

中华人民共和国国家标准

GB/T 44117—2024

电化学储能电站模型参数测试规程

Code of practice for model parameters testing of electrochemical
energy storage station

2024-05-28 发布

2024-12-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	1
5 测试条件	2
6 电磁暂态仿真模型测试与验证	3
7 机电暂态仿真模型参数测试与验证	9
8 中长期动态仿真模型参数测试与验证	15
附录 A (资料性) 储能电站测试收集资料	16
附录 B (规范性) 储能电站模型参数测试接线	19
附录 C (规范性) 故障穿越测试要求	21
附录 D (规范性) 阶跃响应仿真误差要求	23
附录 E (规范性) 故障穿越仿真误差要求	24
附录 F (规范性) 故障穿越控制参数计算及辨识方法	27
参考文献	29

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。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由全国电力储能标准化技术委员会(SAC/TC 550)归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、国网湖南省电力有限公司、国网重庆市电力公司电力科学研究院、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院、南方电网电力科技股份有限公司、中国长江三峡集团有限公司、国网四川省电力公司、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、国家电网有限公司西南分部、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、国网河南省电力公司、国网新疆电力有限公司、国网江苏省电力有限公司、国家电网有限公司华中分部、国网甘肃省电力公司电力科学研究院、国网青海省电力公司电力科学研究院、国网新疆电力有限公司电力科学研究院、国家电网有限公司华东分部、国网西藏电力有限公司、国网重庆市电力公司、甘肃省水力发电工程学会、国网四川综合能源服务有限公司、国网辽宁省电力有限公司、国网江西省电力有限公司电力科学研究院、国网陕西省电力有限公司电力科学研究院。

本文件主要起草人：李文锋、李莹、陶向宇、王官宏、韩志勇、宋军英、李登峰、董开松、胡娟、洪权、郭敬梅、艾东平、张健、王景钢、李甘、许守平、马骏超、王晖、汤凡、吕振华、杨桂兴、唐博进、祁晓笑、张同尊、张健、吴俊玲、宋新立、徐希望、戴汉阳、穆世霞、徐贤、邵德军、陈仕彬、朱良合、傅国斌、李建华、巴贵、曾伟、汤明俊、那广宇、邓俊。

电化学储能电站模型参数测试规程

1 范围

本文件规定了电力系统稳定分析用电化学储能电站(简称“储能电站”)的模型参数测试条件、电磁暂态仿真模型测试与验证、机电暂态仿真模型参数测试与验证、中长期动态仿真模型参数测试与验证等技术要求。

本文件适用于通过 10(6) kV 及以上电压等级接入电网的新建、改建和扩建的储能电站模型参数测试。

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 36547 电化学储能系统接入电网技术规定

GB/T 36548 电化学储能系统接入电网测试规范

GB/T 42716 电化学储能电站建模导则

DL/T 2528 电力储能基本术语

3 术语和定义

GB/T 42716、DL/T 2528 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

统一接口 unified application programming interfaces

适用于不同仿真软件的电磁暂态封装模型输入/输出信号和参数设置的接口。

注:仿真软件能采用 ADPSS、HYPERSIM、MATLAB、RT-LAB、PSCAD、PSMODEL。

3.2

短路比 short circuit ratio

单个储能变流器交流端口的短路容量与储能变流器额定功率的比值。

[来源:GB 38755—2019,2.5,有修改]

4 总体要求

4.1 储能电站模型参数测试模型应满足 GB/T 42716 的要求。

4.2 对于储能电站内同一规格型号、相同拓扑结构的储能电池和变流器构成的储能系统应至少完成一个系统的模型参数测试。

4.3 储能系统的电磁暂态仿真模型和机电暂态仿真模型参数应采用数模混合仿真测试数据或现场试验数据校核验证;储能电站的电磁暂态仿真模型、机电暂态仿真模型和中长期动态仿真模型应采用现场整站测试数据校核验证。

4.4 储能电站发生设备改造、软件升级、参数修改或控制逻辑变更等影响涉网性能应重新进行模型参数测试与验证。

4.5 储能电站厂站级控制系统应配备储能电站有功功率给定、无功功率给定、功率因数给定等输出/输入接口；储能变流器应配备储能单元(系统)有功功率、无功功率、功率因数给定输入/输出接口和储能变流器控制系统中有功控制电流、无功控制电流等模拟量信号输出接口。储能电站和储能变流器接口输出数据刷新频率应大于 50 Hz。

4.6 储能电站模型应定期进行模型参数的复核试验，机电暂态仿真模型参数应进行现场复核试验，复核周期宜不超过 5 年。

5 测试条件

5.1 测试资料

测试前应收集以下技术资料：

- a) 储能电站拓扑结构、储能电池能量状态上下限和初始能量状态等相关资料；
- b) 储能变流器技术参数，见附录 A 中表 A.1；
- c) 储能电站内升压变压器技术参数，见表 A.2；
- d) 故障穿越控制逻辑及参数，见表 A.3；
- e) 频率/电压保护参数，见表 A.4；
- f) 储能变流器/储能电站的无功/电压、有功/频率和惯量控制传递函数及参数。

5.2 测试设备

5.2.1 实时仿真器

用于储能电站模型数模混合仿真的实时仿真器应满足以下要求：

- a) 具有满足试验要求的控制系统模型库， $2\ \mu\text{s}$ 小步长仿真规模大于 64 节点， $50\ \mu\text{s}$ 电磁暂态仿真规模大于 800 节点；
- b) 一次电路为平均值模型的实时仿真步长不大于 $50\ \mu\text{s}$ ，一次电路为详细模型的实时仿真步长不大于 $2\ \mu\text{s}$ ；
- c) 具备输入/输出量通道及信号自定义功能，模拟量和数字量的输入/输出通道均不少于 32 个；
- d) 具备用于输入/输出信号的计算和转换的自定义搭建功能。

5.2.2 现场测试设备

储能电站模型参数现场测试设备应满足以下要求：

- a) 数据采集装置的采样频率不小于 10 kHz，频率测量精度不小于 0.01 Hz；
- b) 测试设备精度满足表 1 的要求。

表 1 测试设备精度要求

设备	精度
电压互感器/传感器	0.5 级
电流互感器/传感器	0.5 级
数据采集装置	0.5 级

5.3 现场测试条件

储能电站模型参数现场测试应具备以下条件：

- a) 储能电站控制保护、涉网功能及性能满足 GB/T 36547 相关要求；
- b) 储能电站并网点电压、频率在电网稳定运行范围内，运行有功功率大于 $0.2 P_n$ ；
- c) 储能电站内储能系统、无功补偿装置和主升压变压器均正常运行。

注： P_n 为储能电站额定放电功率。

6 电磁暂态仿真模型测试与验证

6.1 一般规定

6.1.1 电磁暂态仿真模型测试包含储能系统的控制系统测试、保护系统测试、短路比适应性测试以及储能电站的模型测试、适应性测试。

6.1.2 储能系统的电磁暂态仿真模型测试应进行数模混合仿真测试和现场测试中的一种或两种测试，以及电磁暂态封装模型仿真测试。

6.1.3 储能电站的电磁暂态仿真模型应基于单个储能系统电磁暂态仿真模型等值建立。

6.1.4 储能电站模型适应性测试验证包含多实例运行测试验证及多环境适应性测试验证，分别验证电磁暂态仿真模型的并列运行稳定性和不同计算机操作系统环境中的准确性。

6.2 储能系统数模混合仿真测试

6.2.1 有功功率控制测试

有功功率控制测试按照以下步骤进行：

- a) 按照附录 B 中图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器，在数模混合仿真程序中设置输出信号；
- b) 设置储能变流器有功功率为 $0.7 P_n'$ ；
- c) 改变储能变流器有功功率给定值从 $0.7 P_n'$ 分别阶跃至 $0.65 P_n'$ 、 $0.75 P_n'$ 、 $0.5 P_n'$ 和 $0.9 P_n'$ ，阶跃持续时间 $1\text{ s} \sim 1.5\text{ s}$ 后恢复到 $0.7 P_n'$ ，记录试验过程中储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流；
- d) 设置储能变流器有功功率为 P_n' ；
- e) 改变储能变流器有功功率给定值从 P_n' 分别阶跃至 $0.95 P_n'$ 、 $1.05 P_n'$ 、 $0.9 P_n'$ 和 $1.1 P_n'$ ，阶跃持续时间 $1\text{ s} \sim 1.5\text{ s}$ 后恢复到 P_n' ，记录试验过程中储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流；
- f) 设置储能变流器有功功率为 $-0.7 P_n'$ ；
- g) 改变储能变流器有功功率给定值从 $-0.7 P_n'$ 分别阶跃至 $-0.65 P_n'$ 、 $-0.75 P_n'$ 、 $-0.5 P_n'$ 和 $-0.9 P_n'$ ，阶跃持续时间 $1\text{ s} \sim 1.5\text{ s}$ 后恢复到 $-0.7 P_n'$ ，记录试验过程中储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流；
- h) 设置储能变流器有功功率为 $-P_n'$ ；
- i) 改变储能变流器有功功率给定值从 $-P_n'$ 分别阶跃至 $-0.95 P_n'$ 、 $-1.05 P_n'$ 、 $-0.9 P_n'$ 和 $-1.1 P_n'$ ，阶跃持续时间 $1\text{ s} \sim 1.5\text{ s}$ 后恢复到 $-P_n'$ ，记录试验过程中储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流；
- j) 改变储能变流器有功功率给定值从 $-P_n'$ 阶跃至 P_n' 、阶跃持续时间 $1\text{ s} \sim 1.5\text{ s}$ 后从 P_n' 阶跃至 $-P_n'$ ，阶跃持续时间 $1\text{ s} \sim 1.5\text{ s}$ ，记录试验过程中储能变流器交流端口三相交流电压、三相

交流电流。

注 1：储能变流器放电功率为正，充电功率为负。

注 2： P_n' 为储能变流器额定功率。

6.2.2 无功功率控制测试

无功功率控制测试按照以下步骤进行：

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器，在数模混合仿真程序中设置输出信号；
- b) 设置储能变流器有功功率为 0，无功功率给定值为 0；
- c) 改变储能变流器无功功率给定值从 0 分别阶跃至 $0.1 Q_n'$ 、 $-0.1 Q_n'$ 、 $0.2 Q_n'$ 和 $-0.2 Q_n'$ 的阶跃试验，阶跃持续时间 1 s~1.5 s 后恢复到 0，记录试验过程中储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流。

注 1： Q_n' 为储能变流器额定无功功率，取变流器额定放电有功功率值。

注 2：储能变流器输出容性无功为正，输出感性无功为负。

6.2.3 故障穿越测试

6.2.3.1 低电压穿越测试

低电压穿越测试按照以下步骤进行：

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器，在数模混合仿真程序中设置输出信号；
- b) 设置储能变流器有功功率为 $0.3 P_n'$ ；
- c) 依次进行储能系统箱变高压侧电压跌落至 $0\sim 0.9 U_n'$ 之间的三相故障、两相故障测试，其中至少包括电压跌落至 0 、 $0.2 U_n'$ 、 $0.35 U_n'$ 、 $0.5 U_n'$ 、 $0.75 U_n'$ 和 $0.9 U_n'$ 6 个点的故障测试，按照附录 C 中表 C.1 记录试验过程中的故障电压跌落幅度、故障持续时间、储能变流器交流端口三相交流电压和三相交流电流；
- d) 分别调节储能变流器有功功率为 P_n' 、 $-P_n'$ 、 $-0.3 P_n'$ ，在每个工况点重复步骤 c)；
- e) 设置储能系统箱变高压侧电压为 $1.0 U_n'$ ；
- f) 在测试中按照步长 $0.01 U_n'$ 递减调整储能变流器交流端口电压至 $0.75 U_n'$ ，以储能变流器的低电压穿越标志位或无功功率变化作为低电压穿越进入判据。

注： U_n' 为储能系统箱变高压侧额定电压。

6.2.3.2 高电压穿越测试

高电压穿越测试按照以下步骤进行：

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器，在数模混合仿真程序中设置输出信号；
- b) 设置储能变流器有功功率为 $0.3 P_n'$ ；
- c) 依次进行储能系统箱变高压侧电压升高至 $1.1 U_n'\sim 1.4 U_n'$ 之间的三相故障测试，其中至少包括电压升高至 $1.2 U_n'$ 、 $1.25 U_n'$ 和 $1.3 U_n'$ 3 个点的故障测试，现场测试宜不超过 $1.35 U_n'$ ，按照表 C.2 记录试验过程中的故障电压升高幅度、故障持续时间、储能变流器交流端口三相交流电压和三相交流电流；
- d) 分别调节储能变流器有功功率为 P_n' 、 $-P_n'$ 、 $-0.3 P_n'$ ，在每个工况点重复步骤 c)；
- e) 设置储能系统箱变高压侧电压为 $1.0 U_n'$ ；
- f) 在测试中按照步长 $0.01 U_n'$ 递增调整储能变流器交流端口电压至 $1.15 U_n'$ ，以储能变流器的高

电压穿越标志位或无功功率变化作为高电压穿越进入判据。

6.2.3.3 连续低电压穿越测试

连续低电压穿越测试按照以下步骤进行：

- 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器,在数模混合仿真程序中设置输出信号;
- 设置储能系统箱变高压侧电压为 $1.0 U_n'$;
- 按照图 1 进行储能系统箱变高压侧电压两次连续低电压穿越测试,低压阶段储能系统箱变高压侧电压降至 0,持续时间 Δt_1 宜为 150 ms,过渡阶段时间 Δt_2 宜不大于 100 ms;
- 记录试验过程中的故障电压跌落幅度、故障持续时间、储能变流器交流端口三相交流电压和三相交流电流。

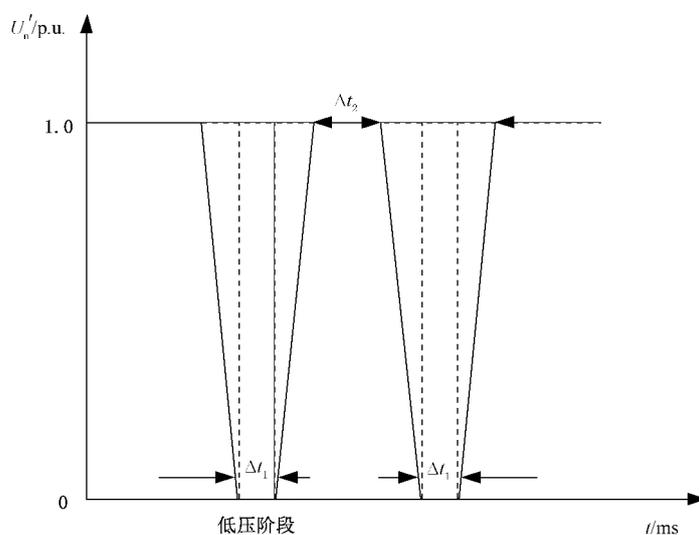


图 1 连续低电压穿越测试故障点电压曲线

6.2.3.4 连续故障穿越测试

连续故障穿越测试按照以下步骤进行：

- 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器,在数模混合仿真程序中设置输出信号;
- 设置储能系统箱变高压侧电压为 $1.0 U_n'$;
- 按照图 2 进行储能系统并网点电压跌落再升高 3 次连续故障穿越测试,低压阶段储能系统箱变高压侧电压降至 0,持续时间 Δt_1 宜为 150 ms,过渡阶段时间 Δt_2 宜不大于 100 ms,高压阶段储能系统箱变高压侧电压升至 $1.3 U_n'$,持续时间 Δt_3 宜为 500 ms;
- 记录试验过程中的故障电压跌落/升高幅度、故障持续时间、储能变流器交流端口三相交流电压和三相交流电流。

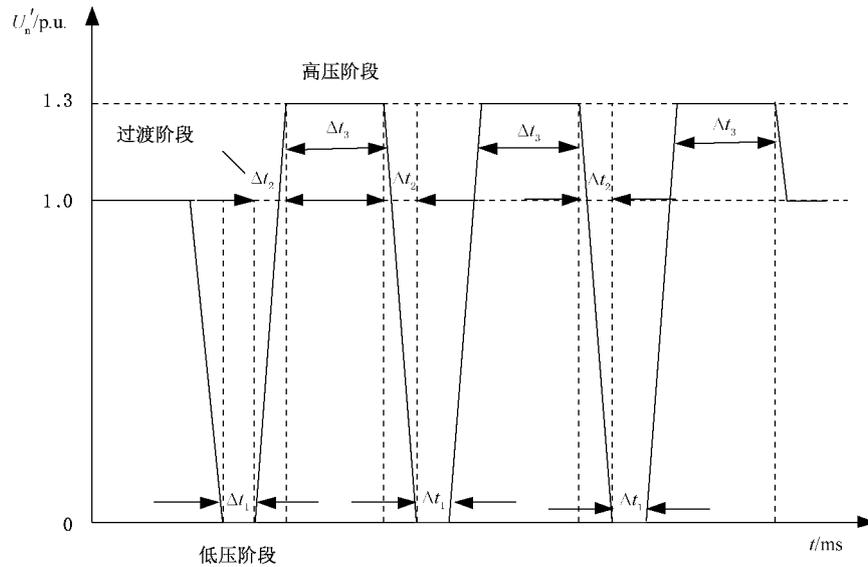


图 2 连续故障穿越测试并网点电压曲线

6.2.4 一次调频测试

一次调频测试按照以下步骤进行：

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器，在数模混合仿真程序中设置输出信号；
- b) 设置储能系统初始有功功率为 $0.2 P_n' \sim 0.5 P_n'$ ；
- c) 投入储能系统一次调频功能；
- d) 调整模拟频率发生器输出频率从 50 Hz 开始，按步长 0.005 Hz 依次增加/减小模拟的频差信号，直至有功功率开始往正确方向规律性调节，记录一次频率偏差死区正值和负值；
- e) 调整模拟频率发生器输出频率从 50 Hz 开始，依次进行 ± 0.05 Hz、 ± 0.15 Hz、 ± 0.2 Hz 的有效频差阶跃，调节稳定后返回至 50 Hz，记录储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流；
- f) 调整模拟频率发生器输出频率从 50 Hz 开始，依次进行 ± 0.25 Hz、 ± 0.35 Hz、 ± 0.5 Hz 的有效频差阶跃，直至有功功率超过限幅值后不再变化，调节稳定后返回至 50 Hz，记录储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流、一次调频增出力限幅值和降出力限幅值；
- g) 分别设置储能电站初始有功功率为 $0.65 P_n' \sim 1.0 P_n'$ 、 $-0.5 P_n' \sim -0.2 P_n'$ 、 $-1.0 P_n' \sim -0.65 P_n'$ ，在每个工况点重复步骤 c)~f)。

6.2.5 惯量响应测试

惯量响应测试按照以下步骤进行：

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器，在数模混合仿真程序中设置输出信号；
- b) 设置储能系统初始有功功率为 $0.2 P_n' \sim 0.5 P_n'$ ；
- c) 投入储能系统惯量响应功能；
- d) 调整模拟频率发生器输出频率从 50 Hz 开始，分别按照 0.02 Hz/s、0.05 Hz/s、0.1 Hz/s 的频率变化率，将模拟频率从 50 Hz 调整至 50.5 Hz，调节稳定后返回至 50 Hz，记录储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流；

- e) 调整模拟频率发生器输出频率从 50 Hz 开始,分别按照 -0.02 Hz/s 、 -0.05 Hz/s 、 -0.1 Hz/s 的频率变化率,将模拟频率从 50 Hz 调整至 48.5 Hz,调节稳定后返回至 50 Hz,记录储能变流器交流端口三相交流电压、三相交流电流;
- f) 分别设置储能电站初始有功功率为 $0.65 P_n'$ 、 $1.0 P_n'$ 、 $-0.5 P_n'$ 、 $-0.2 P_n'$ 、 $-1.0 P_n'$ 、 $-0.65 P_n'$,在每个工况点重复步骤 c)~e)。

6.2.6 电压保护定值测试

电压保护定值测试按照以下步骤进行:

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器,在数模混合仿真程序中设置输出信号;
- b) 设置储能系统箱变高压侧电压为 $1.1 U_n'$;
- c) 按照步长 $0.05 U_n'$ 递增调整储能系统箱变高压侧电压至 $1.4 U_n'$,现场试验时调整储能系统箱变高压侧电压至 $1.35 U_n'$,各个电压点至少保持 60 s,根据储能变流器保护的切除结果,记录每个电压点对应的保护延时定值;
- d) 设置储能系统箱变高压侧电压为 $0.9 U_n'$;
- e) 按照步长 $0.05 U_n'$ 递减调整储能系统箱变高压侧电压至 0,各个电压点至少保持 60 s,根据储能变流器保护的切除结果,记录每个电压点对应的保护延时定值。

6.2.7 频率保护定值测试

频率保护定值测试按照以下步骤进行:

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器,在数模混合仿真程序中设置输出信号;
- b) 设置储能系统箱变高压侧频率为 50 Hz;
- c) 按照步长 0.5 Hz 递增调整储能系统箱变高压侧频率至 55 Hz,各个频率点至少保持 60 s,根据储能变流器保护的切除结果,记录每个频率点对应的保护延时定值;
- d) 设置储能系统箱变高压侧频率为 50 Hz;
- e) 按照步长 0.5 Hz 递减调整储能系统箱变高压侧频率至 45 Hz,各个频率点至少保持 60 s,根据储能变流器保护的切除结果,记录每个频率点对应的保护延时定值。

6.2.8 短路比适应性测试

通过改变等效电源阻抗(应计及变压器阻抗和系统阻抗)进行储能变流器短路比适应性测试验证,测定电磁暂态仿真模型失稳的临界值,确定电磁暂态仿真模型短路比适用范围。短路比适应性测试按照以下步骤进行:

- a) 按照图 B.1 将被测储能系统的储能变流器接入实时仿真器,在数模混合仿真程序中设置输出信号;
- b) 设置储能变流器有功功率为 P_n' ;
- c) 设置储能变流器交流端口短路比为 3.0,按照步长 0.1 递减短路比,在每个短路比工况下进行扰动仿真,仿真系统在扰动后出现失稳(周期振荡或失去同步)状态,记录当前短路比数值为短路比临界值;
- d) 设置储能变流器有功功率为 $-P_n'$;
- e) 重复进行步骤 c)。

6.3 储能系统现场测试

储能系统现场测试按照以下步骤进行：

- a) 按照图 B.2 将数据采集装置接在测试点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上；
- b) 进行储能系统控制系统测试,按照 6.2.1~6.2.5 分别进行有功功率、无功功率、故障穿越、一次调频和惯量响应测试；
- c) 进行储能系统保护系统测试,按照 6.2.6、6.2.7 分别进行电压保护定值和频率保护定值测试。

6.4 储能系统电磁暂态封装模型仿真测试

在电磁暂态仿真软件中基于具有统一接口的电磁暂态封装模型测试,按照以下步骤进行：

- a) 将被测电磁暂态封装模型接入电磁暂态仿真软件中,在程序中设置输出信号；
- b) 进行储能系统控制系统测试,按照 6.2.1~6.2.5 分别进行有功功率、无功功率、故障穿越、一次调频和惯量响应测试；
- c) 进行储能系统保护系统测试,按照 6.2.6、6.2.7 分别进行电压保护定值和频率保护定值测试；
- d) 按照 6.2.8 进行短路比适应性测试。

6.5 储能电站电磁暂态模型仿真测试

在电磁暂态仿真软件中建立基于储能系统电磁暂态封装模型等值的储能电站电磁暂态仿真模型,储能电站模型包含储能系统、集电线、厂站级控制系统、无功补偿装置以及主变压器等模型。储能电站电磁暂态模型仿真测试按照以下步骤进行：

- a) 进行储能电站控制系统测试,按照 6.2.1~6.2.5 分别进行有功功率、无功功率、故障穿越、一次调频和惯量响应测试；
- b) 进行储能电站保护系统测试,按照 6.2.6、6.2.7 分别进行电压保护定值和频率保护定值测试。

6.6 储能电站模型适应性测试验证

6.6.1 多实例运行测试

在电磁仿真软件中,储能电站模型多实例测试按照以下步骤进行：

- a) 搭建含两个以上相互间没有电气联系的储能系统模型的仿真算例；
- b) 在算例中对单个储能系统设置故障,其他储能系统模型正常运行,且故障过程中的响应特性与该储能系统故障时一致；
- c) 包含多个不同类型储能系统的储能电站,在算例中对单个储能电站设置故障,其他储能电站模型正常运行,且故障过程中的响应特性与该储能电站故障时一致。

6.6.2 多环境适应性测试

储能电站模型多环境适应性测试宜分别在 Windows、Linux 等平台按照 6.6.1 完成多实例运行测试。

6.7 模型参数校核

6.7.1 校核原则

电磁暂态仿真模型仿真测试验证的校核原则如下：

- a) 模型验证仿真使用电力系统稳定计算用分析软件；
- b) 模型验证的电气量为基波正序电压、基波正序有功功率、基波正序无功功率、有功电流、无功

电流；

- c) 仿真测试与数模混合仿真模型测试数据采用相同的量纲、时标,时间序列同步。

6.7.2 校核误差

电磁暂态仿真模型仿真测试结果应与数模混合仿真模型测试数据或现场试验数据进行对比,并满足以下误差要求:

- a) 短路比边界值的误差绝对值小于 0.2;
- b) 电压、频率保护定值动作时间的误差绝对值不超过 0.1 s,定值误差绝对值不超过 0.1%;
- c) 无功/电压、有功/频率和惯量响应等阶跃响应误差满足附录 D 中表 D.1 的要求;
- d) 故障穿越响应误差满足附录 E 的要求。

6.8 报告主要内容

报告应包括以下内容:

- a) 储能电站名称、位置、接线拓扑结构、接入电网电压等级和并网点位置等基础参数;
- b) 储能变流器厂家型号、数模混合仿真模型控制器型号、软件版本;
- c) 模型一次电路说明;
- d) 模型控制器说明;
- e) 储能电站和储能系统的电磁暂态模型测试结果,模型仿真结果与数模混合仿真数据或现场实测数据的误差分析;
- f) 结论和建议。

7 机电暂态仿真模型参数测试与验证

7.1 一般规定

7.1.1 储能电站机电暂态仿真模型参数测试包括厂站级控制系统模型参数和储能系统模型参数的测试和辨识。

7.1.2 储能系统的机电暂态仿真模型参数辨识以现场测试数据或数模混合仿真平台测试数据为基础数据。

7.1.3 储能电站厂站级控制系统模型参数辨识以现场测试数据为基础,参数测试在现场运行的控制模式下进行。

7.1.4 储能电站模型参数应采用标么值,并标明基准值,其中功率基准值取储能电站额定功率。

7.2 储能系统模型参数测试

7.2.1 有功功率控制测试

7.2.1.1 测试方法

储能变流器有功功率控制模型结构包含定有功功率控制模式、定有功电流控制模式,现场测试或数模混合仿真测试应在储能变流器正常投入的控制模式下按照 6.2.1 进行。

7.2.1.2 参数辨识

参数辨识按照以下方法进行:

- a) 根据储能变流器定有功功率控制的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能变流器有功功率控制模式的 PID 等控制参数;

- b) 根据储能变流器定有功电流控制的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能变流器定有功电流控制时间常数等控制参数;
- c) 根据 $\pm 0.2 P_n'$ 给定阶跃试验,采用最小二乘法或直接计算法,辨识功率给定值速率限制值或定有功电流控制输出速率限制值,以及控制系统的最大、最小限幅值。

7.2.2 无功功率控制测试

7.2.2.1 测试方法

储能变流器无功功率控制模型结构包含定无功功率控制模式、定功率因数控制模式、定无功电流控制模式、定电压控制模式,现场测试或数模混合仿真测试应在储能变流器正常投入的控制模式下,按照以下步骤进行:

- a) 设置储能变流器初始有功功率为 $0.9 P_n'$;
- b) 定无功功率控制模式/定无功电流控制模式按 6.2.2 进行,记录阶跃试验中储能变流器无功功率给定值、无功电流控制输出指令、三相交流电压、三相交流电流、无功功率等试验波形数据;
- c) 定电压控制模式:设置储能变流器初始电压为 $1.0 U_n'$,改变储能变流器电压给定值,依次进行阶跃量为 $\pm 0.01 U_n'$ 、 $\pm 0.02 U_n'$ 、 $\pm 0.05 U_n'$ 的阶跃试验,阶跃持续时间不小于 15 s,记录阶跃试验中储能变流器无功功率给定值、无功电流控制输出指令、三相交流电压、三相交流电流、无功功率等试验波形数据;
- d) 定功率因数控制模式:分别设置储能变流器功率因数为 1.0、-1.0,按照步长 0.01 改变储能变流器功率因数给定值至出现系统运行限制,每个功率因数点持续时间不小于 30 s,记录阶跃试验中储能变流器无功功率给定值、无功电流控制输出指令、三相交流电压、三相交流电流、无功功率等试验波形数据;
- e) 设置储能变流器初始有功功率为 $-0.9 P_n'$;
- f) 重复进行步骤 b)~d)。

7.2.2.2 参数辨识

参数辨识按照以下方法进行:

- a) 通过储能变流器定无功功率控制给定值阶跃试验的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能变流器定无功功率控制模式的 PID 控制参数;
- b) 通过储能变流器定无功电流控制的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能变流器定无功电流控制时间常数等控制参数;
- c) 通过储能变流器定功率因数控制的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能变流器定功率因数控制环节参数;
- d) 通过储能变流器定电压控制的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能变流器的定电压控制模式 PID 控制参数;
- e) 通过储能变流器 $\pm 0.2 P_n'$ 给定阶跃下的试验数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识功率给定值速率限制值或变流器无功电流控制输出速率限制值,以及控制系统的最大限幅、最小限幅值;
- f) 通过储能变流器 $\pm 0.05 U_n'$ 给定阶跃下的试验数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识定电压控制的最大限幅、最小限幅值;
- g) 对于需要辨识的参数,应选取多组合适的试验数据进行辨识,对多组辨识结果加权平均,确定合适的参数值。

7.2.3 故障穿越测试

7.2.3.1 低电压穿越测试

7.2.3.1.1 测试方法

低电压穿越测试包括储能系统和储能电站的低电压穿越试验,按照以下步骤进行:

- a) 按照图 B.2 将数据采集装置接在测试点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上;
- b) 按照 GB/T 36548 规定的方法开展储能系统低电压穿越现场试验进行,按照 6.2.3.1 开展数模混合仿真测试;
- c) 储能电站低电压穿越试验宜通过电网仿真系统或电网故障模拟发生装置进行,有条件的储能电站应开展人工短路试验,短路故障点宜选在主变低压侧近并网点母线的附近。

7.2.3.1.2 参数辨识

储能系统和储能电站的低电压穿越控制参数辨识按照附录 F 中 F.1 进行。

7.2.3.2 高电压穿越测试

7.2.3.2.1 测试方法

高电压穿越测试包括储能系统和储能电站的高电压穿越试验,按照以下步骤进行:

- a) 按照图 B.2 将数据采集装置接在测试点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上;
- b) 按照 GB/T 36548 规定的方法开展储能系统高电压穿越现场试验进行,按照 6.2.3.2 开展数模混合仿真测试;
- c) 储能电站高电压穿越试验宜通过电网仿真系统或电网故障模拟发生装置进行,故障点宜选在主变低压侧近并网点母线的附近。

7.2.3.2.2 参数辨识

储能系统和储能电站高电压穿越控制参数辨识按照 F.2 进行。

7.3 储能电站控制系统模型参数测试

7.3.1 厂站级有功功率控制

7.3.1.1 测试方法

在现场试验中,厂站级有功功率控制模型参数测试按照以下步骤进行:

- a) 按照图 B.3 将数据采集装置接在测试点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上;
- b) 设置储能电站有功功率为 $0.7 P_n$;
- c) 改变储能电站有功功率给定值从 $0.7 P_n$ 分别阶跃至 $0.65 P_n$ 、 $0.75 P_n$ 、 $0.5 P_n$ 和 $0.9 P_n$,阶跃持续时间 30 s 后恢复到 $0.7 P_n$,记录试验过程中储能电站三相交流电压、三相交流电流;
- d) 设置储能电站有功功率为 P_n ;
- e) 改变储能电站有功功率给定值从 P_n 分别阶跃至 $0.95 P_n$ 、 $1.05 P_n$ 、 $0.9 P_n$ 和 $1.1 P_n$,阶跃持续时间 30 s 后恢复到 P_n ,记录试验过程中储能电站三相交流电压、三相交流电流;
- f) 设置储能电站有功功率为 $-0.7 P_n$;
- g) 改变储能电站有功功率给定值从 $-0.7 P_n$ 分别阶跃至 $-0.65 P_n$ 、 $-0.75 P_n$ 、 $-0.5 P_n$ 和 $-0.9 P_n$,阶跃持续时间 30 s 后恢复到 $-0.7 P_n$,记录试验过程中储能电站三相交流电压、三

相交流电流；

- h) 设置储能电站有功功率为 $-P_n$ ；
- i) 改变储能电站有功功率给定值从 $-P_n$ 分别阶跃至 $-0.95 P_n$ 、 $-1.05 P_n$ 、 $-0.9 P_n$ 和 $-1.1 P_n$ ，阶跃持续时间 30 s 后恢复到 P_n ，记录试验过程中储能电站三相交流电压、三相交流电流；
- j) 按照 GB/T 36548 规定的方法开展储能电站充放电转换试验。

注：储能电站放电功率为正，充电功率为负。

7.3.1.2 参数辨识

参数辨识按照以下方法进行：

- a) 基于多组储能电站有功控制阶跃试验数据，一般采用直接计算法或最小二乘法，辨识厂站有功功率控制系统控制延时及时间常数；
- b) 利用储能电站有功控制阶跃试验中厂站级有功功率控制系统的控制输出模拟量信号、储能电站功率给定、储能电站功率反馈信号，一般采用直接计算法校核厂站级有功功率控制系统有功功率指令分配策略；
- c) 利用储能电站有功控制阶跃试验中厂站级有功功率控制系统的功率给定、厂站有功功率控制指令及有功/无功功率反馈等信号，通过最小二乘法或直接计算法，辨识厂站级有功指令滞后时间、功率给定最大/最小限幅及速率限制值；
- d) 基于储能电站放电转充电试验及充电转放电试验数据，计算储能电站有功功率速率限制值。

7.3.2 厂站级无功功率控制

7.3.2.1 测试方法

厂站级无功功率控制模型结构包含定无功功率控制模式、定电压控制模式、定功率因数控制模式，在现场试验中参数测试应在实际投入的控制模式下，按照以下步骤进行：

- a) 按照图 B.3 将数据采集装置接在测试点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上；
- b) 设置储能电站有功功率为 $0.9 P_n$ ；
- c) 定无功功率控制模式：设置储能电站无功功率为 0，改变储能电站无功功率给定值从 0 分别阶跃至 $0.1 Q_n$ 、 $-0.1 Q_n$ 、 $0.2 Q_n$ 和 $-0.2 Q_n$ ，阶跃持续时间 30 s 后无功功率恢复至 0，记录试验过程中储能电站三相交流电压、三相交流电流、有功功率及无功功率等试验波形数据；
- d) 定电压控制模式：设置储能电站初始电压为 $1.0 U_n$ ，通过改变储能电站电压给定值进行阶跃试验，阶跃量宜在 $\pm(0.001\sim 0.05)U_n$ 之间，阶跃持续时间 Δt 不小于 30 s，记录试验过程中储能电站三相交流电压、三相交流电流、有功功率及无功功率等试验波形数据；
- e) 定功率因数控制模式：分别设置储能电站功率因数为 1.0、-1.0，按照步长 0.01 逐步改变储能电站功率因数给定值直至出现系统运行限制，每个功率因数点持续时间 Δt 不小于 30 s，记录试验过程中储能电站三相交流电压、三相交流电流、有功功率及无功功率等试验波形数据；
- f) 设置储能电站初始有功功率为 $-0.9 P_n$ ；
- g) 重复进行步骤 c)~e)。

注 1： Q_n 为储能电站额定无功功率，取储能电站额定放电有功功率值。

注 2： U_n 为储能电站额定电压，取并网点标称电压。

注 3：储能电站配置有无功补偿装置的，无功补偿装置进行模型参数测试。

7.3.2.2 参数辨识

参数辨识按照以下方法进行：

- a) 选取比较接近的两个无功功率响应曲线作为分析依据，通过储能电站无功控制阶跃试验数

据,采用直接计算法、最小二乘法等辨识方法,辨识厂站无功功率控制系统控制延时及时间常数;

- b) 通过储能电站厂站控制系统定无功功率控制下的厂站级有功功率控制系统控制输出模拟量信号、储能电站功率给定、储能电站功率反馈信号,辨识厂站级无功功率控制系统无功功率指令分配策略以及无功功率给定最大/最小限幅及速率限制值;
- c) 利用储能电站厂站控制系统定电压控制下的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能变流器定电压控制模式的 PID 控制参数;
- d) 利用储能电站厂站控制系统定功率因数控制下的测试数据,采用最小二乘法或直接计算法,辨识储能电站定功率因数控制环节参数。

7.3.3 一次调频及惯量响应控制

7.3.3.1 测试方法

厂站级一次调频及惯量响应控制功能和性能应符合 GB/T 36547 要求,现场试验按照以下步骤进行:

- a) 按照图 B.4 将数据采集装置接在测试点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上;
- b) 设置储能电站初始有功功率为 $0.2 P_n \sim 0.5 P_n$;
- c) 一次调频死区测试:从 0 开始按步长 0.005 Hz 依次增加/减小模拟的频差信号,直至有功功率开始往正确方向规律性调节,记录频率、一次调频控制输出、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据,一次调频沿有功功率上升方向、下降方向动作时刻的频差值为一次频率偏差死区正值和负值;
- d) 一次调频响应动态性能测试:依次进行至少包含 ± 0.05 Hz、 ± 0.15 Hz、 ± 0.2 Hz 的有效频差阶跃,最大有效频差宜不超过 ± 0.25 Hz,频差应持续保持至一次调频功率达到理论值后 30 s,记录储能电站在频率给定值阶跃扰动下频差、一次调频调节量输出、有功功率等;
- e) 一次调频限幅值测试:从小到大改变频差阶跃量,直至有功功率超过限幅值后不再变化,频差阶跃量最大不宜超过 ± 0.5 Hz,记录频率、一次调频控制输出、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据,记录一次调频增出力限幅值和降出力限幅值;
- f) 惯量响应死区测试:从 0 开始按照设定的频率变化率改变频差依次增加/减小模拟的频率信号,直至有功功率开始往正确方向规律性调节,频率变化速率按照当地电网对惯量响应的技术要求确定,试验中记录频率、惯量响应控制输出、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据,惯量响应控制输出沿有功功率上升方向、下降方向动作时刻的频差值为惯量响应偏差死区正值和负值;
- g) 惯量响应动态性能测试:从 0 开始按照设定频率变化率改变频差,依次进行至少包含 ± 0.02 Hz/s、 ± 0.05 Hz/s、 ± 0.1 Hz/s 频率变化率的扰动信号,最大频率变化率宜不超过 ± 0.3 Hz/s,频率扰动至惯量响应控制有功功率达到理论值后 30 s,试验中记录频率、惯量响应控制输出、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据;
- h) 惯量响应限幅值测试:从小到大改变频率扰动信号的变化速率,最大速率宜不超过 ± 0.3 Hz/s,直至有功功率超过某一限制值后不再变化,试验中记录频率、惯量响应控制输出、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据,记录惯量响应增出力限幅值和降出力限幅值;
- i) 分别设置储能电站初始有功功率为 $0.65 P_n \sim 1.0 P_n$ 、 $-0.5 P_n \sim -0.2 P_n$ 、 $-1.0 P_n \sim -0.65 P_n$,在每个工况点重复步骤 c)~h)。

7.3.3.2 参数辨识

参数计算及辨识按照以下方法进行。

- a) 根据响应性能测试的多组试验数据计算得到一次调频滞后时间、上升时间、调节时间的平均值,按照公式(1)计算频率下垂控制因子:

$$D_{up} = \frac{\Delta P_{up}}{\Delta f_{up}}, D_{dn} = \frac{\Delta P_{dn}}{\Delta f_{dn}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- D_{up} 、 D_{dn} ——频率下垂下调控制因子、频率下垂上调控制因子;
- ΔP_{up} 、 ΔP_{dn} ——分别为对应的一次调频有功功率上升方向和下降方向调节量;
- Δf_{up} 、 Δf_{dn} ——一次调频沿有功功率上升方向、下降方向动作的有效频差值。

- b) 根据测试结果,计算惯量响应时间常数。

7.4 模型参数校核

7.4.1 模型建立

基于 GB/T 42716 中储能电站机电暂态仿真模型及参数辨识结果建立储能电站机电暂态仿真模型,在电力系统稳定计算用分析软件中开展模型参数校核仿真。

7.4.2 校核原则

储能电站机电暂态仿真模型参数校核原则如下:

- a) 储能电站模型验证包括电压、电流、有功功率、无功功率,储能变流器模型验证包括电压和基波正序分量的有功功率、无功功率、有功电流、无功电流;
- b) 模型验证中网侧扰动试验验证过程时间包含扰动发生前 2 s 到扰动消除后有功功率恢复到稳定运行后 2 s;
- c) 模型验证中控制指令试验验证过程时间包含控制指令下达前 2 s 到功率达到稳定运行后 10 s;
- d) 仿真数据与试验数据采用相同的量纲、时标,时间序列需同步。

7.4.3 校核误差

机电暂态仿真模型仿真测试结果应与数模混合仿真模型测试数据或现场试验数据进行对比,并满足以下误差要求:

- a) 无功/电压、有功/频率和惯量响应等阶跃响应误差满足附录 D 中表 D.1 的要求;
- b) 故障穿越响应误差满足附录 E 的要求。

7.5 报告主要内容

机电暂态仿真模型参数测试报告应包含以下内容:

- a) 储能电站名称、位置、接线拓扑结构、并入电网电压等级和并网位置等基础参数;
- b) 模型控制器参数说明,包括传递函数框图和框图中所有参数的取值、基准值等;
- c) 模型参数测试试验结果;
- d) 储能系统及储能电站的机电暂态模型仿真结果与数模混合模型仿真结果或现场实测数据的误差分析;
- e) 结论和建议。

8 中长期动态仿真模型参数测试与验证

8.1 一般规定

8.1.1 储能电站中长期动态仿真模型在机电暂态仿真模型的基础上,增加电池中长期动态仿真模型,储能电站二次调频模型。

8.1.2 储能电池中长期动态仿真模型参数可采用电池厂家提供的参数或依据厂家提供数据通过拟合获得模型中的参数。

8.1.3 储能电站二次调频模型参数辨识以现场试验数据为基础数据。

8.2 储能电站二次调频模型参数测试

8.2.1 储能电站二次调频模型参数现场测试按照以下步骤进行:

- a) 核对调度侧与储能电站侧自动发电控制(AGC)系统间的信息通道正常;
- b) 数据采集装置接在测试点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上,见图 B.2;
- c) 改变储能电站 AGC 有功调节指令,进行阶跃量为 $\pm 0.05 P_n$ 的有功功率指令阶跃试验;
- d) 记录试验过程中的 AGC 调节指令、厂站有功功率曲线、储能变流器有功功率指令、储能变流器有功功率等数据。

8.2.2 储能电站二次调频模型中死区、限幅等控制参数可采用现场设定值,模型中的反向延迟时间、调节步长等参数可根据实测曲线计算得出。

8.3 模型参数校核

8.3.1 基于储能电站机电暂态仿真模型参数、电池中长期动态仿真模型参数及二次调频模型参数建立储能电站中长期动态仿真模型。

8.3.2 储能电站中长期动态仿真模型参数仿真校核应与 AGC 有功功率指令阶跃试验中储能电站有功功率实测曲线对比。

8.3.3 储能电站 AGC 有功功率仿真曲线与实测曲线最大误差值应不大于 3%额定有功功率且不大于 10%有功功率指令阶跃值。

8.4 报告主要内容

中长期动态仿真模型参数测试报告应包含以下内容:

- a) 储能电站名称、位置、接线拓扑结构、并入电网电压等级和并网位置等基础参数;
- b) 模型控制器参数说明,包括传递函数框图和框图中所有参数的取值、基准值等;
- c) 储能电站二次调频测试结果和参数;
- d) 储能电站中长期动态仿真模型参数仿真结果和误差分析;
- e) 结论和建议。

附 录 A
(资料性)
储能电站测试收集资料

A.1 储能变流器技术参数

储能电站储能变流器技术参数见表 A.1, 升压变压器技术参数见表 A.2。

表 A.1 储能变流器技术参数

序号	名称	内容
1	厂家	
2	型号	
3	额定功率	
4	过载能力	
5	电网额定电压	
6	额定交流电流	
7	电网额定频率	
8	功率因数可调范围	
9	无功功率响应时间	
10	功率控制精度	
11	是否具备低电压穿越功能	
12	是否具备高电压穿越功能	
13	是否具备防孤岛保护功能	
14	是否具备交流过流/短路保护功能	
15	是否具备交流过压/欠压保护功能	
16	是否具备交流过频/欠频保护功能	
17	功率响应速度	
18	充放电转换时间	
19	允许交流电压波动范围	
20	瞬时过流保护定值	

表 A.2 升压变压器技术参数

生产厂家				
型号			设备编号	
额定容量 kVA	原边(高) S_T		额定电压 kV	原边(高) V_N
	副边 1(中) S_{T1}			副边 1(中) V_{N1}
	副边 2(低) S_{T2}			副边 2(低) V_{N2}
目前运行档位			联接组别、接地方式	
			接地电阻/电抗值/ Ω	
短路阻抗 %	原-副(全穿) X_S		空载电流 I_0 %	
	原-副 1(半穿) X_{S12}			
	原-副 2(半穿) X_{S13}			
	副 1-副 2 X_{S23}			
短路损耗 kW	原-副(全穿) P_S		空载损耗 P_0 kW	
	原-副 1(半穿) P_{S12}			
	原-副 2(半穿) P_{S13}			
	副 1-副 2 P_{S23}			

A.2 控制保护参数

对称故障和不对称故障时故障穿越控制动作判据、无功控制策略表达式、有功控制策略表达式见表 A.3;储能电站频率/电压保护参数见表 A.4。

表 A.3 故障穿越控制逻辑及参数

一、对称故障	
(1)进入低电压穿越判断条件	
(2)退出低电压穿越判断条件	
(3)低电压穿越期间的有功、无功控制策略	
(4)进入高电压穿越判断条件	
(5)退出高电压穿越判断条件	
(6)高电压穿越期间的有功、无功控制策略	
二、不对称故障	
(1)进入低电压穿越判断条件	
(2)退出低电压穿越判断条件	
(3)低电压穿越期间的有功、无功控制策略	
(4)进入高电压穿越判断条件	
(5)退出高电压穿越判断条件	
(6)高电压穿越期间的有功、无功控制策略	

表 A.4 频率/电压保护参数

控保参数	数值
额定功率因数	
高频保护定值区间(p.u.)	
高频保护延时区间	
低频保护定值区间(p.u.)	
低频保护延时区间	
高电压保护定值区间(p.u.)	
高电压保护延时区间	
低电压保护定值区间(p.u.)	
低电压保护延时区间(p.u.)	
无功控制模式(无功功率控制模式、定功率因数控制模式、定无功电流控制模式、定电压控制模式)	
其他频率保护	
其他电压保护	

附录 B
(规范性)
储能电站模型参数测试接线

B.1 储能系统数模混合仿真测试

以储能系统为对象进行测试时,将储能变流器与实时仿真器相连,接线见图 B.1。

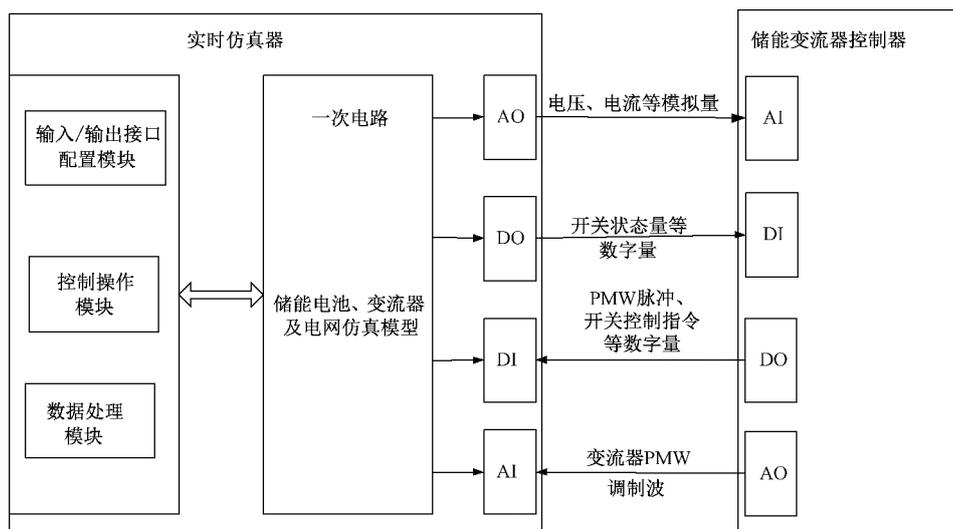
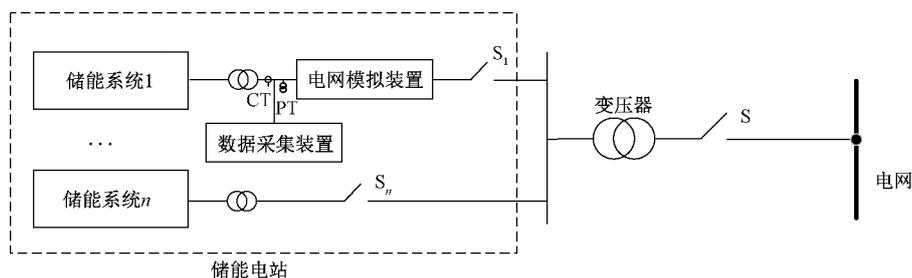


图 B.1 储能系统数模混合仿真测试接线示意图

B.2 储能系统接入电网测试接线

以储能系统为对象进行测试时,将电网模拟装置与被测储能系统串联,并与电网相连,数据采集装置接在被测系统变压器高压侧的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上,接线见图 B.2。



注 1: S_1, \dots, S_n , 表示储能系统的并网开关。

注 2: S 表示储能电站并网开关。

图 B.2 储能系统接入电网测试接线示意图

B.3 储能电站接入电网测试接线

以储能电站为对象进行测试时,数据采集装置接在并网点或公共连接点的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上,接线见图 B.3。

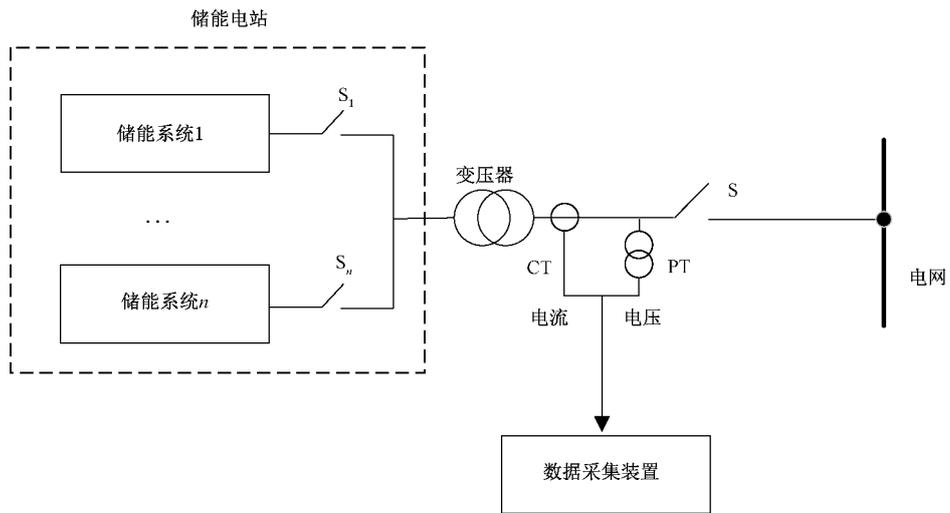


图 B.3 储能电站接入电网测试接线示意图

B.4 储能电站采用频率信号发生装置测试接线

以储能电站为对象,进行一次调频或者惯量响应测试时,数据采集装置接在并网点或公共连接点电压互感器(PT)和电流互感器(CT)上,频率信号发生装置与储能电站监控系统相连,接线见图 B.4。

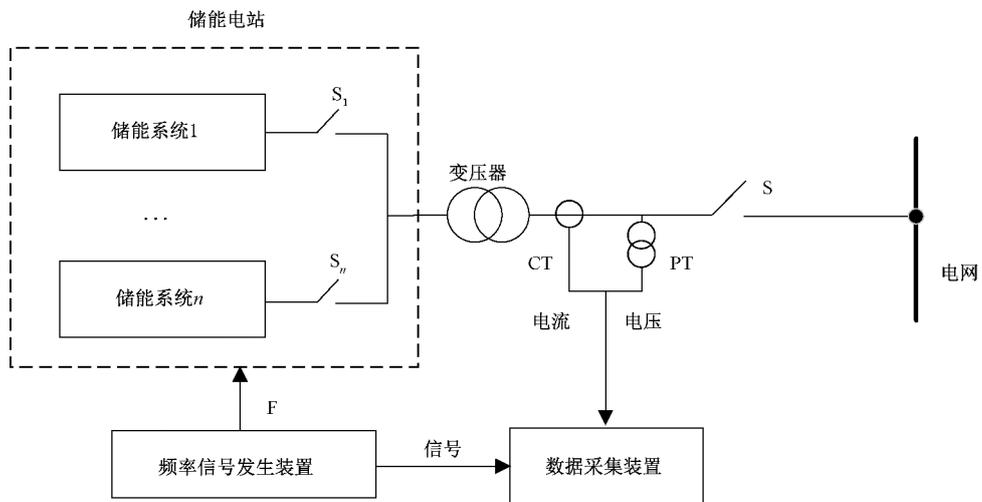


图 B.4 储能电站采用频率信号发生装置测试接线示意图

附录 C
(规范性)
故障穿越测试要求

C.1 低电压穿越特性测试要求

低电压穿越特性测试要求见表 C.1。

表 C.1 低电压穿越特性测试要求

序号	故障点线电压 p.u.	初始功率	故障时间 s	故障类型
1	0.0	小功率/大功率	0.1/0.15	三相、两相
2	0.1	小功率/大功率	0.1	三相、两相
3	0.2	小功率/大功率	0.1/0.625	三相、两相
4	0.3	小功率/大功率	0.1	三相、两相
5	0.35	小功率/大功率	0.912	三相、两相
6	0.4	小功率/大功率	0.1	三相、两相
7	0.5	小功率/大功率	0.1/1.21	三相、两相
8	0.6	小功率/大功率	0.1	三相、两相
9	0.7	小功率/大功率	0.1	三相、两相
10	0.75	小功率/大功率	1.721	三相、两相
11	0.8	小功率/大功率	0.1	三相、两相
12	0.9	小功率/大功率	2.0	三相、两相

C.2 高电压穿越特性测试要求

高电压穿越特性测试要求见表 C.2。

表 C.2 高电压穿越特性测试要求

序号	故障点线电压 p.u.	初始功率	故障时间 s	故障类型
1	1.1	小功率/大功率	10	三相
2	1.15	小功率/大功率	10	三相
3	1.2	小功率/大功率	10	三相
4	1.25	小功率/大功率	1	三相
5	1.3	小功率/大功率	0.5	三相

表 C.2 高电压穿越特性测试要求（续）

序号	故障点线电压 p.u.	初始功率	故障时间 s	故障类型
6	1.35	小功率/大功率	0.1	三相
7	1.4	小功率/大功率	0.1	三相

附录 D
(规范性)
阶跃响应仿真误差要求

阶跃响应的控制特性应按图 D.1 所示的曲线进行指标量化,仿真与实测的偏差允许值应满足表 D.1 要求。

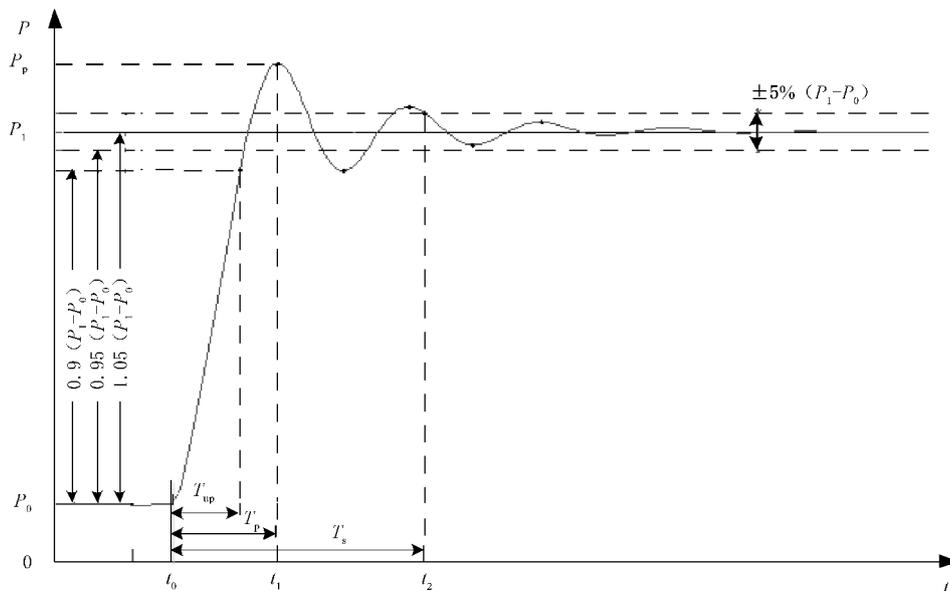


图 D.1 阶跃响应特性示意曲线

阶跃响应特性定义如下:

- 上升时间(T_{up}):阶跃试验中,从阶跃量加入开始到被控量变化至 90%阶跃量所需时间;
- 峰值时间(T_p):阶跃试验中,从阶跃量加入开始到被控量达到最大值所需时间;
- 稳定时间(T_s):从起始时间开始,到被控量与最终稳态值之差的绝对值始终不超过 5%阶跃量的最短时间;
- 超调量(M_p):阶跃试验中,被控量的最大值与最终稳态值的差值与阶跃量之比的百分数。

表 D.1 偏差允许值

参数	实测/数模混合 仿真结果	电磁暂态封装/机 电暂态仿真结果	偏差	允许偏差
超调量(M_p)				$\pm 10\%$
上升时间(T_{up})				± 0.1 s
峰值时间(T_p)				± 0.2 s
稳定时间(T_s)				± 1 s

附录 E
(规范性)
故障穿越仿真误差要求

E.1 扰动过程区段划分

E.1.1 网侧电压扰动过程区段划分

以测试电压数据为依据,将试验与仿真的数据序列分为 A(扰动前)、B(扰动期间)、C(扰动后)3 个时段,见图 E.1,具体划分如下:

- a) 电压跌落前 1 s 为 A 时段开始;
- b) 电压跌落至 $0.9U_n$ 时刻为 A 时段结束,B 时段开始;
- c) 故障清除的开始时刻为 B 时段结束、C 时段开始;
- d) 故障清除后,有功功率开始稳定输出后的 1 s 为 C 时段结束。

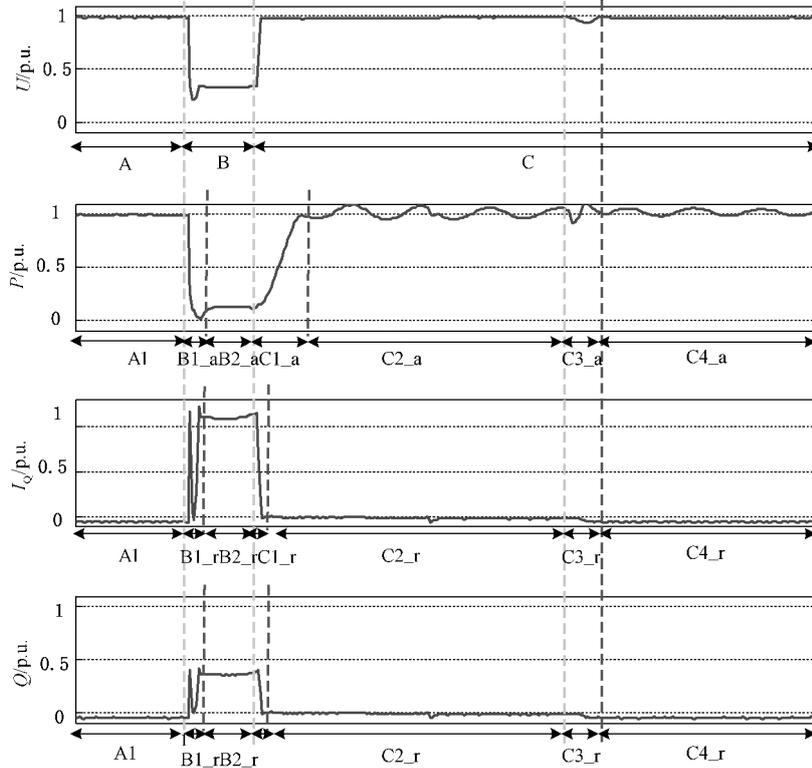


图 E.1 验证过程分区

E.1.2 有功、无功响应特性过程区段划分

以有功功率和无功功率的响应测试数据为依据,将 B、C 时段分为暂态区间和稳态区间,其中 B 时段分为 B1(暂态)和 B2(稳态)区间,C 时段分为 C1(暂态)和 C2(稳态)区间,见图 E.1。

E.2 偏差计算

E.2.1 通过计算模型仿真数据与试验数据之间的偏差,考核模型的准确程度。仿真与试验偏差计算的

电气量包括：电压 U_S 、电流 I 、无功电流 I_Q 、有功功率 P 、无功功率 Q 。

E.2.2 数据区段划分后，分别计算每个时段暂态和稳态区间的偏差；各时段暂态区间仅计算平均偏差，稳态区间分别计算平均偏差和最大偏差；计算模型仿真与试验数据的加权平均总偏差。

E.2.3 平均偏差与最大偏差按以下方法计算：

- a) 稳态区间的平均偏差 F_1 ——模型仿真与试验数据在稳态区间内偏差的算术平均值，见式(E.1)。

$$F_1 = \left| \frac{1}{K_{S_End} - K_{S_Start} + 1} \sum_{i=K_{S_Start}}^{K_{S_End}} X_S(i) - \frac{1}{K_{M_End} - K_{M_Start} + 1} \sum_{i=K_{M_Start}}^{K_{M_End}} X_M(i) \right| \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

K_{S_Start}, K_{S_End} ——计算误差区间内模型仿真数据的第一个和最后一个序号；

X_S ——待考核电气量的模型仿真数据标么值；

K_{M_Start}, K_{M_End} ——计算误差区间内试验数据的第一个和最后一个序号；

X_M ——待考核电气量的试验数据的标么值。

- b) 暂态区间的平均偏差 F_2 ——模型仿真与试验数据在暂态区间内偏差的算术平均值，见式(E.2)。

$$F_2 = \left| \frac{1}{K_{S_End} - K_{S_Start} + 1} \sum_{i=K_{S_Start}}^{K_{S_End}} X_S(i) - \frac{1}{K_{M_End} - K_{M_Start} + 1} \sum_{i=K_{M_Start}}^{K_{M_End}} X_M(i) \right| \dots\dots\dots (E.2)$$

- c) 稳态区间的最大偏差 F_3 ——模型仿真与试验数据在稳态区间的偏差的最大值，见式(E.3)。

$$F_3 = \max_{i=K_{M_Start} \dots K_{M_End}} (|X_S(i) - X_M(i)|) \dots\dots\dots (E.3)$$

E.2.4 将各时段的平均偏差进行加权平均计算：

- a) 网侧扰动试验各时段权值：
——A(扰动前)：10%；
——B(扰动期间)：60%；
——C(扰动后)：30%；
- b) 有功、无功控制试验各时段权值：
——A(指令阶跃前)：30%；
——B(指令阶跃后)：70%。

E.3 验证结果评价

E.3.1 网侧扰动试验，偏差计算结果应满足以下要求：

- a) 所有工况的储能系统升压变高压侧电压各偏差不大于表 E.1 中的电压偏差最大允许值；
- b) 所有工况稳态和暂态区间的电流、无功电流、有功功率和无功功率的平均偏差、稳态区间的最大偏差以及加权平均总偏差不大于表 E.1 中的偏差最大允许值；
- c) 对于两相不对称扰动工况下的模型仿真验证，基波正序分量的最大允许偏差值为表 E.1 数值的 1.5 倍。

表 E.1 允许最大偏差值

电气参数	稳态区间平均偏差 允许值($F_{1\max}$)	暂态区间平均偏差 允许值($F_{2\max}$)	稳态区间最大偏差 允许值($F_{3\max}$)	所有区间加权平均总偏 差允许值($F_{G\max}$)
电压偏差($\Delta U_s/U_n$)	0.02	0.05	0.05	0.05
有功电流($\Delta I_d/I_n$)	0.10	0.20	0.15	0.15
无功电流($\Delta I_q/I_n$)	0.10	0.20	0.15	0.15
有功功率($\Delta P/P_n$)	0.10	0.20	0.15	0.15
无功功率($\Delta Q/P_n$)	0.10	0.20	0.15	0.15

E.3.2 有功控制试验的有功功率和电流各项偏差应不大于表 E.1 中的最大允许偏差。无功控制试验的无功功率和电流各项偏差应不大于表 E.1 中的最大允许偏差。

附录 F

(规范性)

故障穿越控制参数计算及辨识方法

F.1 低电压穿越控制参数计算及辨识方法

低电压穿越的控制参数通过拟合故障稳态期间有功/无功电流与电压之间的关系曲线进行计算及辨识,按照以下步骤进行。

- a) 低电压穿越期间无功电流控制策略根据公式(F.1)进行参数辨识,其中已知量包括 $I_{\text{qcmd_HLVRT}}$ 、 I_{q0} 、 U_{Lin} 、 U_{t} ,待辨识参数包括 $K_{1_Iq_LV}$ 、 $K_{2_Iq_LV}$ 、 $I_{\text{qset_LV}}$,选取多组无功电流与电压关系试验数据,利用最小二乘法进行线性回归分析辨识。

$$I_{\text{qcmd_HLVRT}} = K_{1_Iq_LV} \times (U_{\text{Lin}} - U_{\text{t}}) + K_{2_Iq_LV} \times I_{\text{q0}} + I_{\text{qset_LV}} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

$K_{1_Iq_LV}$ ——无功电流计算系数 1;

U_{Lin} ——进入低电压穿越阈值;

U_{t} ——端电压幅值;

$K_{2_Iq_LV}$ ——无功电流计算系数 2;

I_{q0} ——初始无功电流;

$I_{\text{qset_LV}}$ ——无功电流计算系数 3。

- b) 低电压穿越期间有功电流控制策略根据公式(F.2)进行参数辨识,其中已知量包括 $I_{\text{pcmd_HLVRT}}$ 、 I_{p0} 、 U_{t} ,待辨识参数包括 $K_{1_Ip_LV}$ 、 $K_{2_Ip_LV}$ 、 $I_{\text{pset_LV}}$,选取多组有功电流与电压关系试验数据,利用最小二乘法进行线性回归分析辨识。

$$I_{\text{pcmd_HLVRT}} = K_{1_Ip_LV} \times U_{\text{t}} + K_{2_Ip_LV} \times I_{\text{p0}} + I_{\text{pset_LV}} \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

$K_{1_Ip_LV}$ ——有功电流计算系数 1;

U_{t} ——端电压幅值;

$K_{2_Ip_LV}$ ——有功电流计算系数 2;

I_{p0} ——初始有功电流;

$I_{\text{pset_LV}}$ ——有功电流计算系数 3。

F.2 高电压穿越期间控制参数计算及辨识方法

高电压穿越的控制参数通过拟合故障稳态期间有功/无功电流与电压之间的关系曲线进行计算及辨识,按照以下步骤进行。

- a) 高电压穿越期间无功电流控制策略根据公式(F.3)进行参数辨识,其中已知量包括 $I_{\text{qcmd_HLVRT}}$ 、 I_{q0} 、 U_{Hin} 、 U_{t} ,待辨识参数包括 $K_{1_Iq_HV}$ 、 $K_{2_Iq_HV}$ 、 $I_{\text{qset_HV}}$,选取多组无功电流与电压关系试验数据,利用最小二乘法进行线性回归分析辨识。

$$I_{\text{qcmd_HLVRT}} = K_{1_Iq_HV} \times (U_{\text{Hin}} - U_{\text{t}}) + K_{2_Iq_HV} \times I_{\text{q0}} + I_{\text{qset_HV}} \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

$K_{1_Iq_HV}$ ——无功电流计算系数 1;

U_{Hin} ——进入高电压穿越阈值;

- U_t ——端电压幅值；
- $K_{2_Iq_HV}$ ——无功电流计算系数 2；
- I_{q0} ——初始无功电流；
- I_{qset_HV} ——无功电流计算系数 3。

b) 高电压穿越期间有功电流控制策略根据公式(F.4)进行参数辨识,其中已知量包括 I_{pcmd_HLVRT} 、 I_{p0} 、 U_t ,待辨识参数包括 $K_{1_Ip_HV}$ 、 $K_{2_Ip_HV}$ 、 I_{pset_HV} ,选取多组有功电流与电压关系试验数据,利用最小二乘法进行线性回归分析辨识。

$$I_{pcmd_HLVRT} = K_{1_Ip_HV} \times U_t + K_{2_Ip_HV} \times I_{p0} + I_{pset_HV} \dots\dots\dots (F.4)$$

式中:

- $K_{1_Ip_HV}$ ——有功电流计算系数 1；
- U_t ——端电压幅值；
- $K_{2_Ip_HV}$ ——有功电流计算系数 2；
- I_{p0} ——初始有功电流；
- I_{pset_HV} ——有功电流计算系数 3。

参 考 文 献

- [1] GB 38755—2019 电力系统安全稳定导则
-