

团体标准

T/JES XXX-XXXX

零碳园区硬件在环仿真测试技术要求

Technical Requirements for Hardware-in-the-Loop Simulation Testing
of Zero-Carbon Parks

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

江苏省电工技术学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号、代号和缩略语 2

5 零碳园区硬件在环测试系统 2

 5.1 HIL 测试系统架构 2

 5.2 信号交互 3

 5.3 PHIL 测试系统 3

6 零碳园区电磁暂态仿真模型 4

 6.1 新能源设备模型 4

 6.2 电网模型 5

 6.3 负荷模型 6

7 零碳园区硬件在环测试内容 6

 7.1 离网/并网切换测试 6

 7.2 高电压和低电压穿越测试 8

 7.3 强弱电网模拟测试 9

附录 A（规范性） 电力系统仿真计算 12

参考文献 13

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这些专利的责任。

本文件由江苏省电工技术学会提出并归口。

本文件起草单位：国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司、东南大学、大丰隆盛实业有限公司、南京理工大学。

本文件主要起草人：柏晶晶、黄海泉、郝广东、郑杨、张勐、苏志雄、顾栩玥、丁浩、周杏宇、樊晓康、蒋宇、章飞、沈操、王媛媛、柳伟、胡恺元、刘倩竹。

本文件为首次发布。

零碳园区硬件在环仿真测试技术要求

1 范围

本文件规定了 10 kV 电压等级零碳园区光伏、风电以及储能等装置硬件在环仿真测试的总体要求、测试环境组建、仿真模型要求、测试内容等技术要求。

本文件适用于 10 kV 电压等级零碳园区光伏、风电以及储能等装置的电磁暂态仿真以及基于电磁暂态仿真的硬件在环仿真测试。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 40601—2021 电力系统实时数字仿真技术要求

GB/T 44650—2024 光伏电站逆变器并网性能硬件在环测试规程

GB 38755 电力系统安全稳定导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电磁暂态仿真 electromagnetic transient simulation

电磁暂态仿真是基于电力系统微分代数方程，对电压、电流等电磁量在微秒尺度上的快速动态过程进行高精度数值计算与分析的方法。

3.2

实时仿真 real-time simulation

实时仿真是指仿真计算的执行速度与物理时间同步，使模型输出能够按真实时间连续响应并与实际设备或控制系统交互的仿真技术。

3.3

多步长仿真 multi-rate simulation

多步长仿真是根据系统不同动态特性的时间尺度差异，对各子系统采用不同积分步长并协同计算，以兼顾计算效率与精度的仿真方法。

3.4

硬件在环测试 hardware-in-the-loop test

硬件在环测试（HIL）是将真实硬件设备接入实时仿真系统，使其在接近真实运行环境的条件下与虚拟模型交互，从而验证控制策略和设备性能的测试方法。

3.5

功率硬件在环测试 power hardware-in-the-loop test

功率硬件在环测试是在实时仿真基础上通过功率接口将实际电力设备与虚拟电网进行能量级交互，从而在接近真实工况下验证设备与控制性能的测试方法。

3.6

实时仿真器 real-time simulator

实时仿真器是一种能够在严格的时间约束下，以与物理时间同步的速度执行模型计算的硬件或软件系统。

3.7

功率放大器 power amplifier

功率放大器负责将实时仿真器输出的低电压控制信号实时放大为能满足高电压或大电流需求的真实功率信号，以驱动被测物理设备并形成闭环功率交互。

3.8

零碳园区 zero carbon park

零碳园区是指一个产业园区在一定周期内，通过规划、设计、技术、管理等方式，使园区内生产经营活动产生的二氧化碳排放降至“近零”水平，并具备进一步达到“净零”条件的园区。

4 符号、代号和缩略语

下列符号、代号和缩略语适用于本文件。

HIL：硬件在环（hardware-in-the-loop）

PHIL：功率硬件在环（power hardware-in-the-loop）

5 零碳园区硬件在环测试系统

5.1 HIL 测试系统架构

硬件在环测试系统架构如图 1 所示，电力系统在实时仿真器上进行仿真，同时仿真器配备了与控制器系统和其他系统连接的输入与输出接口装置，实现电力系统与控制器硬件之间的闭环测试。

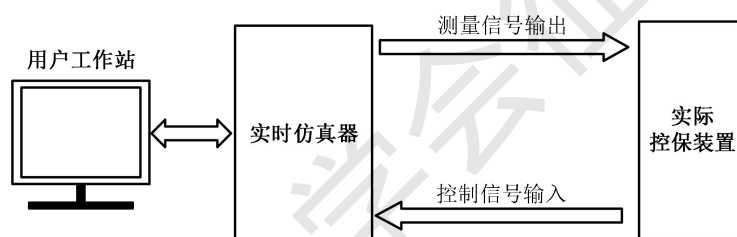


图 1 HIL 测试系统架构图

5.1.1 实时仿真器

实时仿真器支持多步长仿真，如图 2 所示，一般采用 CPU-FPGA 异构，其中 CPU 用于电力系统大步长仿真，FPGA 用于电力电子小步长仿真。子系统包含电网和负载部分以及生成电力电子装置参考电压的上层控制器在 CPU 中运行，生成开关信号的底层控制器和电力电子装置的开关器件在 FPGA 中运行。

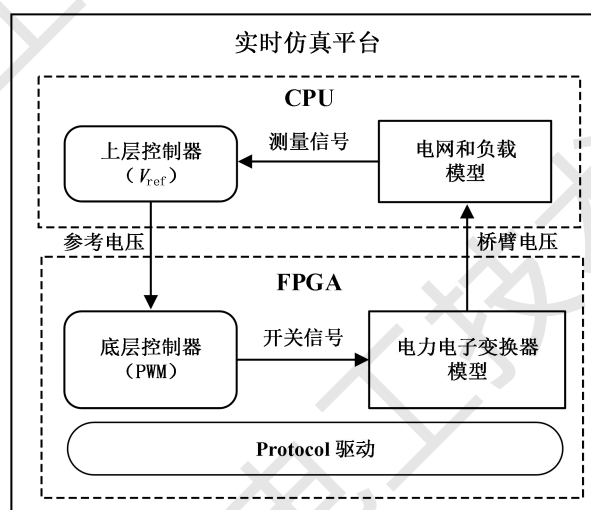


图 2 实时仿真器架构

5.1.2 仿真规模及步长

仿真规模满足大于 1000 个三相节点，典型电力电子设备仿真步长应小于 1 微秒，园区系统级仿真步长应小于 50 微秒。

5.1.3 集群测试

实时仿真器可通过 PCIE 插槽、光纤或者网络交换机进行高速互联，集群后形成仿真平台可进行并行仿真，满足大规模系统仿真的计算资源需求。并行仿真通过对原大系统进行解耦成子系统实现，解耦后的精度应满足仿真精度要求。

5.1.4 测试接线

HIL 测试的接线按以下步骤进行：

- 在实时仿真器中配置对应的输入输出接口；
- 配置实时仿真器与被测控保装置之间的通讯协议；
- 实时仿真器的模拟信号输出接口连接被测控保装置的模拟信号输入接口；
- 实时仿真器的模拟信号输入接口连接被测控保装置的模拟信号输出接口；
- 实时仿真器的数字信号输出接口连接被测控保装置的数字信号输入接口；
- 实时仿真器的数字信号输入接口连接被测控保装置的数字信号输出接口；
- 实时仿真器与上位机通过无线网络或者网线连接，上位机可实时观测仿真波形。

5.2 信号交互

5.2.1 通讯接口类型

通讯接口类型具备模拟信号输入和模拟信号输出，主要用于电压和电流测量数据的传输，同时具备数字信号输入和数字信号输出，主要用于开关信号的传输。

5.2.2 通讯接口精度

通讯接口模拟量输入/输出满足 16 位及以上分辨率，误差小于 0.1%；数字量支持高频脉冲捕获（用于 PWM 验证），时间分辨率小于 10 纳秒。

5.2.3 通信协议类型

通信协议涵盖 Modbus TCP/RTU、IEC 61850、IEC104 等电力领域常用协议。

5.3 PHIL 测试系统

5.3.1 PHIL 测试系统架构

PHIL 测试系统如图 3 所示，园区大部分负载和新能源发电系统在实时仿真器中进行仿真，实际的新能源电力电子装置通过功率放大器与实时仿真器相连。实时仿真器中运行的电力系统通过功率放大器与实际电力电子设备实现功率的交互。

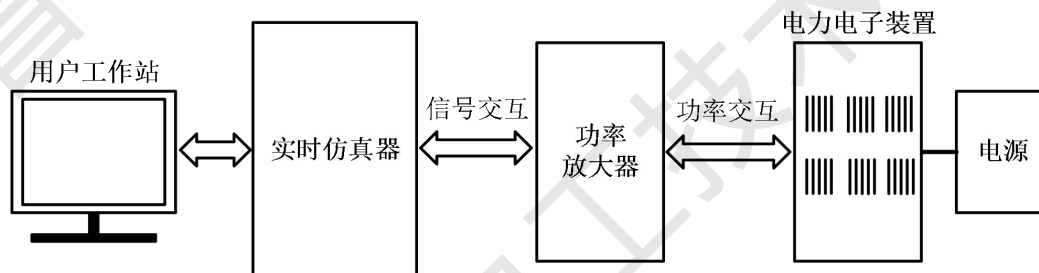


图 3 PHIL 测试系统架构图

5.3.2 功率放大器功能

为了实现功率交互，在仿真器与测试设备之间应功率放大器，同时提供反馈信号实现闭环测试。功率放大器基于四象限运行，既可以吸收功率，也可以发出功率。功率放大器的额定功率应大于被测设备的额定功率 1.5 倍。

5.3.3 功率放大器接口

功率放大器与实时仿真器之间的接口通过可控电压源和可控电流源实现。实际的被测新能源装置在仿真系统中一般采用电流源来表征。仿真器中测得的该装置接入园区网侧的节点电压输出到功率放大器中作为其应控制的参考电压，而被测装置中测得实际电流值作为输入反馈到仿真系统中的电流源。

5.3.4 测试接线

PHIL 测试的接线按以下步骤进行：

- 在实时仿真器中配置对应的输入输出接口；
- 配置实时仿真器与功率放大器之间的通讯协议；
- 实时仿真器的模拟信号输出接口连接功率放大器的模拟信号输入接口；
- 实时仿真器的模拟信号输入接口连接功率放大器的模拟信号输出接口；
- 功率放大器整流侧连接三相交流电源，逆变侧连接 被测设备；
- 被测设备若是光伏或者储能变换器，则直流侧可连接直流电源，交流侧连接功率放大器；
- 被测设备若是风机变换器，则风机侧可连接交流电源，网侧连接功率放大器；
- 实时仿真器与上位机通过无线网络或者网线连接，上位机可实时观测仿真波形。

6 零碳园区电磁暂态仿真模型

6.1 新能源设备模型

新能源设备电磁暂态模型应具备表征内部开关状态的能力，精度与详细开关模型对比应小于 0.5%。

6.1.1 光伏模型

光伏模型应至少包含以下核心子模型：

- 光伏阵列模型
- 直流变换器模型
- 逆变器模型

三个子模型应按照实际物理系统的电气连接顺序进行级联，构成完整的光伏发电单元，并支持与实时仿真器的 I/O 接口及电网模型进行数据交互。

光伏阵列应反映温度以及光照强度变化对其输出的影响，光伏阵列模型应在电气特性上准确反映实际光伏组件或阵列的输出特性，能够模拟在不同环境条件下的 I-V 曲线和 P-V 曲线。模型应支持单二极管模型或双二极管模型等物理解析模型，亦可采用基于查表法的工程简化模型，但应保证插值精度满足上述要求。输入：光照强度（实时或外部注入）、光伏组件温度（实时或外部注入）、直流变换器输入阻抗（或直流端口电压）。输出：光伏阵列端口电压、光伏阵列端口电流、当前最大功率点功率。

直流变换器应实现最大功率点跟踪功能。直流变换器模型可采用 Boost（升压）拓扑，也可根据实际被测逆变器的前级拓扑选择 Buck、Buck-Boost 或隔离型变换器。模型应支持不同开关频率的仿真，模型应至少支持一种常见 MPPT 算法，如扰动观察法、电导增量法，算法应可配置。输入：光伏阵列输出电压、电流；直流母线电压反馈，输出：直流母线电压、直流母线电流、MPPT 占空比。

逆变器控制直流侧电压，同时支持跟网型控制和构网型控制，且两种模式应可动态切换或参数配置。逆变器模型应输出三相交流电压、电流，并与电网模型或并网点模型进行接口。

6.1.2 风机模型

风机模型系统拓扑应支持直驱风机和双馈风机两种主流结构。直驱风机中发电机与风轮直接耦合，整流器和逆变器通过背靠背变流器连接；双馈风机中发电机定子直接并网，转子通过背靠背变流器馈入电网。

电机模型应根据风速、风轮转速和桨距角实时计算风轮捕获的机械转矩和功率。气动特性应基于风轮的风能利用系数曲线或查表数据。

整流器模型应模拟从发电机交流侧到直流母线的功率变换过程。对于直驱风机，整流器连接永磁同步发电机；对于双馈风机，整流器连接双馈发电机的转子绕组。整流器模型应集成最大功率点跟踪控制算法，用于控制发电机转速以捕获最大风能。MPPT 策略：模型应至少支持以下一种策略：

- a) 最佳叶尖速比法：根据风速计算最优转速指令；
- b) 功率信号反馈法：根据当前功率查表得到最优转速指令；
- c) 爬山法：通过扰动转速观察功率变化。

逆变器模型应控制直流母线电压稳定在额定值。直流电压控制应采用电压外环、电流内环的双闭环结构。逆变器模型应同时支持跟网型和构网型两种控制模式，且可根据测试场景通过参数配置选择。逆变器模型应输出三相交流电流、电压，并连接到电网模型或并网点模型。对于双馈风机，网侧变流器的输出与定子侧输出合并。

6.1.3 储能模型

储能模型应至少包含以下核心子模型：

- a) 电池储能模型（含单体或串联/并联等效电路）
- b) 直流变换器模型（双向 DC/DC）
- c) 逆变器模型（双向 DC/AC）

三个子模型应按实际储能系统的电气连接顺序集成：电池、直流变换器、直流母线、逆变器、并网点（电网或负荷）。

电池模型应精确模拟在不同充放电倍率、荷电状态和温度下的端电压、内阻及可用容量特性。模型应支持充电和放电两种工作状态。输入：电池端口电流、电池温度。输出：电池端口电压、当前电量、最大允许充放电电流、电池健康状态。

直流变换器模型应支持双向功率流动，通常采用双向 Buck/Boost 拓扑（或隔离型直流变换器）。直流变换器模型应至少支持以下一种控制模式：

- a) 恒流充电/放电模式：根据外部指令，控制电池电流为给定值；
- b) 恒压充电模式：当电池电压达到上限时，切换为恒压浮充。

逆变器模型连接直流母线与交流电网（或负荷）。模型应具备双向功率传输能力，即能量可以从电网侧流向电池（充电模式），也可以从电池侧流向电网（放电模式）。模型应模拟直流母线电容的动态。逆变器模型应同时支持跟网型控制和构网型控制，且两种模式应可通过参数配置选择，或根据测试场景动态切换。

6.2 电网模型

6.2.1 发电机模型

发电机模型应能准确反映定子、转子及阻尼绕组的电磁暂态过程，具备至少考虑直轴和交轴次暂态特性的高阶模型。模型应支持以下参数的配置：绕组电阻、电抗、时间常数、惯性常数等。模型应能够与外部电网模型（含电感、电容、负荷）稳定联立求解，不发生数值振荡。推荐使用隐式梯形法或后退欧拉法混合求解。

6.2.2 变压器模型

变压器模型应能基于磁链或电感矩阵准确描述绕组的电磁耦合特性，支持多绕组结构及不同连接方式，同时支持漏阻抗的设置。

6.2.3 线路模型

线路模型应支持集中参数模型或者分布式参数模型，在应关注高次谐波或行波过程的场景下（如宽频振荡分析），应使用能够准确反映行波传播过程的分布式参数模型。

集中参数模型的参数应按线路单位长度参数乘以线路总长度计算，模型应支持用户直接输入总电阻、总电感、总电容，或输入单位长度参数及长度后自动计算。

分布式参数模型应至少支持以下一种模型：

- a) 贝杰龙模型：基于特征线法，将偏微分方程转换为等效的时域电路模型（以历史电流源表示波反射）。该方法计算效率高，适用于大多数实时仿真。
- b) 频率相关模型：采用曲线拟合技术在频域拟合线路参数，再通过反变换转换为时域模型。该模型可准确模拟集肤效应和大地回路的频率相关特性。
- c) 相域模型：直接在相域求解，支持不对称线路和不换位线路，精度最高但计算量较大。

6.3 负荷模型

负荷模型应能够模拟电力系统中各类用电设备的功率吸收特性，提供可调控的有功功率和无功功率输入接口，并支持加载典型负荷曲线（自定义曲线）以模拟负荷随时间的变化规律。

根据测试场景精度要求，负荷模型可选择以下形式之一或组合：

- a) 静态负荷模型（恒功率、恒电流、恒阻抗或多项式组合）；
- b) 动态负荷模型（如感应电动机负荷）；
- c) 复合负荷模型（静态+动态）。

7 零碳园区硬件在环测试内容

7.1 离网/并网切换测试

验证在电网波动或故障时，设备控制系统自动平滑切换的能力。

7.1.1 离网测试

离网测试应模拟园区从并网运行切换至孤岛运行的全过程，包括电网断开瞬态、负荷突变、新能源出力波动以及储能充放电切换等典型工况。测试工况应覆盖典型运行边界，以验证系统在无外部支撑条件下的运行能力。

零碳园区新能源装置功率硬件在环（PHIL）离网测试步骤：

1 离网相关功能测试

1.1 孤岛检测性能测试

- a) 保持被测设备并网运行，设定负载功率与被测设备输出功率匹配；
- b) 在仿真器中瞬时断开 PCC 断路器，模拟孤岛；
- c) 记录被测设备孤岛检测时间（从 PCC 断开至被测设备发出孤岛信号的时间）；
- d) 调整有功/无功失配量（如+20%、-20%额定功率），观察检测时间变化。

1.2 离网模式电压与频率支撑能力测试

- a) 使系统处于离网状态（PCC 已断开），被测设备切换至构网控制模式（V-f 控制）；
- b) 在仿真器中对园区负载施加负荷阶跃（ $\pm 30\%$ 额定负载）；
- c) 记录电压动态下降/上升量、恢复时间及稳态偏差；
- d) 注入频率扰动（如通过相邻虚拟机组模拟频率波动），记录被测设备的频率响应与调节时间；
- e) 注入 RoCoF 扰动（典型值 $0.5 \sim 2 \text{ Hz/s}$ ），验证被测设备是否发生误保护或失控。

1.3 黑启动能力测试

- a) 通过功率放大器输出零电压，使被测设备交流侧完全失电；
- b) 在仿真器中设置黑启动指令（或通过被测设备自身黑启动逻辑触发）；
- c) 观察并记录被测设备输出电压的建立过程：
 - 电压幅值达到 90% 额定值的时间（建压时间）；
 - 频率达到 $49.5 \sim 50.5 \text{ Hz}$ 范围的时间；
- d) 依次接入容性、阻性、感性负载（各 20% 额定功率），观察电压波形畸变率。

1.4 数据记录与结果评价

- a) 仿真器时间戳、PCC 电压电流波形（采样率 $\geq 5 \text{ kHz}$ ）、被测设备内部状态变量（模式、功率、保护信号）；
- b) 功率放大器输出端与被测设备的同步录波（事件前后各 2 s ）；
- c) 闭环总延迟、接口算法参数、环境温度与湿度；
- d) 每个测试项的通过/不通过结论，并附验收准则对比表；

- e) 典型波形截图（孤岛检测的 PCC 电压下降与频率变化曲线；黑启动的电压建立波形）；
- f) 稳定性分析结果（奈奎斯特图或阻抗比裕度）；
- g) 偏差说明：如果某项测试未通过，应分析原因是被测设备控制缺陷、接口参数不当还是功率放大器性能不足。

7.1.2 并网测试

并网测试的核心是验证园区各类电源（光伏、风电、储能、构网/跟网型变流器）的同步与功率控制能力，包括功率指令跟踪能力与动态响应速度。测试应重点评估系统对有功功率指令、无功功率指令的跟踪精度与动态响应速度，确保其在电网连接状态下能够安全、稳定、高效地参与功率调度与电网支撑。

零碳园区新能源装置功率硬件在环（PHIL）并网测试步骤：

1 并网功率控制性能测试

1.1 有功功率控制测试

- a) 按阶梯式功率指令（20%→40%→60%→80%→100% P_n，每档≥30 s）调整有功输出，记录稳态偏差；
- b) 验收准则：稳态平均绝对偏差≤1% 额定值；
- c) 开展功率变化速率限制测试（如有条件），验证被测设备按设定速率平滑改变输出功率。

1.2 无功功率控制测试

- a) 恒无功功率模式：设定 ±10%、±30%、±50% Q_{max}，验证稳态误差；
- b) 恒功率因数模式：设定功率因数 0.95 超前/滞后，验证输出一致性；
- c) 电压一无功（Volt-Var）模式：调节 PCC 电压（0.92~1.08 p.u.），测量无功响应曲线与预设特性对比。

1.3 电压一有功模式测试

- a) 逐步升高 PCC 电压至 1.05 p.u. 以上，记录有功功率削减行为；
- b) 恢复额定电压，确认有功输出自动恢复。

2 电网支撑功能测试

2.1 一次调频响应测试

- a) 模拟频率突降 0.2 Hz，测量有功增量是否符合下垂系数；
- b) 一次调频响应时间要求≤500 ms。

2.2 动态电压支撑测试

- a) 模拟短路故障后电压振荡，验证无功补偿快速投入/切除。

2.3 惯量模拟功能测试

- a) 施加小扰动，对比惯量功能开启/关闭时的频率响应曲线，量化虚拟惯性时间常数。

3 数据记录与结果评价

3.1 应记录的数据

- a) PCC 处电压/电流波形（采样率≥5 kHz）；
- b) 被测设备输出的有功/无功功率、功率因数及运行状态标志位；
- c) 环境温度、湿度，功率放大器及被测设备温升值。

3.2 测试报告内容

- a) 各测试项“通过/不通过”对照表；
- b) 典型波形截图（电压恢复曲线、频率穿越过程、RoCoF 曲线）；
- c) 偏差分析：未通过项定位原因（被测设备控制参数、功放响应能力等）。

7.1.3 切换测试

验证源网荷储系统在运行模式快速切换过程中动态稳定性与控制鲁棒性，在切换后短时间内进入稳定运行状态，无持续振荡或失稳现象，评估园区在电网解列与重连过程中的无缝切换能力以及扰动抑制能力。

零碳园区新能源装置 PHIL 离网—并网切换测试步骤：

1 测试准备

- a) 按并网测试要求完成平台校准与初始状态建立（并网运行，功率 30% P_n）；

- b) 设置仿真器内 PCC 断路器可控，电网模型可预设故障或正常状态；
- c) 配置高速录波，触发条件为 PCC 开关状态变化。

2 并网→离网切换测试（计划性与非计划性）

2.1 计划性离网切换

- a) 通过监控系统向被测设备发送“离网运行”指令；
- b) 记录被测设备断开 PCC 断路器的时间及切换至构网模式的过渡时间；
- c) 验收：切换时间 $\leq 100\text{ ms}$ ，切换过程中电压暂降 $\leq 10\% U_n$ 。

2.2 非计划性离网（孤岛检测）

- a) 在仿真器中模拟电网故障（电压骤降/频率偏移），触发 PCC 跳闸；
- b) 记录被测设备孤岛检测时间及切换动作时间；
- c) 验收：检测与切换总时间 $\leq 2\text{ s}$ ，无功率反送。

3 离网/并网切换测试

- a) 电网条件正常后，通过监控系统发送“并网”指令；
- b) 被测设备自动检测电网幅值、相位、频率，执行预同步；
- c) 记录达到同步条件的时间及闭合 PCC 的时间。

4 连续切换与扰动测试

- a) 在 10 分钟内连续执行 3 次“并→离→并”完整循环；
- b) 每次切换后稳定运行 $\geq 1\text{ 分钟}$ ，记录功率、电压波动；
- c) 验收：无累积误差或保护误动作，稳态性能与单次切换一致。

5 数据记录与报告

- a) 强制记录：PCC 两侧电压/电流录波（切换前后各 2 s）、切换时间标签、同步误差；
- b) 报告结论：各切换项通过/不通过，附波形截图。

7.2 高电压和低电压穿越测试

验证并网设备在电网电压发生扰动时维持不脱网并提供支撑能力。

7.2.1 高电压穿越测试

高电压穿越测试标准用于验证电力电子设备（如光伏逆变器、风电变流器、储能变流器等）在园区电网电压异常升高情况下的持续运行能力与支撑能力，采用标准化电压跌落/抬升曲线进行验证。

零碳园区新能源装置 PHIL 高压穿越测试步骤：

1 测试准备

- a) 按并网测试要求完成平台校准，被测设备稳定运行于并网模式，输出功率 $50\% \sim 100\% P_n$ ；
- b) 在实时仿真器中预设高压穿越曲线（电压抬升值、持续时间、上升/恢复斜率）。

2 测试点设置

至少测试以下电压抬升点：

- a) 1.20 p.u.，持续时间 0.5 s
- b) 1.25 p.u.，持续时间 0.2 s
- c) 1.30 p.u.，持续时间 0.1 s（若产品规格要求）

3 测试执行

- a) 通过仿真器将 PCC 电压升至目标值（如 1.20 p.u.），维持规定时间。
- b) 到达持续时间后，按设定斜率恢复至额定电压。
- c) 重复以上步骤，依次测试各电压抬升点。

4 监测与验收准则

4.1 穿越期间：

- a) 被测设备不应脱网，不应触发过压/过流保护。
- b) 动态无功电流注入：当电压 $\geq 1.1 U_n$ 时，被测设备应吸收感性无功电流，注入误差 $\leq 10\%$ 额定值。
- c) 无功电流响应时间 $\leq 10\text{ ms}$ （从电压抬升至无功电流达到目标的 90%）。

4.2 电压恢复后：

- a) 有功功率应在 1 s 内恢复至故障前值的 90% 以上。

b) 无振荡或异常停机的持续迹象。

5 异常处理

若被测设备在穿越过程中脱网或失控，立即降压停机，查明原因（被测设备参数或功放响应延迟）后重新测试。

6 数据记录

- a) 波形记录：PCC 电压、被测设备输出电流（A/B/C 相）、有功/无功功率、被测设备状态。
- b) 记录无功电流注入峰值及响应时间、有功恢复时间。
- c) 截图保存典型高压穿越波形。

7.2.2 低电压穿越测试

低电压穿越测试标准用于验证风电、光伏、储能等电力电子设备在电网电压跌落甚至短时故障条件下的持续并网运行能力与电网支撑能力，测试通常基于标准化电压跌落曲线进行验证。

零碳园区新能源装置 PHIL 低压穿越测试步骤：

1 测试准备

- a) 按并网测试要求完成平台校准，被测设备稳定运行于并网模式，输出功率 50%~100% P_n 。
- b) 在实时仿真器中预设低电压穿越曲线（跌落深度、持续时间、故障类型、恢复斜率）。

2 测试点设置（典型值，可依标准增减）

- a) 0.20 p.u., 持续时间 0.625 s
- b) 0.40 p.u., 持续时间 0.7 s
- c) 0.60 p.u., 持续时间 1.0 s
- d) 0.80 p.u., 持续时间 1.5 s

3 测试执行

- a) 通过仿真器将 PCC 电压跌落至目标值，维持规定时间。
- b) 到达持续时间后，按设定斜率恢复至额定电压。
- c) 依次测试各跌落点及各故障类型。

4 监测与验收准则

4.1 穿越期间：

- a) 被测设备不应脱网，不应触发欠压/过流保护。
- b) 动态无功电流注入：电压跌落期间应注入容性无功电流，注入误差 $\leq 10\%$ 额定值。
- c) 无功电流响应时间 $\leq 10\text{ ms}$ （从电压跌落到无功电流达到目标的 90%）。

4.2 电压恢复后：

- a) 有功功率应在 1 s 内恢复至故障前值的 90% 以上。
- b) 无振荡或异常停机。

5 异常处理

若被测设备在穿越过程中脱网或失控，立即恢复电压并停机，排查原因（被测设备参数、功放响应延迟）后重测。

6 数据记录

- a) 波形：PCC 电压、被测设备三相电流、有功/无功功率、被测设备状态字。
- b) 记录无功电流注入峰值及响应时间、有功恢复时间。
- c) 截图保存典型低压穿越波形（包含跌落段和恢复段）。

7.3 强弱电网模拟测试

通过实时仿真器模拟强弱电网（弱电网 $SCR < 1.5$ ，强电网 $SCR > 3$ ），验证控制器在不同阻抗环境下的稳定性。

7.3.1 强电网模拟测试

强电网测试是验证零碳园区电力电子设备在高刚性电网环境下的精确控制能力与动态稳定性，在强电网条件下，被测设备通常以跟网型控制为主，测试多机功率分配一致性以及多机并联运行环流抑制能力。

零碳园区新能源装置 PHIL 强电网模拟测试步骤：

1 测试准备

- 按并网测试要求完成平台标定，被测设备稳定运行于并网模式。
- 在实时仿真器中配置强电网模型：设定短路比 $SCR \geq 10$ 或按产品规格要求，网侧串联等效阻抗可按电网最大最小短路容量换算且标称电压精确至 0.1% 。
- 确认仿真器与功率放大器的闭环延迟 $\leq 100 \mu s$ ，避免延迟引入额外相位误差。
- 配置高速录波（采样率 $\geq 5 \text{ kHz}$ ），触发条件设为有功/无功功率指令阶跃或电网电压扰动。

2 强电网下电网适应性测试

2.1 电压适应性

- 调节 PCC 电压至 0.90 p.u. 、 0.95 p.u. 、 1.05 p.u. 、 1.10 p.u. ，每档维持 ≥ 2 分钟。
- 验收：被测设备不脱网，有功功率波动 $\leq 2\% P_n$ 。

2.2 频率适应性

- 偏移电网频率至 49.5 Hz 、 50.5 Hz ，每档维持 5 min 。
- 验收：被测设备不脱网，无异常功率震荡。

3 强电网下动态响应性能测试

3.1 有功功率快速响应

- 施加 $0\% \rightarrow 100\% P_n$ 阶跃指令，测量上升时间及超调量。
- 验收：上升时间 $\leq 100 \text{ ms}$ ，超调量 $\leq 5\% P_n$ 。

3.2 无功功率快速响应

- 施加 $0 \rightarrow \pm 100\% Q_{\max}$ 阶跃指令，测量响应时间及调节时间。
- 验收：响应时间 $\leq 50 \text{ ms}$ ，调节时间 $\leq 200 \text{ ms}$ 。

3.3 电网电压小幅扰动响应

- 在 PCC 施加 $\pm 5\%$ 正弦电压扰动（频率 $1 \sim 10 \text{ Hz}$ ），记录被测设备输出功率波动幅度。
- 验收：功率波动幅度 $\leq \pm 2\% P_n$ 。

4 数据记录与报告

- 短路比设定值与实测值；
- PCC 点电压、电流、有功/无功功率录波（采样率 $\geq 5 \text{ kHz}$ ）；
- 各测试项的响应时间、稳态误差、超调量。

7.3.2 弱电网模拟测试

弱电网测试主要用于评估园区源网荷储系统在低短路比、强电力电子化、低惯量电网条件下的稳定运行能力与电网支撑能力，被测设备通常采用构网型控制，测试设备对园区系统频率和电压的支撑能力。

零碳园区新能源装置 PHIL 弱电网模拟测试步骤：

1 测试准备

- 按并网测试要求完成平台标定，被测设备稳定运行于并网模式，输出功率为 $50\% \sim 100\% P_n$ ，按测试要求设定。
- 在实时仿真器中配置弱电网模型：设定短路比 SCR 为产品规格书规定的最低值（如 $SCR=2$ 、 $SCR=1.5$ 或 $SCR=1.2$ ），电网阻抗角按典型配电线路参数设置。
- 确认仿真器与功率放大器闭环延迟 ≤ 100 微秒，避免延迟与电网阻抗耦合引发振荡。

2 弱电网参数设置与稳定性预分析

根据 GB/T 44650—2024 要求设定 SCR 值，至少包括以下档位：

- $SCR = 10$ （强电网基准值）
- $SCR = 3$ （弱电网边界值）
- $SCR = 2$ （弱电网临界值）
- $SCR = 1.5$ （极弱电网工况，GB/T 44650—2024 SCR 模拟范围下限）

3 弱电网下锁相环同步稳定性测试

- 稳态 PLL 跟踪精度：在弱电网条件下运行 $\geq 10 \text{ min}$ ，观测并记录 PCC 处电压相位角跟踪误差，验收：相位跟踪误差 $\leq 3^\circ$ 。

- b) 频率阶跃响应：在 PCC 施加频率阶跃 ± 0.5 Hz，测量 PLL 输出频率的上升时间及超调量，验收：无失锁，调节时间 ≤ 200 ms，超调量 ≤ 1 Hz。
- c) 相角突变耐受能力：施加相角瞬时阶跃 ($\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$)，验证被测设备是否发生振荡或脱网，验收：系统在 200 ms 内恢复稳定。

4 弱电网下功率控制性能测试

a) 有功功率控制精度

阶梯式功率指令：20%→40%→60%→80%→100% P_n ，每档维持 ≥ 60 s（弱电网下应更长时间确认稳态收敛），验收：稳态有功偏差 $\leq 2\%$ P_n （可宽于强电网测试的 1%）。

b) 无功功率控制精度

阶梯式无功指令：20%→40%→60%→80% Q_{max} （超前/滞后），验收：稳态无功偏差 $\leq 10\%$ Q_{max} 。

c) 功率振荡验证

在弱电网下按额定功率运行，持续观测 ≥ 5 min，若无明显功率振荡（峰峰值 $\leq 5\%$ P_n ），即视为通过。

5 弱电网下电网适应性测试

通过仿真器依次设定以下边界条件，各坚持运行 ≥ 5 min（弱电网条件下较强电网 2 min 适当延长，以充分确认收敛）：

- a) 电压适应性——调节 PCC 电压至 0.90 p.u.、0.95 p.u.、1.05 p.u.、1.10 p.u.，记录被测设备有功出力是否受限。
- b) 频率适应性——偏移电网频率至 48.5 Hz 和 51.5 Hz。
- c) 三相不平衡适应性——设置电压负序不平衡度 2%、5%，评估被测设备的连续运行能力及负序电流水平。

6 弱电网下动态响应性能测试

- a) 有功阶跃响应：在弱电网下施加 50%→100% P_n 阶跃指令，测量上升时间 (≤ 200 ms) 及超调量 ($\leq 10\%$ P_n)。
- b) 电网电压扰动抑制：在 PCC 施加 $\pm 5\%$ 正弦电压扰动（频率 0.1~10 Hz），记录被测设备输出功率波动幅度，验收： $\leq \pm 5\%$ P_n 。

7 数据记录与报告

7.1 应记录：

- a) SCR 设定值（多档）及各工况录波；
- b) 强电网/弱电网切换录波（切换前后各 2 s）；
- c) PLL 关键量录波（相位误差、频率跟踪曲线）。

7.2 报告结论：逐项标注“通过/不通过”，附波形图及偏差分析。

附录 A (规范性) 电力系统仿真计算

A.1 仿真步长选择

CPU 的仿真步长一般在 10 微秒至 50 微秒范围，根据仿真规模以及仿真平台硬件计算资源的不同进行适当配置，以满足实时性的要求；FPGA 仿真步长一般在 100 纳秒至 1 微秒范围，根据电力电子装置的数量以及开关频率来确定。

A.2 误差对比模型选择

误差对比模型可选择二值电阻开关器件模型或者 L/C 等效伴随电路开关模型，在相同网络结构和电力电子拓扑情况下，对比模型的精度。

A.3 精度计算方式

精度计算方式建议采用均方根误差 (RMSE)，计算公式如下所示，应对稳态和暂态过程进行对比，暂态过程测试包含功率负荷突变、短路开路故障以及电力电子装置开关闭锁解锁。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{sim}(k) - x_{ref}(k))^2} \quad (1)$$

参 考 文 献

- [1] GB/T 26865.2—2023 电力系统实时动态监测系统 第2部分：数据传输协议.
 - [2] IEC 60870-5-101 基于串行通信的远程控制协议.
 - [3] IEC 60870-5-104 基于以太网的远程控制协议.
-