

ICS XXX
CCS XXX

T/HEBQIA

团 体 标 准

T/HEBQIA × × × × — 2025

含分布式电源的配电网短路参数监测终端 布点导则

（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 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1	1
短路参数 short-circuit parameters	2
3.2	2
短路参数监测终端 short-circuit parameter monitoring terminal	2
3.3	2
有源配电网 active distribution network	2
3.4	2
分布式电源 distributed generation	2
3.5	2
观测区域 observation area	2
3.6	2
关键节点 critical node	2
3.7	2
可观测性 observability	2
3.8	2
短路容量敏感性 short-circuit capacity sensitivity	2
3.9	2
最优布点 optimal placement	2
3.10	2
延伸计算 extended calculation	3
4 总则	3
5 配电网短路特性分析	3
5.1 传统配电网短路特性	3
5.2 分布式电源影响分析	4
5.3 有源配电网短路特性	5
6 监测终端布点总体要求	5
6.1 布点原则	5
6.2 布点流程	6
6.3 布点密度	7
7 关键节点识别	7
7.1 电气拓扑分析	8

7.2 短路容量敏感性分析 9

7.3 分布式电源影响评估 10

8 多目标优化布点方法 11

8.1 可观测性分析 11

8.2 经济性评估 12

8.3 多目标优化模型 13

9 布点方案设计 14

9.1 监测终端配置 14

9.2 典型布点方案 15

9.3 特殊场景布点 16

10 方案评估与验证 17

10.1 评估指标 17

10.2 验证方法 18

10.3 优化调整 19

附录 A（规范性附录） 监测终端技术要求 21

附录 B（规范性附录） 配电网特征节点判定方法 23

附录 C（规范性附录） 监测终端布点优化方法 25

附录 D（规范性附录） 分布式电源影响下的监测点特殊考虑 27

附录 E（规范性附录） 典型应用场景下监测终端布点技巧 29

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。

含分布式电源的配电网短路参数监测终端布点导则

1 范围

本标准规定了含分布式电源的配电网短路参数监测终端的布点原则、方法、流程及评估验证等内容。

本标准适用于电力企业或使用单位规划、设计和建设含分布式电源的10kV~35kV配电网短路参数在线监测系统的终端布点工作。

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 12325 电能质量 供电电压偏差
GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡
GB/T 15544.1 三相交流系统短路电流计算 第1部分：电流计算
GB/T 15945 电能质量 电力系统频率偏差
GB/T 19963.1 风电场接入电力系统技术规定 第1部分：陆上风电
GB/T 19963.2 风电场接入电力系统技术规定 第2部分：海上风电
GB/T 19964 光伏发电站接入电力系统技术规定
GB/T 20140 隐极同步发电机定子绕组端部动态特性和振动测量方法及评定
GB/T 26866 电力时间同步系统检测规范
GB/T 30137 电能质量 电压暂升、电压暂降与短时中断
GB/T 36276 电力储能用锂离子电池
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
NB/T 10283 高压交流负荷开关-熔断器组合电器 试验导则
NB/T 10091 高压开关设备温度在线监测装置技术规范
DL/T 860.904 电力自动化通信网络和系统 第90-4部分：网络工程指南
DL/T 1883 配电网运行控制技术导则
DL/T 2810 配电网智能分布式终端互操作技术规范
DL/T 5729 配电网规划设计技术导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

短路参数 short-circuit parameters

表征电力系统短路特性的物理量，包括短路阻抗、短路容量、短路电流等。

3.2

短路参数监测终端 short-circuit parameter monitoring terminal

安装在配电网特定位置，用于采集电压、电流数据并计算短路参数的装置。

3.3

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。

3.4

分布式电源 distributed generation

分散接入配电网的小型发电设施，包括但不限于光伏发电、风力发电、燃气轮机发电、燃料电池发电及储能装置等。

3.5

观测区域 observation area

通过单个或多个短路参数监测终端可直接测量或通过计算得到短路参数的网络区域。

3.6

关键节点 critical node

在配电网拓扑结构中具有重要地位，对短路参数监测具有代表性或关键影响的节点。

3.7

可观测性 observability

配电网通过有限数量的监测终端对全网短路参数进行直接测量或准确计算的能力。

3.8

短路容量敏感性 short-circuit capacity sensitivity

配电网节点短路容量对网络结构变化、运行方式变化或分布式电源出力变化的响应程度。

3.9

最优布点 optimal placement

在满足可观测性要求的前提下，通过多目标优化方法确定的监测终端安装位置方案。

3.10

延伸计算 extended calculation

基于已安装监测终端的测量数据，通过算法计算未安装监测终端节点的短路参数值。

4 总则

- 4.1 含分布式电源的配电网短路参数监测终端布点应坚持“系统性规划、重点监测、经济合理、技术可行”的原则，实现对配电网短路参数的有效监测。
- 4.2 监测终端布点应充分考虑分布式电源对配电网短路特性的影响，重点关注分布式电源接入密度高、容量大、类型复杂的区域。
- 4.3 监测终端布点应通过关键节点识别和多目标优化方法，在满足监测精度和覆盖率要求的前提下，最大限度降低设备投资和运维成本。
- 4.4 监测终端布点应结合配电网规划，预留发展空间，适应未来配电网结构变化和分布式电源接入增长的需要。
- 4.5 监测终端布点应考虑与配电自动化系统、配电网运行分析系统等协调配合，实现资源共享和功能互补。
- 4.6 监测终端布点方案应经过科学评估和验证，确保监测系统的有效性和可靠性。
- 4.7 监测终端布点应因地制宜，根据配电网特点和监测需求制定差异化的布点策略。

5 配电网短路特性分析

5.1 传统配电网短路特性

5.1.1 传统配电网拓扑结构特性主要包括：

- a) 网络结构以辐射状为主，少量线路采用闭环运行方式，形成简单明确的树形结构；
- b) 供电方式采用单一电源点供电，功率流向从电源点（通常是变电站）单向流向各负荷点，呈现明显的“源-荷”单向辐射特性；
- c) 配电网节点数量多且线路分支复杂，尤其在负荷密集区域分支更为繁多；
- d) 传统配电网只在变电站出线开关处配置较为完善的保护和监测功能，能够监测线路始端的电气参数；
- e) 线路上的分段开关和联络开关功能相对有限，多为简单的机械开关，缺乏智能化监测和控制功能。

5.1.2 传统配电网短路电流特性主要包括：

- a) 短路电流主要来自系统电源，大小取决于系统阻抗，与上级系统的强度密切相关；
- b) 短路电流随故障点距离系统电源距离增加而减小，呈现明显的距离衰减特性，这是由于线路阻抗的累积效应造成的；
- c) 短路电流幅值相对稳定，受网络运行方式的影响较小，主要由系统阻抗和负荷性质决定；
- d) 短路电流具有较强的方向性，短路电流总是从系统电源点流向故障点，方向明确且固定；
- e) 短路电流的阻性分量和感性分量比例相对固定，主要由系统阻抗特性决定，这一特性便于保护定值的计算和整定。

5.1.3 传统配电网短路参数分布特性主要包括：

- a) 短路容量从变电站母线向负荷末端逐渐降低，呈现明显的递减趋势，这是由线路阻抗累积造成的；

- b) 与短路容量变化趋势相反，短路阻抗从变电站母线向负荷末端逐渐增大，随距离增加而增大；
- c) 短路参数变化具有较强的规律性，可以通过理论计算方法获得较为准确的结果，这为系统分析和设计提供了便利；
- d) 短路参数受季节和负荷变化的影响相对较小，系统参数较为稳定，不会出现大幅波动；
- e) 短路参数的空间分布相对稳定，时间变化相对缓慢，呈现出较强的确定性特征。

5.2 分布式电源影响分析

5.2.1 分布式电源对配电网拓扑结构的影响主要包括：

- a) 改变传统单一电源供电模式，形成多电源供电结构；
- b) 功率流向可能发生改变，出现双向潮流，打破了传统的单向潮流模式；
- c) 网络结构复杂度增加，运行方式多样化，系统的组合状态大幅增加；
- d) 保护配置和控制策略需要适应新的网络结构，传统的保护方案可能不再适用，需要更智能的保护和控制方法；
- e) 网络拓扑动态变化特性增强，网络重构更加频繁，特别是在分布式电源出力波动较大的情况下。

5.2.2 分布式电源对配电网短路电流的影响主要包括：

- a) 增加短路电流来源，多点注入特性明显，短路电流不再仅来自系统电源，而是有多个来源点；
- b) 改变短路电流分布，不再单纯随距离递减，而是呈现更复杂的分布形态；
- c) 短路电流方向可能改变，在某些情况下会出现反向短路电流；
- d) 短路电流幅值波动增大，受分布式电源出力变化影响显著，不再具有传统配电网的稳定特性；
- e) 不同类型分布式电源对短路电流的贡献特性不同，需要针对不同类型分别分析其影响。

5.2.3 分布式电源对配电网短路参数的影响主要包括：

- a) 改变短路容量空间分布特性，不再单纯沿线路递减，而可能在分布式电源接入点附近出现局部升高；
- b) 增加短路参数的时变特性，随分布式电源出力变化而变化，特别是对于风电、光伏等波动性电源；
- c) 增强短路参数对网络拓扑变化的敏感性，拓扑结构的微小变化可能导致短路参数的显著变化；
- d) 改变短路阻抗的阻抗角特性，可能使阻抗角发生偏移，对保护定值计算和整定有影响；
- e) 增加短路参数计算的复杂性和不确定性，传统的理论计算方法可能不再适用，需要更复杂的模型和算法。

5.2.4 不同类型分布式电源对短路参数的影响特性如下：

- a) 同步发电机型分布式电源（如小型燃气轮机等）的短路电流贡献较大，一般为额定电流的 4~6 倍，短路电流持续时间长，可维持稳定的短路电流注入，对短路容量提升效果显著且相对稳定，表现出类似于传统同步发电机的特性。
- b) 感应发电机型分布式电源（如某些风力发电机等）的短路电流贡献在初始阶段较大，但迅速衰减，短路电流持续时间短，通常在数个周波后衰减至较低水平，对短路容量的提升效果有限且不稳定，需要特别关注其暂态特性。
- c) 逆变器型分布式电源（如光伏发电、燃料电池等）的短路电流贡献受控制策略限制，一般为额定电流的 1.1~2 倍，短路电流响应快速，但受控制策略和保护设置限制，对短路容量的提升效果相对有限且具有较强的时变特性，其行为更多由控制策略决定而非物理特性。
- d) 储能系统的短路电流贡献受储能类型、充放电状态和控制策略影响，可提供双向电流支持，控制灵活性强，对短路容量的影响具有较强的状态依赖性，表现出更为复杂的特性。

5.3 有源配电网短路特性

5.3.1 有源配电网相比传统配电网的主要特性变化包括：

- a) 网络拓扑结构更加复杂，运行模式更加多样化，网络结构可能频繁变化，需要更灵活的管理策略；
- b) 潮流分布动态变化，双向潮流现象普遍存在，功率流向不再固定，增加了潮流管理的难度；
- c) 电压分布特性发生了改变，在分布式电源接入点可能出现电压升高现象，传统的电压降模型可能不再适用；
- d) 系统阻抗特性变化明显，等值阻抗随运行状态动态变化，不再具有固定的特性；
- e) 系统稳定性特征也发生了变化，出现了新的稳定性问题，如低惯量问题、振荡问题等。

5.3.2 有源配电网的短路参数特性变化主要表现为：

- a) 短路容量分布不再单纯随距离变化，而是呈现局部波动特性，在分布式电源接入点附近可能出现短路容量增大的现象；
- b) 短路参数的动态变化明显，时变特性增强，短路参数会随分布式电源出力、负荷变化和网络拓扑的变化而迅速变化；
- c) 短路参数空间分布的关联性增强，节点间相互影响加大，一个节点的变化可能影响到多个相关节点的短路参数；
- d) 短路参数计算难度增加，传统的理论计算精度下降，需要更复杂的模型和算法来准确计算短路参数；
- e) 短路参数监测的重要性增加，实测数据的价值提升，实时监测成为获取准确短路参数的重要手段。

5.3.3 有源配电网的保护和控制需求变化主要包括：

- a) 保护配置需要适应短路电流方向和幅值的变化，传统的定向保护和过流保护可能不再适用，需要更智能的保护方案；
- b) 保护整定需要考虑短路参数的动态变化特性，固定整定值可能不能满足要求，可能需要自适应保护策略；
- c) 控制策略需要基于准确的短路参数信息，实时短路参数成为控制决策的重要依据；
- d) 故障定位和隔离需要更准确的短路参数支持，以实现快速准确的故障处理；
- e) 系统重构和恢复需要实时短路参数作为决策依据，确保重构后的系统安全稳定运行。

6 监测终端布点总体要求

6.1 布点原则

6.1.1 布点方案应具备系统性，主要包括：

- a) 从配电网整体出发，统筹考虑各区域的监测需求，确保监测系统的整体性和协调性；
- b) 考虑配电网的层次结构和功能分区，根据不同层次和区域的特点制定差异化的布点策略；
- c) 兼顾当前需求和未来发展，在满足当前监测需求的同时，预留足够的扩展空间，适应未来配电网的发展变化；
- d) 协调短路参数监测与其他监测系统的关系，如配电自动化系统、电能质量监测系统等，实现资源共享和功能互补；
- e) 考虑监测数据的综合应用价值，确保获取的数据能够满足规划、运行、保护等多方面的应用需求。

6.1.2 布点应遵循重要性优先原则，主要包括：

- a) 优先监测关键节点和重要线路，如变电站出线点、主干线关键分段点等，确保网络骨干的监测覆盖；
- b) 优先监测分布式电源接入密度高的区域，这些区域短路参数变化显著，监测价值更高；
- c) 优先监测短路容量变化敏感区域，这些区域的参数波动大，更需要实时监测数据支持；
- d) 优先监测保护配置复杂或存在保护协调问题的区域，为保护整定优化提供数据支持；
- e) 优先监测供电可靠性要求高的区域，如重要用户集中区域，确保这些区域的供电安全。

6.1.3 布点应考虑经济性，主要包括：

- a) 在满足监测需求的前提下，最小化监测终端数量，避免冗余建设，优化投资效益；
- b) 充分利用现有设施和条件，降低安装成本；
- c) 考虑监测终端安装条件和通信条件，选择安装便利、通信条件好的位置，减少额外工程投入；
- d) 平衡投资成本与监测效益，在效益明显的区域适当增加投入，在效益不显著的区域控制成本；
- e) 考虑运行维护成本，选择运维便利、可靠性高的布点方案，降低长期运维成本。

6.1.4 布点应具备技术可行性，主要包括：

- a) 考虑监测终端安装的物理条件和环境要求，如安装空间、环境温度、湿度等，确保设备能够正常安装和运行；
- b) 考虑供电条件和电气安全要求，确保监测终端有稳定的电源供应，并符合电气安全规范；
- c) 考虑通信网络覆盖和通信质量要求，确保数据能够可靠传输，避免选择通信盲区或信号弱区；
- d) 考虑现场运维条件和可维护性，选择便于日常巡检和故障处理的位置，避免偏远或难以到达的位置；
- e) 考虑数据传输和集成要求，确保监测数据能够顺利接入数据中心，与现有系统兼容。

6.1.5 布点方案应具备适应性，主要包括：

- a) 适应配电网拓扑结构变化，在网络结构调整后仍能保持良好的监测覆盖；
- b) 适应分布式电源接入增长和分布变化，随着新能源的发展，监测系统能够持续发挥作用；
- c) 适应负荷增长和分布变化，在负荷发展变化的情况下不失效；
- d) 适应运行方式变化和优化调整，在不同运行方式下均能提供有效监测；
- e) 适应技术发展和功能提升，便于后期技术升级和功能拓展。

6.2 布点流程

6.2.1 监测终端布点的基本流程如下：

- a) 配电网分析与建模：收集和分析配电网拓扑结构、设备参数、负荷分布、分布式电源接入情况等信息，建立配电网模型；
- b) 监测需求分析：明确短路参数监测的目标、范围、精度要求和应用场景；
- c) 关键节点识别：基于电气拓扑分析、短路容量敏感性分析和分布式电源影响评估，识别配电网中的关键节点；
- d) 初步布点方案设计：根据关键节点识别结果和监测需求，设计包括监测位置、监测终端类型和数量的初步布点方案；
- e) 多目标优化：基于可观测性分析和经济性评估，采用多目标优化方法优化布点方案，平衡监测覆盖率和成本效益；
- f) 方案评估与验证：对优化后的布点方案进行评估和验证，包括模拟验证和实际测试，确认方案的可行性和有效性；

- g) 方案实施与调整：实施布点方案，并根据实际监测效果进行必要的调整和优化，形成最终的监测网络。

6.2.2 布点流程中应注意以下关键点：

- a) 配电网模型应尽可能准确反映实际网络情况，包括网络拓扑、线路参数、负荷特性和分布式电源特性等；
- b) 监测需求应综合考虑运行、规划、保护等多方面需求，确保监测系统能够为各类应用提供支持；
- c) 关键节点识别应采用多种分析方法相结合，如电气拓扑分析、敏感性分析和影响评估等，提高识别的准确性和全面性；
- d) 布点方案设计应保持适当冗余度，在关键区域设置备份监测点，增强系统的可靠性和容错能力；
- e) 优化过程应平衡多种目标和约束条件，如监测覆盖率、成本限制、技术可行性等，寻找最优折中方案；
- f) 方案评估应采用多种评估方法进行交叉验证，如理论分析、仿真计算和实地测试等，全面验证方案的有效性；
- g) 方案实施和调整应分阶段进行，逐步完善，先在关键区域部署，验证效果后再扩展到其他区域，降低实施风险。

6.3 布点密度

6.3.1 监测终端布点密度应根据配电网特点、监测需求和经济性要求确定，不同类型配电网的布点密度指导值如表 1 所示。

表 1 不同类型配电网监测终端布点密度指导值

配电网类型	布点密度(台/线路)	布点密度说明
传统配电网	1~3	每条 10kV 线路配置 1~3 台监测终端
分布式电源渗透率小于 15%	2~4	每条 10kV 线路配置 2~4 台监测终端
分布式电源渗透率为 15%~30%	3~5	每条 10kV 线路配置 3~5 台监测终端
分布式电源渗透率大于 30%	4~6	每条 10kV 线路配置 4~6 台监测终端
微电网	2~3	每个微电网配置 2~3 台监测终端

注：分布式电源渗透率是指配电网中分布式电源容量与最大负荷的比值。

6.3.2 除表 1 的指导值外，监测终端布点密度还应结合以下因素进行调整：

- a) 配电网结构复杂度，结构越复杂（如多分支、网格化结构），布点密度应适当提高，确保复杂网络的可观测性；
- b) 分布式电源类型多样性，类型越多样（如同时存在光伏、风电、储能等多种类型），布点密度应适当提高，应对不同类型电源的综合影响；
- c) 考虑负荷重要性，在重要负荷集中区域（如工业园区、商业中心、医院等），布点密度应适当提高，确保供电安全；
- d) 考虑短路参数变化程度，在短路参数变化显著的区域（如系统薄弱环节、网络边缘区域等），布点密度应适当提高，捕捉参数波动；
- e) 根据经济技术条件调整布点密度，在预算充足、通信条件好的区域可适当提高密度，在资源有限的情况下则需合理控制。

7 关键节点识别

7.1 电气拓扑分析

7.1.1 配电网拓扑结构的描述方法主要包括：

- a) 节点-支路模型：基于节点和连接节点的支路构建网络模型，直观表达网络的物理连接关系；
- b) 母线阻抗矩阵：描述网络节点间的电气连接关系，便于计算分析，但直观性较差；
- c) 图论表示：采用图论中的顶点和边表示网络节点和线路，便于应用图论算法分析网络特性，如最短路径、连通性等；
- d) 分层结构描述：按照电压等级和功能层次描述网络结构，如高压层、中压层、低压层的层次关系，清晰展示网络的层级特性；
- e) 区域划分：将网络划分为多个功能区域或供电单元，如按变电站供电范围划分，便于区域化管理和分析。

7.1.2 配电网节点类型主要包括：

- a) 电源点是电力输入的节点，包括变电站母线、分布式电源接入点等，是功率的源头；
- b) 负荷点是电力消耗的节点，包括配电变压器、大型用户接入点等，是功率的终点；
- c) 分支点是线路分叉的节点，包括线路分叉点、分段点等，影响功率的分配路径；
- d) 联络点是不同线路或区域的连接节点，在正常工作或故障情况下可改变网络拓扑结构；
- e) 关键设备点是安装有开关、断路器、电容器组等关键设备的节点，对网络运行和控制具有重要作用。

7.1.3 配电网拓扑特征参数主要包括：

- a) 节点度是指节点连接的支路数量，反映节点的直接连接能力，度越高，节点越重要；
- b) 介数中心性表示节点作为网络最短路径的次数，反映节点在网络信息流动中的“桥梁”作用，介数高的节点控制着网络中的信息流通；
- c) 接近中心性衡量节点到所有其他节点的平均最短距离，反映节点对网络其他部分的影响范围，接近中心性高的节点能够快速到达或影响网络中的其他节点；
- d) 特征向量中心性基于相邻节点重要性加权的节点重要性，考虑了节点的“质量”而非仅考虑数量，与重要节点相连的节点也更为重要；
- e) 集聚系数描述节点周围节点间的连接程度，反映局部网络的密集程度，集聚系数高表示节点周围形成了紧密的子网络。

7.1.4 基于拓扑特征的节点重要性评价方法主要包括：

- a) 度中心性评价直接基于节点度评估节点重要性，简单直观，但只考虑了直接连接；
- b) 介数中心性评价基于节点在网络中的“桥梁”作用评价重要性，能够识别控制网络信息流的关键节点；
- c) 接近中心性评价基于节点对网络其他部分影响范围评价重要性，能够识别能够快速影响整个网络的节点；
- d) 特征向量中心性评价综合考虑节点及其相邻节点的重要性，提供了更全面的重要性衡量；
- e) 综合拓扑指标评价结合多种拓扑特征参数，如加权求和或层次分析，提供更全面的重要性评估。

7.1.5 基于电气拓扑分析，配电网关键节点主要包括：

- a) 变电站母线节点是配电网的电源点，对整个网络的电力供应至关重要；
- b) 分布式电源接入节点是改变网络功率流向的节点，影响系统的短路特性；
- c) 网络分叉节点是线路分支较多的节点，控制着多条支路的功率流向；
- d) 联络开关节点是连接不同供电区域的节点，在网络重构和故障恢复中起关键作用；
- e) 重要负荷接入节点是重要用户的接入点，供电可靠性要求高；

- f) 拓扑特征参数值较高的节点在拓扑结构中占据重要位置,如具有高介数中心性或高特征向量中心性的节点。

7.2 短路容量敏感性分析

7.2.1 短路容量敏感性是指配电网节点短路容量对网络结构变化、运行方式变化或分布式电源出力变化的响应程度,可通过敏感性系数量化表示。

7.2.2 短路容量敏感性计算方法主要包括:

- a) 解析法:基于短路计算公式推导敏感性系数,通过对计算公式求偏导数得到,理论严谨但应用复杂;
- b) 数值计算法:通过多次短路计算对比得到敏感性系数,如改变某一参数前后计算短路容量的变化率,直观易实现但计算量大;
- c) 统计分析法:基于历史数据统计分析得到敏感性系数,利用实测数据进行回归分析,适合有大量历史数据的场景;
- d) 扰动法:通过引入小扰动计算敏感性系数,如在系统中引入小的参数变化观察短路容量的响应,简单实用;
- e) 状态估计法:基于系统状态估计结果计算敏感性系数,结合电力系统状态估计理论,适合与状态估计系统集成。

7.2.3 影响短路容量敏感性的主要因素包括:

- a) 网络拓扑结构是最基本的影响因素,节点在网络中的位置和连接关系直接决定了其敏感性特征;
- b) 线路参数包括线路阻抗和长度,影响电力潮流分布和短路电流大小;
- c) 分布式电源特性包括类型、容量、并网方式和控制特性,不同类型的分布式电源对短路容量的影响机制不同;
- d) 负荷特性包括负荷类型、容量和分布,影响系统阻抗和潮流分布;
- e) 运行方式如开关状态、网络重构方式等,改变网络拓扑和电力流向,进而影响短路参数。

7.2.4 短路容量敏感性可分为以下几类:

- a) 拓扑敏感性:反映节点短路容量对网络拓扑结构变化的敏感程度,如开关操作、线路故障等导致的网络结构变化;
- b) 分布式电源敏感性:反映节点短路容量对分布式电源出力变化的敏感程度,尤其是对波动性电源如风电、光伏的响应;
- c) 负荷敏感性:反映节点短路容量对负荷变化的敏感程度,包括负荷大小和功率因数的变化;
- d) 故障敏感性:反映节点短路容量对系统故障的敏感程度,考察故障对系统短路特性的扰动影响;
- e) 运行方式敏感性:反映节点短路容量对系统运行方式变化的敏感程度,如网络重构、电源切换等。

7.2.5 基于短路容量敏感性分析,敏感节点的识别方法包括:

- a) 敏感性阈值法:通过设定敏感性系数的阈值,选择敏感性系数大于阈值的节点作为关键节点,简单直接但阈值选取需要经验判断;
- b) 相对敏感性法:通过比较节点间敏感性系数的相对大小,选择敏感性系数相对较高的前 N 个节点,避免了绝对阈值选取的困难;
- c) 敏感性组合评价法:综合考虑多种敏感性(如拓扑敏感性、分布式电源敏感性等),通过加权或多指标决策方法选取关键节点,更全面但增加了复杂性;

- d) 敏感性变化趋势法:关注敏感性变化显著的节点, 不仅考虑静态敏感性值, 还考虑其动态变化特性;
- e) 敏感区域分析法:首先识别敏感性较高的区域, 然后在这些区域中选择代表性节点, 适合大型网络的分层分析。

7.3 分布式电源影响评估

7.3.1 分布式电源对配电网短路参数的影响评估指标主要包括:

- a) 短路容量变化率:分布式电源接入前后短路容量的变化比例, 直接反映了分布式电源对系统强度的影响程度;
- b) 短路电流贡献率:分布式电源对短路电流的贡献比例, 反映分布式电源在故障条件下的电流支撑能力;
- c) 短路阻抗变化率:分布式电源接入前后短路阻抗的变化比例, 从阻抗角度量化影响程度;
- d) 短路参数波动率:衡量短路参数随分布式电源出力变化的波动程度, 反映参数的动态变化特性;
- e) 保护敏感性指标:反映短路参数变化对保护配置的影响程度, 评估保护系统需要调整的紧迫性。

7.3.2 分布式电源影响评估方法主要包括:

- a) 理论分析法:基于短路计算理论分析分布式电源影响, 利用电力系统基本原理和公式推导影响机制;
- b) 仿真算法:通过电力系统仿真软件计算分析, 建立详细模型进行数字仿真, 得到多种条件下的影响结果;
- c) 案例对比法:通过实际案例对比分析, 利用现有工程案例的实测数据进行前后对比, 直观可信;
- d) 统计分析法:基于历史数据进行统计分析, 利用大量历史运行数据挖掘影响规律, 适用于长期运行的系统;
- e) 敏感性分析法:通过分析短路参数对分布式电源变化的敏感性, 量化影响的强度和范围。

7.3.3 分布式电源对短路参数影响特性分析应考虑以下方面:

- a) 影响范围:分布式电源影响的网络范围, 包括空间范围和电气距离, 了解影响的扩散范围;
- b) 影响程度:分布式电源对短路参数的影响强度, 量化参数变化的幅度;
- c) 影响规律:分布式电源影响的变化规律, 如随距离衰减、随容量增长等, 揭示影响的内在机制;
- d) 影响持续性:分布式电源影响的时间特性, 区分暂态影响和稳态影响;
- e) 影响叠加效应:多个分布式电源影响的组合特性, 考察不同电源的相互作用。

7.3.4 不同类型分布式电源对短路参数的影响评估应考虑其特性差异:

- a) 同步发电机型分布式电源提供较大且持续的短路电流贡献, 一般为额定电流的 4~6 倍, 对短路容量提升效果显著, 影响范围较广, 类似于传统同步机的特性。;
- b) 感应发电机型分布式电源的短路电流贡献初期较大但快速衰减, 对短路容量暂态影响明显但稳态影响有限, 影响范围相对集中, 表现出明显的时间特性;
- c) 逆变器型分布式电源的短路电流贡献受控且有限, 一般为额定电流的 1.1~2 倍, 对短路容量影响相对较小, 影响具有明显的控制策略依赖性, 更多由控制算法决定而非物理特性;
- d) 混合型分布式电源的影响特性复杂, 需综合考虑各组成部分特性, 影响程度受控制策略和运行模式影响较大, 可能出现不同运行状态下的差异化影响, 需要更复杂的模型描述。

7.3.5 基于分布式电源影响评估, 关键节点识别方法包括:

- a) 影响程度排序法:通过对节点受分布式电源影响程度的排序, 选择影响程度较大的节点, 直观简单;

- b) 影响范围分析法:选择处于多个分布式电源影响范围交叉区域的节点,关注影响的空间分布和叠加效应;
- c) 影响变化趋势法:选择短路参数随分布式电源变化明显的节点,注重参数的动态变化特性;
- d) 保护敏感点识别法:选择短路参数变化可能影响保护配置的节点,关注影响的实际应用后果;
- e) 分布式电源群集点:选择分布式电源接入密度高的区域中的代表性节点,关注高密度区域的综合影响。

8 多目标优化布点方法

8.1 可观测性分析

8.1.1 配电网短路参数监测的可观测性是指通过有限数量的监测终端,直接测量或计算得到配电网所有节点短路参数的能力。

8.1.2 可观测性评价指标主要包括:

- a) 覆盖率:能够直接测量或准确计算短路参数的节点比例,反映监测系统的覆盖范围;
- b) 观测精度:计算得到的短路参数与实际值的误差程度,衡量监测数据的准确性;
- c) 冗余度:系统失去部分监测点后保持可观测的能力,反映系统的容错性和可靠性;
- d) 适应性:系统适应网络拓扑变化保持可观测的能力,体现系统对变化的适应能力;
- e) 状态估计性能:基于监测数据进行状态估计的性能指标,如收敛性、稳定性等,反映系统的数据处理能力。

8.1.3 可观测性分析方法主要包括:

- a) 拓扑分析法:基于网络拓扑结构分析可观测性,利用图论和矩阵理论判断系统的拓扑可观测性;
- b) 状态估计法:基于状态估计理论分析可观测性,通过观测方程的可解性判断系统可观测性;
- c) 阻抗矩阵分析法:基于节点阻抗矩阵分析可观测性,研究阻抗矩阵的特性判断短路参数的可计算性;
- d) 图论方法:采用图论算法分析网络可观测性,利用连通性、覆盖集等概念描述监测系统的覆盖能力;
- e) 仿真验证法:通过仿真验证特定布点方案的可观测性,直接测试在不同条件下监测系统的表现。

8.1.4 可观测性约束条件主要包括:

- a) 全网覆盖约束:要求监测系统能够覆盖所有需监测的节点,确保无监测盲区;
- b) 精度约束:要求计算得到的短路参数应满足精度要求,确保数据的可用性;
- c) 冗余度约束:要求系统具备一定的冗余监测能力,提高系统可靠性;
- d) 关键节点约束:要求关键节点应能够直接测量或高精度计算,保障重要节点的数据准确性;
- e) 技术可行性约束:要求监测布点应满足技术实现的可行性,考虑安装条件、通信能力等实际限制。

8.1.5 为提高可观测性分析效率,可将配电网划分为多个观测区域:

- a) 基于供电区域划分:按照变电站供电范围划分,符合电网管理的实际结构;
- b) 基于拓扑结构划分:按照网络拓扑特征划分,如将网络分为干线区域和分支区域;
- c) 基于分布式电源分布划分:按照分布式电源集中程度划分,关注新能源集中区域的特殊需求;
- d) 基于短路参数特性划分:按照短路参数变化特性划分,重点关注参数波动显著的区域;
- e) 基于监测需求划分:按照监测重要性和优先级划分,根据应用需求确定监测重点。

8.2 经济性评估

8.2.1 监测终端布点的成本构成主要包括：

- a) 设备成本是指监测终端设备的采购成本，包括测量单元、通信模块、供电装置等硬件设备的购置费用；
- b) 安装成本包括监测终端的安装和调试费用，如现场施工、接线、参数设置等工作的人力和物力投入；
- c) 通信成本包括数据传输通信系统的建设和运行成本，如通信网络建设、通信服务租用费等；
- d) 运维成本是指监测系统长期运行维护的成本，包括日常巡检、故障维修、软件升级等持续性投入；
- e) 间接成本包括系统集成、人员培训等附加费用，虽不直接用于监测设备，但对系统整体实施必不可少。

8.2.2 监测终端布点的效益分析主要包括：

- a) 直接经济效益：
 - 1) 减少保护误动和拒动带来的经济损失，通过准确的短路参数提高保护系统可靠性；
 - 2) 优化设备选型和配置，避免过度设计，降低设备投资；
 - 3) 减少停电损失和故障处理成本，通过及时发现和处理问题减少故障停电；
 - 4) 延长设备使用寿命，通过优化保护和控制延缓设备老化。
- b) 间接经济效益：
 - 1) 提高系统运行可靠性的社会效益，减少停电对社会生产生活的影响；
 - 2) 改善供电质量带来的客户满意度提升，增强电力企业形象；
 - 3) 为分布式电源接入评估提供支持，促进新能源发展；
 - 4) 为配电网规划提供决策支持，提高规划科学性。

8.2.3 布点流程中应注意以下关键点：

- a) 配电网模型应尽可能准确反映实际网络情况，避免模型误差导致布点失准；
- b) 监测需求应综合考虑运行、规划、保护等多方面需求，确保监测系统满足各类应用需求；
- c) 关键节点识别应采用多种分析方法相结合，提高识别的准确性和全面性；
- d) 布点方案设计应保持适当冗余度，增强系统的可靠性和容错能力；
- e) 优化过程应平衡多种目标和约束条件，寻找最优折中方案；
- f) 方案评估应采用多种评估方法进行交叉验证，全面验证方案有效性；
- g) 方案实施和调整应分阶段进行，逐步完善，降低实施风险。

8.2.4 经济约束条件主要包括：

- a) 总投资约束：要求监测系统总投资不超过预算限额，确保项目在财务可行范围内；
- b) 单点投资约束：要求单个监测点投资不超过限定标准，避免单点成本过高；
- c) 运维成本约束：要求年度运维成本控制在预算范围内，确保长期运行的经济可行性；
- d) 效益要求约束：要求系统投资效益应满足最低要求，确保投资的价值回报；
- e) 投资回收期约束：要求投资回收期应在可接受范围内，通常要求在 3-5 年内收回投资。

8.2.5 经济性优化策略主要包括：

- a) 分级布点策略：根据重要性分级布点，重要区域密度高，非重要区域密度低，实现资源的差异化配置；
- b) 多功能集成策略：通过监测终端集成多种功能，如短路参数监测、电能质量监测、状态监测等，提高投资效益；

- c) 分阶段建设策略:根据实际需求分期分批建设, 优先建设关键区域, 逐步扩展完善, 降低初期投资压力;
- d) 共享资源策略:与配电自动化等系统共享通信和基础设施, 减少重复建设, 降低总体成本;
- e) 差异化配置策略:根据监测需求配置不同功能和性能的终端, 重要节点配置高性能终端, 一般节点配置基本型终端, 优化成本结构。

8.3 多目标优化模型

8.3.1 监测终端布点的多目标优化目标主要包括:

- a) 可观测性目标:旨在最大化配电网短路参数的可观测性, 提高监测系统的覆盖范围和精度;
- b) 经济性目标:致力于最小化监测系统的投资和运行成本, 提高系统的成本效益比;
- c) 重要性目标:确保优先保障关键节点的监测需求, 满足系统关键部位的监测要求;
- d) 适应性目标:增强系统适应网络变化的能力, 使监测系统能够在网络结构和运行状态变化时保持良好性能;
- e) 可靠性目标:提高监测系统的可靠性和冗余度, 确保系统在部分监测点失效的情况下仍能正常工作。

8.3.2 多目标优化的约束条件主要包括:

- a) 可观测性约束:要求满足配电网短路参数监测的可观测性要求, 确保系统具备基本的监测能力;
- b) 经济约束要求:满足投资成本和运行成本的限制条件, 确保系统在经济上可行;
- c) 技术约束要求:满足监测终端安装和运行的技术条件, 如空间要求、环境条件等;
- d) 通信约束要求:满足数据传输的通信条件, 确保数据能够可靠传输;
- e) 运维约束要求:满足系统运行维护的条件, 确保系统可维护性。

8.3.3 多目标优化模型的一般形式为:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } [F_1(x), F_2(x), \dots, F_m(x)] \\
 & \text{s.t. } g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, J \\
 & \quad h_k(x) = 0, k = 1, 2, \dots, K \\
 & \quad x_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned}$$

其中: $F_1(x), F_2(x), \dots, F_m(x)$ 为m个优化目标;

$g_j(x)$ 为J个不等式约束;

$h_k(x)$ 为K个等式约束;

x_i 为决策变量, 表示第i个节点是否安装监测终端(1表示安装, 0表示不安装); n为配电网节点总数。

8.3.4 适用于监测终端布点多目标优化的算法主要包括:

- a) 遗传算法是一种模拟自然进化过程的优化算法, 适合组合优化问题, 可有效处理多目标优化, 具有全局搜索能力;
- b) 粒子群算法基于群体智能, 收敛速度快, 适合处理连续优化问题, 容易实现但可能陷入局部最优;
- c) 模拟退火算法模拟金属退火过程, 可以跳出局部最优, 寻找全局最优解, 适合复杂的布点优化问题;

- d) 蚁群算法受蚂蚁寻路行为启发, 适合解决离散优化问题, 具有较好的全局搜索能力, 特别适合网络布点这类路径问题;
- e) 多目标进化算法专门针对多目标优化问题设计, 如 NSGA-II、SPEA2 等, 能够有效处理多个冲突目标, 获得良好的 Pareto 前沿。

8.3.5 多目标优化结果的处理方法主要包括:

- a) Pareto 解集分析通过分析非支配解集的分布特性, 了解不同目标间的权衡关系, 为决策提供全局视角;
- b) 决策者偏好分析根据决策者偏好选择最满意解, 如通过交互式方法逐步引导决策者找到最符合需求的解;
- c) 层次分析法采用层次分析法对多个目标进行权重设置, 将多目标转化为单目标, 简化决策过程;
- d) 模糊评价法采用模糊评价方法综合评价各解, 处理目标评价中的不确定性, 提供更具弹性的决策支持;
- e) 方案比较与选择通过多种评价方法对比选择最终方案, 如成本效益分析、TOPSIS 方法等, 从多角度评估方案优劣。

9 布点方案设计

9.1 监测终端配置

9.1.1 根据功能和性能要求, 监测终端可分为以下类型:

- a) 基础型监测终端: 具备基本短路参数测量功能, 能够测量和计算基本的短路阻抗和短路容量, 适用于一般监测点, 成本较低;
- b) 标准型监测终端: 具备完整短路参数测量和分析功能, 能够提供更全面的短路参数和初步分析功能, 适用于典型监测点;
- c) 高级型监测终端: 具备高精度测量和扩展分析功能, 提供最精确的测量和最全面的分析, 适用于关键节点, 精度和功能最高但成本也最高;
- d) 集成型监测终端: 集成短路参数测量与其他监测功能, 如电能质量监测、状态监测等, 充分利用硬件资源, 提高投资效益;
- e) 便携型监测终端: 用于临时测量或验证的便携设备, 不需要固定安装, 适用于系统调试和故障排查。

9.1.2 监测终端的功能配置应根据安装位置和监测需求确定:

- a) 关键节点: 应配置高级型或标准型监测终端, 具备高精度测量和分析功能, 确保关键位置的监测质量, 如变电站出线点、重要负荷点等;
- b) 重要线路分支点: 宜配置标准型监测终端, 具备完整的测量和分析功能, 满足线路分支监测需求;
- c) 分布式电源接入点: 宜配置高级型监测终端, 能适应复杂短路特性, 应对分布式电源引起的参数波动;
- d) 一般监测点: 可配置基础型监测终端, 满足基本监测需求, 降低成本;
- e) 配电自动化终端安装点: 宜配置集成型监测终端, 与自动化功能共享资源, 提高投资效益。

9.1.3 监测终端的技术要求主要包括:

- a) 测量精度: 电压测量精度应优于 0.5 级, 电流测量精度应优于 0.5 级, 短路参数计算精度应满足应用要求, 确保数据可靠性;

- b) 采样性能: 采样频率不应低于 10kHz, 分辨率不应低于 12 位, 应具备抗干扰能力, 保证信号质量;
- c) 通信能力: 应支持标准通信协议, 通信速率应满足数据传输需求, 应具备信息安全保护功能, 确保数据安全可靠传输;
- d) 环境适应性工作温度范围应为 $-25^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$, 相对湿度应为 5%~95%, 防护等级应符合安装环境要求, 适应各种安装环境;
- e) 供电可靠性: 应支持多种供电方式, 应具备备用电源或断电保护功能, 应具备欠压保护功能, 确保供电稳定可靠。

9.1.4 监测终端的安装要求主要包括:

- a) 安装位置: 应便于施工和维护, 应满足电气安全距离要求, 应满足环境温度和湿度要求, 确保安装安全和便利;
- b) 安装方式: 可采用壁挂式、柜内安装或杆上安装, 应固定牢固, 防震防松动, 应具备防雨、防晒、防尘措施, 确保设备长期可靠运行;
- c) 接线要求: 电压取样应使用专用二次回路, 电流取样应考虑 CT 精度等级和负荷, 接地应可靠, 屏蔽应良好, 确保信号准确和安全;
- d) 通信接口: 应提供标准通信接口, 应预留接口扩展空间, 通信线路敷设应规范, 便于系统扩展和维护;
- e) 安全防护: 具备过压、过流保护, 应具备绝缘保护和接地保护, 应具备防雷击保护, 确保设备和人员安全。

9.2 典型布点方案

9.2.1 变电站出线布点方案主要特点:

- a) 安装位置位于每条配电线路的出线断路器或出线开关处, 是线路的始端, 电气特性明显;
- b) 监测功能主要是监测线路始端短路参数, 作为基准参考点, 为全线短路参数分析提供基础数据;
- c) 终端配置宜采用高级型或标准型监测终端, 确保数据精度和可靠性;
- d) 通信方式优先采用站内通信网络, 如以太网、光纤等, 利用变电站已有的通信资源;
- e) 应用价值在于可监测系统电源对配电网短路特性的影响, 是短路参数监测的基础点位。

9.2.2 分布式电源接入点布点方案主要特点:

- a) 安装位置设在容量较大的分布式电源并网点或分布式电源集中接入区域的关键节点, 直接监测电源影响;
- b) 监测功能主要是监测分布式电源对短路参数的影响, 捕捉参数变化, 评估电源接入效果;
- c) 终端配置宜采用高级型监测终端, 具备适应复杂短路特性的能力, 应对动态变化的参数;
- d) 通信方式根据现场条件灵活选择光纤、无线或电力线载波等, 确保数据可靠传输;
- e) 应用价值在于为分布式电源接入评估和保护配置优化提供依据, 支持新能源安全并网。

9.2.3 关键分段点布点方案主要特点:

- a) 安装位置设在线路主干上的关键分段开关处或重要分支线起点, 监控线路的主要节点;
- b) 监测功能是监测线路主干各段和重要分支的短路参数, 了解参数沿线分布特性;
- c) 终端配置宜采用标准型监测终端, 满足常规监测需求;
- d) 通信方式根据现场条件选择适当通信方式, 如无线通信、光纤或电力线载波等;
- e) 应用价值在于为保护整定和故障处理提供支持, 助力系统安全运行。

9.2.4 联络开关布点方案主要特点:

- a) 安装位置设在不同线路或区域之间的联络开关处，监测网络互联点的参数；
- b) 监测功能主要是监测网络重构时短路参数的变化，了解不同运行方式下的系统特性；
- c) 终端配置宜采用标准型或高级型监测终端，应对复杂的运行工况；
- d) 通信方式优先选择可靠性高的通信方式，确保在网络重构等关键时刻的数据传输；
- e) 应用价值在于支持网络优化重构和应急恢复策略制定，提高系统灵活性和可靠性。

9.2.5 重要负荷布点方案主要特点：

- a) 安装位置设在重要用户接入点或大型负荷中心，直接监测供电质量敏感区域；
- b) 监测功能主要是监测重要负荷点的短路参数，评估供电能力和质量；
- c) 终端配置根据重要性配置相应级别监测终端，重要程度高的用户可配置高级型终端；
- d) 通信方式优先选择可靠性高的通信方式，确保数据及时可靠传输；
- e) 应用价值在于保障重要负荷供电安全，优化保护配置，提高供电可靠性。

9.2.6 环网结构布点方案主要特点：

- a) 安装位置设在环网中的关键节点，包括分段点和联络点，覆盖环网的关键位置；
- b) 监测功能主要是监测环网不同运行方式下的短路参数变化，了解开环/闭环运行的差异；
- c) 终端配置宜采用标准型或高级型监测终端，应对复杂运行方式的监测需求；
- d) 通信方式宜形成环状或网状通信结构，提高通信系统的可靠性，与电网拓扑结构相匹配；
- e) 应用价值在于支持环网优化运行和保护配置，提高环网运行的灵活性和安全性。

9.2.7 微电网布点方案主要特点：

- a) 安装位置设在微电网与主网连接点和微电网内关键节点，监测微电网的边界和内部重要位置；
- b) 监测功能主要是监测微电网并网和孤岛运行状态下的短路参数变化，了解两种模式下的系统特性差异；
- c) 终端配置宜采用高级型监测终端，具备适应多种运行模式的能力，应对模式切换的动态过程；
- d) 通信方式优先采用微电网内部通信网络，如工业以太网、光纤环网等，充分利用微电网的通信资源；
- e) 应用价值在于支持微电网安全稳定运行和保护协调，提高微电网的自治能力和灵活性。

9.3 特殊场景布点

9.3.1 高分布式电源渗透率区域布点应考虑以下特点：

- a) 布点密度应适当提高，相比常规配电网增加 30%-50%的监测点，确保监测精度，全面捕捉参数变化；
- b) 关键位置重点关注分布式电源群集区域和短路参数敏感区域，如多个分布式电源的公共接入点、电网薄弱点等，确保重点区域的监测覆盖；
- c) 终端配置宜采用高级型监测终端，具备适应复杂短路特性的能力，能够处理多种分布式电源共存情况下的参数波动；
- d) 通信要求较高，通信系统应具备较高的带宽和可靠性，满足频繁数据传输需求；
- e) 数据处理要求强化，应加强数据分析处理，识别短路参数变化规律，挖掘数据价值。

9.3.2 薄弱电网区域布点应考虑以下特点：

- a) 布点位置重点关注电网薄弱环节和短路容量较低区域，如网络末端、供电半径长的线路等，监测系统脆弱点；
- b) 监测功能加强对短路容量波动的监测，关注低短路容量条件下的系统安全性；
- c) 终端配置根据实际情况配置相应级别监测终端，考虑成本与功能的平衡；

- d) 通信要求考虑通信条件限制，选择适应性强的通信方式，如无线通信、卫星通信等，解决通信困难问题；
- e) 应用价值在于为薄弱电网改造和分布式电源接入评估提供依据，支持电网加强和规划。

9.3.3 城市配电网布点应考虑以下特点：

- a) 布点位置重点关注供电可靠性要求高的区域，如商业中心、公共服务设施、政府机构等，确保重要区域的监测覆盖；
- b) 安装条件需考虑空间限制和环境要求，如箱式变电站内部空间有限、电磁环境复杂等城市特有环境；
- c) 通信条件较好，可利用城市通信网络资源，如光纤、4G/5G 网络等，建设高效可靠的通信系统；
- d) 与配电自动化系统协调部署，充分利用已有自动化设施，实现资源共享和功能互补；
- e) 经济性考虑需合理控制投资规模，提高经济效益，避免重复建设，优化资源配置。

9.3.4 农村配电网布点应考虑以下特点：

- a) 布点位置重点关注主干线和重要分支线，主要监测骨干网络，适当降低支线覆盖率，平衡成本和效益；
- b) 安装条件需适应恶劣环境条件，如户外安装、温度波动大、防雷要求高等农村特有环境；
- c) 通信条件需解决通信困难问题，如采用无线通信、卫星通信、电力线载波等适合农村地区的通信方式；
- d) 供电可靠性需解决供电条件差的问题，如配置独立电源、太阳能供电等，确保监测设备持续运行；
- e) 经济性考虑需降低成本，提高投资效益，如采用简化型监测终端、共享农村电网改造资源等，控制总体投资。

9.3.5 复杂地形区域布点应考虑以下特点：

- a) 布点位置需考虑地形条件限制，选择可行的安装位置，如避开地质灾害风险区、保证交通可达性等；
- b) 安装方式需根据地形特点选择适当的安装方式，如杆上安装、墙挂式安装、防震固定等，适应山地、丘陵、河流等各种地形；
- c) 通信方式需解决通信盲区问题，如采用卫星通信、无线中继、混合通信等，确保数据传输可靠；
- d) 供电方式需解决供电困难问题，如采用太阳能供电、风能供电、长效电池等，保障设备持续运行；
- e) 防护要求需加强设备防护，适应恶劣环境，如增强防水防潮性能、提高防雷等级、加强机械强度等。

10 方案评估与验证

10.1 评估指标

10.1.1 布点方案的技术评估指标主要包括：

- a) 可观测性指标：
 - 1) 监测覆盖率：直接测量节点占总节点比例，反映直接监测能力；
 - 2) 计算覆盖率：可准确计算节点占总节点比例，反映间接监测能力；
 - 3) 监测精度：短路参数计算误差，衡量数据准确性；
 - 4) 冗余度：系统失去部分监测点后的可观测能力，体现系统的容错性。

- b) 适应性指标：
 - 1) 拓扑变化适应性：适应网络结构变化的能力；
 - 2) 分布式电源适应性：适应分布式电源变化的能力；
 - 3) 运行方式适应性：适应运行方式变化的能力；
 - 4) 负荷变化适应性：适应负荷变化的能力。
- c) 可靠性指标：
 - 1) 监测系统可用率：系统正常工作时间比例；
 - 2) 故障恢复能力：系统故障后恢复能力；
 - 3) 数据可靠性：数据的准确性和完整性。

10.1.2 布点方案的经济评估指标主要包括：

- a) 投资指标：
 - 1) 总投资：监测系统总投资额，反映整体投入规模；
 - 2) 单点投资：单个监测点平均投资，反映单位资源投入；
 - 3) 单位覆盖率投资：单位监测覆盖率的投入额，反映投资效率。
- b) 效益指标：
 - 1) 直接经济效益：直接带来的经济收益，如减少停电损失；
 - 2) 间接经济效益：间接产生的经济效益，如提高规划决策质量；
 - 3) 社会效益：提高供电可靠性等社会效益，如提升客户满意度。
- c) 经济性指标：
 - 1) 投资回收期：投资收回所需时间；
 - 2) 净现值：项目净现值，考虑时间价值的投资回报；
 - 3) 内部收益率：投资内部收益率，衡量投资效率。

10.1.3 布点方案的综合评估指标主要包括：

- a) 技术经济综合指标：技术指标和经济指标的综合评价，平衡技术性能和经济效益；
- b) 短期效益与长期效益平衡指标：短期和长期效益的平衡程度；
- c) 投资效率指标：单位投资产生的综合效益，考虑系统的全生命周期价值；
- d) 可扩展性指标：系统未来扩展的便利性和成本，体现系统的发展潜力；
- e) 实施难度指标：方案实施的技术和管理难度，包括技术可行性、资源需求等方面。

10.2 验证方法

10.2.1 布点方案的仿真验证方法主要包括：

- a) 电力系统仿真通过建立配电网精确模型，模拟不同运行方式和故障条件，计算和分析短路参数分布，验证方案的技术可行性和效果。具体包括建立详细的配电网模型，包括线路参数、负荷特性和分布式电源模型；模拟各种运行方式和故障情况，如正常运行、N-1 故障、极端工况等；计算不同条件下的短路参数分布，分析监测系统的覆盖效果；
- b) 监测系统仿真通过模拟监测终端布点位置、数据采集过程和计算精度，评估监测系统的性能。具体包括模拟监测终端在预定位置的数据采集过程；模拟测量误差和通信延迟等实际因素；验证短路参数计算方法的准确性和鲁棒性；
- c) 蒙特卡洛仿真通过考虑参数不确定性，进行大量随机场景模拟，统计分析监测系统性能，评估系统在各种随机情况下的表现。具体包括考虑负荷波动、分布式电源出力变化等不确定因素；进行多次随机场景模拟，覆盖各种可能的系统状态；统计分析不同场景下监测系统的性能指标，评估系统的稳健性。

10.2.2 布点方案的实验室验证方法主要包括：

- a) 硬件在环仿真将实际监测终端与仿真系统结合，验证监测终端功能和性能，测试系统集成效果。具体包括将实际监测终端接入仿真环境，形成半实物仿真系统；在仿真系统中产生各种测试信号和场景；验证监测终端的功能、性能和兼容性，测试其在各种模拟条件下的表现；
- b) 实时数字仿真利用实时数字仿真器模拟配电网实际运行，验证监测系统响应特性，评估系统在接近实时运行条件下的表现。具体包括利用 RTDS 等实时数字仿真设备；模拟配电网的动态运行过程，包括暂态和稳态响应；验证监测系统的实时响应特性，特别是在快速变化条件下的性能；
- c) 缩比模型试验通过建立配电网物理缩比模型，部署监测系统，进行实际测试验证，在物理层面评估系统性能。具体包括建立配电网的物理缩比模型，模拟实际网络结构；在缩比模型上部署监测终端和通信系统；进行各种测试场景的实际验证，如负荷变化、故障模拟等。

10.2.3 布点方案的现场试点验证方法主要包括：

- a) 单点测试选择典型节点安装监测终端，收集实际测量数据，与理论计算结果对比分析，验证单个监测点的效果。包括在代表性节点安装监测终端，如变电站出线点、分布式电源接入点等；收集实际运行条件下的测量数据；将实测数据与理论计算或仿真结果进行对比，分析差异和原因；
- b) 小范围试点在特定区域部署监测系统，验证系统功能和性能，评估实际监测效果，检验多点协同工作的效果。包括在小范围区域部署完整的监测系统，包括终端、通信和数据处理；在实际运行条件下验证系统的各项功能和性能；评估监测系统的实际效果，包括覆盖率、精度、可靠性等；
- c) 对比验证采用多种手段测量同一参数，对比分析不同测量结果，验证监测精度和可靠性，从多角度评估监测效果。包括使用不同测量方法或设备测量同一参数，如标准测试设备与监测终端并行测量；对比分析不同测量结果的差异和一致性；验证监测系统的测量精度和可靠性，确认数据质量。

10.3 优化调整

10.3.1 基于验证结果的反馈分析主要包括：

- a) 技术问题分析：
 - 1) 识别系统功能缺陷，如功能不完整、性能不达标等；
 - 2) 析性能不足原因，如设备性能限制、算法不优、通信瓶颈等；
 - 3) 评估技术风险，如兼容性问题、扩展性限制等，形成技术问题清单和原因分析。
- b) 经济问题分析：
 - 1) 分析成本结构合理性，如设备成本、安装成本、通信成本等各项成本比例是否合理；
 - 2) 评估投资回报状况，实际效益与预期是否一致，投资回收期是否可接受；
 - 3) 识别经济风险，如成本超支、效益不足、运维成本过高等，形成经济问题分析报告。
- c) 实施问题分析：
 - 1) 分析安装条件限制，如空间不足、供电困难、安装环境恶劣等；
 - 2) 评估通信条件约束，如信号覆盖不足、带宽不够、延迟过高等；
 - 3) 识别运维难题，如维护困难、备件不足、技能要求高等，形成实施问题清单。

10.3.2 布点方案的优化调整主要包括：

- a) 布点位置优化：
 - 1) 调整监测终端布点位置，如移动、增加或减少监测点；

- 2) 优化布点密度和分布，如调整不同区域的监测密度；
 - 3) 提高关键节点覆盖率，确保重要节点的监测效果。
 - b) 功能配置优化：
 - 1) 调整监测终端功能配置，如升级或降级部分终端的功能级别；
 - 2) 优化数据采集策略，如调整采样频率、采集内容等；
 - 3) 完善分析处理功能，增强数据处理和分析能力。
 - c) 通信方式优化：
 - 1) 优化通信网络结构，如调整网络拓扑、增加中继节点等；
 - 2) 调整通信技术选择，如更换更适合的通信方式；
 - 3) 提高通信可靠性，如增加备份通道、优化协议等。
- 10.3.3 分步实施策略主要包括：
- a) 优先级分析：
 - 1) 明确各区域监测优先级，根据重要性、紧迫性等因素排序；
 - 2) 确定各功能实施优先级，区分核心功能和扩展功能；
 - 3) 制定分步实施计划，明确各阶段目标和任务。
 - b) 实施路径规划：
 - 1) 确定先易后难的实施路径，从简单场景开始，积累经验后再扩展到复杂场景；
 - 2) 平衡短期目标和长期目标，既考虑当前需求，又为未来发展预留空间；
 - 3) 制定阶段性验收标准，明确各阶段的完成标准和质量要求。
 - c) 持续改进机制：
 - 1) 建立验证-反馈-调整循环，形成闭环改进过程；
 - 2) 定期评估实施效果，检查系统性能和应用效果；
 - 3) 根据实际情况动态调整方案，保持方案的适应性和有效性。

附 录 A
(规范性附录)
监测终端技术要求

A.1 基本功能要求

监测终端作为短路参数监测系统的前端设备，须具备全面的电气参数测量、短路参数计算及数据存储与传输功能，确保系统数据采集和处理的准确性、可靠性，其基本功能要求如下：

表 A.1 监测终端基本功能要求

功能类别	功能描述	技术指标
电气参数测量	实时测量电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、频率等；具备三相不平衡度计算能力。	要求电压误差≤±0.5%；电流误差≤±0.5%；频率误差≤±0.01Hz。
短路参数计算	实时计算正序、负序、零序阻抗；支持系统阻抗和等值阻抗计算与转换；具备短路容量自动推导能力；考虑分布式电源影响。	正序阻抗计算误差≤±2%；短路容量计算误差≤±5%。
数据存储与传输	本地数据存储能力支持定时、触发和请求三种传输方式；具备数据加密传输功能；支持多种通信接口。	存储容量支持至少 15 天历史数据支持；以太网、4G/5G、光纤等通信方式。

A.2 性能参数要求

监测终端的性能参数直接影响监测数据质量，必须满足快速瞬态分析需求，具备足够的计算能力和适应恶劣环境的能力，主要要求如下：

表 A.2 监测终端性能参数要求

性能类别	性能描述	技术指标
采样性能	高采样率满足快速瞬态分析；高精度采样保证数据准确性；足够的采样密度捕捉电气暂态。	采样率≥10kHz（关键节点建议≥20kHz）；采样精度≥16 位；支持 256 点/周波采样密度。
计算性能	支持复杂算法在线运行；快速响应系统事件；稳定可靠的处理能力。	短路参数计算延时≤100ms；系统事件响应时间≤50ms；优选工业级 CPU 和 DSP 双处理器架构。
环境适应性	适应各类安装环境；具备恶劣条件下稳定运行能力；满足电磁兼容性要求。	工作温度范围：-40℃~+70℃；相对湿度范围：5%~95%(无凝露)；防护等级≥IP54、电磁兼容符合国标系列标准。

A.3 接口与通信要求

监测终端的接口与通信功能对系统集成至关重要，必须支持标准测量接口、多种通信协议并保证通信质量和安全性，要求如下：

表 A.3 监测终端接口与通信要求

要求类别	要求描述	技术指标
硬件接口	标准电气测量接口；通用通信接口；维护和授时接口	支持常见 PT、CT 接入；配备 RS-485、以太网、USB 等接口；本地维护接口；可选 GPS/北斗授时接口
通信协议	支持行业标准协议；支持电网公司专用规约；协议转换和安全通信	支持国家标准通信协议；支持国家电网或南方电网通信规约；通信延时<100m；数据丢包率<0.1%
系统兼容性	与现有系统兼容；支持主站对接；支持扩展	兼容 SCADA、配电自动化系统；支持与分布式电源监控系统数据共享；预留第三方系统接口

A.4 安全与可靠性要求

监测终端的安全与可靠性是长期稳定运行的保障，必须满足电气安全标准、确保数据安全并具备高可靠性设计，要求如下：

表 A.4 监测终端安全与可靠性要求

要求类别	要求描述	技术指标
电气安全性	满足绝缘强度标准；抗电磁干扰；电源安全保护；可靠接地	绝缘强度符合国家标准；抗干扰符合国家系列标准；电源模块符合行业标准要求；接地电阻≤4Ω
数据安全性	加密存储和传输；访问控制；安全防护	支持数据加密存储和传输；具备访问控制和身份认证；符合电力信息安全等级保护要求；具备网络入侵检测能力
运行可靠性	长期稳定运行；远程管理；故障自诊断；掉电保护；冗余设计	MTBF≥50000 小时；支持远程升级和配置；具备自诊断功能；配备掉电保护和数据备份；关键组件冗余设计

附录 B
(规范性附录)
配电网特征节点判定方法

B.1 拓扑结构特征节点

配电网拓扑结构特征节点是网络结构的关键点，包括电源接入点、联络节点和分支节点，这些节点在短路参数监测中具有重要意义，判定方法如下：

表 B.1 拓扑结构特征节点判定方法

节点类型	判定依据	监测意义
电源接入点	连接配电网与上级电网的节点；电压等级转换点；电源潮流主要流入点。	反映上级电网供电能力，是短路参数监测的首要位置。
联络节点	实现网络拓扑重构的开关两侧节点；不同供电区域的边界点；具备转供功能的关键节点。	评估网络重构后的系统强度变化，网络灵活性分析的关键点。
分支节点	三条及以上线路连接的节点；电缆与架空混合线路的转换点；T 接分支点。	潮流分配的关键点，反映区域负荷分布变化。

B.2 电气特性特征节点

电气特性特征节点是从电气参数角度判定的重要监测点，包括阻抗敏感点、电压敏感点和潮流变化显著点，对系统状态评估有重要价值，方法如下：

表 B.2 电气特性特征节点判定方法

节点类型	判定方法	监测意义
阻抗敏感点	灵敏度系数大于 0.5 的节点；阻抗变化率大于 20%/年的节点；短路容量波动超过 30%的节点。	有效反映系统阻抗动态变化，系统强度变化的指示点。
电压敏感点	线路末端节点；大容量或波动性负荷接入点；电压合格率低于 95%的历史问题点。	与电压稳定性密切相关，电压问题治理的重要依据。
潮流变化显著点	日负荷波动超过额定容量 50%的节点；季节性潮流反向的节点；大型可控负荷接入点。	反映负荷变化对系统强度的影响，评估系统动态特性。

B.3 分布式电源特征节点

分布式电源接入改变了配电网特性，相关特征节点包括接入点、影响显著点和潮流反向可能点，对评估分布式电源影响至关重要，相关特征节点判定方法如下：

表 B.3 分布式电源特征节点判定方法

节点类型	判定依据	监测意义
分布式电源接入点	分布式电源并网点；装机容量>500kW 的光伏、风电站接入点；额定功率>250kW 的储能系统接入点；微电网与主网连接点。	直接反映分布式电源对系统强度的贡献，新能源并网影响的首要监测点。
分布式电源影响显著点	对分布式电源出力变化响应明显的节点(电压变化率>0.5%/MW)；短路容量变化超过 15%的节点；多个分布式电源影响范围交叉区的节点。	评估分布式电源的网络支撑能力，系统阻抗动态变化分析。
潮流反向可能点	分布式电源容量大于本地负荷的线路段关键节点；历史发生过潮流反向的节点；仿真预测可能发生潮流反向的节点。	把握网络动态特性，分析分布式电源高渗透率影响。

B.4 保护配置特征节点

表 B.4 保护配置特征节点判定方法

节点类型	判定依据	监测意义
保护动作频繁点	近两年内保护动作次数超过 5 次的线路关键节点；误动或拒动记录较多的保护装置安装点；频繁发生瞬时性故障的线路段关键节点。	分析保护动作原因，优化保护配置的基础数据。
保护协调关键点	多级保护配合的关键节点；保护区域重叠或交界处；定值整定困难的保护装置安装点。	为保护配合提供依据，提高保护系统可靠性。
自适应保护应用点	网络重构频繁导致保护定值需调整的位置；分布式电源接入导致短路电流变化显著的区域；实施或计划实施自适应保护的示范线路关键节点。	实现自适应保护的基础数据，支持保护系统智能化。

附录 C
(规范性附录)
监测终端布点优化方法

C.1 布点评价指标

监测终端布点方案的优劣需要通过科学的评价指标进行量化，包括观测性、经济性和可靠性指标，为布点优化提供客观评价依据，主要指标如下：

- a) 观测性指标用于评估监测系统对网络状态的可观测程度：
 - 1) 节点覆盖率：被监测节点占特征节点总数的比例，一般不低于 85%；
 - 2) 线路覆盖率：安装监测终端的线路占总线路数的比例，一般不低于 70%；
 - 3) 关键参数可观测率：可监测的关键参数占需监测参数总数的比例，一般不低于 90%。

观测性指标越高，表明监测系统对网络状态的把握越全面。

- b) 经济性指标用于评估监测系统的成本效益：
 - 1) 单点监测成本：每个监测点的设备、安装和维护总成本；
 - 2) 信息获取效率：单位投入获取的有效信息量；
 - 3) 边际效益递减率：新增监测点带来的信息增量与成本的比值。

经济性评价应考虑设备全生命周期成本，兼顾初期投入和长期运行维护成本。

- c) 可靠性指标用于评估监测系统的稳定可靠程度：
 - 1) 数据可用率：有效数据时间占总时间的比例，一般应不低于 99.5%；
 - 2) 关键信息冗余度：重要监测数据的冗余备份程度；
 - 3) 系统鲁棒性：在部分终端失效情况下系统整体功能的保持能力。

可靠性指标反映了监测系统在各种条件下持续提供有效数据的能力。

C.2 数学优化方法

通过数学优化方法可以科学确定最优布点方案，常用灵敏度分析法、信息熵方法和多目标优化法，针对不同复杂度的配电网选择适合的方法。

表 C.1 监测终端布点数学优化方法

优化方法	实施步骤	适用场景
灵敏度分析法	建立配电网精确模型；计算节点灵敏度。系数；按灵敏度排序选取节点；结合约束条件确定方案。	系统结构相对稳定，参数准确的配电网。
信息熵方法	定义系统状态信息熵；建立最大化信息熵目标函数；使用启发式算法求解；通过信息增益评估方案。	复杂度高，不确定性大的配电网。
多目标优化法	建立多目标函数；设置约束条件；使用多目标优化算法求解；从 Pareto 解集选择方案。	需平衡多种冲突目标，复杂决策场景。

C.3 启发式算法

当系统规模大或约束条件复杂时，启发式算法可提供高效的近似最优解，常用贪婪算法、遗传算法和模拟退火算法解决布点优化问题。

表 C.2 监测终端布点启发式算法

算法类型	实施步骤	算法特点
贪婪算法	从空集开始；每次选择增益最大的节点；达到终止条件停止；进行局部调整优化。	简单易实现，速度快，可能陷入局部最优。
遗传算法	二进制编码表示监测点；设计适应度函数；选择、交叉、变异操作；从最终种群选择最佳方案。	全局搜索能力强，适合复杂非线性优化，参数调整较复杂。
模拟退火算法	随机生成初始方案；定义能量函数和温度参数；随机扰动生成新解；降低温度直至收敛。	可跳出局部最优，适合离散组合优化，收敛速度较慢。

C.4 工程实践方法

在实际工程应用中，常结合理论方法和工程经验确定布点方案，包括分层布点法、分区域配置法和渐进式优化法，兼顾理论与实践。

表 C.3 监测终端布点工程实践方法

方法类型	实施步骤	方法优势
分层布点法	主干线关键节点优先布置；重要支线和负荷点补充；薄弱环节和问题区域增补。	符合工程建设规律，便于分期实施，投资控制合理。
分区域配置法	城市核心区高密度布点；一般城区中密度布点；偏远农村低密度布点。	考虑区域差异性，资源合理分配，效益最大化。
渐进式优化法	制定初始布点方案；评估监测效果；调整优化布局；形成动态优化循环。	适应网络演化，持续改进，效果更优。

附录 D (规范性附录)

分布式电源影响下的监测点特殊考虑

D.1 不同类型分布式电源的影响特点

不同类型的分布式电源对短路参数具有不同的影响特点，监测点布置需考虑各自特性，确保监测系统能有效捕捉相关变化。

- a) 光伏发电系统主要通过逆变器接入电网，其短路电流特性与传统同步发电机有显著差异。短路电流贡献有限，通常为额定电流的 1.1~1.5 倍；短路电流响应速度快，但持续时间短；工作状态（如日照条件）对短路参数贡献影响显著。监测点布置应考虑大型光伏电站接入点及其影响范围内的关键节点，特别关注光伏出力变化显著时段（如日出、日落和阴晴变化时）的参数波动。
- b) 风力发电系统的影响与其发电机类型密切相关。双馈感应发电机型风机具有一定短路电流贡献能力，而全功率变流器型风机类似于光伏系统，短路电流贡献有限。短路电流贡献与风速、控制策略相关；运行模式转换可能导致短路参数突变；群体效应使得风电场整体影响大于单机影响之和。监测点布置应覆盖风电场接入点及风电渗透率高的区域关键节点，关注风速变化显著和控制模式转换期间的参数变化。
- c) 储能系统在短路响应中表现出高度可控性，短路电流贡献受控制策略和荷电状态(SOC)影响；响应速度快，可实现毫秒级响应；运行模式（充电/放电/待机）转换导致系统特性变化；大型储能系统可显著改变局部网络的短路特性。监测点布置应关注大型储能系统接入点及其控制范围内的节点，特别是运行模式经常变化的储能系统周边区域。

D.2 分布式电源接入位置的影响

分布式电源的接入位置对短路参数分布产生重要影响，监测点布置需考虑位置因素，全面捕捉系统变化特征。

- a) 线路末端接入的分布式电源可能导致电压分布和潮流方向改变，提高末端电压水平；可能出现潮流反向；末端短路容量显著提升，但对线路前端影响有限；保护定值整定难度增加。监测点布置应覆盖分布式电源接入点、潮流反向可能点以及保护配合的关键节点，全面掌握线路参数分布变化。
- b) T 接线分支接入的分布式电源影响范围更为复杂，改变分支节点的潮流分布；多方向影响短路电流分布；可能导致保护误动；对系统阻抗的贡献与负荷分布相关。监测点布置应关注 T 接点及各分支的关键节点，确保准确把握多向潮流变化带来的短路参数变化。
- c) 多点接入的分布式电源群对系统形成分布式影响，形成网络支撑，提高整体短路容量；局部形成微网特性；群体协同效应导致系统特性变化。监测点布置应采用网格化布局，在分布式电源集中区域形成密集监测网络，全面掌握群体效应下的系统参数变化。

D.3 分布式电源容量因素

分布式电源的容量大小直接决定其对系统短路参数的影响程度，监测策略应根据容量等级差异化配置，优化监测资源。

- a) 小容量分布式电源（<100kW）对系统影响有限，单个电源对短路参数影响不显著；群体接入可能形成累积效应；波动性大，但影响范围局限。监测策略可采用抽样监测，选择典型区域或代表性节点进行监测，关注群体效应而非单点影响。
- b) 中等容量分布式电源（100kW-1MW）对局部网络有明显影响，显著改变接入点及周边节点的短路参数；运行状态变化导致参数波动；可能引起保护配合问题。监测策略应覆盖每个中等容量电源的接入点，并在其影响范围内布置辐射状监测点，形成区域性监测网络。
- c) 大容量分布式电源（>1MW）对系统影响显著，大幅改变局部网络特性；可作为支撑点提高系统强度；控制模式对短路参数影响明显；可能主导局部区域的保护配置。监测策略应形成以大容量电源为中心的重点监测区域，同时关注其与系统其他部分的交互影响，必要时采用高精度、高采样率的专用监测设备。

D.4 分布式电源运行模式的影响

分布式电源的运行模式对短路参数产生动态影响，监测终端布置需考虑模式转换和变化特性，捕捉关键参数变。

- a) 并网运行模式下分布式电源与系统协同运行，短路容量与电源出力正相关；受并网点阻抗和控制策略限制；对系统形成支撑作用。监测点布置应关注电源出力变化显著区间，如光伏发电的日间峰值和晚间零出力状态，捕捉短路参数的动态变化。
- b) 孤岛运行模式下分布式电源独立支撑局部负荷，系统惯量和短路容量显著下降；电压和频率稳定性变差；保护特性发生根本变化。监测策略应确保在可能形成孤岛的区域设置足够密集的监测点，特别关注微电网与主网连接点，及时捕捉模式转换过程中的参数变化。
- c) 混合运行模式是并网和孤岛模式的交替或并存，运行模式切换导致短路参数突变；可能存在多种控制目标转换；过渡过程复杂。监测终端布置应关注模式切换频繁的区域和关键节点，配置具备高时间分辨率的监测设备，准确捕捉转换过程中的暂态参数变化。

附 录 E
(规范性附录)
典型应用场景下监测终端布点技巧

E.1 供电可靠性提升场景

在提高供电可靠性的应用场景中，监测终端布点应突出故障多发区域、薄弱环节和保护性能优化相关的节点，为系统可靠性提升提供有效支持。

表 E.1 供电可靠性提升场景布点技巧

布点要素	布点技巧	应用价值
故障多发区域	历史故障频发区优先覆盖；根据故障类型差异化布点；同类故障集中区采用梯度布点。	发现故障根源；提供针对性治理依据；评估治理效果。
薄弱环节识别	电压质量问题、短路容量不足、供电半径过长点优先布置；结合设备老化分析增设监测点；负荷增长压力大区域预先布置。	发现系统薄弱环节；指导加强改造；提前预防潜在问题。
保护性能优化	保护配合关键点布置监测终端；保护动作频繁或问题区域加密布点；保护调整区域增设验证点	优化保护定值；提高保护系统可靠性；验证调整效果。

E.2 分布式电源接入评估场景

分布式电源接入评估需要通过监测短路参数变化评估系统承载能力，布点应覆盖接入前评估、接入过程监测和接入后优化三个阶段。

表 E.2 分布式电源接入评估场景布点技巧

应用阶段	布点技巧	应用价值
接入前评估	潜在接入点布置监测终端；接入点到电源点路径形成监测链；不同负荷水平下采集基准数据。	提供接入容量评估数据基础；建立基准短路参数档案；支持科学接入决策。
接入过程监测	预期影响显著区域增设临时监测点；关键节点安装高时间分辨率设备；监测不同出力水平下系统响应。	验证接入评估准确性；发现接入过程潜在问题；指导接入策略调整。
接入后运行优化	形成网格状监测网络；关注季节性、天气相关变化；区分各类电源贡献；动态调整监测布局。	优化分布式电源运行策略；完善系统配置；提高接入效益。

E.3 配电网规划与改造场景

配电网规划与改造需要基于准确的短路参数数据进行决策，布点应支持现状评估、方案比选和效果评估全过程，提高规划改造质量。

表 E.3 配电网规划与改造场景布点技巧

规划阶段	布点技巧	应用价值
现状评估	全面覆盖关键节点建立基线；重点监测负荷增长快区域；加密监测问题区域；结合历史异常点布置。	建立系统参数基线；找出问题根源；提供科学规划基础。
方案比选	规划关键节点布置监测终端；针对方案差异点设置监测；使用移动式临时设备灵活调整；验证仿真结果准确性。	提供方案比选量化依据；验证仿真模型；提高决策科学性。
改造评估	形成“前-中-后”全过程监测；改造完成后加密关键点；长期跟踪参数变化趋势；识别持续存在的问题。	全面评估改造效果；验证改造项目持续效益；积累经验提高质量。

E.4 智能配电网示范应用场景

智能配电网示范工程中，监测终端布点应体现智能配电特点，支持智能应用开发和技术验证，推动配电网智能化发展。

表 E.4 智能配电网示范应用场景布点技巧

应用特点	布点技巧	应用价值
智能终端集成	与智能开关设备集成布置；与配电自动化终端协同部署；结合智能配电房建设；采用多功能监测终端。	降低综合成本；提高系统协同效率；优化资源利用。
数据应用导向	根据配电物联网架构配置；为故障定位系统部署关键点；为状态估计配置验证点；为负荷预测和调度提供数据支持。	形成面向应用的数据采集；提高智能应用价值；支持数据深度应用。
前瞻性技术验证	为自愈系统配置监测终端；为自适应保护布置高精度设备；为柔性配电技术配置专用监测；结合能源互联网布置多元监测。	支持新技术验证；推动创新应用开发；引领技术进步。