

ICS XXX
CCS XXX

T/HEBQIA

团 体 标 准

T/HEBQIA × × × × — 2025

配电网短路容量非故障扰动测量技术导则

（征求意见稿）

2025-××-××发布

2025-××-××实施

河北省质量信息协会发布

目 次

前言	III
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
3.1	2
短路容量 short-circuit capacity	2
3.2	2
短路阻抗 short-circuit impedance	2
3.3	2
非故障扰动 non-fault disturbance	2
3.4	2
扰动测量 disturbance-based measurement	2
3.5	2
自主可控 autonomous and controllable	2
3.6	3
有源配电网 active distribution network	3
3.7	3
参数可信度 parameter credibility	3
3.8	3
实时测量 real-time measurement	3
3.9	3
延伸计算 extended calculation	3
3.10	3
并行测算 parallel calculation	3
4 总则	3
5 非故障扰动测量技术基本原理	4
5.1 扰动信号特性	4
5.2 测量原理	4
5.3 测量精度评估	4
6 短路容量测量终端	5
6.1 硬件技术要求	5
6.2 软件技术要求	6
6.3 通信与接口	7
6.4 安装与部署	7
7 短路容量测量与计算方法	8

7.1 扰动信号识别 8

7.2 数据预处理 8

7.3 阻抗计算流程 9

7.4 校验与修正 9

8 含分布式电源的短路容量测量 10

8.1 分布式电源影响分析 10

8.2 动态特性修正 10

8.3 不同类型分布式电源适用方法 11

9 短路参数数据库构建 11

9.1 数据库结构 11

9.2 数据质量评估 12

9.3 参数可信度评价 12

10 测量结果应用 13

附录 A（规范性附录） 雷非故障扰动短路容量测量精度等级划分 14

附录 B（规范性附录） 不同类型非故障扰动事件特征参数 15

附录 C（规范性附录） 短路阻抗与系统响应关系建模方法 17

附录 D（规范性附录） 不同类型分布式电源对短路阻抗影响特性 19

附录 E（规范性附录） 短路参数质量评估流程 21

前 言

本文件依据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。

本文件由上海浦源科技有限公司提出。

本文件由河北省质量信息协会归口。

本文件起草单位：上海浦源科技有限公司、XXX。

本文件主要起草人：XXX。

配电网短路容量非故障扰动测量技术导则

1 适用范围

本标准规定了配电网短路容量非故障扰动测量的基本原理、测量终端技术要求、测量与计算方法、含分布式电源的短路容量测量、短路参数数据库构建以及测量结果应用等内容。

本标准适用于电力企业或使用单位对配电网短路参数进行实时测量、监测和应用的相关工作，重点规范10kV～35kV配电网短路容量的非故障扰动测量技术及其应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本规范。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本规范。

GB/T 2900.20 电工术语 高压开关设备和控制设备

GB/T 15576 低压成套无功功率补偿装置

GB/T 17215.241 电测量设备 通用要求、试验和试验条件 第41部分：多电能和多费率仪表的电能计度方法和要求

GB/T 17215.302 电测量设备（交流） 特殊要求 第2部分：静止式谐波有功电能表

GB/T 17215.301 电测量设备（交流） 特殊要求 第1部分：多功能电能表

GB/T 18460.1 分布式电源接入电网技术规定

GB/T 30137 电能质量 电压暂升、电压暂降与短时中断

GB/T 32507 电能质量术语

GB/T 33592 分布式电源并网运行控制规范

GB/T 33593 分布式电源并网技术要求

GB/T 33982 分布式电源并网继电保护技术规范

GB/T 34930 微电网接入配电网运行控制规范

GB/T 35732 配电自动化智能终端技术规范

GB/T 36268 微电网接入配电网技术规定

GB/T 37968 高压电能计量设备检验装置

GB/Z 44118.1 电能质量技术管理 第1部分：总则

GB/T 44137 高电能质量需求用户接入电网技术要求

GB/T 41236 能源互联网与分布式电源互动规范

GB/T 44659.1 新能源场站及接入系统短路电流计算 第1部分：风力发电

GB/T 44659.2 新能源场站及接入系统短路电流计算 第2部分：光伏发电

GB/T 44659.3 新能源场站及接入系统短路电流计算 第3部分：储能电站

DL/T 357 输电线路行波故障测距装置技术条件

DL/T 390 县域配电自动化技术导则

DL/T 448 电能计量装置技术管理规程

DL/T 721 配电自动化终端技术规范
DL/T 1529 配电自动化终端设备检测规程
DL/T 1664 电能计量装置现场检验规程
DL/T 1665 数字化电能计量装置现场检测规范
DL/T 1883 配电网运行控制技术导则
DL/T 1936 配电自动化系统安全防护技术导则
DL/T 2041 分布式电源接入电网承载力评估导则
DL/T 2769 配电自动化终端检测平台技术规范
DL/T 2810 配电网智能分布式终端互操作技术规范
DL/T 2833 电能质量评估技术导则 电压暂降与短时中断
DL/T 2868 配电网集中型馈线自动化技术规范
DL/T 2607 配电自动化终端即插即用技术导则
DL/T 2608 配电自动化终端运维技术规范
DL/T 5781 配电自动化系统验收技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

短路容量 short-circuit capacity

在规定的电压水平下，在电力系统某一点的单相或三相短路故障时的最大表观功率值，由短路电流与短路前的相电压之积得出，单位为兆伏安（MVA）。

3.2

短路阻抗 short-circuit impedance

电力系统中某一点对参考点的等值阻抗，通常由对称分量的正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗组成。

3.3

非故障扰动 non-fault disturbance

电力系统在正常运行过程中由负荷变化、开关操作、电源波动等引起的，未导致系统故障的电压和电流瞬态变化过程。

3.4

扰动测量 disturbance-based measurement

利用电力系统中自然发生的或人为引入的微小扰动，通过测量和分析系统响应特性，计算得到系统参数的测量方法。

3.5

自主可控 autonomous and controllable

基于国产化的硬件和软件平台，实现关键核心技术自主研发并完全可控，不依赖外部技术壁垒的软硬件系统。

3.6

有源配电网 active distribution network

含有分布式发电、储能、可控负荷等主动参与电网运行的电力设备，并具备双向潮流、自动控制和优化运行等特性的配电网络。

3.7

参数可信度 parameter credibility

对短路参数测量结果准确性和可靠性的量化评价指标，通常根据测量条件、扰动特性、数据质量和计算方法等多个因素综合评定。

3.8

实时测量 real-time measurement

在规定的时间范围内（通常为毫秒或秒级）完成数据采集、处理、计算并输出结果的测量过程。

3.9

延伸计算 extended calculation

基于已知测量点的短路参数值，通过拓扑关系和电气特性，计算得到未测量点短路参数的方法。

3.10

并行测算 parallel calculation

多个测量终端同时采集数据并协同计算，实现更广范围、更高精度的短路参数计算方法。

4 总则

4.1 非故障扰动下的配电网短路容量测量应坚持“安全可靠、精确实时、自主可控、经济适用”的原则，在不影响系统正常运行的前提下，实现对短路参数的高精度实时测量。

4.2 短路容量测量应采用非侵入式测量方法，利用系统中的自然扰动或通过加装专用扰动装置产生可控微小扰动，确保测量过程不影响电网安全稳定运行。

4.3 测量终端的设计应基于国产化芯片和软件平台，实现核心技术自主可控，保障系统信息安全和稳定运行。

4.4 短路容量测量应适应有源配电网复杂性与多变性，充分考虑分布式电源、储能装置等对系统短路特性的影响，确保测量结果的准确性和适用性。

4.5 短路容量测量应建立完善的数据处理、参数计算、结果验证和数据库管理体系，形成短路参数测量的标准化、规范化流程。

4.6 测量系统应与配电网调度自动化系统、配电自动化系统、配电网管理系统等实现数据共享和协同应用，为配电网运行、保护和规划提供数据支撑。

4.7 测量系统应满足高精度、强抗干扰、良好可靠性和实时性的基本要求，并具备自诊断和故障告警功能。

5 非故障扰动测量技术基本原理

5.1 扰动信号特性

5.1.1 配电网非故障扰动信号主要包括两类：自然产生的系统扰动和人为引入的可控扰动。

5.1.2 自然扰动信号包括但不限于以下类型：

- a) 大型负荷投入或切除引起的电压和电流变化；
- b) 电动机起动产生的电压暂降和电流冲击；
- c) 电容器组投切引起的电压和电流震荡；
- d) 分布式电源出力波动引起的电压和功率波动；
- e) 一次设备切换操作引起的暂态过程。

5.1.3 可控扰动信号主要通过专用扰动装置产生，应满足以下要求：

- a) 扰动幅值应控制在合理范围内，保证测量精度的同时不影响系统正常运行；
- b) 扰动信号波形应易于识别，具有良好的信噪比；
- c) 扰动频率范围应覆盖短路阻抗计算所需的频带范围；
- d) 扰动持续时间应满足测量要求，一般不超过 20ms；
- e) 扰动装置应具备时序控制功能，避免在系统薄弱状态下产生扰动。

5.1.4 非故障扰动信号的典型特征参数见附录 B。

5.2 测量原理

5.2.1 非故障扰动下配电网短路阻抗测量的基本原理是利用扰动前后电压和电流的变化量，建立系统阻抗与响应特性的关系模型，通过测量系统响应计算短路阻抗。

5.2.2 在扰动过程中，系统等效阻抗计算公式为：

$$\text{测量点的系统等效阻抗}(\Omega) = \frac{\text{扰动引起的电压变化量}(V)}{\text{扰动引起的电流变化量}(A)}$$

5.2.3 系统短路容量计算公式为：

$$\text{测量点的短路容量}(MVA) = \frac{\text{测量点的额定电压}^2(kV)}{\text{测量点的系统等效阻抗}(\Omega)}$$

5.2.4 含有分布式电源的配电网点，短路阻抗与系统响应的关系模型应考虑分布式电源的动态特性影响，具体建模方法见附录 C。

5.3 测量精度评估

5.3.1 非故障扰动短路容量测量的精度等级划分见附录 A。

5.3.2 影响测量精度的主要因素包括：

- a) 扰动信号的幅值、频谱特性和持续时间；
- b) 测量系统的采样频率、分辨率和信噪比；
- c) 系统阻抗的频率依赖性和非线性特性；
- d) 分布式电源的动态响应特性；

e) 负荷特性和系统运行状态。

5.3.3 测量精度评估应通过以下方法进行：

- a) 与系统仿真模型计算结果比较，验证与理论值的一致性；
- b) 与历史故障分析得到的短路阻抗比较，检验与实际故障特性的符合度；
- c) 与标准电气试验得到的参数比较；
- d) 多次重复测量的一致性分析，评估方法的稳定性和可靠性；
- e) 多点同步测量的交叉验证，通过不同位置的测量数据相互验证提高可信度。

6 短路容量测量终端

6.1 硬件技术要求

6.1.1 短路容量测量终端应满足以下一般要求：

- a) 采用国产化主控芯片、存储芯片和通信芯片，保障核心技术自主可控；
- b) 具备完整的电磁兼容性保护措施，确保在电力环境中可靠工作；
- c) 具备过压、过流、过温等多重保护功能，防止设备损坏；
- d) 具备自诊断和故障记录功能，便于维护和故障定位；
- e) 具备时间同步功能，同步精度优于 1ms，保证多终端数据的时间一致性；
- f) 应在-25℃~+70℃的温度范围内正常工作；
- g) 应在相对湿度不大于 95%的环境中正常工作，确保在各种环境条件下稳定工作；
- h) 满足电力行业关于配电自动化系统终端的相关要求，保持与行业标准的一致性；
- i) 主要部件的平均无故障工作时间(MTBF)不低于 10 万小时，保障长期可靠运行。

6.1.2 采样单元是测量终端的核心部件，应满足以下要求：

- a) 采样通道数应不少于 4 路电压和 4 路电流，以满足三相测量需求；
- b) 电压测量范围应覆盖额定电压的 0~1.2 倍；
- c) 电流测量范围应覆盖额定电流的 0~20 倍，覆盖正常和扰动状态；
- d) 采样频率不低于 10kHz，确保捕捉到高频扰动成分；
- e) 电压测量精度优于 0.2 级；
- f) 电流测量精度优于 0.5 级，保证基础数据准确性；
- g) 采样分辨率不低于 16 位；
- h) 信噪比不低于 60dB；
- i) 抗干扰能力应满足电力电子环境要求；
- j) 应具备抗混叠滤波功能，避免高频信号采样导致的失真。

6.1.3 数据处理单元负责算法执行和数据分析，应满足以下要求：

- a) 采用国产化高性能处理器，主频不低于 1GHz，覆盖正常和扰动状态；
- b) RAM 容量不低于 1GB，ROM 容量不低于 8GB，满足数据缓存和程序存储需求；
- c) 具备硬件加速计算能力，支持 FFT、矩阵运算等常用算法的高效处理；
- d) 具备实时数据处理能力，处理延时不超过 20ms，满足快速响应需求；
- e) 支持多任务并行处理功能，提高系统效率；
- f) 具备断电数据保存功能，防止重要数据丢失；
- g) 具备看门狗和自恢复功能，提高系统稳定性和可靠性。

6.1.4 通信单元是终端与上级系统连接的桥梁，应满足以下要求：

- a) 支持至少两种以上有线通信方式（如以太网、RS485 等），增强连接灵活性；
 - b) 支持至少一种无线通信方式（如 4G/5G、无线专网等），适应不同安装环境；
 - c) 支持标准通信协议，保证与电力系统的兼容性；
 - d) 具备信息安全防护功能，防止非授权访问和数据泄露；
 - e) 具备通信状态监测功能，及时发现通信问题；
 - f) 通信数据传输速率应满足实时传输要求，确保数据及时上送。
- 6.1.5 电源单元为终端提供稳定电能，应满足以下要求：
- a) 支持 DC 220V $\pm$ 20%或 DC 24V $\pm$ 20%供电，增强适应性；
 - b) 具备过压、过流、短路保护功能，确保安全运行；
 - c) 具备电源状态监测和故障告警功能，提高可靠性；
 - d) 输出应满足终端设备的功耗需求，留有不小于 30%的裕量，适应负载变化；
 - e) 电源效率不低于 85%，减少能耗；
 - f) 电源纹波系数不大于 1%，提供稳定的电能质量。
- 6.1.6 扰动产生单元是主动测量的关键部件，应满足以下要求：
- a) 能产生可控幅值、频率、相位的扰动信号；
 - b) 扰动幅值范围应可调，通常为额定值的 0.5%~5%，平衡测量精度和系统影响；
 - c) 扰动持续时间可控，范围为 1ms~100ms，适应不同测量需求；
 - d) 具备同步触发功能，确保扰动信号与测量动作协调；
 - e) 具备扰动序列编程功能，支持复杂测量方案；
 - f) 具备安全联锁功能，在系统条件不满足时禁止扰动，保障系统安全。
- 6.2 软件技术要求
- 6.2.1 操作系统是软件运行的基础平台，应满足以下要求：
- a) 采用国产化嵌入式实时操作系统，保障核心技术自主可控；
 - b) 具备多任务调度、优先级管理能力，确保关键任务及时执行；
 - c) 支持多种硬件平台，提高兼容性和可移植性；
 - d) 具备良好的实时性，中断响应时间不超过 50 μ s，满足高速数据处理需求；
 - e) 具备完善的安全机制，防止未授权访问和操作；
 - f) 具备远程升级功能，便于维护和功能扩展；
 - g) 符合国家关键信息基础设施安全保护要求。
- 6.2.2 基础软件为应用提供支撑环境，应满足以下要求：
- a) 采用国产化编译环境和开发工具，保持技术链的自主可控；
 - b) 软件架构应模块化、标准化，便于维护和扩展；
 - c) 具备完善的异常处理机制，提高系统稳定性；
 - d) 具备软件自诊断功能，及时发现问题；
 - e) 支持数据加密和安全访问控制，保护敏感信息；
 - f) 具备日志记录和管理功能，便于问题定位和系统优化。
- 6.2.3 应用软件负责实现测量终端的核心功能，应具备以下功能：
- a) 数据采集功能，实现对电压、电流信号的高精度采集；
 - b) 扰动识别功能，实现对系统扰动的自动识别和筛选；
 - c) 阻抗计算功能，实现基于扰动信号的短路阻抗计算；

- d) 数据处理功能，实现滤波、趋势分析、异常判断等；
- e) 结果评估功能，实现测量结果的质量评估和可信度分析；
- f) 数据存储功能，实现短路参数的本地和远程存储；
- g) 通信功能，实现与上级系统的数据交互；
- h) 人机交互功能，实现参数配置、状态显示和结果查询；
- i) 系统管理功能，实现设备状态监测、告警处理等。

6.2.4 软件安全是系统安全的重要组成部分，应满足以下要求：

- a) 采用身份认证和访问控制机制，确保只有授权人员可以操作；
- b) 支持数据传输加密和完整性校验，防止数据泄露和篡改；
- c) 具备安全日志审计功能，记录关键操作便于追溯；
- d) 定期进行漏洞扫描和安全评估，及时发现并修复安全风险；
- e) 支持远程安全升级，及时应对新的安全威胁；
- f) 符合国家电力行业信息安全等级保护要求。

6.3 通信与接口

6.3.1 短路容量测量终端的通信协议应满足以下要求：

- a) 支持电力行业标准协议，确保与电力系统的兼容性；
- b) 支持国产密码算法，保障通信安全；
- c) 支持安全传输层协议，提供端到端加密保护；
- d) 具备报文完整性校验功能，防止数据篡改；
- e) 支持通信协议转换功能，增强与不同系统的互操作性。

6.3.2 数据接口是系统集成的基础，应满足以下要求：

- a) 提供标准化的数据接口，符合电力行业规范；
- b) 支持实时数据、历史数据、统计数据等多种数据类型；
- c) 支持按需数据订阅和推送机制，提高数据传输效率；
- d) 具备数据报文压缩功能，节约网络带宽；
- e) 支持数据质量标签，标识数据的可靠性和精确度，便于上层应用判断。

6.3.3 人机接口是用户与系统交互的窗口，应满足以下要求：

- a) 提供本地和远程访问界面，便于不同场景下的操作和维护；
- b) 支持参数配置、状态查询、数据显示等功能，满足用户操作需求；
- c) 具备友好的人机交互界面，提高操作效率；
- d) 支持故障诊断和告警显示，及时发现并处理问题；
- e) 提供多级权限管理，根据用户角色分配不同操作权限，提高系统安全性。

6.4 安装与部署

6.4.1 短路容量测量终端的安装位置应满足以下要求：

- a) 优先安装在配电网的关键节点，如配电变电站母线、重要分支线路出口、分布式电源接入点等，确保获取最有价值的测量数据；
- b) 安装位置应便于安装、维护和通信信号接入，降低工程和维护难度；
- c) 安装环境应满足设备运行要求，避免强电磁干扰区域，保障测量质量；
- d) 安装方式应符合电力行业相关规范要求，保持与行业标准一致。

6.4.2 接线方式是保障测量准确性和安全性的关键，应满足以下要求：

- a) 电压取样应从 PT 二次绕组或专用测量绕组引出，确保信号准确反映系统电压；
- b) 电流取样应从 CT 二次绕组或专用测量绕组引出，保证电流测量的精确性；
- c) 接线应符合电气安全规范，保证人身和设备安全，防止误操作导致事故；
- d) 信号线应采用屏蔽电缆，并做好接地处理，减少外部干扰，提高信号质量。

7 短路容量测量与计算方法

7.1 扰动信号识别

7.1.1 扰动信号识别是短路阻抗计算的前提，应具备以下功能：

- a) 自动识别各类非故障扰动事件，如负荷变化、开关操作等；
- b) 区分扰动信号与系统噪声，避免误判；
- c) 判断扰动信号是否满足短路阻抗计算要求，如信号强度、持续时间等；
- d) 识别扰动信号的起始和结束时刻，确定计算时间窗口；
- e) 对不同类型的扰动信号进行分类处理，采用最适合的计算方法。

7.1.2 扰动信号识别可采用以下方法：

- a) 基于阈值的变化率检测方法简单直观，通过监测信号变化速率识别扰动；
- b) 小波变换分析方法利用时频分析能力，能有效提取扰动特征；
- c) 模式识别方法通过与预先定义的扰动模式比对，识别特定类型扰动；
- d) 人工智能识别方法利用机器学习算法，提高复杂环境下的识别准确性；
- e) 相关性分析方法通过分析多点信号的关联性，提高识别可靠性。

7.1.3 对自然扰动信号，应根据以下特征进行有效性判断：

- a) 扰动幅值应大于系统背景噪声的 3 倍，确保信号质量；
- b) 扰动持续时间应满足短路阻抗计算要求，通常需要包含完整的扰动过程；
- c) 扰动信号应具有良好的 consistency，各相位信号变化协调；
- d) 扰动过程不应伴随系统保护动作，以区别于故障情况。

7.1.4 对可控扰动信号，应记录扰动发生时刻，并在指定时间窗口内提取信号响应特性。

7.2 数据预处理

7.2.1 扰动数据预处理是提高数据质量的关键步骤，应包括以下步骤：

- a) 异常数据检测与剔除，识别并移除明显错误或异常的数据点；
- b) 数据平滑处理，减少随机波动影响；
- c) 滤波处理，去除高频噪声，保留有用信号；
- d) 基波分量提取，便于后续阻抗计算；
- e) 相位校正，补偿采样和传输延迟导致的相位偏差。

7.2.2 数据预处理可采用以下方法：

- a) 中值滤波或均值滤波方法简单有效，适合处理随机噪声；
- b) 小波变换滤波具有良好的时频局部化特性，能保留信号特征同时去除噪声；
- c) 傅里叶变换分析适合提取周期性信号的频率成分；
- d) Prony 分析适合分析包含多种频率成分的复杂信号；
- e) Kalman 滤波能有效处理动态过程中的测量数据，具有良好的预测能力。

7.2.3 预处理后的数据应满足以下质量要求：

- a) 信噪比不低于 30dB，确保有效信号远强于背景噪声；
- b) 相位误差不大于 1° ，保证相量计算的准确性；
- c) 幅值误差不大于 1%，确保电压电流测量精度；
- d) 数据连续性好，无明显跳变，反映真实的系统变化过程。

7.3 阻抗计算流程

7.3.1 短路阻抗计算流程应包括以下步骤：

- a) 确定扰动前后的稳态数据段，为计算变化量提供基础；
- b) 计算扰动前后电压和电流的变化量，作为阻抗计算的输入；
- c) 计算等效阻抗的阻抗分量，包括实部(电阻)和虚部(电抗)；
- d) 应用修正算法处理分布式电源影响，考虑特殊控制特性；
- e) 基于阻抗值计算短路容量，评估系统强度；
- f) 评估计算结果的可信度，确定是否可用于实际应用。

7.3.2 短路阻抗计算方法可采用以下方式：

- a) 基于稳态数据的直接法简单直观，适用于稳定扰动情况；
- b) 最小二乘估计法通过拟合多个数据点提高计算精度；
- c) 递归最小二乘法适合处理时变系统，能够实时更新参数估计；
- d) 频域分析法通过分析频谱特性计算阻抗，适合复杂信号处理；
- e) 状态观测器法结合系统模型进行参数估计，具有较强的抗干扰能力。

7.3.3 采用直接法计算短路阻抗时，计算公式如下：

短路阻抗(Ω) = 短路阻抗的电阻分量(Ω) + $j \times$ 短路阻抗的电抗分量(Ω)

$$\text{电阻分量}(\Omega) = \frac{(\text{电压实部变化量}(V) \times \text{电流实部变化量}(A) + \text{电压虚部变化量}(V) \times \text{电流虚部变化量}(A))}{(\text{电流实部变化量}^2(A) + \text{电流虚部变化量}^2(A))}$$

$$\text{电抗分量}(\Omega) = \frac{(\text{电压虚部变化量}(V) \times \text{电流虚部变化量}(A) - \text{电压实部变化量}(V) \times \text{电流实部变化量}(A))}{(\text{电流实部变化量}^2(A) + \text{电流虚部变化量}^2(A))}$$

下：

$$\text{短路容量}(MVA) = \frac{\text{额定电压}^2(kV)}{\text{短路阻抗模值}(\Omega)}$$

$$\text{短路阻抗模值}(\Omega) = \sqrt{\text{电阻分量}^2 + \text{电抗分量}^2}$$

7.4 校验与修正

7.4.1 短路阻抗计算结果应通过以下方式进行校验：

- a) 与历史测量数据比较，分析变化趋势的合理性；
- b) 与基于系统参数的理论计算值比较，检验是否在合理范围内；
- c) 与相邻测量点的数据比较，分析空间分布的一致性；
- d) 通过多次重复测量结果的一致性分析，评估测量稳定性；
- e) 比较不同扰动类型下测量结果的一致性，验证方法适用性。

7.4.2 当测量结果与预期值偏差较大时，应采取以下校正措施：

- a) 分析偏差原因，排除异常因素影响，如信号干扰、设备故障等；

- b) 调整计算参数和算法，如滤波参数、计算窗口等；
- c) 增加采样次数，采用统计平均方法提高可靠性；
- d) 考虑系统运行方式变化影响，如拓扑结构、负荷水平等；
- e) 必要时重新测量或采用其他方法验证，确保结果准确性。

7.4.3 对于精度要求较高的场合，可采用以下修正方法：

- a) 频率响应修正考虑系统阻抗的频率依赖特性，提高宽频测量精度；
- b) 温度影响修正考虑环境温度对设备参数的影响；
- c) 负荷水平修正考虑系统负荷变化对阻抗特性的影响；
- d) 系统运行方式修正考虑网络拓扑结构对阻抗分布的影响；
- e) 分布式电源影响修正考虑各类电源的控制特性对测量结果的影响。

8 含分布式电源的短路容量测量

8.1 分布式电源影响分析

8.1.1 分布式电源对短路容量测量的影响主要体现在以下方面：

- a) 改变系统阻抗特性和短路电流分布，传统辐射状网络特性发生变化；
- b) 引入控制系统动态响应特性，如逆变器的电流限制和控制响应；
- c) 增加系统运行方式的复杂性和多样性，如并/离网切换；
- d) 改变系统阻抗的频率特性，引入新的谐振点或阻尼特性；
- e) 引入双向潮流和功率波动，增加了系统动态特性。

8.1.2 不同类型分布式电源对短路阻抗的影响特性应根据其接入方式和控制特性进行分析：

- a) 同步发电机型分布式电源，如小型燃气轮机、小水电等，具有传统发电机特性，对短路电流有较大贡献；
- b) 异步发电机型分布式电源，如风力发电机组等，短路特性与转子参数和滑差相关；
- c) 逆变器型分布式电源，如光伏发电、燃料电池等，短路特性受控制策略和电流限制影响；
- d) 混合型分布式电源，如带储能的光伏系统等，具有更复杂的响应特性，需综合考虑。

8.1.3 分布式电源对短路阻抗影响的定量分析可参照附录 D。

8.2 动态特性修正

8.2.1 含分布式电源的配电网短路容量测量应考虑以下动态特性修正：

- a) 分布式电源出力水平修正考虑不同出力状态下的影响差异；
- b) 控制系统响应特性修正考虑不同控制模式和参数的影响；
- c) 保护系统限流特性修正考虑逆变器等设备的电流限制功能；
- d) 储能系统充放电状态修正考虑不同荷电状态下的响应差异；
- e) 系统运行方式修正考虑网络拓扑和电源分布的变化。

8.2.2 分布式电源动态特性修正可采用以下方法：

- a) 基于运行状态的参数修正法根据分布式电源的实时运行状态调整计算参数；
- b) 等值模型法建立精确的分布式电源等效模型，模拟其对系统的影响；
- c) 数学统计分析法通过大量测量数据的统计规律建立修正模型；
- d) 组合测量法综合多点测量结果，消除单点误差；
- e) 模型辨识法通过系统辨识技术获取准确的系统模型参数。

8.2.3 含分布式电源的短路容量测量应建立完整的影响因素数据库，记录分布式电源类型、容量、接入位置、控制参数等信息，作为动态特性修正的基础数据。

8.3 不同类型分布式电源适用方法

8.3.1 对于同步发电机型分布式电源，短路容量测量可采用以下方法：

- a) 在发电机出力稳定时进行测量，减少动态过程影响；
- b) 考虑发电机暂态和次暂态特性，区分不同时间尺度下的短路特性；
- c) 建立发电机动态模型进行综合计算，包括详细的机械和电气参数；
- d) 考虑励磁系统和调速系统的响应特性，分析其对短路参数的影响。

8.3.2 对于异步发电机型分布式电源，短路容量测量可采用以下方法：

- a) 考虑转子滑差的影响，在不同运行状态下滑差变化导致阻抗特性变化；
- b) 区分启动状态和稳定运行状态，不同工况下的短路特性差异较大；
- c) 考虑无功补偿装置的影响，如电容器组对系统阻抗的改变；
- d) 分析机械转矩波动对电气特性的影响，如风力变化导致的输出波动。

8.3.3 对于逆变器型分布式电源，短路容量测量可采用以下方法：

- a) 考虑控制模式的影响，如 PQ 控制、V/f 控制等不同策略下的响应差异；
- b) 分析逆变器限流特性和低电压穿越能力，这直接影响故障期间的电流输出；
- c) 考虑谐波、间谐波对测量精度的影响，逆变器输出的非基波成分可能干扰测量；
- d) 分析不同功率因数下的短路特性变化，功率因数设定影响无功支撑能力。

8.3.4 对于混合型分布式电源，短路容量测量可采用以下方法：

- a) 分析各组成部分的协调控制特性，如光伏与储能的联合控制策略；
- b) 考虑能量管理系统的运行策略，如负荷跟踪、削峰填谷等不同模式；
- c) 分析不同运行模式下的短路特性变化，如离网模式与并网模式的差异；
- d) 建立综合等效模型进行整体分析，考虑各组件间的交互影响。

9 短路参数数据库构建

9.1 数据库结构

9.1.1 短路参数数据库应采用分层结构设计，主要包括以下层次：

- a) 数据采集层：负责从前端设备获取原始测量数据并存储，确保数据完整性；
- b) 数据处理层：对原始数据进行预处理、计算和质量评估，提升数据价值；
- c) 参数管理层：负责对计算后的短路参数进行系统化管理，包括分类、标记和关联；
- d) 应用服务层：提供标准化接口，支持各类应用系统调用和使用短路参数。

9.1.2 数据库应包含以下主要数据类型：

- a) 原始测量数据：存储电压、电流波形等基础信息，是后续分析的起点；
- b) 扰动事件数据：记录扰动的类型、时间、特征等信息，为参数计算提供背景；
- c) 短路参数数据：存储计算所得的短路阻抗、短路容量等关键成果；
- d) 质量评估数据：记录数据质量指标和可信度等级，指导数据应用；
- e) 系统配置数据：描述网络拓扑、设备参数等系统背景信息，帮助理解和分析结果；
- f) 运行方式数据：记录测量时的系统运行状态，为结果解释提供环境信息。

9.1.3 数据库应支持以下功能：

- a) 数据实时存储和历史数据归档功能确保新旧数据的有效管理；
- b) 数据备份和恢复功能保障数据安全，防止丢失；
- c) 数据查询和统计分析功能便于用户获取和挖掘有价值信息；
- d) 数据导入导出功能支持与其他系统的数据交换；
- e) 数据安全功能保护敏感信息，控制访问权限；
- f) 版本控制和修改记录功能跟踪数据变更历史，便于追溯和审计。

9.2 数据质量评估

9.2.1 短路参数数据质量评估应从以下方面进行：

- a) 数据完整性评估：检查数据是否存在缺失或断点；
- b) 数据准确性评估：判断数据是否符合预期范围和物理规律；
- c) 数据一致性评估：分析多次测量结果的稳定性和可重复性；
- d) 数据时效性评估：考察数据是否反映当前系统状态，避免过时信息；
- e) 数据可追溯性评估：检查数据来源是否清晰可查，便于验证和追溯。

9.2.2 数据质量评估指标可包括：

- a) 数据完整率：应不低于 99%，确保信息连续性；
- b) 数据准确率：应不低于 95%，保证计算结果可靠；
- c) 数据一致性系数：应不低于 0.9，反映测量结果的稳定性；
- d) 数据更新周期：应不超过 24 小时，保证数据时效性；
- e) 异常数据识别率：应不低于 98%，确保及时发现和处理问题数据。

9.2.3 数据质量评估的流程和方法见附录 E。

9.3 参数可信度评价

9.3.1 短路参数可信度评价应基于以下因素：

- a) 测量条件评价分析扰动特性和系统状态是否适合测量；
- b) 测量过程评价检查采样质量和信噪比等技术指标；
- c) 计算方法评价判断所用算法的适用性和数值稳定性；
- d) 结果一致性评价分析多次测量结果的离散程度；
- e) 验证结果评价比较与其他方法得到的结果差异。

9.3.2 参数可信度等级划分为 A、B、C、D 四级：

- a) A 级：可信度高，数据质量优异，可直接用于保护整定等关键应用；
- b) B 级：可信度较高，数据基本可靠，适合大多数常规应用；
- c) C 级：可信度中等，数据存在一定不确定性，建议在重要应用前进行进一步验证；
- d) D 级：可信度低，数据质量不佳，不建议直接使用，应重新测量或采用其他方法验证。
- e) 参数可信度评价结果应与短路参数数据一同存储，作为应用判断的依据。

10 测量结果应用

10.1 短路容量测量结果可应用于以下方面：

- a) 配电网继电保护整定：提供准确的短路参数，优化保护装置整定；

- b) 配电网规划设计：为电网规划提供实测数据支撑；
- c) 配电设备选型：为断路器、限流器等设备选型提供依据；
- d) 分布式电源接入评估：评估分布式电源接入对系统短路容量的影响；
- e) 配电网安全分析：识别系统薄弱环节，评估系统安全裕度；
- f) 系统状态评估：提供系统阻抗特性变化趋势，反映系统状态；
- g) 故障诊断与分析：为故障事件提供参考数据；
- h) 系统运行优化：为运行方式优化提供决策支持。

10.2 测量结果应用应遵循以下原则：

- a) 根据应用需求选择合适可信度等级的参数，重要应用选用高可信度数据；
- b) 考虑参数的时效性，定期更新应用数据，避免使用过时信息；
- c) 结合系统运行状态分析参数变化趋势，理解参数与系统状态的关联；
- d) 建立参数异常预警机制，及时发现系统异常变化；
- e) 定期评估参数应用效果，验证和改进应用方法。

10.3 测量结果应纳入配电网管理系统，实现与调度自动化系统、配电自动化系统、保护信息管理系统等的数据共享和协同应用。

附 录 A
(规范性附录)
雷非故障扰动短路容量测量精度等级划分

A.1 短路容量测量精度等级

短路容量测量精度等级是根据测量结果的准确性和应用需求划分的。通过对短路容量相对误差、短路阻抗相对误差以及相应应用场景的综合考虑，将测量精度分为三个等级，如表A.1所示。

表 A.1 短路容量测量精度等级

精度等级	短路容量相对误差	短路阻抗相对误差	应用场景
0.5 级	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 5\%$	保护整定、设备选型
1.0 级	$\leq \pm 10\%$	$\leq \pm 10\%$	系统分析、规划设计
2.0 级	$\leq \pm 20\%$	$\leq \pm 20\%$	趋势分析、参考应用

在0.5级精度中，短路容量相对误差和短路阻抗相对误差均不超过 $\pm 5\%$ ，这一精度等级主要适用于保护整定和设备选型等对精度要求较高的关键应用场景。对于系统分析和规划设计等一般应用，可采用1.0级精度标准，其短路容量和短路阻抗相对误差控制在 $\pm 10\%$ 以内。而在趋势分析和参考应用等对精度要求相对较低的非关键场合，可采用2.0级精度标准，允许短路容量和短路阻抗相对误差达到 $\pm 20\%$ 。

A.2 影响测量精度的主要因素包括：

- a) 测量系统硬件精度直接决定了数据采集的基础准确性,包括采样精度、分辨率和信噪比等指标;
- b) 扰动信号特性,如幅值大小、持续时间和频谱特性等,对测量结果有显著影响;
- c) 算法选择与参数设置,不同的计算方法和参数配置会导致不同的测量结果;
- d) 系统运行状态,如负荷水平、网络拓扑和运行方式等,会改变系统的阻抗特性;
- e) 分布式电源的接入及其控制特性也会对短路参数产生复杂影响,尤其是在高渗透率的场景下。

A.3 根据应用需求选择合适的精度等级：

- a) 对于保护整定、设备选型等关键应用,应选择 0.5 级精度;
- b) 对于系统分析、规划设计等一般应用,可选择 1.0 级精度;
- c) 对于趋势分析、参考应用等非关键场合,可选择 2.0 级精度。

附录 B
(规范性附录)
不同类型非故障扰动事件特征参数

B.1 大型负荷切换扰动特征

大型负荷切换扰动特征如表B.1所示。

表 B.1 大型负荷切换扰动特征

特征参数	典型范围	说明
电压变化率	0.5%~5%	负荷投入时电压下降,切除时电压上升
电流变化率	5%~50%	负荷投入时电流上升,切除时电流下降
功率因数变化	±0.05	负荷特性决定变化方向
暂态持续时间	50ms~200ms	从扰动开始到系统恢复稳定
波形特征	近似阶跃	电压、电流波形呈阶跃变化

B.2 电动机起动扰动特征

电动机起动扰动特征如表B.2所示。

表 B.2 电动机起动扰动特征

特征参数	典型范围	说明
电压暂降幅值	3%~15%	与电动机容量和系统强度相关
起动电流倍数	4~7 倍额定电流	与电动机类型和起动方式相关
起动持续时间	0.5s~10s	与电动机容量和负载特性相关
功率因数特性	0.2~0.4(起动初期)	起动过程中逐渐提高
频率波动	±0.1Hz	大型电动机起动时可能引起

B.3 电容器组投切扰动特征

电容器组投切扰动特征如表B.3所示。

表 B.3 电容器组投切扰动特征

特征参数	典型范围	说明
电压变化率	1%~6%	投入时电压上升,切除时电压下降
电流冲击倍数	10~30 倍额定电流	投入瞬间的电流冲击
振荡频率	300Hz~1000Hz	与系统参数和电容器容量相关
振荡持续时间	10ms~50ms	振荡逐渐衰减

谐波含量	THD 增加 1%~5%	投入瞬间可能产生高次谐波
------	--------------	--------------

B.4 分布式电源出力波动特征

分布式电源出力波动特征如表B.4所示。

表 B.4 分布式电源出力波动特征

特征参数	典型范围	说明
有功功率变化率	1%~20%/分钟	与分布式电源类型和环境条件相关
电压波动率	0.5%~3%	与分布式电源位置和容量相关
功率因数变化	±0.1	与控制策略相关
波动周期	5s~10 分钟	光伏、风电等不同类型具有不同特性
谐波特性	个别次谐波增加 1%~3%	主要是逆变器型分布式电源

B.5 开关操作扰动特征

开关操作扰动特征如表B.5所示。

表 B.5 开关操作扰动特征

特征参数	典型范围	说明
电压瞬变幅值	10%~50%	操作类型和系统参数相关
暂态持续时间	5ms~50ms	从扰动开始到系统恢复稳定
振荡频率	100Hz~2000Hz	与系统参数相关
电流突变特性	额定电流的 0~5 倍	与负载特性相关
传播特性	衰减速率 0.1~0.5/km	沿线路传播过程中幅值衰减

附 录 C
(规范性附录)
短路阻抗与系统响应关系建模方法

C.1 传统配电网模型

对于传统配电网，短路阻抗与系统响应关系可表示为：

$$\Delta U = Z \times \Delta I \quad (\text{C.1-1})$$

式中： Z —系统短路阻抗(Ω)；

ΔU —扰动引起的电压变化向量(V)；

ΔI —扰动引起的电流变化向量(A)。

C.2 含分布式电源的配电网模型

含分布式电源的配电网，短路阻抗与系统响应关系可表示为。

$$\Delta U = Z \times \Delta I + \Delta U_{dg} \quad (\text{C.2-1})$$

式中： ΔU_{dg} —分布式电源响应引起的电压变化(V)。

分布式电源响应引起的电压变化 可根据其类型和控制特性建模：

a) 对于同步发电机型分布式电源：

$$\Delta U_{dg} = Z_{dg} \times \Delta I_{dg} \quad (\text{C.2-2})$$

式中： Z_{dg} —绕击耐雷水平(kA)；

ΔI_{dg} —分布式电源注入电流变化(A)。

b) 对于逆变器型分布式电源：

$$\Delta U_{dg} = T_c \times \Delta U \quad (\text{C.2-3})$$

式中： T_c —逆变器控制传递函数；

ΔU —扰动引起的电压变化向量(V)。

C.2 频域分析模型

在频域中，短路阻抗与系统响应关系可表示为：

对于传统配电网，短路阻抗与系统响应关系可表示为：

$$Z(j\omega) = \frac{\Delta U(j\omega)}{\Delta I(j\omega)} \quad (\text{C.3-1})$$

式中： $Z(j\omega)$ —频域中的系统阻抗(Ω)；

$\Delta U(j\omega)$ —频域中的电压变化(V)；

$\Delta I(j\omega)$ —频域中的电流变化(A)。

C.3 状态空间模型

采用状态空间模型描述短路阻抗与系统响应关系：

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B\Delta I \quad (\text{C.4-1})$$

$$\Delta U = Cx + D\Delta I \quad (\text{C.4-2})$$

式中： x —系统状态变量；

A 、 B 、 C 、 D —系统矩阵；

ΔI —电流变化输入；

ΔU —电压变化输出。

C.4 等值网络模型

通过等值网络模型描述短路阻抗与系统响应关系：

设置系统等值网络模型，包括系统电源、线路、变压器、负载等元件，根据网络拓扑和参数计算短路阻抗。

附录 D
(规范性附录)
不同类型分布式电源对短路阻抗影响特性

D.1 同步发电机型分布式电源

同步发电机型分布式电源对短路阻抗的影响特性如表D.1所示。

表 D.1 同步发电机型分布式电源对短路阻抗的影响特性

影响特性	描述
短路电流贡献	可提供持续的短路电流，一般为额定电流的 4~6 倍
动态特性	具有次暂态、暂态和稳态过程，短路阻抗随时间变化
控制系统影响	励磁系统和调速系统控制参数影响短路阻抗特性
机械惯性影响	机械惯性影响暂态过程中的电压恢复特性
频率特性	在机械响应范围内对频率扰动有响应能力

D.2 异步发电机型分布式电源

异步发电机型分布式电源对短路阻抗的影响特性如表D.2所示。

表 D.2 异步发电机型分布式电源对短路阻抗的影响特性

影响特性	描述
短路电流贡献	短路初期贡献较大，但快速衰减，持续时间短
动态特性	短路后磁场迅速衰减，阻抗特性变化快
转子滑差影响	转子滑差变化导致阻抗特性变化
无功补偿影响	配套的无功补偿装置影响短路阻抗特性
频率特性	对频率变化敏感，滑差随频率变化而变化

D.3 逆变器型分布式电源

逆变器型分布式电源对短路阻抗的影响特性如表D.3所示。

表 D.3 逆变器型分布式电源对短路阻抗的影响特性

影响特性	描述
短路电流贡献	一般限制在额定电流的 1.1~2 倍，由控制策略决定
控制模式影响	PQ 控制和 V/f 控制下短路阻抗特性不同
响应速度	控制响应速度快，一般在几个毫秒内
谐波影响	可能引入高次谐波，影响阻抗测量精度

低电压穿越	低电压穿越能力影响短路过程中的电流注入特性
-------	-----------------------

D. 4 混合型分布式电源

混合型分布式电源对短路阻抗的影响特性如表D. 4所示。

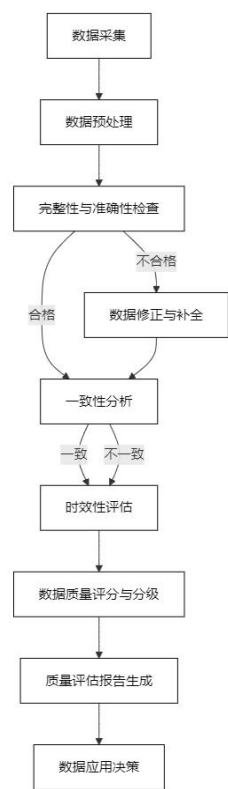
表 D. 4 混合型分布式电源对短路阻抗的影响特性

影响特性	描述
复合响应特性	结合各类型分布式电源特点，短路响应更复杂
能量管理影响	能量管理系统的控制策略影响短路阻抗特性
运行模式影响	不同运行模式下短路阻抗特性差异显著
控制协调影响	各部分控制系统的协调特性影响整体短路响应
储能状态影响	储能系统的充放电状态影响短路响应能力

附录 E
(规范性附录)
短路参数质量评估流程

E.1 质量评估流程图

短路参数质量评估流程如图E. 1-1所示。



该流程图详细描述了从数据采集到质量评定的整个评估过程，包括数据完整性评估、数据准确性评估、结果一致性评估以及最终的质量等级判定。流程图明确了各评估环节的先后顺序和逻辑关系，为质量评估工作提供了规范化指导。

E.2 数据完整性评估主要包括以下内容：

- a) 检查数据记录是否完整，无缺失或损坏，确保原始数据的完整性；
- b) 检查时间戳是否连续，无跳变或重复，保证数据的时间连贯性；
- c) 检查采样点数是否满足计算要求，确保数据量足够支持短路参数计算；
- d) 检查通道数据是否齐全，三相数据是否完整，保证电气参数的完整性；
- e) 检查辅助信息（如系统运行方式、负荷水平等）是否完整，确保有足够的背景信息支持数据分析和解释。

E.3 数据准确性评估主要包括以下内容：

- a) 检查数据是否在合理范围内，符合物理规律和系统特性；
- b) 检查相位关系是否正确，各相量之间保持合理的相角关系；
- c) 检查功率因数是否合理，与系统负荷特性相符；
- d) 检查谐波含量是否超标，评估谐波对测量精度的影响；
- e) 检查三相不平衡度是否正常，判断系统运行状态的合理性。

E.4 结果一致性评估主要包括以下内容：

- a) 计算多次测量结果的离散程度，评估测量结果的稳定性；
- b) 分析不同扰动类型下测量结果的差异，检验方法的适应性；
- c) 比较不同算法计算结果的差异，验证计算方法的鲁棒性；
- d) 分析短周期内参数变化趋势的合理性，检查参数的时间一致性；
- e) 比较相邻测量点参数的空间一致性，验证系统整体特性的合理性。

E.5 质量评估指标计算方法

- a) 数据完整率计算：

$$Rc = \frac{Nc}{Nt} \times 100\% \quad (\text{E. 5-1})$$

式中： Rc —数据完整率(%)；

Nc —有效数据点数；

Nt —应有数据点总数。

- b) 数据准确率计算：

$$Ra = \frac{Na}{Nv} \times 100\% \quad (\text{E. 5-2})$$

式中： Ra —数据准确率(%)；

Na —准确数据点数；

Nv —验证数据点总数。

- c) 数据一致性系数计算：

$$C_i = 1 - \frac{\sigma}{\mu} \quad (\text{E. 5-3})$$

式中： C_i —一致性系数；

σ —多次测量结果的标准差；

μ —多次测量结果的平均值。