各种电压等级下的配电系统继电保护、配电自动化系统、配电网安全稳定控制装置、新能源与各种储能装置的研发试验、验证试验以及入网试验，开展新能源、智能电网等方面实验研究，还可以进行国家电网、南方电网的设备入网实验，为研究多能接入交直流混联系统的规划、运行控制等相关前沿技术，研发相关技术检验检测平台提供多方位的支撑。在交直流配电网、微电网技术标准方面，可以开展交直流配电网/微电网规划、建设、运行、控制、检测、试验、运维等多方面的规范、标准的研究。

## 6 实景图片



图5 操作室



图6 一次设备区



图7 二次屏柜区



图8 模拟水轮发电机组

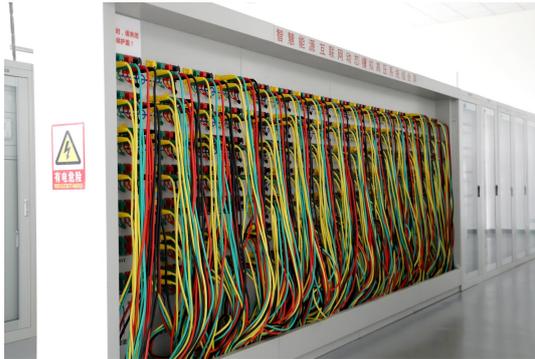


图9 模拟高压系统组合屏



图10 操作台

中国仪器仪表网