



中华人民共和国国家标准

GB/T ×××××—201X

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

（征求意见稿）

20XX — XX — XX 发布

20XX — XX — XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

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 2

5 试验条件 2

6 电磁暂态模型测试验证 3

7 机电暂态模型参数测试 6

8 中长期动态仿真模型参数测试 9

附录 A （资料性） 储能电站收资文档..... 11

附录 B （资料性） 低/高穿测试工况列表..... 14

附录 C （资料性） 储能电站机电暂态仿真模型结构..... 16

附录 D （资料性） 现场低穿、高穿测试示意图..... 18

附录 E （资料性） 低穿、高穿控制参数计算及辨识方法..... 19

附录 F （资料性） 低穿/高穿仿真误差要求..... 21

附录 G （资料性） 储能电站中长期动态仿真模型结构..... 24

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：XXXX。

本文件主要起草人：XXXX。

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的模型参数测试条件、电磁暂态模型验证、机电暂态模型参数测试、中长期动态模型参数测试等技术要求。

本文件适用于接入10（6）kV及以上电压等级电力系统的电化学储能电站，接入其他电压等级的电化学储能电站可参照执行。

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 34120 电化学储能系统储能变流器技术规范
GB/T 34133 储能变流器检测技术规程
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 36558 电化学储能系统通用技术条件
GB 38755 电力系统安全稳定导则
GB 38969 电力系统技术导则
GB/T 40595 并网电源一次调频技术规定及试验导则
DL/T 2528 电力储能基本术语

3 术语和定义

DL/T 2528 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电化学储能电站 electrochemical energy storage station

电能存储采用电化学储能介质的储能电站。电化学储能类型主要包括：锂离子电池储能、铅酸/铅碳电池储能、液流电池储能、钠离子电池储能、钠硫电池储能、燃料电池储能等。

[来源：DL/T 2528-2022, 3.2.1.1]

3.2

电磁暂态模型 electromagnetic simulation model

用于电力系统电磁暂态过程仿真的模型，主要反映电力系统各元件从微秒到数秒之间的动态特性。

3.3

数模混合仿真模型 digital-analog hybrid simulation model

将一次电路的数字模型与变流器控制保护物理设备通过软硬件接口连接实现硬件在环的实时仿真系统模型。

3.4

电磁暂态封装模型 electromagnetic transient packaging model

一次电路和控制系统均采用数字模型，并且控制系统模型由物理控制器内部程序改造封装形成，可直接被仿真程序调用的电磁暂态仿真模型。

3.5

机电暂态仿真模型 electromechanical transient simulation model

用于电力系统机电仿真程序的模型，主要反映电力系统各元件从几个周波到数十秒的动态特性。

3.6

中长期动态仿真模型 mid-long term dynamic simulation model

用于电力系统长期动态过程仿真的模型，主要反映电力系统各元件从数十秒至数十分钟动态特性。

3.7

统一接口 unified application programming interfaces

一组从接口形式上完全一致的封装储能单元程序的函数。

注：经过统一接口封装的储能单元模型，可以被不同的电磁暂态仿真软件（包括ADPSS、HYPERSIM、MATLAB、RT-LAB、PSCAD、PSMODEL）调用。

3.8

短路比 short circuit ratio

电力电子设备并网母线的短路容量与设备额定容量的比值。

3.9

厂站级控制系统 power station control system

电化学储能发电站内基于通信的控制系统，可接受来自调度或操作人员的指令，根据并网点电气量调整电化学储能电站的运行状态，使得电化学储能电站在并网点处可被视为单一发电机。

4 总体要求

4.1 电化学储能电站参数测试应包括电磁暂态、机电暂态和中长期动态三类模型参数测试、辨识和校核验证，模型参数应适用于 GB/T** 《电化学储能电站建模导则》。

4.2 同厂商、同容量且采用同型号变流器的储能单元应至少完成一台次的模型参数测试工作。

4.3 因软件升级、参数优化等导致储能单元的低电压穿越（以下简称“低穿”）/高电压穿越（以下简称“高穿”）、电压频率保护、无功/电压、有功/频率和惯量控制等涉网性能发生变化时，应重新进行电化学储能电站模型参数测试工作。

4.4 电化学储能电站模型应定期进行模型参数测试及验证复核试验，复核周期不宜超过 5 年。

5 试验条件

5.1 电化学储能电站应按照 GB/T 36548 完成相关测试，测试结果满足 GB/T 36547 的相关规定。

5.2 电化学储能电站储能变流器控制系统及厂站级控制系统应具备能供第三方进行参数测试所需要的储能电站有功功率给定、无功功率给定、功率因素给定等模拟量输出接口，能输入模拟量信号进行测试，储能单元应配备专用变流器有功功率给定、无功功率给定、功率因素给定等模拟量输出通道，模拟量通道的输出数据的刷新频率应大于 50Hz。

5.3 制造商提供的电磁暂态封装模型应按照统一接口的规范进行封装。

5.4 数模混合仿真器应满足以下要求：

- 仿真器应具有满足试验要求的电力系统和控制系统模型库， $2\mu\text{s}$ 小步长仿真规模应大于 64 节点， $50\mu\text{s}$ 电磁暂态仿真规模应大于 800 节点；
- 仿真器中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 $2\mu\text{s}$ ；
- 仿真器应具备输入/输出量通道及信号自定义功能，模拟量输入/输出通道不少于 32 个，数字量输入/输出通道不少于 32 个；
- 仿真器应具备自定义功能框（UD）搭建功能，用于输入/输出信号的计算和转换。

- 5.5 试验前应收集以下技术参数和控制保护策略的数据资料：
- a) 储能变流器技术参数见附录 A 中表 A.1；
 - b) 箱变技术参数见附录 A 中表 A.2；
 - c) 低穿/高穿控制动作判据、无功控制策略表达式、有功控制策略表达式，对称故障和不对称故障的区分判据、低穿/高穿电流限幅值的表达式、连续故障穿越控制逻辑，见附录 A 中表 A.3；
 - d) 无功/电压、有功/频率和惯量控制逻辑；
 - e) 储能电站涉网保护参数见附录 A 中表 A.4。
- 5.6 现场试验测试设备应满足以下要求：
- a) 数据采集装置的采样频率不应小于 10kHz，频率测量精度应达到 0.01Hz；
 - b) 测试设备精度应要求满足表 1 的规定。

表 1 测试设备精度要求

设备仪器	精度要求
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

6 电磁暂态模型测试验证

6.1 一般规定

- 6.1.1 电磁暂态模型可采用制造商提供的电磁暂态封装模型。
- 6.1.2 电磁暂态模型测试验证应包含控制系统测试验证、保护系统测试验证、短路比适应性测试验证和模型适应性测试验证。
- 6.1.3 电磁暂态模型测试验证应以数模混合仿真模型测试数据或现场实测数据为基准。

6.2 储能单元控制系统测试验证

6.2.1 有功功率控制测试

有功功率控制测试按以下步骤进行：

- a) 设置初始有功功率为 0；
- b) 按照图 1 所示，改变有功功率给定值，逐级调节至 $-0.25 P_n$ 、 $0.25 P_n$ 、 $-0.5 P_n$ 、 $0.5 P_n$ 、 $-0.75 P_n$ 、 $0.75 P_n$ 、 $-P_n$ 、 P_n 、 $-P_n$ 、 $0.75 P_n$ 、 $-0.75 P_n$ 、 $0.5 P_n$ 、 $-0.5 P_n$ 、 $0.25 P_n$ 、 $-0.25 P_n$ ，各个功率点保持至少 30s，记录试验数据。

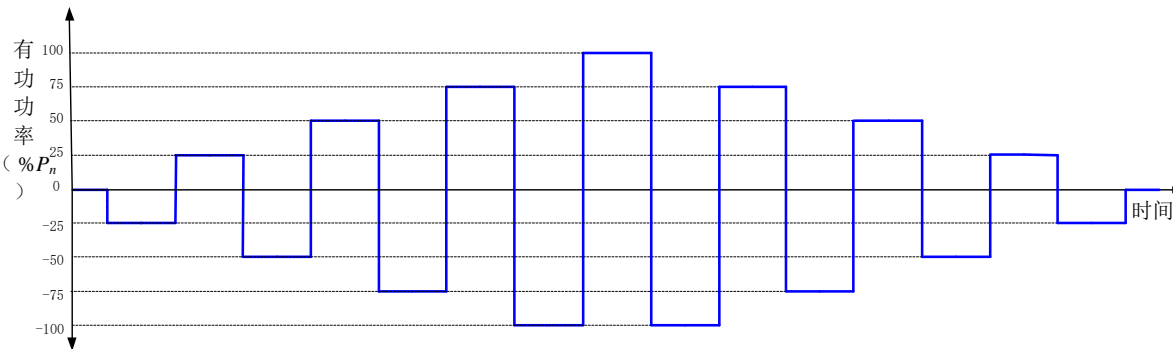


图 1 有功功率测试曲线

注 1：储能单元放电功率为正， P_n 为储能变流器额定放电有功功率。
注 2：储能单元充电功率为负， $-P_n$ 为储能变流器额定充电有功功率。

6.2.2 无功功率控制测试

无功功率控制测试按以下步骤进行：

- a) 设置有功功率初始值为 0，无功功率给定值为 0；

- b) 按照图 3 所示, 改变无功功率给定值, 逐级调节至 $-0.5Q_n$ 、 $-Q_n$ 、 0 、 $0.5Q_n$ 、 Q_n 、 0 , 各个功率点保持至少 30s, 记录试验数据。

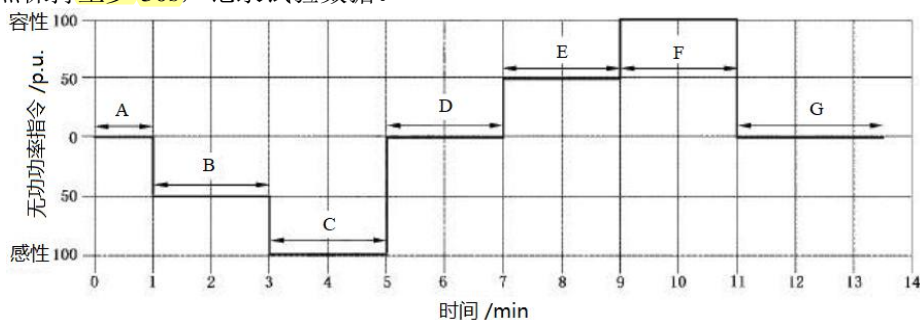


图2 定无功功率控制模式测试曲线

注 1: Q_n 为储能变流器在有功功率为 0 时可输出的最大无功功率设计值。

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 低电压穿越测试

低电压穿越测试按以下步骤进行:

- 设置有功功率初始值为 $0.3P_n$;
- 依次进行 35kV 母线电压跌落幅度在 $0 \sim 0.9U_n$ 之间三相故障、两相故障测试, 各项测试中的故障电压跌落幅度及故障持续时间应按照附录 B 中表 B.1, 记录试验数据;
- 分别调节有功功率初始值为 P_n 、 $-P_n$ 、 $-0.3P_n$, 在每个工况点重复步骤 b);
- 设置储能单元机端电压为 $1.0U_n$;
- 按照间隔值 $0.01U_n$ 逐级向下进行电压阶跃测试, 调整机端电压至 $0.75U_n$, 以储能控制器的低穿标志位和无功功率变化为作为低穿进入判据。

6.2.4 高电压穿越测试

高电压穿越测试按以下步骤进行:

- 设置有功功率初始值为 $0.3P_n$;
- 依次进行 35kV 母线电压升高幅度在 $1.1 \sim 1.4U_n$ 之间的三相故障测试, 各项测试中的故障电压升高幅度及故障持续时间应按照附录 B 中表 B.2, 记录试验数据。
- 分别调节有功功率初始值为 P_n 、 $-P_n$ 、 $-0.3P_n$, 在每个工况点重复程序 b);
- 设置储能单元机端电压为 $1.0U_n$;
- 按照间隔值 $0.01U_n$ 逐级向上进行电压阶跃测试, 调整机端电压至 $1.15U_n$, 以储能控制器的高穿标志位和无功功率变化为作为高穿进入判据。

6.2.5 连续故障穿越测试

连续故障穿越测试按以下步骤进行:

- 设置储能单元机端电压为 $1.0U_n$;
- 按照图 4 所示, 进行 35kV 母线电压跌落再升高连续故障测试, 低压阶段机端电压降至 $0.3U_n$, 持续时间 Δt_1 宜为 100ms、过渡阶段时间 Δt_2 宜为 150ms、高压阶段机端电压升至 $1.2U_n$, 持续时间 Δt_3 应不小于 500ms。

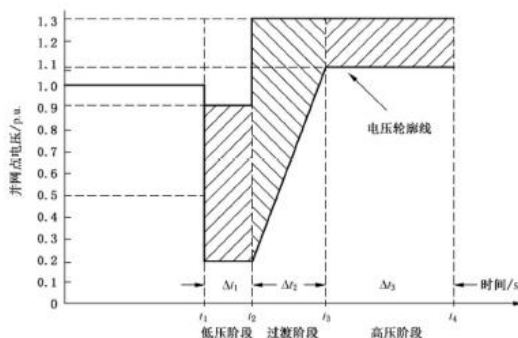


图4 连续故障穿越测试机端电压曲线

6.2.6 一次调频测试

一次调频测试应按照 GB/T 40595 规定进行。

6.2.7 惯量响应测试

惯量响应测试按以下步骤进行：

- 储能单元惯量响应功能投入；
- 将模拟的频率发生器输出频率从 50Hz 开始，按照 0.5Hz/s 的频率变化率，将模拟的频率从 50Hz 调整至 50.5Hz，调节稳定后返回至 50Hz，记录试验数据；
- 将模拟的频率发生器输出频率从 50Hz 开始，按照 -0.5Hz/s 的频率变化率，将模拟的频率从 50Hz 调整至 48.5Hz，调节稳定后返回至 50Hz，记录试验数据。

6.3 保护系统测试验证

6.3.1 电压保护定值测试

电压保护定值测试按以下步骤进行：

- 设置储能单元机端电压为 $1.0U_n$ ；
- 按照间隔值 $0.05 U_n$ 逐级向上进行电压阶跃测试，调整机端电压至 $1.6 U_n$ ，各个电压点至少保持 60s，根据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；
- 设置储能单元机端电压为 $1.0U_n$ ；
- 按照间隔值 $0.05 U_n$ 逐级向下进行电压阶跃测试，调整机端电压至 0，各个电压点至少保持 60s，根据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。

6.3.2 频率保护定值测试

频率保护定值测试按以下步骤进行：

- 设置储能单元机端频率为 50Hz；
- 按照间隔值 0.5Hz 逐级向上进行频率阶跃测试，调整机端频率至 55Hz，各个频率点至少保持 60s，根据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；
- 设置储能单元机端频率为 50Hz；
- 按照间隔值 $0.05 U_n$ 逐级向下进行频率阶跃测试，调整机端频率至 0，各个频率点至少保持 60s，根据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。

6.4 短路比适应性测试验证

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，确定电磁暂态模型失稳的边界值，得到电磁暂态模型对短路比的适用范围。短路比适应性测试按以下步骤进行：

- 设置额定功率下机端短路比为 2.5；
- 按照间隔值 0.1 逐级减小短路比，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边界值。

6.5 模型适应性测试验证

在单个储能单元电磁暂态模型测试校核完成后，应进行模型厂站的多实例运行测试及多环境适应性测试验证，考察电磁暂态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。测试按以下步骤进行：

- 多实例运行测试应在同一个算例内可以同时运行 2 个以上储能单元模型（各单元间没有电气联系），对其中 1 个储能系统设置故障，其他储能单元模型正常运行，故障时过程中的响应特性与单个储能单元故障时一致；
- 多环境适应性测试应分别在 Windows 平台与 Linux 平台完成多实例运行测试。

6.6 数模混合仿真测试数据记录要求

测试过程中应记录以下数据：

- 记录所需工况的机端电压、有功功率、无功功率、有功电流和无功电流的数据；
- 测试设备采样频率应不低于 10kHz。

6.7 模型校核及误差要求

电磁暂态封装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实测数据进行对比，满足以下误差要求：

- a) 低穿/高穿响应误差要求可参考附录 F；
- b) 无功/电压、有功/频率和惯量控制等阶跃响应误差要求可参考附录 B.3；
- c) 短路比边界值的实测值与设计值的绝对误差应小于 0.2；
- d) 电压、频率保护定值动作时间的误差应不超过 0.1s。

6.8 报告主要内容

报告应包括以下内容：

- a) 储能电站的基础参数；
- 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) 模型测试试验结果，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 机电暂态模型参数测试

7.1 一般规定

7.1.1 电化学储能电站机电暂态模型参数测试应包括储能变流器和厂站级控制系统的模型参数测试和辨识，模型结构见附录 C。

7.1.2 变流器的机电暂态模型参数测试应在现场或数模混合仿真平台上进行。

7.1.3 厂站级控制系统模型参数测试应在现场进行。

7.1.4 电化学储能电站模型参数应采用标么值，并标明基准值。功率基准值取储能电站额定有功功率、电压基准值取并网点额定电压、频率基准值为电网运行基准频率。

7.2 厂站级控制系统模型参数测试

7.2.1 厂站级有功功率控制

7.2.1.1 测试方法

厂站级有功功率控制模型结构见附录 C.1，模型参数测试按以下步骤进行：

- a) 设置储能电站初始有功功率为 70% 额定充电功率；
- b) 依次进行 $\pm 5\%$ 及 $\pm 20\%$ 额定充电功率给定阶跃试验，各个功率点保持至少 30s，记录储能电站功率给定值、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据；
- c) 分别设置储能电站初始有功功率为 70% 额定放电功率、100% 额定充电功率、100% 额定放电功率，在每个工况点重复步骤 b)；
- d) 设置储能电站初始有功功率为 100% 额定充电功率，将储能电站功率给定值从 100% 额定充电功率阶跃至 100% 额定放电功率，阶跃保持时间至少 30s，进行放电转充电试验，记录储能电站功率给定值、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据；
- e) 设置储能电站初始有功功率为 100% 额定放电功率，将储能电站功率给定值从 100% 额定放电功率阶跃至 100% 额定充电功率，阶跃保持时间至少 30s，进行充电转放电试验，记录储能电站功率给定值、储能电站交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据。

7.2.1.2 参数辨识

参数计算和辨识方法如下：

- a) 通过储能电站有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，辨识厂站有功功率控制系统控制延时及时间常数；
- b) 通过储能电站有功控制阶跃试验中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有功功率控制系统的 PID 等控制参数的 K_{p_pp} 、 K_{i_pp} 等参数；

- c) 通过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 P_{plant_ref} 、 P_{pod} 及功率反馈 P_e 等信号计算厂站级有功指令滞后时间常数 T_{lag} ;
- d) 通过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调整速率、有功功率应达到最大充电功率和最大放电功率的限制值。

7.2.2 厂站级无功功率控制

7.2.2.1 测试方法

厂站级无功功率控制模型结构见附录 C.2, 模型参数测试按以下步骤进行:

- a) 设置储能电站初始有功功率为 90% 额定充电功率;
- b) 设置储能电站监控系统无功功率控制模式为定无功功率控制模式;
- c) 依次进行 $\pm 10\%$ 及 $\pm 20\%$ 储能电站无功功率给定阶跃试验, 各个功率点持续时间至少 30s, 记录储能电站在无功功率给定值阶跃扰动下的三相交流电压和电流、有功功率以及无功功率;
- d) 设置储能电站厂站监控系统无功功率控制模式为定电压控制模式;
- e) 依次进行 $\pm 2\%$ 额定电压给定阶跃试验, 各电压点持续时间至少 30s, 记录储能电站在电压给定值阶跃扰动下的三相交流电压和电流、有功功率以及无功功率;
- f) 设置储能电站初始有功功率为 90% 额定放电功率;
- g) 重复试验步骤 c)~f)。

注: 储能电站无功功率为储能电站有功功率为 0 时可输出的最大无功功率设计值。

7.2.2.2 参数辨识

参数计算和辨识方法如下:

- 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, 采用直接算法、最小二乘法等辨识方法, 辨识厂站有功功率控制系统控制延时及时间常数;
- b) 通过电化学储能电站定无功控制模式下无功功率给定值阶跃扰动试验, 测试得到的无功功率响应曲线, 根据动态调节过程数据辨识无功功率调节并联 PI 参数 K_{i-pq} ;
- c) 在无功功率响应曲线的直线段选取两个不同的数据点, 根据上升过程数据辨识厂站定无功功率控制模式 PI 控制输入偏差限幅值 $Q_{err-max}$ 和 $Q_{err-min}$, $Q_{err-max}$ 采用向上阶跃扰动测试曲线, $Q_{err-min}$ 采用向下阶跃扰动测试曲线;
- d) 根据无功功率响应曲线的稳态值与理论值偏差, 计算无功功率调节并联 PI 参数 K_{p-pq} 和无功功率调节死区值 Q_{pdb} ;
- e) 根据电化学储能电站定电压控制模式电压给定值阶跃扰动后无功功率响应测试曲线, 计算定电压控制参数, 计算重复步骤 a)~d)。

7.2.3 一次调频控制

7.2.3.1 测试方法

厂站级一次调频控制模型结构见附录 C.3, 储能电站一次调频参数设置应满足 GB/T 40595 要求, 一次调频性能及参数测试按以下步骤进行:

- a) 设置储能电站初始有功功率为 20%~50% 额定充电功率;
- b) 依次进行至少包含 $\pm 0.05\text{Hz}$ 、 $\pm 0.15\text{Hz}$ 、 $\pm 0.2\text{Hz}$ 的有效频差阶跃, 最大有效频差宜不超过 $\pm 0.25\text{Hz}$, 频差应持续保持至一次调频功率达到理论计算值后 30s, 记录储能电站在频率给定值阶跃扰动下频率 (转速) 偏差、一次调频调节量输出、电气功率等;
- c) 依次进行大频差频率阶跃试验, 阶跃量从小到大, 最大宜不超过 0.5Hz , 直至有功功率超过某一限制值不再增大/减小, 记录对应的有功功率值为一次调频上/下限幅值;
- d) 分别设置储能电站初始有功功率为 65%~100% 额定充电功率、20%~50% 额定放电功率、65%~100% 额定放电功率, 在每个工况点重复步骤 b)~c)。

7.2.3.2 参数辨识

参数计算及辨识方法如下:

- a) 通过连续向上/向下改变模拟的频差(转速)信号直至有功功率开始往减小/增加方向规律性调节,得到动作时刻对应的频率值为一次频率偏差死区值 f_{db2} 、 f_{db1} ;
- b) 通过频率阶跃试验数据得到一次调频滞后时间、上升时间、调节时间,按照公式(3)计算频率下垂控制因子:

$$D_{up} = \frac{\Delta P_{up}}{\Delta f_{up}}, D_{dn} = \frac{\Delta P_{dn}}{\Delta f_{dn}} \dots\dots\dots (3)$$

- c) 通过大频差频率阶跃试验数据得到一次频率限幅值 P_{max_Dup} 、 P_{max_Ddn} 。

注: Δf_{up} 和 Δf_{dn} 为有效频差。

7.3 变流器机电暂态模型参数测试

7.3.1 有功功率控制

7.3.1.1 测试方法

变流器有功功率控制模型结构见附录 C.4, 模型参数测试按以下步骤进行: :

- a) 设置储能变流器初始有功功率为 70% 额定充电功率;
- b) 依次进行 $\pm 5\%$ 、 $\pm 20\%$ 额定充电功率给定阶跃试验, 各个功率点保持至少 30s, 记录变流器 PCS 功率给定值、储能变流器交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据;
- c) 分别设置储能变流器初始有功功率为 70% 额定放电功率、100% 额定充电功率、100% 额定放电功率, 在每个工况点重复步骤 b);
- d) 设置储能变流器初始有功功率为 100% 额定放电功率, 将储能变流器有功给定值从 100% 额定放电功率阶跃至 100% 额定充电功率, 阶跃保持时间至少 30s, 进行放电转充电试验, 记录变流器 PCS 功率给定值、储能变流器交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据;
- e) 设置储能电站初始有功功率为 100% 额定充电功率, 将储能变流器有功给定值从 100% 额定充电功率阶跃至 100% 额定放电功率, 阶跃保持时间至少 30s, 进行充电转放电试验, 记录变流器 PCS 功率给定值、储能变流器交流电压、交流电流、有功功率等试验波形数据。

7.3.1.2 参数辨识

参数计算及辨识方法如下:

- a) 利用变流器设置为定功率运行方式下的测试数据, 利用最小二乘法或直接算法, 对储能变流器有功功率控制模式的 PID 等控制参数;
- b) 通过储能变流器额定有功功率下的阶跃试验, 或依次向变流器下达有功指令 P_{ord} , 从 0 连续变化至 100% 后持续增大, 直至测量得到给定值不再增大, 得到 P_{max} 、 dP_{max} 、 Ip_{max} 。
- c) 向变流器逐步下达有功指令 P_{ord} , 从 0 连续变化至 -100% 后持续降低, 直至测量得到给定值不再减小, 得到 P_{min} 、 dP_{min} 、 Ip_{min} 。

7.3.2 无功功率控制

7.3.2.1 测试方法

变流器有功功率控制模型结构见附录 C.4, 模型参数测试按以下步骤进行:

- a) 设置储能变流器为定无功功率控制模式;
- b) 设置储能变流器初始有功功率为 90% 额定充电功率;
- c) 依次进行 $\pm 5\%$ 及 $\pm 20\%$ 无功功率给定阶跃试验, 各个功率点保持至少 30s, 记录变流器无功功率给定值、储能变流器交流电压、交流电流、无功功率等试验波形数据;
- d) 设置储能变流器初始有功功率为 90% 额定放电功率, 重复步骤 c)。

注: 1. 储能变流器无功功率为变流器有功功率为 0 时可输出的最大无功功率设计值。

7.3.2.2 参数辨识

- a) 利用变流器定无功功率给定值阶跃试验的测试数据, 采用最小二乘法, 对储能变流器定无

功率控制模式的 PID 等控制参数，如 K_{p_dq} 和 K_{i_dq} ；

- b) 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。

7.3.3 低电压穿越控制

7.3.3.1 测试方法

变流器低电压穿越测试应通过现场测试或数模混合仿真的方法实施。其中现场测试根据GB/T 36548相关规定进行，仿真测试根据6.2.3节步骤进行。

7.3.3.2 参数辨识

变流器低穿控制参数辨识依据附录E.1进行。

7.3.4 高电压穿越测试

7.3.4.1 测试方法

变流器高电压穿越测试应通过现场测试或数模混合仿真的方法进行。其中现场测试根据GB/T 36548相关规定开展，仿真方法根据6.2.4进行。

7.3.4.2 参数辨识

变流器高穿控制参数辨识依据附录E.2进行。

7.4 模型参数校核及误差要求

7.4.1 模型参数校核原则

7.4.1.1 模型验证仿真应采用广泛使用的电力系统分析软件。

7.4.1.2 模型验证包括电压、电流、无功电流分量、有功功率和无功功率。

7.4.1.3 模型验证试验方法包括网侧扰动试验和控制指令试验，验证过程时间应满足以下要求：

- a) 网侧扰动试验：扰动发生前 2s 到扰动消除后有功功率恢复到稳定运行后 2s；
- b) 控制指令试验：控制指令下达前 2s 到功率达到稳定运行后 10s。

7.4.1.4 仿真数据与试验数据应采用相同的量纲、时标、分辨率，时间序列应同步。

7.4.2 误差要求

仿真结果应与数模混合仿真模型结果或现场实测结果进行对比，并满足以下误差要求：

- a) 低穿/高穿响应误差要求见附录 F；
- b) 无功/电压、有功/频率和惯量控制等阶跃响应误差要求见附录 B.3。

7.5 报告主要内容

机电暂态模型参数测试报告应包含以下内容：

- a) 储能电站的基础参数。
- b) 模型控制器参数说明。包括传递函数框图、框图中所有参数的取值、基准值等。
- c) 模型测试试验结果。
- d) 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 中长期动态模型参数测试

8.1 电化学储能电站中长期动态模型应包括机电暂态模型、电池中长期动态模型，厂站二次调频模型，模型结构见附录G。

8.2 储能电池中长期动态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可变内电势、可变内电阻以及等效并联电阻参数。

8.3 储能电池中长期动态模型参数校核应采用现场充放电过程（20%~80% SOE）电池直流侧电压曲线与仿真结果对比，最大误差宜不大于 30% 额定电压。

8.4 储能电站二次调频模型参数可采用现场设定值。

8.5 储能电站二次调频模型参数的校核应采用指令下发后电化学储能系统有功功率的变化曲线与仿真结果对比，最大误差宜不大于 1%额定有功功率。

附 录 A
(资料性)
储能电站收资文档

A.1 储能变流器技术参数

电化学储能电站储能变流器技术参数见表 A.1，箱变技术参数见表 A.2。

表 A.1 变流器技术参数

序号	名称	内容
1	厂家	
2	型号	
3	交流接入方式	
4	额定功率	
5	过载能力	
6	额定电网电压	
7	额定交流电流	
8	最大交流电流	
9	额定电网频率	
10	功率因数可调范围	
11	无功功率响应时间	
12	功率控制精度	
13	直流分量	
14	直流电压范围	
15	满功率直流电压范围	
16	最大直流电流	
17	最大转换效率	
18	稳压精度	
19	稳流精度	
20	低电压穿越	
21	防孤岛保护	
22	交流过流/短路保护	
23	交流过压/欠压保护	
24	交流过频/欠频保护	
25	功率响应速度	
36	充放电转换时间	

表 A.2 箱变技术参数

变压器参数					
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_{T2}			副边 1（中） V_{N1}	
	副边 2（低） S_{T3}			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（kW） P_0		
	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

低穿、高穿控制动作判据、无功控制策略表达式、有功控制策略表达式，对称故障和不对称故障的区分判据、低穿、高穿电流限幅值的表达式、连续故障穿越控制逻辑见表 A.3。储能电站涉网保护参数见表 A.4。

表 A.3 低穿/高穿控制逻辑及参数

一、对称故障	
(1) 进入低穿判断条件	
(2) 退出低穿判断条件	
(3) 低穿期间的有功、无功控制策略	
(4) 进入高穿判断条件	
(5) 退出高穿判断条件	
(6) 高穿期间的有功、无功控制策略	
二、不对称故障	
(1) 进入低穿判断条件	
(2) 退出低穿判断条件	
(3) 低穿期间的有功、无功控制策略	
(4) 进入高穿判断条件	
(5) 退出高穿判断条件	

(6) 高穿期间的有功、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（定值区间、延时区间）（p.u.）	
低频保护定值（定值区间、延时区间）（p.u.）	
高电压保护定值（定值区间、延时区间）（p.u.）	
低电压保护定值（定值区间、延时区间）（p.u.）	
无功控制方式（功率因数、无功闭环、电压闭环）	
其他频率、电压保护	

附录 B
(资料性)
低/高穿测试工况列表

B.1 低穿特性的测试要求

低穿特性测试详细故障测试要求表格详见表B.1。

表 B.1 低穿特性的测试要求

序号	35kV 母线线电压跌落幅度 标么值	初始功率	故障时间 s	故障类型
1	0.0	小功率/大功率	0.1	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

B.2 高穿特性的测试要求

高穿特性测试详细故障测试要求表格详见表B.2。

表 B.2 高穿特性的测试要求

序号	35kV 母线线电压标么值	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
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

B.3 阶跃响应的误差要求

阶跃响应的控制特性应按图 B.1 所示的曲线进行指标量化。

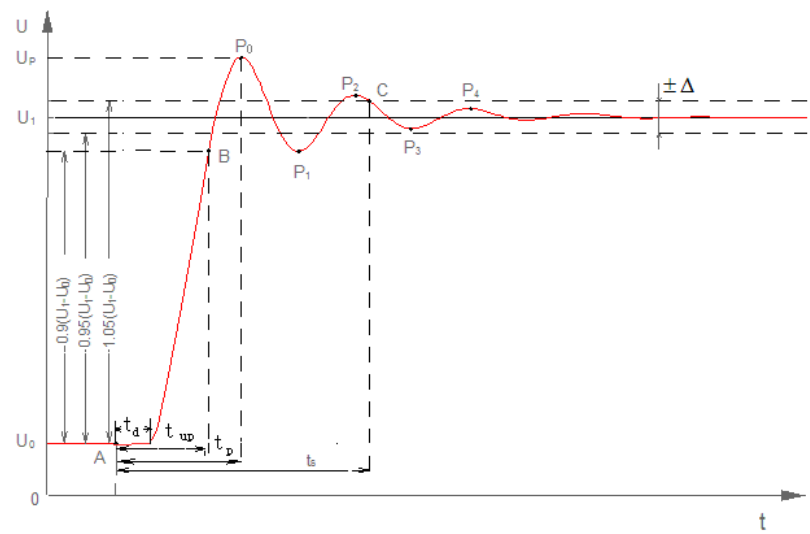


图 B.1 阶跃响应特性示意曲线

阶跃响应特性定义如下：

- 上升时间：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：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：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：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 B.3 仿真与实测的偏差允许值

	实测/数模混合仿真结果	电磁封装/机电暂态仿真结果	偏差	允许偏差
Mp				±10%
Tup				±0.1s
Tp				±0.2s
Ts				±2s

附录 C

(资料性)

储能电站机电暂态仿真模型结构

C.1 电化学储能电站厂站级有功功率控制机电暂态模型框图如图 C.1 所示。

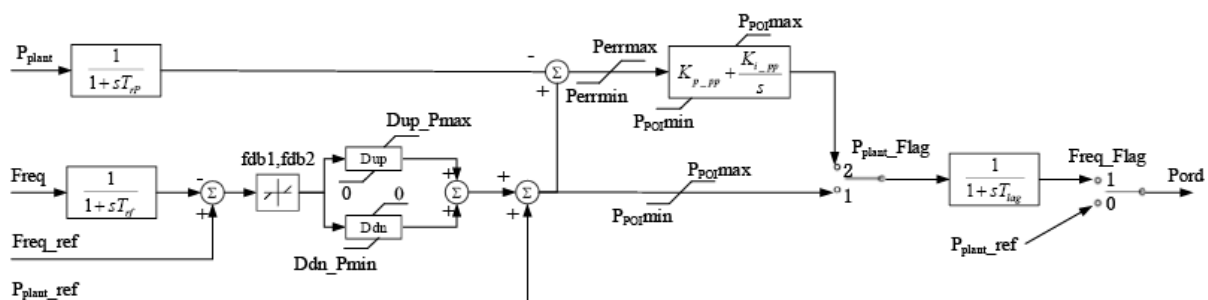


图 C.1 厂站级有功控制模型

C.2 电化学储能电站厂站级无功功率控制机电暂态模型框图如图 C.2 所示。

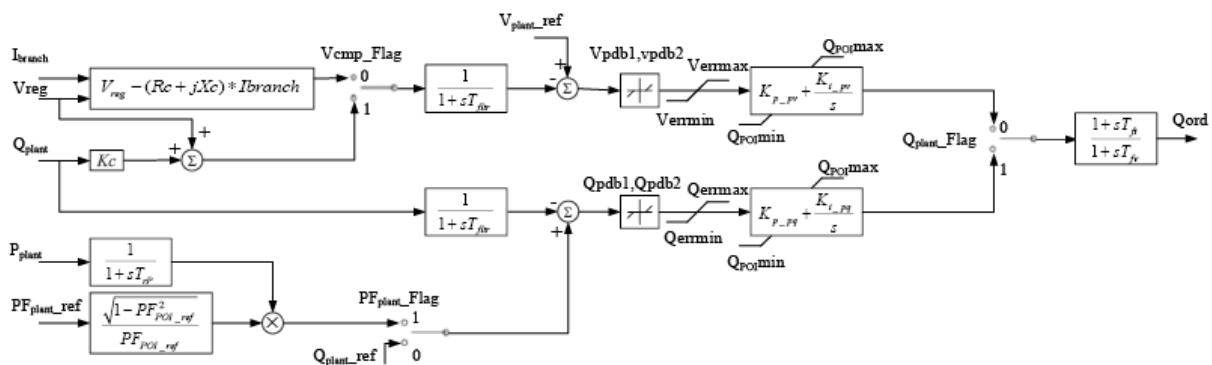


图 C.2 厂站级无功控制模型

C.3 电化学储能电站厂站级一次调频及惯量控制机电暂态模型框图如图 C.3 所示。

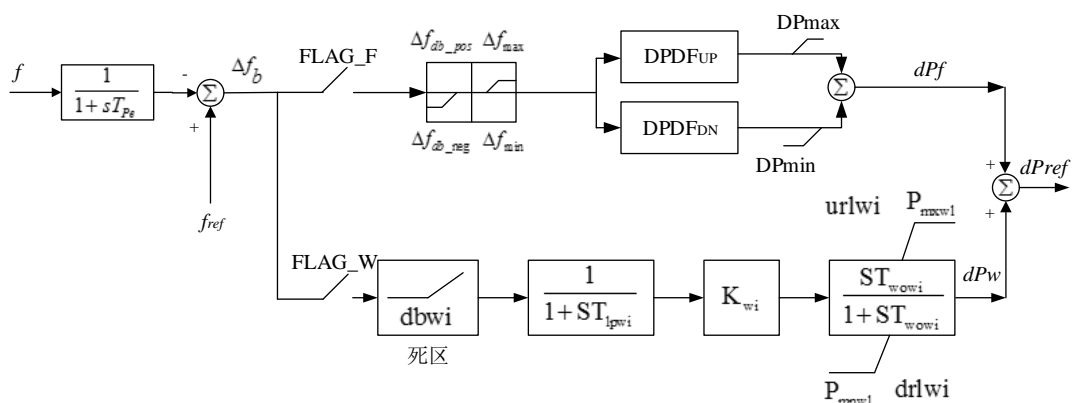


图 C.3 一次调频、惯量控制框图

C.4 储能变流器有功功率控制机电暂态模型框图如图C.4所示。

附录 D
(资料性)
现场低穿、高穿测试示意图

现场低穿、高穿试验测试示意图如图D. 1所示。

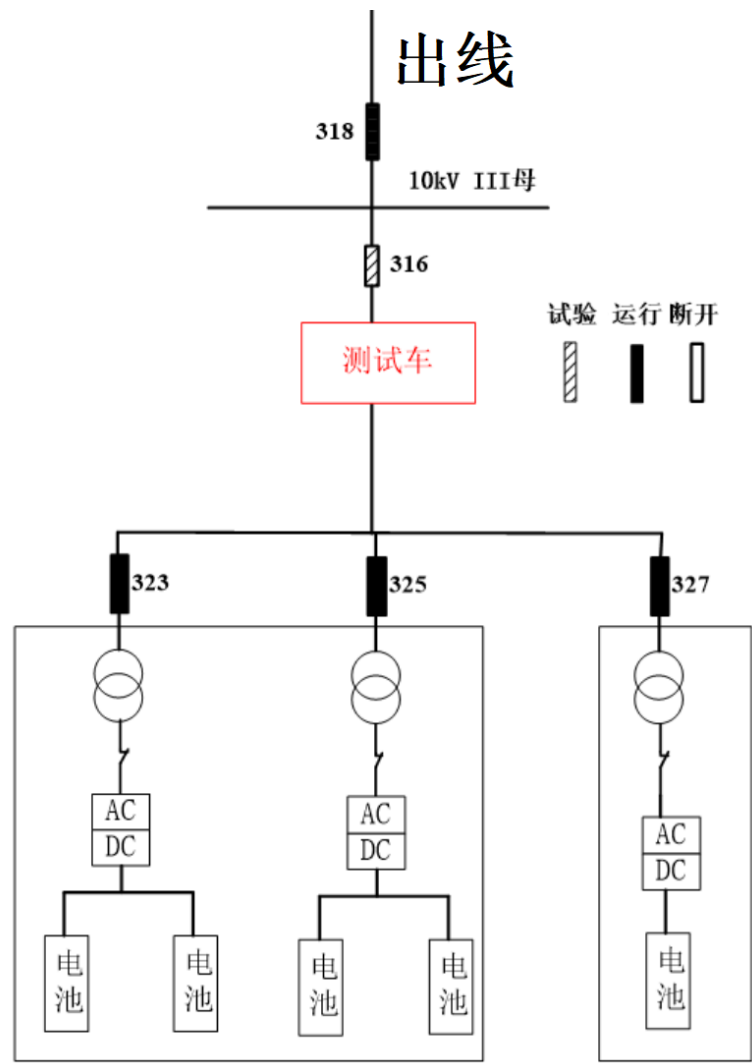


图 D. 1 储能电站现场高穿、低穿测试示意图

附录 E

(资料性)

低穿、高穿控制参数计算及辨识方法

E.1 低穿期间控制参数计算及辨识方法

E.1.1 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低穿控制参数计算及辨识。

E.1.2 在相同电压跌落幅度试验中,不同的有功初始工况下变流器发出的无功电流相同,表明故障期间无功电流输出优先, $PQ_LHVRT_FLAG=1p.u.$ 。在不同电压跌落幅度试验中, I_q 无观察到明显限幅, I_{qmax_LV} 取典型值 $1.1p.u.$; 在不同电压跌落幅度试验中, 根据 $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$ 的最大值, I_{max} 取典型值 $1.3p.u.$ 。

E.1.3 低电压穿越期间无功电流控制策略根据公式 (E.1) 进行参数辨识, 其中已知量包括 I_{q_LVRT} 、 I_{q0} 、 V_{Lm} 、 V_t , 待辨识参数包括 $K_{1_Iq_LV}$ 、 $K_{2_Iq_LV}$ 、 I_{qset_LV} 。在相同电压跌落幅度试验中, 不同的无功初始工况下逆变器发出的无功电流相同, 表明无功电流输出与 I_{q0} 无关, 低电压穿越控制期间的最大无功电流 $K_{2_Iq_LV}$ 取为 0。利用最小二乘法进行线性回归分析即可辨识 $K_{1_Iq_LV}$ 和 I_{qset_LV} 。

$$I_{q_LVRT} = K_{1_Iq_LV} \times (V_{Lm} - V_t) + K_{2_Iq_LV} \times I_{q0} + I_{qset_LV} \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中,

$K_{1_Iq_LV}$ ——无功电流计算系数 1;

$K_{2_Iq_LV}$ ——无功电流计算系数 2;

I_{qset_LV} ——无功电流计算系数 3;

I_{q0} ——初始无功电流;

V_t ——端电压幅值;

V_{Lm} ——进入低电压穿越阈值。

E.1.4 低电压穿越期间有功功率控制策略根据公式 (E.2) 进行参数辨识, 其中已知量包括 I_{p_LVRT} 、 I_{p0} 、 V_t , 待辨识参数包括 $K_{1_Ip_LV}$ 、 $K_{2_Ip_LV}$ 、 I_{pset_LV} 。

$$I_{p_LVRT} = K_{1_Ip_LV} \times V_t + K_{2_Ip_LV} \times I_{p0} + I_{pset_LV} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

式中,

$K_{1_Ip_LV}$ ——有功电流计算系数 1;

$K_{2_Ip_LV}$ ——有功电流计算系数 2;

I_{pset_LV} ——有功电流计算系数 3;

I_{p0} ——初始有功电流;

V_t ——端电压幅值。

E.2 高穿期间控制参数计算及辨识方法

E.2.1 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高穿控制参数计算及辨识。

E.2.2 高电压穿越期间无功电流控制策略根据公式 (E.3) 进行参数辨识, 其中已知量包括 I_{q_HVRT} 、 I_{q0} 、 V_{Hm} 、 V_t , 待辨识参数包括 $K_{1_Iq_HV}$ 、 $K_{2_Iq_HV}$ 、 I_{qset_HV} 。取多组试验数据, 利用最小二乘法进行线性回归分析即可辨识 $K_{1_Iq_HV}$ 、 $K_{2_Iq_HV}$ 和 I_{qset_HV} 。

$$I_{q_HVRT} = K_{1_Iq_HV} \times (V_{Hm} - V_t) + K_{2_Iq_HV} \times I_{q0} + I_{qset_HV} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

式中,

$K_{1_Iq_HV}$ ——无功电流计算系数 1;

$K_{2_Iq_HV}$ ——无功电流计算系数 2;

I_{qset_HV} ——无功电流计算系数 3;

I_{q0} ——初始无功电流;

V_t ——端电压幅值;

$V_{H_{in}}$ ——进入高电压穿越阈值。

E.2.3 高电压穿越期间有功功率控制策略根据公式(E.4)进行参数辨识,其中已知量包括 I_{p_HVRT} 、 I_{p0} 、 V_t ,待辨识参数包括 $K_{1_Ip_HV}$ 、 $K_{2_Ip_HV}$ 、 I_{pset_HV} 。取多组试验数据,利用最小二乘法进行线性回归分析即可辨识 $K_{1_Ip_HV}$ 、 $K_{2_Ip_HV}$ 和 I_{pset_HV} 。

$$I_{p_HVRT} = K_{1_Ip_HV} \times V_t + K_{2_Ip_HV} \times I_{p0} + I_{pset_HV} \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

式中,

$K_{1_Ip_HV}$ ——有功电流计算系数 1;

$K_{2_Ip_HV}$ ——有功电流计算系数 2;

I_{pset_HV} ——有功电流计算系数 3;

I_{p0} ——初始有功电流;

V_t ——端电压幅值。

附录 F

(资料性)

低穿/高穿仿真误差要求

F.1 扰动过程区段划分

F.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）三个时段，如图 F.1 所示，具体划分如下：

- a) 电压跌落前 1s 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，风电机组有功功率开始稳定输出后的 1s 为 C 时段结束。

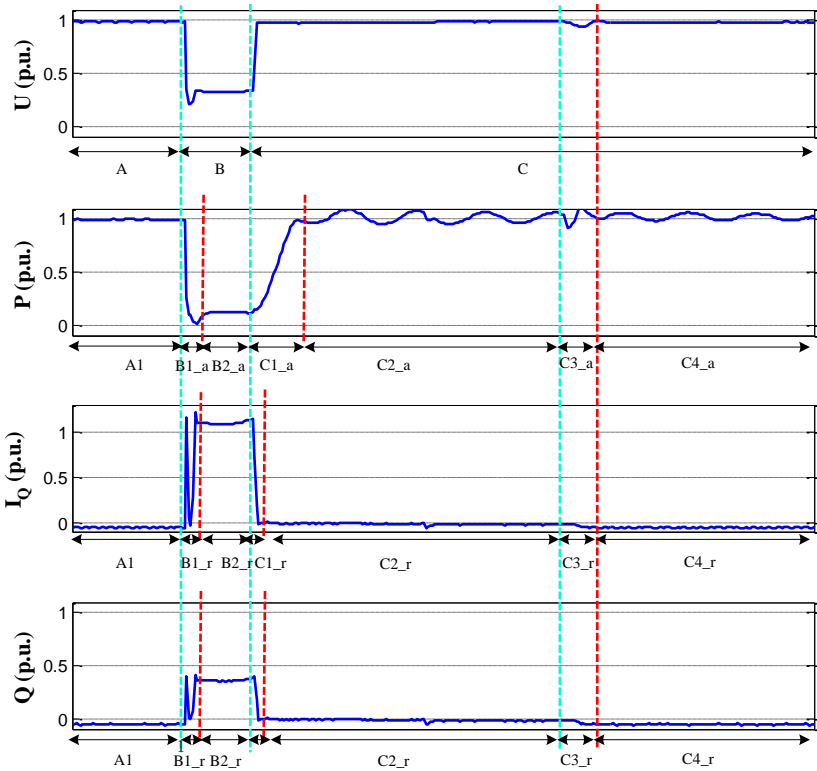


图 F.1 验证过程分区

F.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，如图 F.1 所示。

F.2 偏差计算

F.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 。

F.2.2 数据区段划分后，应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。

F.2.3 平均偏差与最大偏差计算方法：

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，如式(F.1)。

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

式中，

X_S ——待考核电气量的模型仿真数据标么值；

X_M ——待考核电气量的试验数据的标么值；

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；

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。

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，如式(F.2)。

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

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，如式(F.3)。

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

F.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%

F.2.5 每个验证工况记录验证结果。

F.3 验证结果评价

F.3.1 网侧扰动试验，偏差计算结果应满足以下条件：

- 所有工况的光伏发电单元升压变高压侧电压各偏差应不大于表E.1中的电压偏差最大允许值；
- 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应不大于表E.1中的偏差最大允许值。
- 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E.1数值的1.5倍。

表 F.1 允许最大偏差值

电气参数	$F_{1\max}$	$F_{2\max}$	$F_{3\max}$	$F_{G\max}$
电压偏差， $\Delta U_g/U_n$	0.02	0.05	0.05	0.05

电流, $\Delta I/I_n$	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
$F_{1\max}$: 稳态区间平均偏差允许值; $F_{2\max}$: 暂态区间平均偏差允许值; $F_{3\max}$: 稳态区间最大偏差允许值; $F_{G\max}$: 所有区间加权平均总偏差允许值。				

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

附录 G

(资料性)

储能电站中长期动态仿真模型结构

G.1 储能电池中长期动态仿真模型如图 G.1 所示。

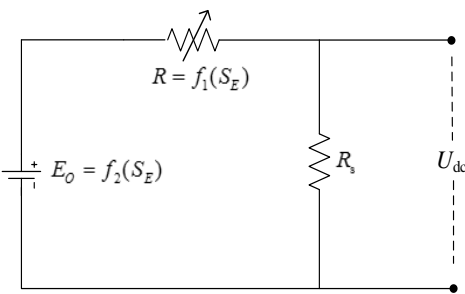


图 G.1 储能电池中长期动态仿真模型

说明：

- S_E —— 储能电池的电能存储状态；
- R —— 电池的内电阻；
- E_0 —— 电池的内电势；
- U_{dc} —— 储能电池直流电压；

G.2 电化学储能电站典型二次调频模型如图 G.2 所示。

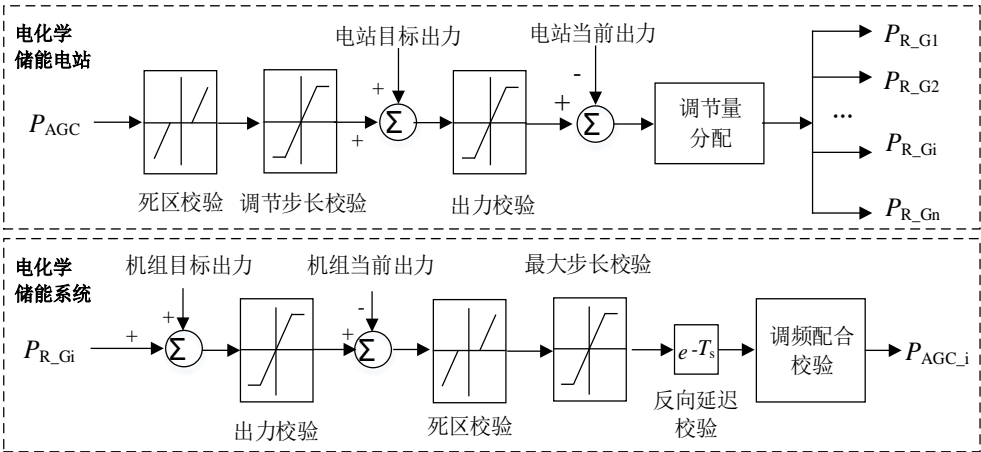


图 G.2 储能电站典型二次调频模型

