

城市配电网高可靠性供电模式及优化策略分析

刘海青

华北制药股份有限公司 河北 石家庄 052165

摘要：随着我国城市化进程的加速和数字经济的蓬勃发展，社会对电力供应的连续性、稳定性和安全性提出了前所未有的高要求。城市配电网作为连接主网与终端用户的“最后一公里”，其供电可靠性直接关系到城市运行效率、居民生活质量乃至国家安全。本文系统梳理了当前制约城市配电网可靠性的主要因素，深入剖析了双环网、多分段多联络、“花瓣型”接线等典型高可靠性供电模式的技术特点与适用场景，并在此基础上，从网架结构优化、智能化技术融合、运维管理提升以及源-网-荷协同四个维度，提出了一套综合性的优化策略体系。研究表明，构建“坚强网架+智能感知+主动运维+柔性互动”的高可靠性配电网是未来发展的必然方向，对保障新型电力系统安全稳定运行具有重要的理论价值与实践意义。

关键词：城市配电网；供电可靠性；高可靠性模式；优化策略；智能配电网

引言

电力是现代社会的基石，是支撑国民经济高质量发展和人民美好生活的核心能源。在“双碳”目标引领下，以新能源为主体的新型电力系统正在加速构建，这对配电网的功能定位和运行形态提出了更高、更复杂的要求。城市作为人口、产业和信息的高度集聚区，其用电负荷密度大、用户敏感度高、对停电容忍度极低。一次短暂的停电事故，不仅会造成巨大的经济损失，还可能引发交通瘫痪、通信中断、金融交易停滞等一系列连锁反应，严重威胁城市公共安全与社会稳定。国家能源局发布的《配电网建设改造行动计划》明确提出，要显著提升中心城市（区）的供电可靠性，用户年均停电时间力争控制在1小时以内。然而，传统的配电网在规划、建设、运行和维护方面，仍存在诸多短板，难以满足新时代高可靠供电的需求。因此，深入研究并推广高可靠性供电模式，系统性地制定和实施优化策略，已成为当前电力行业亟待解决的关键课题。本文旨在通过理论分析与实践总结，为构建现代化、高可靠的城市配电网提供科学参考。

1 城市配电网可靠性现状及主要制约因素

1.1 可靠性指标体系

衡量配电网供电可靠性的核心指标主要包括系统平均停电频率（SAIFI）、系统平均停电持续时间（SAIDI）以及用户平均停电持续时间（CAIDI）等。这些指标共同反映了电网在面对设备故障、自然灾害或计划检修时，维持连续供电的能力。

1.2 主要制约因素分析

尽管近年来我国配电网建设取得了长足进步，但在高可靠性方面仍面临多重挑战：（1）网架结构薄弱且灵

活性不足。许多老城区配电网仍采用单辐射或单环网结构，一旦主干线发生故障，将导致下游所有用户停电，且转供路径单一甚至缺失，故障隔离与负荷转移能力差。这种“牵一发而动全身”的脆弱结构是造成高SAIDI值的根本原因。（2）设备老化与运维水平滞后。部分区域配电设备服役年限过长，绝缘性能下降，故障率居高不下。同时，传统的“被动式”运维模式依赖人工巡检和故障后抢修，缺乏对设备状态的实时感知与预判，无法实现故障隐患的早发现、早处理^[1]。（3）分布式电源与多元化负荷接入带来的新挑战。以光伏、风电为代表的分布式能源大量接入配电网，其出力的间歇性和波动性增加了潮流分布的不确定性，给电压控制、保护定值配合带来了难题。同时，电动汽车充电桩、数据中心等新型负荷对电能质量和供电连续性提出了极致要求，进一步加剧了配电网的运行压力。（4）外部环境风险加剧。城市地下管线错综复杂，施工外力破坏成为配电网故障的主要诱因之一。此外，极端天气事件（如强台风、暴雨、冰灾）频发，对暴露在外的配电设施构成严重威胁。

2 典型高可靠性供电模式分析

为应对上述挑战，国内外电力企业探索并应用了多种高可靠性供电模式，其核心思想是通过冗余设计和灵活的网络拓扑，最大限度地缩小故障影响范围，缩短停电时间。

2.1 双环网

双环网模式由两条独立的馈线构成两个相互闭合的环网，每台配电变压器（或开闭所）通常通过双电源接入这两个环网。正常运行时，联络开关断开，形成两个独立的单环网。当任一环网中的某段线路或设备发生故

障时,通过快速操作相关开关,可将故障点隔离,并将非故障区域的负荷无缝切换至另一健康环网供电。优势是N-1甚至N-2安全准则下仍能保证全部用户不停电,可靠性极高。劣势是投资成本高昂,需要双倍的电缆通道和变电容量,适用于对供电可靠性要求极高的核心商务区(CBD)、大型医院、数据中心等关键负荷区域。

2.2 多分段多联络

该模式是在传统单环网基础上的升级版。将一条主干线划分为多个电气分段(通常3-5段),每个分段通过联络开关与其他不同电源的馈线相连。当某一分段发生故障时,只需断开该分段两端的分段开关,即可精准隔离故障,其余各分段可通过各自的联络开关,从相邻馈线获得备用电源。优势是相比双环网,投资成本更低,且能有效限制故障停电范围,显著降低SAIDI和SAIFI。灵活性好,易于在现有网架上进行改造升级。劣势是需要复杂的自动化系统支持,以实现快速、准确的故障定位、隔离与恢复(FA)。对通信和控制系统依赖性强。

2.3 “花瓣型”接线模式

“花瓣型”模式是一种源自新加坡的先进配电网结构,近年来在我国部分发达城市得到试点应用。其核心是一个中心开闭所(花心),多条(通常6-8条)馈线呈放射状延伸出去,每两条相邻的馈线末端通过一个联络开关相连,形成一个闭合的“花瓣”。整个系统由多个这样的“花瓣”组成。优势是结构清晰,运行方式灵活^[2]。任何一点故障,最多只会影响一个“花瓣”内的部分用户,且能在秒级内完成负荷转供。同时,该模式天然支持分布式电源的友好接入,便于实现局部区域的自治运行(微网)。劣势是初期规划和建设难度较大,对中心开闭所的容量和可靠性要求极高。同样需要高度自动化的配电管理系统(DMS)支撑。

3 城市配电网高可靠性优化策略

3.1 网架结构优化策略:筑牢物理基础

3.1.1 差异化规划,精准投资

城市内部功能分区差异显著,金融中心、三甲医院、国家级数据中心等关键区域对供电中断极为敏感,其单位时间停电损失可达百万元甚至更高。应建立基于负荷等级、用户密度、经济价值等多维因子的供电区域分级标准(如A+、A、B、C类)。对A+类区域,优先采用双环网、“花瓣型”接线等N-2甚至N-3安全冗余结构;对一般商业区和居民区,则推广经济高效的多分段多联络模式,在保障基本可靠性的同时控制投资成本。这种“因区施策”的精准投资机制,可有效避免“过度建设”或“保障不足”,实现资源最优配置。

3.1.2 推进电缆化与入地工程,提升抗灾能力

架空线路易受雷击、大风、树障及施工外力破坏,故障率远高于电缆线路。因此,应在城市核心区、景观带、高密度建成区全面推进电缆化改造。同时,加强与市政、交通、住建等部门协同,将电力通道纳入城市综合管廊统一规划、同步建设,破解地下空间碎片化难题。对于暂不具备入廊条件的区域,应采用高标准直埋或排管敷设,并设置电子标识、防外破警示装置,从源头降低故障风险。

3.1.3 构建标准化、模块化网架,增强系统韧性

推行配电网典型设计和标准物料库,统一设备接口、通信协议与控制逻辑,可大幅缩短建设周期、降低运维复杂度。更重要的是,引入“模块化”设计理念——将一个“花瓣单元”或多分段联络单元视为独立功能模块,支持灵活拼装、快速复制。当局部区域负荷激增时,可迅速扩展模块;当发生故障时,可整体隔离受损单元而不影响全局运行,极大提升了系统的适应性、可扩展性与自愈韧性。

3.2 智能化技术深度融合策略:注入数字动能

3.2.1 全面部署高阶配电自动化(DA),实现秒级自愈

配电自动化是高可靠配电网的“神经中枢”。应构建“边缘智能+云端协同”的双层架构:在馈线关键点部署具备边缘计算能力的智能终端(如FTU、DTU),支持在通信中断下自主完成故障定位、隔离与非故障区段恢复(FA),响应时间压缩至秒级;在主站侧建设集成SCADA、拓扑分析、状态估计等功能的配电管理系统(DMS),实现全局态势感知与优化调度^[3]。二者融合,形成“就地快速处置、远程智能协调”的高效自愈体系。

3.2.2 构建全景感知的数字孪生配电网,赋能智慧决策

依托物联网(IoT)技术,在开关站、环网柜、变压器、电缆接头等关键节点部署温度、局放、振动等智能传感器,结合智能电表、无人机巡检、视频监控等多源数据,构建覆盖“发-输-变-配-用”全环节的实时感知网络。在此基础上,利用三维建模、云计算与大数据平台,打造配电网“数字孪生体”。该虚拟映射不仅能动态反映物理电网状态,还可进行故障推演、检修预演、负荷转供仿真等,为规划、调度、运维提供科学、可视化的决策支持。

3.2.3 深化人工智能与大数据应用,迈向预测性维护

海量历史运行数据蕴含设备劣化规律与故障征兆。通过LSTM、图神经网络等机器学习算法,可构建高精度的设备健康状态评估(PHM)模型,实现从“坏了再修”向“该修才修”的转变。此外,AI还可优化复杂运行场

景：例如，在高比例光伏接入区域，实时预测发电出力，动态调节无功补偿与有载调压装置，维持电压稳定；在满足N-1安全约束前提下，自动搜索最优负荷转供路径，最大限度减少用户停电时间和范围。

3.3 运维管理模式创新策略：激活内生动力

3.3.1 推行资产全寿命周期管理（LCC）

传统模式重“初投”轻“运维”，易导致长期成本失控。LCC理念要求统筹设备从规划、采购、安装、运行到退役的全周期成本。通过量化比较不同设备的技术经济性，可优选虽初始成本高但故障率低、免维护周期长的优质设备，实现长期效益最大化。

3.3.2 建立基于状态的检修（CBM）体系

依托数字孪生与AI评估结果，仅在设备健康状态低于阈值时触发检修工单，彻底摒弃“到期必修”的僵化模式。这既保障了设备安全，又减少了非必要停电，显著提升供电可靠性和运维效率。

3.3.3 强化应急响应与韧性提升

高可靠性不仅体现在日常运行，更在于极端事件下的快速恢复能力。应完善多层次应急预案，常态化开展反事故演练；同时战略性部署移动储能车、应急发电车、便携式微网等柔性资源，并接入统一应急指挥平台^[4]。一旦主网受损，这些“电力方舟”可迅速为医院、通信基站等生命线工程提供临时供电，成为城市韧性的重要支柱。

3.4 源-网-荷协同互动策略：拓展系统边界

3.4.1 引导分布式能源有序接入

通过强制并网技术标准（如低电压穿越、无功支撑）与市场化机制（如辅助服务补偿），将分布式光伏、储能等“扰动源”转化为可控“支撑源”。大力发展虚拟电厂（VPP），聚合分散资源参与电网调节，提升系统灵活性。

3.4.2 激活需求侧响应（DSR）潜力

利用分时电价、可中断负荷合同等激励手段，引导工商业用户错峰生产、居民用户转移柔性负荷（如电动汽车充电、空调运行），实现“削峰填谷”，缓解设备过载，延缓电网扩容投资。

3.4.3 推动多能互补与综合利用

在园区、社区层面构建综合能源系统（IES），融合电、冷、热、气等多种能源形式。通过冷热电三联供、电制氢、储冷/储热等技术，实现能量梯级利用与时空互补。例如，利用低谷电制冰蓄冷用于日间供冷，或利用富余风电进行电采暖，既提升区域能源自给率，又为上级电网提供额外调节能力。

4 结语

构建高可靠性的城市配电网是一项复杂的系统工程，绝非单一技术或模式所能解决。本文通过对当前制约因素的剖析，对比了双环网、多分段多联络、“花瓣型”等主流高可靠性模式的优劣，并据此提出了一套涵盖网架结构、智能技术、运维管理、源网荷协同四个层面的综合性优化策略。未来的城市配电网，将不再是传统意义上单向、被动的电能配送通道，而是一个集成了先进传感、高速通信、智能计算和柔性控制于一体的能源互联网核心枢纽。它将以坚强的物理网架为基础，以数字化、智能化为引擎，以主动、精益的运维为保障，以开放、互动的生态为延伸，最终实现“不停电、少停电、快复电”的高可靠性目标，为智慧城市的发展和人民的美好生活提供坚实、可靠的电力支撑。

参考文献

- [1]李纯.城市配电网运行可靠性与管理策略分析[J].电工技术,2025,(22):243-245.
- [2]张洋,焦海波.城市配电网自动化改造关键技术研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十四届工程技术与数字化转型学术交流会议论文集(下册).天津市电力公司蓟州分公司盘山供电服务中心;天津市电力公司蓟州分公司邦均供电服务中心;;2025:453-454.
- [3]王平平.智能电网发展背景下的城市配电网改造分析[J].光源与照明,2025,(08):254-256.
- [4]徐进,田彬,王政,等.城市配电网中的智能技术应用[J].集成电路应用,2025,42(08):379-381.