

输配电及用电工程智能配电网自愈控制技术研究

罗贤庆

江西省恒通供用电工程有限公司 江西南昌 330000

摘要：随着智能电网建设的深入推进，配电网作为电力系统与用户直接相连的关键环节，其安全可靠运行对保障社会经济发展和人民生活水平具有重要意义。智能配电网自愈控制技术通过集成先进的传感、通信、计算和控制技术，实现对配电网故障的快速检测、准确定位、隔离以及非故障区域的快速恢复供电，从而显著提高配电网的供电可靠性和供电质量。本文首先阐述了智能配电网自愈控制技术的研究背景与意义，分析了当前配电网运行面临的挑战；其次，系统梳理了自愈控制技术的核心理论与关键技术，包括配电网故障诊断与定位方法、网络重构优化策略、分布式电源（DG）接入对自愈控制的影响及协调控制方法；最后，总结了当前自愈控制技术存在的问题与不足，并对未来发展趋势进行了展望，旨在为智能配电网自愈控制技术的进一步研究与应用提供参考。

关键词：智能配电网；自愈控制；故障诊断与定位；网络重构

引言

电力系统是国民经济命脉，配电网作为“最后一公里”，直接关系用户用电体验和社会公共安全。传统配电网依赖人工巡检和经验判断处理故障，存在定位难、隔离恢复慢、可靠性低等问题，难以满足现代社会需求。随着分布式能源大量接入和电力市场化改革深化，配电网结构复杂、运行方式灵活，对控制与管理要求更高。智能配电网自愈控制技术是智能电网核心特征之一，目标是故障或扰动后自动完成检测、定位、隔离和重构，快速恢复非故障区域供电，减少停电时间和范围。研究和应用该技术对提高供电可靠性、减少损失、提升效率、促进消纳及实现电网智能化管理有重要意义。

一、智能配电网自愈控制理论基础与体系架构

（一）自愈控制的基本概念与内涵

自愈控制是指配电网在自身或外部因素引起故障或异常运行状态时，通过内置的智能决策与控制机制，自动检测、分析、决策并执行控制动作，以维持电网的稳定运行或将故障的影响降至最低。其核心内涵包括“预防-检测-诊断-隔离-恢复”五个环节的闭环控制。自愈控制不仅要求快速恢复供电，还强调在正常运行时对潜在风险的预警和预防，实现从“被动应对”到“主动防御”的转变^[1]。

（二）自愈控制的体系架构

智能配电网自愈控制系统采用分层分布式架构，分为感知层、通信层、控制层和应用层。感知层由智能传

感器组成，采集配电网运行数据和故障信息并上传。通信层用多种通信方式构建信息传输网络，实现各层间数据交换。控制层是核心，含本地控制单元和主站控制中心，前者处理就地故障，后者进行全局决策与调度。应用层为不同用户提供服务，如状态监测等，提供信息与操作界面。

（三）自愈控制的关键技术环节

智能配电网自愈控制依赖多关键技术协同，包括状态监测与数据融合、故障诊断与定位、故障隔离、网络重构与供电恢复以及协调控制技术。状态监测与数据融合技术处理配电网数据，为故障诊断提供支撑。故障诊断与定位技术利用故障信息判断故障位置。故障隔离技术根据定位结果隔离故障区域。网络重构与供电恢复技术在故障隔离后恢复非故障区供电。协调控制技术确保设备间及本地与远方控制的配合，保障自愈策略执行^[2]。

二、配电网故障诊断与定位技术

（一）传统故障诊断与定位方法

传统的配电网故障诊断与定位方法主要包括：

（1）过电流保护配合与断路器跳闸信息法：基于预设的保护整定值，故障时保护装置动作跳闸，通过收集各开关的跳闸信息和故障电流方向，大致判断故障区段。该方法简单易行，但定位精度低，通常只能到线路区段，且在复杂网络或DG接入时易出现保护误动或拒动。

（2）阻抗法（距离保护原理）：通过测量故障相电压和电流，计算故障回路阻抗，进而估算故障距离。该

方法在线路参数已知、系统运行方式稳定时具有一定精度，但受过渡电阻、负荷电流、电源阻抗变化等因素影响较大，在分支较多的配电网中定位效果欠佳。

(3) 故障指示器法：在配电网线路关键节点安装故障指示器，故障时指示器动作并通过无线方式上报，运行人员根据指示器动作情况判断故障区间。该方法成本较低，安装方便，但依赖指示器的可靠性，且仍需人工判断具体故障点。

(二) 基于人工智能的故障诊断与定位方法

随着人工智能技术的发展，其在配电网故障诊断与定位中的应用日益广泛：

(1) 专家系统：将领域专家的经验知识转化为规则库，通过推理机对故障现象进行匹配和诊断。具有较好的解释性，但知识获取困难，规则库维护复杂，适应性较差^[3]。

(2) 人工神经网络(ANN)：利用神经网络强大的非线性映射能力和自学习能力，以故障时的电压、电流等电气量特征作为输入，故障位置作为输出进行训练和预测。具有较高的容错性和泛化能力，但训练样本获取难度大，收敛速度慢，解释性不强。

(3) 支持向量机(SVM)：基于统计学习理论，通过寻找最优分类超平面进行故障分类和定位，在小样本情况下仍能取得较好效果。但对核函数和参数选择敏感，计算复杂度较高。

(4) 模糊理论：能够有效处理故障信息中的不确定性和模糊性，通过模糊隶属度函数和模糊推理进行故障判断。常与其他方法结合使用，如模糊神经网络、模糊专家系统等。

(5) 深度学习：如卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)等，能够自动提取故障数据的深层特征，进一步提高诊断定位精度。但需要大量的标注数据和强大的计算能力。

(三) 基于同步相量测量与行波的定位方法

(1) 同步相量测量技术(PMU/D-PMU)：利用同步相量测量单元(PMU)或微型同步相量测量单元(D-PMU)，获取配电网各节点的同步电压、电流相量信息。通过比较故障前后的相量变化、计算故障分量或利用阻抗法结合同步数据，可以实现更高精度的故障定位。该方法依赖高精度的同步时钟和密集的PMU布点^[4]。

(2) 行波定位法：基于故障发生时产生的暂态行波在线路中的传播特性。通过安装行波检测装置，记录行波波头到达时间，利用双端法、单端法或多端法计算故

障距离。行波法定位精度高，不受过渡电阻、系统运行方式等影响，但受行波波头识别困难、衰减和反射等因素影响，对硬件采样率和数据处理能力要求高。

(四) 不同定位方法的比较与适用性分析

综合比较上述故障诊断与定位方法：传统方法简单经济，但精度和适应性有限；人工智能方法能处理复杂非线性问题，但对数据质量和样本数量有较高要求；同步相量测量法和行波法定位精度高，但成本较高或对硬件要求苛刻。在实际应用中，应根据配电网的结构特点、自动化水平、经济投入以及对定位精度和速度的要求，选择合适的方法或采用多种方法融合的策略，以提高故障诊断与定位的准确性和可靠性。

三、配电网故障隔离与网络重构技术

(一) 故障隔离策略

故障隔离是在故障定位之后，通过操作配电网中的开关设备，将故障区段从系统中安全、可靠地分离出来，防止故障扩大，保护设备安全，并为后续的供电恢复创造条件。

(1) 基于传统保护与断路器配合的隔离：利用馈线自动化终端(FTU)采集故障信息，主站或子站按预设逻辑(如失压延时、过流脉冲计数等)控制分段与联络开关动作，实现故障区段隔离。例如，“电压-时间型”和“电流-时间型”是早期常用方式。

(2) 基于智能分布式控制的故障隔离：配电网终端设备通过高速通信网络直接交换信息，无需主站干预，自主判断故障并操作开关，实现快速故障隔离。该方式响应快、可靠性高，是未来主流。常见有基于对等通信(P2P)的逻辑判断和基于故障电流方向的分布式协同控制。

(3) 考虑DG影响下的故障隔离：DG接入改变配电网潮流方向和短路电流水平，可能使传统保护失选择性或灵敏度。故障隔离时，需考虑DG类型(如同步机型、逆变器型)、接入位置和容量。通常对DG进行低电压/低频率穿越控制或快速切除，或采用自适应保护、方向保护等策略，确保隔离有效^[5]。

(二) 网络重构与供电恢复优化模型

网络重构与供电恢复是自愈控制关键步骤，目标是在满足网络拓扑、潮流、设备容量、电压质量等约束条件下，通过改变开关状态和调整DG出力，优化网络拓扑，让更多非故障区域用户快速恢复供电，追求网损最小、开关操作次数最少、恢复负荷最多等目标。

(1) 单目标优化模型：常见的最小化网损或最大

化恢复负荷，如以恢复负荷总量最大为目标函数，以潮流方程、节点电压上下限、支路电流容量、开关操作次数等为约束条件。

(2) 多目标优化模型：因实际工程复杂，单一目标难满足所有需求，多目标优化模型同时考虑恢复负荷最大化、网损最小化、开关操作次数最少化、电压稳定性最好等冲突目标，求解后会得到Pareto最优解集供决策者选择。

(3) 考虑DG和储能参与的恢复模型：将DG和储能系统作为重要电源支撑，网络重构时充分利用其出力，提高供电恢复能力和灵活性，微网系统主网故障时可孤岛运行保障关键负荷供电，模型需计及DG出力预测、储能充放电约束等。

(三) 网络重构优化算法

网络重构是一个典型的组合优化问题，求解难度较大，常用的优化算法包括：

(1) 传统启发式算法：如分支定界法、枚举法，在小规模网络中可行，但在大规模复杂配电网中计算量巨大，难以实用。

(2) 现代启发式智能优化算法：如遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、模拟退火算法(SA)、禁忌搜索算法(TS)、蚁群算法(ACO)等。这些算法具有较强的全局搜索能力和鲁棒性，能在可接受时间内找到近似最优解，广泛应用于配电网重构问题。

(3) 混合优化算法：为了克服单一算法的不足，常将不同算法结合，形成混合优化算法，如将局部搜索算法嵌入到遗传算法中，以提高算法的收敛速度和寻优精度。

(4) 分布式优化算法：随着配电网分布式控制的发展，基于多智能体系统(MAS)的分布式优化算法受到关注。各智能体(如馈线分区、节点)通过本地信息和有限的邻居通信进行决策，共同完成网络重构任务，具有更高的自主性和容错性。

(四) DG与储能在网络重构中的协调控制

DG和储能的接入为配电网自愈重构提供了新的灵活性，但也增加了控制的复杂性。

(1) DG的协调控制：在供电恢复过程中，应优先利用本地DG供电，尤其是对重要负荷。对于可调度的DG(如微型燃气轮机、储能)，应优化其出力，以支撑节点电压和频率，减少对主网的依赖。对于不可调度的DG(如光伏、风电)，需考虑其出力预测的不确定性，预留

一定的备用容量。

(2) 储能系统(ESS)的应用：ESS可以平抑DG出力波动，提供短时功率支撑，改善节点电压质量，提高网络重构的灵活性和成功率。在重构过程中，ESS的充放电策略应与网络拓扑调整和DG出力相协调。

(3) 微网(Microgrid)自治与并网切换：包含DG和储能的微网可以作为一个整体参与配电网的自愈控制。在主网故障时，微网可以快速切换至孤岛运行模式，保障内部重要负荷供电；待主网恢复正常后，再平滑切换回并网运行模式。

结语

智能配电网自愈控制技术的研究与应用，为现代电力系统的安全稳定运行提供了重要保障。通过对故障的快速诊断、精准定位、有效隔离以及优化重构，不仅能够显著减少停电时间和范围，还能提升供电可靠性和电能质量。未来，随着人工智能、大数据分析和物联网等新兴技术的进一步发展，自愈控制技术将更加智能化和高效化。例如，深度学习算法的引入可大幅提高故障诊断的准确性，而基于数字孪生技术的仿真平台则能实现对配电网运行状态的实时预测和优化决策。此外，分布式能源资源的广泛接入也为自愈控制带来了新的机遇与挑战，如何在复杂多变的运行环境下实现多源协同优化，将是下一步研究的重点方向。总之，智能配电网自愈控制技术的发展将持续推动电力系统向更灵活、更可靠、更经济的方向迈进。

参考文献

- [1] 李曼. 探讨智能配电网自愈控制技术[J]. 电子测试, 2020 (11): 3. DOI: CNKI: SUN: WDZC.0.2020-11-046.
- [2] 王亚男, 黄国. 智能配电网的主站集中式自愈控制技术研究[J]. 电子乐园, 2022 (11): 0208-0210.
- [3] 赖武聪. 智能配电网的主站集中式自愈控制技术研究[J]. 电力系统装备, 2020 (4): 2.
- [4] 卢永全. 智能配电网自愈控制技术应用分析[J]. 通信电源技术, 2021, 038 (011): 81-83.
- [5] 杨忠藩. 智能配电网自愈控制技术及其应用[J]. 中国高新科技, 2020 (10): 2. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2020.10.12.