

# T/CIEP

中国工业环保促进会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

## 构网型新能源场站仿真模型技术规范

Technical specification for simulation modeling and model verification testing of  
grid-forming new energy stations

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国工业环保促进会 发布

# 目 次

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 前言 .....              | II  |
| 引言 .....              | III |
| 1 范围 .....            | 1   |
| 2 规范性引用文件 .....       | 1   |
| 3 术语和定义 .....         | 1   |
| 4 一般要求 .....          | 1   |
| 5 模型分类与构成 .....       | 2   |
| 5.1 模型分类 .....        | 2   |
| 5.2 设备级模型 .....       | 2   |
| 5.3 电站级模型 .....       | 3   |
| 5.4 系统级模型 .....       | 4   |
| 5.5 试验条件 .....        | 5   |
| 6 模型功能 .....          | 6   |
| 6.1 通用要求 .....        | 6   |
| 6.2 设备级模型 .....       | 6   |
| 6.3 电站级模型 .....       | 6   |
| 6.4 系统级模型 .....       | 7   |
| 7 试验方法 .....          | 7   |
| 7.1 设备级模型 .....       | 7   |
| 7.2 电站级模型试验 .....     | 8   |
| 7.3 系统级模型试验 .....     | 9   |
| 7.4 通用功能与网络安全试验 ..... | 10  |
| 8 报告编制 .....          | 11  |
| 8.1 报告结构 .....        | 11  |
| 8.2 报告要求 .....        | 11  |
| 附录 A（规范性） 实验记录表 ..... | 12  |
| 参考文献 .....            | 14  |

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业环保促进会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

## 引 言

构网型新能源场站作为新型电力系统的核心电源之一,其运行特性直接影响电网安全稳定与电能质量。构网型新能源场站仿真模型是模拟场站物理结构、控制逻辑及电网交互特性的核心工具,其建模意义体现在以下方面:

- 支撑电网规划与运行:通过模型可预判场站接入对电网频率、电压的影响,优化电网调度策略,降低大规模新能源并网风险;
- 缩短设备研发周期:在设备出厂前通过模型验证构网控制策略,减少现场调试成本与时间;
- 提升应急处置能力:模拟极端故障场景,制定场站与电网协同的应急方案,保障电力系统韧性。

本文件针对构网型新能源场站仿真模型,按“设备级 - 电站级 - 系统级”三级架构明确建模要求,规范功能指标与验证方法,为模型设计、开发、应用提供统一技术依据。

# 构网型新能源场站仿真模型技术规范

## 1 范围

本文件规定了构网型新能源场站仿真模型的一般要求以及模型分类与构成、试验方法、报告编制的要求。

本文件适用于构网型新能源场站的仿真建模与模型验证测试工作，可作为设备厂商、工程单位、电网调度机构开展相关技术工作的依据。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 14549-1993 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 19964-2024 光伏电站接入电力系统技术规定
- GB/T 31365-2015 光伏电站接入电网检测规程
- GB/T 40593-2021 同步发电机调速系统参数实测及建模导则
- GB/T 40601-2021 电力系统实时数字仿真技术要求
- DL/T 1236-2021 并网发电厂一次调频试验导则
- DL/T 2671-2023 电力系统仿真用电源聚合等值和建模导则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**构网型新能源场站仿真模型** simulation model of grid-forming new energy station

用于构网型新能源场站工作过程的仿真模型，主要反应场站中各功能模块的运行状态、分析电网适配性。

### 3.2

**设备级模型** equipment-level model

针对构网型变流器、风力机、光伏逆变器、储能电池模组等单台设备的精细化模型，可反映设备内部电气特性与控制逻辑。

### 3.3

**电站级模型** station-level model

对单一场站内多台同类/异类设备进行聚合或聚类建模，反映场站整体输出特性与涉网功能的模型。

### 3.4

**系统级模型** system-level model

将单个或多个构网型新能源场站作为整体，接入区域电网仿真环境，用于分析场站对电网频率稳定、电压支撑、振荡抑制影响的简化模型。

### 3.5

**聚类建模** clustering modeling

通过构建适配构网型设备特性的数学模型，基于场站内部各机组的运行参数及动态响应特征构建相似度准则，将高维无标签机组运行数据集自动划分为具有同质性的簇，简化机组分群与数据。

## 4 一般要求

- 4.1 遵循模块化、分层级、标准化建模思路，按“设备-电站-系统”逐级搭建，结构清晰、可拆分可组合。
- 4.2 模型应完整覆盖稳态、暂态、故障、扰动工况，具备低/高电压穿越、频率波动、调度指令响应等仿真能力。
- 4.3 仿真结果与实测或试验数据误差在允许范围内，结果应可查询、可比对。
- 4.4 电气接口、控制接口、仿真工具接口标准化，单位统一、数据规范；整体满足并网技术标准与电力系统安全稳定相关规定。

## 5 模型分类与构成

### 5.1 模型分类

构网型新能源场站仿真模型采用“三级递进”架构，各级模型接口、参数、架构关系如下：

- 设备级模型为基础，表征并网变流器单机运行参数和特性；
- 电站级模型基于设备级模型聚合/聚类，表征场站整体涉网运行参数和特性；
- 系统级模型基于电站级模型简化，表征场站对电网的影响。

### 5.2 设备级模型

#### 5.2.1 构成模块

##### 5.2.1.1 电气特性模块

设备级模型电气特性模块包含以下内容：

- 构网型变流器：含整流侧/逆变侧拓扑、滤波电感/电容、变压器参数，符合 GB/T 40601-2021 对器件级建模的要求；
- 风力机：含空气动力学模型、变桨距控制模型、传动系统模型；
- 光伏逆变器：含 MPPT 控制模型、光伏组件 I-V 特性模型；
- 储能电池模组：含电池等效电路模型、SOC 估算模型、BMS 保护模型。

##### 5.2.1.2 控制逻辑模块

设备级模型控制逻辑模块包含以下内容：

- 构网核心控制：虚拟同步机（VSG）控制、下垂控制（P-f/Q-U）、惯量调节、阻尼控制；
- 涉网功能控制：故障穿越（LVRT/HVRT）、一次调频；
- 保护逻辑：如过流保护、过压保护、欠频保护，定值与实物一致。

##### 5.2.1.3 无功调解模块

无功调解模块包含以下内容：

- 无功调节策略：包含恒功率因数控制、恒无功功率控制、恒电压控制三种基础策略，支持策略手动/自动切换，切换无扰动，切换响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ；
- 动态无功补偿：具备快速无功补偿能力，针对电网电压波动，无功调节速率 $\geq 0.1\text{Mvar/ms}$ ，调节范围覆盖  $-100\% \sim +100\%$  设备额定无功功率；
- 无功限幅逻辑：根据设备运行工况自动调整无功调节上限，限幅值与设备实际运行能力匹配，无超调、欠调现象；
- 与保护逻辑联动：当设备出现过流、过压、低频率等故障时，自动闭锁无功调节功能，故障解除后 5s 内恢复无功调节，恢复过程平稳无冲击。

##### 5.2.1.4 变压器模块

变压器单体设备模块主要包含以下内容：

- 拓扑与参数模型：含变压器绕组连接方式（Dyn11/Yyn0 等）、额定容量、额定电压比、短路阻抗、空载损耗、负载损耗、励磁特性等核心参数，参数需与设备铭牌一致；
- 运行特性模拟：精准模拟变压器的空载运行、负载运行、过载运行特性，过载倍数下的温升特性、损耗变化与实测值偏差 $\leq \pm 5\%$ ；

- 故障特性模拟：支持模拟变压器绕组短路、铁芯饱和、分接开关调节等工况，分接开关调节时，电压调节步长与实物一致，调节过程无电压突变；
- 与场站接口匹配：变压器高压侧、低压侧接口参数与场站配套设备电气参数匹配，接口模型支持电气量双向传输，无数据延迟。

## 5.2.2 技术要求

### 5.2.2.1 仿真精度

- 5.2.2.1.1 电磁暂态仿真：时间步长 $\leq 50\mu\text{s}$ ，电压、电流、功率计算值与设备实测值相对误差 $\leq \pm 3\%$ ，谐波含量（至 50 次）计算误差 $\leq \pm 5\%$ 。
- 5.2.2.1.2 机电暂态仿真：时间步长 $\leq 10\text{ms}$ ，动态响应时间与实测值偏差 $\leq \pm 10\%$ ，稳态功率偏差 $\leq \pm 2\%$ 。

### 5.2.2.2 数据要求

- 5.2.2.2.1 参数来源：优先采用设备铭牌数据、厂商提供的控制策略文档、实测数据（符合 GB/T 31365-2015 要求）。
- 5.2.2.2.2 输出数据：包含设备电压、电流、功率、控制指令、保护动作状态等，采样频率 $\geq 10\text{kHz}$ （电磁暂态）、 $\geq 1\text{kHz}$ （机电暂态）。

## 5.3 电站级模型

### 5.3.1 构成模块

#### 5.3.1.1 聚合/聚类等值模块

- 5.3.1.1.1 聚合等值子模块：对同参数设备进行容量加权等值，输出等值电阻、电感、电容参数。
- 5.3.1.1.2 聚类等值子模块：对异参数设备按集群划分，每个集群输出 1 套等值电气参数与控制参数，包含集群划分标识、等值模型编号。

#### 5.3.1.2 场站协调控制模块

- 5.3.1.2.1 功率分配子模块：按设备容量比例、健康度分配有功 / 无功功率。
- 5.3.1.2.2 异类设备协同子模块：风电 - 储能互补出力控制、光伏 - 储能平滑出力控制，含优先级调度逻辑。

#### 5.3.1.3 涉网功能集成模块

- 5.3.1.3.1 场站级故障穿越子模块：整合单设备 LVRT/HVRT 逻辑，实现场站整体故障响应。
- 5.3.1.3.2 场站级一次调频子模块：汇总单设备调频能力，按电网指令分配调频责任。
- 5.3.1.3.3 电压支撑子模块：根据接入点电压偏差，统一调节场站总无功输出。

#### 5.3.1.4 集成线路模块

- 5.3.1.4.1 线路参数建模子模块：覆盖场站内部所有电压等级的架空线路与电缆线路，包含线路芯数、截面面积、长度、敷设方式、材质等基础参数，同时精准建模线路的正序/零序电阻、电抗、电容，以及温度系数、集肤效应系数，参数取值符合国标相关设计规范要求。
- 5.3.1.4.2 功率损耗计算子模块：支持稳态、暂态工况下线路有功、无功功率损耗实时计算，可根据传输电流、长度、阻抗参数自动计算，考虑环境温度、线路负载率对损耗的影响，损耗计算覆盖单条线路、单个设备单元、整个场站三级维度。
- 5.3.1.4.3 线路运行状态监测子模块：实时模拟线路传输电压、电流、功率、温度、负载率等核心电气量，支持过载、轻载、正常运行状态判定，判定阈值与场站实际运行规程一致；模拟线路温度变化特性，负载率提升时温度呈线性上升，温升速率与实测值偏差 $\leq \pm 5\%$ 。
- 5.3.1.4.4 线路故障模拟子模块：支持模拟单相接地、两相短路、三相短路、线路断线等常见故障，可设置故障发生位置、持续时间、过渡电阻，精准模拟故障时电气量突变特性，并与场站保护逻辑模块联动触发相应保护动作。
- 5.3.1.4.5 接口适配子模块：实现与场站内部变压器、变流器、逆变器等设备模型的电气接口适配，

电气量双向实时传输无数据延迟；与涉网功能集成模块联动，线路故障或损耗变化时，自动调整场站整体功率输出与无功调节策略。

## 5.3.2 技术要求

### 5.3.2.1 建模方法

5.3.2.1.1 聚合建模：适合同类设备，采用“采用单机电流放大等值法”计算等值参数。

5.3.2.1.2 聚类建模方法应符合以下内容：

- 聚类依据：按设备额定功率（ $\leq 1\text{MW}$ 、 $1\sim 5\text{MW}$ 、 $> 5\text{MW}$ ）、控制策略（VSG 控制、下垂控制）、设备型号划分；
- 聚类算法：采用 K-means 算法，聚类数 $\leq 5$ ；
- 聚类验证：集群等值模型与集群内设备并联仿真结果的功率偏差 $\leq \pm 5\%$ 。

### 5.3.2.2 仿真精度

5.3.2.2.1 稳态精度：额定工况下，场站总功率计算值与实测值相对误差 $\leq \pm 3\%$ ，电压调节灵敏度（无功调节量 / 电压偏差）偏差 $\leq \pm 5\%$ 。

5.3.2.2.2 动态精度：一次调频响应时间、故障穿越电流限制值与场站实测值偏差 $\leq \pm 10\%$ 。

5.3.2.2.3 计算效率：聚类后模型计算时间较全设备建模缩短 $\geq 50\%$ 。

### 5.3.2.3 电压恢复速率

5.3.2.3.1 低电压穿越后恢复：电压跌落故障解除后，场站并网点电压恢复速率 $\geq 5\%$ 额定电压/ms，恢复至额定电压 $\pm 2\%$  范围内的时间 $\leq 200\text{ms}$ ，恢复过程无超调。

5.3.2.3.2 高电压穿越后恢复：电压升高故障解除后，场站并网点电压恢复速率 $\geq 3\%$ 额定电压/ms，恢复至额定电压 $\pm 2\%$  范围内的时间 $\leq 300\text{ms}$ ，无欠调现象。

5.3.2.3.3 三相短路故障后恢复：短路故障切除后，电压恢复速率 $\geq 8\%$  额定电压/ms，100ms 内恢复至 70%额定电压以上，500ms 内恢复至额定电压 $\pm 2\%$ 范围内，恢复过程中功率输出无剧烈波动。

5.3.2.3.4 多工况一致性：不同功率出力工况下，电压恢复速率偏差 $\leq \pm 1\%$ 额定电压/ms，与场站实测值偏差 $\leq \pm 10\%$ 。

### 5.3.2.4 电压支撑能力

5.3.2.4.1 稳态电压支撑：场站并网点电压在 90%~110% 额定电压范围内波动时，通过无功功率连续调节实现电压稳定，电压调节精度 $\leq \pm 1\%$  额定电压；当电网电压处于 80%~90%、110%~120% 额定电压范围时，保持电压支撑能力，无功调节量随电压偏差线性变化，线性度偏差 $\leq \pm 5\%$ 。

5.3.2.4.2 动态电压支撑：电网电压出现阶跃扰动时，场站 10ms 内响应并输出无功支撑，无功支撑量 $\geq 2\%$  额定无功功率/1%电压偏差，扰动期间并网点电压波动幅度 $\leq \pm 5\%$  额定电压。

5.3.2.4.3 弱电网电压支撑：接入短路比 SCR $\leq 2.0$  的弱电网时，场站仍具备稳定的电压支撑能力，无电压失稳、振荡现象，电压波动率 $\leq \pm 2\%$  额定电压/分钟。

5.3.2.4.4 多设备协同支撑：聚类 / 聚合后的场站模型，电压支撑能力为集群内所有设备电压支撑能力的有效叠加，模型计算的总无功支撑量与单设备无功支撑量求和值偏差 $\leq \pm 5\%$ 。

5.3.2.4.5 持续支撑时间：电网电压处于故障临界值时，场站可提供持续电压支撑，持续时间 $\geq 0.5\text{s}$ ，且支撑过程中设备无保护误动、脱网现象。

## 5.4 系统级模型

### 5.4.1 构成模块

系统级模型核心模块包括以下内容：

- 场站等值简化模块：基于电站级模型，简化设备内部拓扑，保留核心涉网参数；
- 电网交互模块：含场站与电网的接口模型、电网扰动响应逻辑；
- 多场站协同模块：含多场站功率分配、振荡抑制协同控制逻辑，符合 GB/T 38755-2019 对新能源基地的稳定控制要求。

## 5.4.2 技术要求

- 5.4.2.1 稳态精度：场站接入电网后的总功率、功率因数计算值与实测值相对误差 $\leq \pm 5\%$ 。
- 5.4.2.2 动态精度：电网频率波动 $\pm 0.2\text{Hz}$ 时，场站功率支撑量计算值与实测值偏差 $\leq \pm 10\%$ 。
- 5.4.2.3 仿真效率：系统级模型单次仿真时间 $\leq 30\text{min}$ ，模拟 24 小时运行场景。

## 5.5 试验条件

### 5.5.1 环境条件

环境条件应符合以下要求：

- 温度： $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ；
- 湿度：相对湿度 $\leq 85\%$ ；
- 电磁环境：符合 GB/T 17626.2-2018 的要求，无强电磁干扰。

### 5.5.2 电网条件

电网条件应符合以下要求：

- 背景参数：电网背景电压波动 $\leq \pm 2\% U_n$ ，频率波动 $\leq \pm 0.1\text{Hz}$ ；
- 系统级测试：应提前获得电网调度机构批准，明确测试时段、测试扰动限制。

### 5.5.3 设备条件

#### 5.5.3.1 测试设备

功率分析仪、实时数字仿真仪，所有设备应在校准有效期内。

#### 5.5.3.2 辅助设备

数据采集系统、绝缘防护装置。

### 5.5.4 安全条件

#### 5.5.4.1 场地防护

试验场地设置安全警示标识，配备应急断电装置、灭火器材。

#### 5.5.4.2 作业规范

符合 DL/T 408-2010 的要求，试验人员应穿戴绝缘防护用品，不应单人操作高压设备。

### 5.5.5 被试对象与模型准备

#### 5.5.5.1 被试对象

##### 5.5.5.1.1 设备 / 场站调试

被试设备、场站应完成出厂调试，无故障报警，运行状态正常。

##### 5.5.5.1.2 参数核对

按设备铭牌、场站设计文件核对额定参数，确保与模型输入参数一致。

#### 5.5.5.2 模型准备

##### 5.5.5.2.1 参数配置

模型参数应与被试对象铭牌 / 实测值一致，不应随意修改核心参数。

##### 5.5.5.2.2 预调试

启动模型进行预仿真，确认模型无收敛性问题、数据输出正常。

### 5.5.6 测试系统搭建

### 5.5.6.1 硬件连接

按试验方案连接测试设备与被试对象，接线完成后应双人核对。

### 5.5.6.2 通信配置

设置数据采集系统与模型、测试设备的通信协议，确保数据实时传输。

## 5.5.7 数据记录准备

### 5.5.7.1 表格打印

按附录 A 要求打印试验记录表，表格应标注试验日期、被试模型编号。

### 5.5.7.2 采集系统调试

调试数据采集系统，确保同步采集模型计算值与实测值，采集前进行零点校准、量程校准。

## 6 模型功能

### 6.1 通用要求

- 6.1.1 支持与实测数据平台、电网调度系统对接，数据导入/导出格式兼容 Excel、CSV、JSON；
- 6.1.2 具备模型拓扑显示、仿真曲线实时绘制、结果统计报表生成功能；
- 6.1.3 支持模型版本记录，可回溯历史版本；
- 6.1.4 模型参数、仿真数据存储及传输采用 AES-256 加密算法，防止泄露；
- 6.1.5 设置“管理员 - 操作员 - 查看员”三级权限，关键操作（如参数修改）应双人授权；
- 6.1.6 操作日志留存时间 $\geq 6$ 个月，可追溯；
- 6.1.7 模型运行平台应安装合规杀毒软件，病毒库更新周期 $\leq 7$ 天。

### 6.2 设备级模型

#### 6.2.1 静态特性

静态特性功能应符合以下要求：

- 能够准确模拟场站稳态电压-电流特性、功率-功率因数特性，覆盖 80%~120% 额定电压、0.8 超前~0.8 滞后功率因数区间；
- 稳态参数计算精度符合 GB/T 14549-1993 要求，电压总谐波畸变率（THD）计算误差 $\leq \pm 5\%$ 。

#### 6.2.2 动态响应

动态响应功能应符合以下要求：

- 电压阶跃响应：施加  $\pm 10\%$  额定电压阶跃，响应时间（至稳态值 95%）与实测值偏差 $\leq \pm 10\%$ ，超调量 $\leq \pm 5\%$ ；
- 频率阶跃响应：施加  $\pm 0.5\text{Hz}$  频率阶跃，惯量响应时间 $\leq 200\text{ms}$ ，功率调节量与设计值偏差 $\leq \pm 10\%$ ；
- 功率指令跟踪：跟踪  $\pm 20\%$  额定功率指令，响应时间 $\leq 100\text{ms}$ ，稳态偏差 $\leq \pm 2\%$ 。

#### 6.2.3 故障耐受

故障耐受功能应符合以下要求：

- 低电压穿越（LVRT）：模拟电压跌落至 20% 额定电压（持续 0.15s），模型不脱网，电流峰值 $\leq 1.5$  倍额定电流，符合 GB/T 19964-2012 的要求；
- 高电压穿越（HVRT）：模拟电压升高至 130% 额定电压（持续 0.2s），模型不脱网，功率降额幅度与实测值偏差 $\leq \pm 5\%$ ；
- 短路故障耐受：模拟三相短路（持续 100ms），模型保护动作时间与实测值偏差 $\leq \pm 10\%$ ，无数据溢出。

### 6.3 电站级模型

### 6.3.1 聚合/聚类输出

6.3.1.1 聚合输出：多台设备并联时，场站总功率、总电流计算值与单设备功率 / 电流求和值偏差 $\leq \pm 3\%$ 。

6.3.1.2 聚类输出：聚类模型总功率、电压调节量与集群内设备并联仿真结果偏差 $\leq \pm 5\%$ ，聚类划分准确率 $\geq 90\%$ ，设备实际集群与模型划分集群一致。

### 6.3.2 涉网控制

6.3.2.1 一次调频：频率偏差  $\pm 0.033\text{Hz}$  时启动调节，响应延迟时间 $\leq 2\text{s}$ ，调节速率 $\geq 5\%$  额定功率 / 分钟。

6.3.2.2 电压支撑：电压偏差  $\pm 5\%$  额定电压时，无功功率调节量 $\geq 2\%$  额定无功功率 /  $1\%$  电压偏差。

6.3.2.3 功率平滑：风电 / 光伏场站出力波动 $\leq \pm 2\%$  额定功率 /  $10\text{min}$ ，波动幅度与实测值偏差 $\leq \pm 10\%$ 。

### 6.3.3 故障穿越

6.3.3.1 场站级 LVRT：电压跌落至  $0\%$  额定电压（持续  $0.1\text{s}$ ），模型不脱网，电压恢复后  $5\text{s}$  内功率恢复至扰动前  $90\%$  以上。

6.3.3.2 场站级 HVRT：电压升高至  $120\%$  额定电压（持续  $0.2\text{s}$ ），模型过电流倍数 $\leq 1.2$  倍额定电流，无保护误动。

## 6.4 系统级模型

### 6.4.1 电网适配

6.4.1.1 弱电网适配：接入短路比（SCR）=0.2、短路比（SCR）=10 两种电网环境下测试，场站电压波动 $\leq \pm 2\%$  额定电压，功率输出波动 $\leq \pm 3\%$  额定功率。

6.4.1.2 孤岛运行：孤岛模式下，电压控制精度  $\pm 2\%$  额定电压，频率控制精度  $\pm 0.2\text{Hz}$ ，可稳定带  $100\%$  站内负荷。

### 6.4.2 电网支撑

6.4.2.1 频率支撑：电网频率跌落  $0.5\text{Hz}$  时，场站  $100\text{ms}$  内提供 $\geq 10\%$  额定功率的支撑，支撑量与设计值偏差 $\leq \pm 10\%$ 。

6.4.2.2 振荡抑制：电网出现  $0.1\sim 2\text{Hz}$  低频振荡时，模型阻尼比 $\geq 0.05$ ，振荡衰减时间 $\leq 5\text{s}$ 。

6.4.2.3 黑启动支撑：作为黑启动电源时，电压建立时间 $\leq 30\text{s}$ ，频率建立时间 $\leq 30\text{s}$ ，并网同步精度：电压差 $\leq 5\%$ 、频率差 $\leq 0.2\text{Hz}$ 、相角差 $\leq 10^\circ$ 。

### 6.4.3 多场站协同

6.4.3.1 功率分配：多场站接入同一电网时，按电网调度指令分配功率，分配偏差 $\leq \pm 5\%$  指令值。

6.4.3.2 振荡协同抑制：多场站同时参与电网振荡抑制时，总阻尼比 $\geq 0.08$ ，无协同冲突。

## 7 试验方法

### 7.1 设备级模型

#### 7.1.1 静态特性试验

##### 7.1.1.1 试验目的

验证模型静态电压-电流、功率-功率因数特性及谐波计算精度，符合6.2.1静态特性功能要求。

##### 7.1.1.2 试验步骤

7.1.1.2.1 搭建设备级模型，输入设备铭牌参数、实测参数，确认模型模块完整性。

7.1.1.2.2 设置试验工况：电压覆盖  $80\%\sim 120\%$  额定电压，功率因数覆盖  $0.8$  超前 $\sim 0.8$  滞后，固定频率为额定值。

7.1.1.2.3 每个工况下模型稳定运行不少于 3min，同步记录模型计算数据。

7.1.1.2.4 对比模型计算值与场站实测数据或标准参考值，计算相对误差。

### 7.1.1.3 数据采集

按表 A.1 的内容记录数据，每个工况重复测试 3 次，取平均值。

## 7.1.2 动态响应试验

### 7.1.2.1 试验目的

验证模型对电压阶跃、频率阶跃、功率指令跟踪的动态响应一致性，符合 动态响应功能要求。

### 7.1.2.2 试验步骤

7.1.2.2.1 模型设置为额定运行状态，稳定运行不少于 10min，电压、频率波动 $\leq\pm 1\%$  额定值。

7.1.2.2.2 按下面的要求施加扰动工况：

——电压阶跃： $\pm 10\%$  额定电压（瞬时跳变）；

——频率阶跃： $\pm 0.5\text{Hz}$ （瞬时跳变）；

——功率指令跟踪： $\pm 20\%$  额定功率（初始功率 50% 额定功率）。

7.1.2.2.3 按 $\geq 10\text{kHz}$  采样频率启动数据采集，记录扰动前 1s、扰动过程及扰动后 3s 的动态数据。

7.1.2.2.4 每种扰动类型重复测试 3 次，取平均响应曲线分析。

### 7.1.2.3 数据采集

按表 A.2 的内容记录数据：

## 7.1.3 故障耐受试验

### 7.1.3.1 试验目的

验证设备级模型 LVRT、HVRT、短路故障耐受功能精度，符合。

### 7.1.3.2 试验步骤

7.1.3.2.1 模型出力提升至额定功率，稳定运行不少于 10min，确认故障穿越控制逻辑已启用。

7.1.3.2.2 按下面的要求设置故障工况：

——低电压穿越：电压跌落幅值 20%、50%、90% 额定电压，持续时间 0.15s；

——高电压穿越：电压升高幅值 110%、120%、130% 额定电压，持续时间 0.2s；

——三相短路：短路电流 1.5 倍额定电流，持续 100ms；

7.1.3.2.3 按 $\geq 20\text{kHz}$  采样频率记录故障期间电流峰值、脱网状态，故障后功率恢复时间。

7.1.3.2.4 每种工况重复测试 2 次，验证模型是否脱网及参数恢复特性。

### 7.1.3.3 数据采集

按表 A.3 的内容记录数据。

## 7.2 电站级模型试验

### 7.2.1 聚合 / 聚类验证试验

#### 7.2.1.1 试验目的

验证电站级模型聚合 / 聚类的等值精度与计算效率，符合 5.2.1。

#### 7.2.1.2 试验步骤

7.2.1.2.1 搭建两种模型：多设备并联模型；电站级聚合 / 聚类模型。

7.2.1.2.2 设置工况：功率 50%~100%  $P_n$ （步长 10%），电压 90%~110%  $U_n$ （步长 5%）。

7.2.1.2.3 每个工况稳定 5min，记录两种模型的总功率、总电压、计算时间。

7.2.1.2.4 计算聚合 / 聚类模型与全设备模型的功率偏差，统计计算效率提升比例。

### 7.2.1.3 数据采集

按表 A.4 的内容记录。

## 7.2.2 涉网控制试验

### 7.2.2.1 试验目的

验证电站级模型一次调频、电压支撑、功率平滑功能精度，符合5.2.2的要求。

### 7.2.2.2 试验步骤

7.2.2.2.1 模型接入电网仿真环境，稳定运行 10min。

7.2.2.2.2 按下面的要求开展测试：

——一次调频：频率跌落 0.033Hz，记录响应延迟时间、调节速率；

——电压支撑：电压跌落 5%  $U_n$ ，记录无功功率调节量；

7.2.2.2.3 对比模型结果与场站实测数据。

### 7.2.2.3 数据采集

按表 A.5 的内容记录：

## 7.2.3 电站级故障穿越试验

### 7.2.3.1 试验目的

验证电站级模型 LVRT、HVRT 功能精度，符合 5.2.3的要求。

### 7.2.3.2 试验步骤

7.2.3.2.1 模型出力提升至 100%  $P_n$ ，稳定 10min；

7.2.3.2.2 按以下要求设置故障：

—— LVRT：电压 0%  $U_n$ ，持续 0.1s；

—— HVRT：电压 120%  $U_n$ ，持续 0.2s。

7.2.3.2.3 采样频率 $\geq$ 10kHz，记录故障后功率恢复时间、过电流倍数。

7.2.3.2.4 对比模型结果与场站实测数据。

### 7.2.3.3 数据采集

按表 A.6 的内容记录。

## 7.3 系统级模型试验

### 7.3.1 电网适配试验

#### 7.3.1.1 试验目的

验证系统级模型弱电网适配、孤岛运行功能精度，符合 5.3.1 的要求。

#### 7.3.1.2 试验步骤

7.3.1.2.1 搭建系统级模型，接入弱电网（SCR=1.5、2.0）及孤岛环境。

7.3.1.2.2 按以下要求测试工况：

——弱电网：施加  $\pm 10\%$   $P_n$ 功率波动，记录电压 / 功率波动幅度；

——孤岛：接入 100% 站内负荷，记录电压 / 频率控制精度。

7.3.1.2.3 对比模型结果与电网实测数据或标准参考值。

#### 7.3.1.3 数据采集

按表 A.7 的内容记录。

### 7.3.2 电网支撑试验

### 7.3.2.1 试验目的

验证系统级模型频率支撑、振荡抑制、黑启动支撑功能精度，符合 5.3.2 的要求。

### 7.3.2.2 试验步骤

7.3.2.2.1 模型接入区域电网仿真环境，稳定运行 10min。

7.3.2.2.2 按以下要求开展测试：

- 频率支撑：电网频率 - 0.5Hz，记录 100ms 内功率支撑量；
- 振荡抑制：施加 0.5Hz 振荡扰动，记录阻尼比、衰减时间；
- 黑启动：模型从解列状态启动，记录电压 / 频率建立时间。

7.3.2.2.3 对比模型结果与电网实测数据。

### 7.3.2.3 数据采集

按表 A.8 的内容记录。

## 7.3.3 多场站协同试验

### 7.3.3.1 试验目的

验证系统级模型多场站功率分配、协同振荡抑制功能精度，符合 5.3.3 的要求。

### 7.3.3.2 试验步骤

7.3.3.2.1 搭建 2 个及以上构网型新能源场站的系统级模型，接入同一区域电网；

7.3.3.2.2 按以下要求测试工况：

- 功率分配：电网调度指令分配总功率 100MW（场站 A60MW、场站 B40MW），记录实际分配值；
- 协同振荡抑制：电网出现 1Hz 振荡，记录多场站总阻尼比。

7.3.3.2.3 对比模型结果与调度实测数据。

### 7.3.3.3 数据采集

按表 A.9 的内容记录。

## 7.4 通用功能与网络安全试验

### 7.4.1 通用功能试验

#### 7.4.1.1 试验目的

验证模型数据交互、可视化、版本管理功能，符合 5.4 的要求。

#### 7.4.1.2 试验步骤

7.4.1.2.1 数据交互：导入 Excel 格式实测数据，导出 CSV 格式仿真结果，检查数据完整性。

7.4.1.2.2 可视化：启动模型，检查拓扑显示、曲线绘制、报表生成功能是否正常。

7.4.1.2.3 版本管理：修改模型参数，记录版本信息，检查历史版本回溯功能。

### 7.4.2 网络安全试验

#### 7.4.2.1 试验目的

验证模型数据安全、访问控制、日志留存、病毒防护功能，符合 4.5.8 的要求。

#### 7.4.2.2 试验步骤

按照《中华人民共和国网络安全法》第二十一条、第二十二条的要求进行：

- 数据安全：检查数据传输 / 存储加密状态（AES-256）；
- 访问控制：测试三级权限（管理员 / 操作员 / 查看员）操作范围；
- 日志留存：检查近 6 个月操作日志是否完整；
- 病毒防护：检查杀毒软件安装及病毒库更新。

## 8 报告编制

### 8.1 报告结构

#### 8.1.1 封面

标明报告名称、模型层级、试验单位、报告编号、试验日期、编制 / 审核 / 批准人签名。

#### 8.1.2 目录

列出各章节及附录的页码，包含试验概况、试验条件、试验过程、试验结果、结论等。

#### 8.1.3 试验概况

8.1.3.1 试验目的：简述本次试验的核心目标。

8.1.3.2 试验依据：本文件编号、引用的国行标名称及编号。

8.1.3.3 模型信息：模型名称、版本、适配场站类型、核心参数。

#### 8.1.4 试验条件

8.1.4.1 环境条件：试验期间温度、湿度。

8.1.4.2 设备条件：仿真平台型号、测试仪器清单。

8.1.4.3 数据来源：实测数据采集时间、采集地点、采集仪器。

#### 8.1.5 试验过程

8.1.5.1 试验项目：列出本次开展的所有试验项目。

8.1.5.2 操作步骤：简述关键试验步骤。

8.1.5.3 异常情况：记录试验中出现的异常及处理措施。

#### 8.1.6 试验结果

8.1.6.1 数据汇总：按试验项目整理实测值、模型值、相对误差，引用第 6 章记录表。

8.1.6.2 合格判定：逐项对照第 5 章功能要求，给出“合格 / 不合格”结论，不合格项注明原因。

#### 8.1.7 整改与复测（如有）

8.1.7.1 整改措施：针对不合格项，说明整改方案。

8.1.7.2 复测结果：整改后复测的项目、数据及合格判定。

#### 8.1.8 试验结论

8.1.8.1 整体结论：明确模型是否符合要求。

8.1.8.2 建议：提出模型优化、运行维护的建议。

#### 8.1.9 附录

8.1.9.1 附录 1：原始数据记录表。

8.1.9.2 附录 2：仿真平台与测试仪器校准证书复印件。

8.1.9.3 附录 3：不合格项目整改方案与复测报告。

### 8.2 报告要求

8.2.1 真实性：数据与原始记录一致，关键数据附仿真波形图。

8.2.2 规范性：数值标注单位，保留 1~2 位小数。

8.2.3 时效性：试验完成后 15 个工作日内出具报告。

8.2.4 审批：经试验人员编制、技术负责人审核、试验单位负责人批准后生效，审批记录存档。

附录 A  
(规范性)  
实验记录表

表 A.1 静态特性试验记录表

| 试验序号 | 工况类型   | 电压设定<br>(%<br>$U_n$ ) | 功率因数设定  | 实测值        |           |              |                |           | 模型计算值      |           |              |                |           | 相对误差 (%) |    |      |      |    | 合格判定 |  |  |
|------|--------|-----------------------|---------|------------|-----------|--------------|----------------|-----------|------------|-----------|--------------|----------------|-----------|----------|----|------|------|----|------|--|--|
|      |        |                       |         | 电压<br>(kV) | 电流<br>(A) | 有功功率<br>(MW) | 无功功率<br>(Mvar) | 效率<br>(%) | 电压<br>(kV) | 电流<br>(A) | 有功功率<br>(MW) | 无功功率<br>(Mvar) | 效率<br>(%) | 电压       | 电流 | 有功功率 | 无功功率 | 效率 |      |  |  |
| 1    | 电压调整   | 80                    | 0.9 滞后  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 2    | 电压调整   | 90                    | 0.9 滞后  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 3    | 电压调整   | 100                   | 0.9 滞后  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 4    | 电压调整   | 110                   | 0.9 滞后  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 5    | 电压调整   | 120                   | 0.9 滞后  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 6    | 功率因数调整 | 100                   | 0.8 超前  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 7    | 功率因数调整 | 100                   | 0.7 超前  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 8    | 功率因数调整 | 100                   | 0.6 超前  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 9    | 功率因数调整 | 100                   | 0.5 超前  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 11   | 功率因数调整 | 100                   | 0.85 滞后 |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |
| 12   | 功率因数调整 | 100                   | 0.8 滞后  |            |           |              |                |           |            |           |              |                |           |          |    |      |      |    |      |  |  |

注：额定参数假设： $U_n=35\text{kV}$ ， $P_n=100\text{MW}$ ， $\cos\phi_n=0.9$  滞后， $I_n\approx 1850\text{A}$ ， $Q_n\approx 48.4\text{Mvar}$ ；每个工况重复测试 3 次，表中为平均值；相对误差计算依据  $\delta=X_m-X_t/X_t\times 100\%$ ，保留 1 位小数；所有工况均满足“电压 / 电流 / 有功 / 无功相对误差 $\leq\pm 3\%$ 、效率相对误差 $\leq\pm 5\%$ ”，故合格判定均为“合格”。

表 A.2 动态响应试验记录表

| 试验序号 | 扰动类型                    | 扰动幅度       | 实测响应时间<br>(ms) | 模型响应时间<br>(ms) | 峰值偏差 (%) | 合格判定 |
|------|-------------------------|------------|----------------|----------------|----------|------|
| 1    | 电压阶跃 (+10%<br>$U_n$ )   | +10% $U_n$ |                |                |          |      |
| 2    | 电压阶跃 (-10%<br>$U_n$ )   | -10% $U_n$ |                |                |          |      |
| 3    | 频率阶跃<br>(+0.5Hz)        | +0.5Hz     |                |                |          |      |
| 4    | 频率阶跃<br>(-0.5Hz)        | -0.5Hz     |                |                |          |      |
| 5    | 功率指令跟踪<br>(+20% $P_n$ ) | +20% $P_n$ |                |                |          |      |
| 6    | 功率指令跟踪<br>(-20% $P_n$ ) | -20% $P_n$ |                |                |          |      |

注：响应时间指参数达到稳态值 95% 的时间。

表 A.3 故障耐受试验记录表

| 试验序 | 故障类 | 故障参 | 实测电 | 实测恢复时间 (s) | 模型电流峰值 (kA) | 模型恢 | 脱网状 | 合格判 |
|-----|-----|-----|-----|------------|-------------|-----|-----|-----|
|-----|-----|-----|-----|------------|-------------|-----|-----|-----|

| 试验序号 | 故障类型 | 故障参数                 | 实测电流峰值 (kA) | 实测恢复时间 (s) |  |  | 模型电流峰值 (kA) |                                 | 模型恢复时间 (s) | 脱网状态 | 合格判定 |
|------|------|----------------------|-------------|------------|--|--|-------------|---------------------------------|------------|------|------|
|      |      |                      |             |            |  |  | 未脱网         | 电流 $\leq 1.5I_n$ , 恢复 $\leq 5s$ |            |      |      |
| 1    | LVRT | $20\%U_n$ ,<br>0.15s |             |            |  |  |             |                                 |            |      |      |
| 2    | HVRT | $130\%U_n$ ,<br>0.2s |             |            |  |  |             |                                 | 未脱网        |      |      |
| 3    | 三相短路 | $1.5I_n$ ,<br>100ms  |             |            |  |  |             |                                 | 未脱网        |      |      |

表 A.4 电站级聚合 / 聚类验证试验记录表

| 试验序号 | 建模方法 | 功率设定 (% $P_n$ ) | 全设备模型值   | 全设备模型值  | 电站级模型值   | 电站级模型值  | 功率偏差 (%)       | 计算时间 (s)  | 效率提升 (%)    | 合格判定 |
|------|------|-----------------|----------|---------|----------|---------|----------------|-----------|-------------|------|
|      |      |                 | 总功率 (MW) | 电压 (kV) | 总功率 (MW) | 电压 (kV) | $\leq \pm 5\%$ | 全设备 / 电站级 | $\geq 50\%$ |      |
| 1    | 聚合   | 50              |          |         |          |         |                |           |             |      |
| 2    | 聚类   | 50              |          |         |          |         |                |           |             |      |
| 3    | 聚合   | 100             |          |         |          |         |                |           |             |      |
| 4    | 聚类   | 100             |          |         |          |         |                |           |             |      |

表 A.5 电站级涉网控制试验记录表

| 试验序号 | 测试项目 | 扰动参数                | 实测值                       | 模型值 | 偏差 (%)          | 合格判定 |
|------|------|---------------------|---------------------------|-----|-----------------|------|
| 1    | 一次调频 | 频率 - 0.033Hz        | 响应延迟 2s, 速率 5% $P_n$ /min |     | $\leq \pm 10\%$ |      |
| 2    | 电压支撑 | 电压 - 5% $U_n$       | 无功调节 10% $Q_n$            |     | $\leq \pm 5\%$  |      |
| 3    | 功率平滑 | 风电波动 $\pm 10\% P_n$ | 输出波动 $\pm 2\% P_n$        |     | $\leq \pm 10\%$ |      |

表 A.6 电站级故障穿越试验记录表

| 试验序号 | 穿越类型 | 故障参数              | 实测恢复时间 (s) | 实测过流倍数 (倍 $I_n$ ) | 模型恢复时间 (s) | 模型过流倍数 (倍 $I_n$ ) | 合格判定 |
|------|------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------|
| 1    | LVRT | $0\%U_n$ , 0.1s   | $\leq 5$   | $\leq 1.5$        |            |                   |      |
| 2    | HVRT | $120\%U_n$ , 0.2s | $\leq 3$   | $\leq 1.2$        |            |                   |      |

表 A.7 系统级电网适配试验记录表

| 试验序号 | 测试场景          | 扰动参数          | 实测波动幅度 (%)                | 模型波动幅度 (%) | 控制精度                                     | 合格判定 |
|------|---------------|---------------|---------------------------|------------|--|------|
| 1    | 弱电网 (SCR=1.5) | +10% $P_n$ 波动 | 电压 $\leq 2$ , 功率 $\leq 3$ |            | -  |      |
| 2    | 孤岛            | 100% 负荷       | -                         | -          | 电压 $\pm 2\% U_n$ , 频率 $\pm 0.2\text{Hz}$ |      |

表 A.8 系统级电网支撑试验记录表

| 试验序号 | 测试项目 | 扰动参数       | 实测值             | 模型值 | 偏差 (%)              | 合格判定 |
|------|------|------------|-----------------|-----|---------------------|------|
| 1    | 频率支撑 | 频率 - 0.5Hz | 支撑 10% $P_n$    |     | $\leq \pm 10\%$     |      |
| 2    | 振荡抑制 | 0.5Hz 扰动   | 阻尼比 0.05, 衰减 5s |     | 阻尼比 $\leq \pm 0.01$ |      |
| 3    | 黑启动  | 解列启动       | 电压 30s, 频率 30s  |     | $\leq \pm 10\%$     |      |

表 A.9 系统级多场站协同试验记录表

| 试验序号 | 测试项目 | 指令参数 | 实测分配值 (MW) | 模型分配值 (MW) | 总阻尼比 | 合格判定 |
|------|------|------|------------|------------|------|------|
|------|------|------|------------|------------|------|------|

### 参 考 文 献

- [1] GB 38755 电力系统安全稳定导则
  - [2] GB/T 38969 电力系统技术导则
  - [3] GB/T 40581 电力系统安全稳定计算规范
  - [4] GB/T 40594 电力系统网源协调技术导则
  - [5] GB/T 40595 并网电源一次调频技术规定及试验导则
  - [6] GB/T 32826 光伏发电系统建模导则
  - [7] GB/T 36237 风能发电系统 通用电气仿真模型
-