

# 智能配电自动化系统中的自愈控制技术

邓钰祺 王娟婷 王鑫鑫

国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 新型电力系统快速发展、“双碳”目标深入推进,配电网作为连接主网与终端用户的关键,其安全等运行愈发重要。智能配电自动化系统(IDAS)是提升配电网智能化水平的核心支撑,其自愈控制技术是保障供电连续性、提升电能质量与运行效率的关键。本文先介绍IDAS基本架构与功能,深入剖析自愈控制技术内涵、目标与关键技术体系,重点探讨基于多源信息融合的故障快速定位、隔离与恢复策略,考虑分布式电源接入的孤岛划分与黑启动能力,以及基于人工智能与数字孪生的主动自愈机制。还分析了该技术工程实践挑战并展望趋势。研究表明,融合先进技术的自愈控制将推动配电网向高弹性、高韧性演进,为新型电力系统构建提供坚实基础。

**关键词:** 智能配电自动化;自愈控制;故障定位、隔离与恢复(FLISR);分布式电源

## 引言

传统配电网呈“无源”“被动”运行,结构辐射状、自动化程度低,故障处理依赖人工,导致停电范围大、恢复久,影响供电可靠性与用户体验。21世纪,可再生能源大规模并网,新型负荷广泛接入,配电网转变为有源、互动、复杂的能源互联网节点,运行控制模式面临挑战。在此背景下,智能配电自动化系统(IDAS)诞生,它集成先进传感测量、通信网络及数据处理平台,能全面感知、精准分析、智能决策配电网运行状态<sup>[1]</sup>。其中,自愈控制是IDAS最核心功能,可模仿生物自我修复,自动完成电网故障处理并恢复供电,减少用户停电。自愈控制是提升供电可靠性的利器,也是配电网从“被动响应”转向“主动防御”的支点,研究其技术对推动配电网高质量发展、支撑能源转型意义重大。

## 1 智能配电自动化系统架构与自愈控制内涵

### 1.1 智能配电自动化系统架构

一个典型的智能配电自动化系统采用“云-边-端”协同的分层分布式架构,如下:

#### 1.1.1 感知层(端)

由部署在配电网各关键节点的智能终端设备构成,包括馈线终端单元(FTU)、配电终端单元(DTU)、变压器终端单元(TTU)、智能电表(AMI)、故障指示器(FI)以及微型同步相量测量单元( $\mu$ PMU)等。这些设备负责实时采集电压、电流、功率、开关状态、故障特征等海量数据。

#### 1.1.2 网络层(边)

提供可靠、安全、低时延的数据传输通道。通常采用有线(光纤专网)与无线(4G/5G、LoRa、NB-IoT)相结合的方式,确保控制指令的快速下达和状态信息的及

时上传。边缘计算节点(如安装在变电站或环网站的智能网关)在此层扮演重要角色,可进行本地数据预处理和初步决策,减轻主站负担。

#### 1.1.3 平台层(云)

即配电自动化主站系统,是整个IDAS的大脑。它集成了SCADA(数据采集与监视控制)、高级应用软件(如网络拓扑分析、潮流计算、状态估计)以及自愈控制核心引擎。主站负责全局信息的汇聚、融合、分析,并根据预设策略或实时优化模型,生成最优的自愈控制方案。

## 1.2 自愈控制的内涵与目标

自愈控制并非单一的技术,而是一个涵盖“预防-校正-恢复”全过程的综合性技术体系。其核心内涵是在配电网发生扰动(主要是短路故障,也包括过载、电压越限等)后,系统能够自主、快速、有序地执行一系列操作,以维持或尽快恢复供电服务。其主要目标可概括为:(1)最小化停电影响:通过精准的故障定位与隔离,将停电范围严格限制在故障点本身及其直接相连的必要区域。(2)最大化供电恢复速度:利用备用路径、联络开关、分布式电源等资源,在数秒至数分钟内恢复绝大多数非故障用户的供电。(3)保障系统安全稳定:在整个自愈过程中,必须确保操作不会引发新的过载、电压崩溃或保护误动/拒动,维持电网的安全边界。(4)优化运行经济性:在满足安全与可靠的前提下,选择网损最小、运行成本最低的恢复方案。

## 2 自愈控制的关键技术体系

### 2.1 故障快速定位、隔离与恢复(FLISR)

当馈线发生短路故障时,主站系统或就地智能终端(如FTU、DTU)会实时采集并分析来自各监测点的故障电流信息,包括过流信号、零序电流、暂态行波等,同

时结合开关变位信号和网络拓扑模型，快速判断出故障所在的具体区段。传统方法多依赖于单一量测信息，易受噪声干扰或拓扑变化影响<sup>[2]</sup>。现代技术则趋向于采用多源信息融合策略，例如将基于阻抗法的粗略定位与基于行波法的精确定位相结合，以兼顾速度与精度；更前沿的方法还引入了 $\mu$ PMU（微型同步相量测量单元）提供的高精度同步相角、电压和电流数据，通过高采样率和时间同步性显著提升故障测距的准确性和鲁棒性，尤其适用于复杂网架结构或高阻接地故障场景。

## 2.2 故障隔离

一旦故障区段被准确识别，自愈控制系统将立即向该区段两端的断路器或智能负荷开关发送遥控分闸指令，实现物理隔离。为确保操作的安全性和可靠性，该过程普遍采用“选择-校核-执行”的三步式安全校验机制：首先由系统生成隔离方案，然后进行逻辑校验（如确认开关状态、通信链路正常、无冲突操作等），最后才下发执行命令。这种机制可有效防止因通信延迟、设备误动或人为干预导致的误操作，保障电网运行安全。

## 2.3 供电恢复

这是FLISR中最具价值的环节，直接关系到用户停电时间和供电可靠性指标（如SAIDI、SAIFI）。系统会基于当前网络拓扑和运行状态，搜索所有可能的备用路径（通常通过联络开关连接相邻馈线），并综合评估每条路径的可行性。评估准则包括但不限于：备用馈线的当前负载率是否留有足够裕度以接纳转供负荷、转供后是否会引起线路或变压器过载、节点电压是否维持在合格范围内（如 $\pm 7\%$ ）、继电保护定值是否匹配以避免越级跳闸等。在此基础上，系统通过优化算法（如启发式搜索、整数规划或图论方法）选择最优恢复方案，并遥控合上相应的联络开关，将失电的非故障负荷转移至健康馈线。整个FLISR过程可在几十秒至几分钟内完成，远快于传统人工巡线和倒闸操作方式，显著提升了配电网的韧性与服务水平。

## 3 考虑分布式电源（DG）的自愈控制

### 3.1 孤岛划分与运行

在主网发生严重故障导致大面积停电时，自愈控制系统可主动识别包含关键负荷（如医院、应急指挥中心、数据中心）和具备可控能力的DG（如储能系统、燃气轮机、具备V/f控制模式的逆变器）的局部区域，通过快速解列形成计划孤岛<sup>[3]</sup>。这要求系统具备高精度的孤岛检测能力、无缝切换控制（实现并网/离网模式平滑过渡），以及孤岛内部的频率与电压稳定控制策略，确保孤岛安全、稳定运行。

### 3.2 黑启动能力

部分DG（特别是储能系统和具备黑启动能力的分布式机组）可在全网失电状态下自主启动，并逐步带动周边负荷及其他DG，为更大范围电网恢复提供“火种”。自愈控制系统需在事前规划黑启动资源、路径及启动顺序，并在故障后快速激活相应预案。

### 3.3 DG参与转供

在FLISR过程中，DG不再仅被视为干扰源，而可作为灵活、分布式的备用电源纳入恢复策略。先进的自愈算法需融合DG的实时出力预测、调节能力（如有功/无功可调范围）、接入位置及控制权限，构建“主网+DG”协同的混合转供模型。例如，在联络线容量不足时，可利用本地DG就地支撑关键负荷，减少对外部转供的依赖，从而提升恢复成功率与供电质量。

## 4 基于人工智能与数字孪生的主动自愈机制

### 4.1 基于人工智能（AI）的自愈

AI技术，特别是机器学习（ML）和深度学习（DL），能够从海量历史运行数据、故障录波、调度日志中挖掘隐性规律，建立复杂的非线性映射关系。例如，可训练卷积神经网络（CNN）或图神经网络（GNN）模型，直接从电网拓扑和实时量测中预测最优恢复开关组合；也可采用强化学习（RL）框架，让自愈智能体在高保真仿真环境中不断试错，学习在不同故障类型、负荷水平、DG渗透率等复杂场景下的最优决策策略<sup>[4]</sup>。相比传统规则库或优化模型，AI方法具有更强的泛化能力和适应性，尤其适用于高度不确定、动态变化的现代配电网。

### 4.2 基于数字孪生的自愈

数字孪生技术通过构建与物理配电网实时同步、高保真的虚拟镜像，集成了物理模型（如电磁暂态模型）、数据模型（如SCADA、AMI数据流）和知识模型（如专家规则、故障案例库）。在此虚拟空间中，自愈系统可在故障发生前进行“预演”：对多种恢复预案进行在线仿真，评估其在不同边界条件（如极端天气、设备老化、通信中断）下的效果与风险，实现“先仿真、后执行”，大幅降低实际操作风险。同时，数字孪生体可提供全景、动态、多维度的状态感知与态势推演能力，支持从“被动修复”向“主动预防”转变——例如，通过监测设备健康状况和负荷增长趋势，提前识别潜在故障点并优化运行方式，防患于未然。因此，数字孪生不仅是自愈控制的验证平台，更是实现主动、前瞻、闭环自愈的理想载体。

## 5 工程实践挑战与未来展望

### 5.1 当前面临的挑战

尽管自愈控制技术取得了长足进步，但在大规模工

程应用中仍面临诸多挑战：(1) 通信可靠性与时延：自愈控制高度依赖通信网络。在偏远地区或极端天气下，通信链路的中断或高时延可能导致控制失败。如何构建高可靠、低时延、抗毁性强的通信网络是亟待解决的问题。(2) “最后一公里”覆盖不足：大量老旧配变台区和分支线路缺乏有效的监测终端（如TTU、智能电表覆盖率不足），形成了信息盲区，严重制约了故障精确定位和负荷精准转供的能力。(3) 多源异构数据融合难题：来自不同厂商、不同协议、不同采样频率的海量数据如何高效、准确地融合，形成统一、可信的电网全景视图，是自愈决策的前提。(4) 标准与互操作性：不同厂家设备之间的接口标准不统一，导致系统集成困难，阻碍了自愈功能的规模化推广。(5) 网络安全风险：高度自动化和网络化的自愈系统也面临着严峻的网络安全威胁，如恶意攻击可能导致错误的控制指令被执行，造成灾难性后果。

### 5.2 未来发展趋势

面向未来，智能配电自动化系统中的自愈控制技术将呈现以下发展趋势：(1) “云-边-端”协同自治：未来的自愈控制将不再是主站集中式的单一模式，而是形成“主站全局优化、边缘区域自治、终端就地快速响应”的多层次协同架构。边缘计算节点将承担更多的本地决策任务，实现毫秒级的就地自愈，而主站则专注于跨区域、多约束的全局优化。(2) 多能协同自愈：随着综合能源系统的发展，自愈控制将不再局限于电能，而是扩展到冷、热、气等多种能源形式。通过电-热-冷-气的协同调度，可以在电力系统故障时，利用其他能源形式保障关键用户的用能需求，提升整体能源韧性。(3) 与市场机制深度融合：自愈控制将更多地考虑经济因素，与

电力现货市场、辅助服务市场等机制联动。例如，在供电恢复时，可以调用需求侧响应资源或购买分布式储能的服务，以更低的成本实现自愈目标。(4) 量子计算赋能：对于超大规模、多目标、强耦合的自愈优化问题，传统算法可能面临计算瓶颈。量子计算有望在未来为此类复杂组合优化问题提供指数级的加速能力。

### 结语

智能配电自动化系统中的自愈控制技术是构建高可靠、高韧性现代化配电网的核心支柱。本文系统梳理了自愈控制的技术内涵、关键组成部分及演进方向。从传统的FLISR，到深度融合分布式电源的主动孤岛与黑启动，再到依托人工智能与数字孪生的预测性、主动性自愈，该技术正经历着深刻的变革。尽管在通信、感知、数据融合、安全等方面仍存在挑战，但随着“云大物移智链”等新一代信息技术的持续赋能，以及新型电力系统建设的深入推进，自愈控制必将朝着更加智能、高效、安全、协同的方向发展。未来的配电网将不再是被动承受冲击的脆弱网络，而是一个具备强大自我感知、自我决策、自我修复能力的生命体，为社会经济发展和人民美好生活提供坚强、绿色、智能的电力保障。

### 参考文献

- [1]张佳星,衣然.智能配电自动化系统中的自愈控制技术[J].张江科技评论,2024,(12):51-53.
- [2]金泰.智能配电自动化系统中的自愈控制技术分析[J].光源与照明,2024,(06):144-146.
- [3]许建远.配电线路故障自愈控制技术的研究分析[J].电气开关,2022,60(03):1-3+7.
- [4]王子滔.自动化开关控制下配电主站自愈状态验证仿真[J].电子技术与软件工程,2021,(12):111-112.