

# 智能配电网下配电自动化系统的协同控制机制研究

袁继光<sup>1</sup> 袁欣钰<sup>2</sup> 王艳萍<sup>3</sup> 国云<sup>4</sup> 袁继明<sup>5</sup>

1 黑龙江省华瑞电力安装集团有限公司, 黑龙江鸡西, 158100;

2 西安建筑科技大学华清学院, 陕西西安, 710000;

3 黑龙江美蓝建筑工程有限公司, 黑龙江鸡西, 158100;

4 黑龙江密山市市政工程处, 黑龙江密山, 158300;

5 黑龙江佳辰矿山机械设备有限公司, 黑龙江佳木斯, 154000;

**摘要:** 在新型电力系统建设和能源结构加速转型的背景下, 配电网正由传统被动运行模式向高度感知、智能决策与协同控制的主动系统演进。配电自动化系统作为智能配电网的重要技术支撑, 其运行效能在很大程度上取决于多层次、多对象之间的协同控制能力。本研究认为, 通过引入分层分区控制理念、强化数据融合与状态感知能力, 并构建自适应、多目标的协同控制机制, 可显著提升配电网运行的安全性、可靠性与经济性, 为智能配电网的稳定运行提供技术支撑。

**关键词:** 智能配电网; 配电自动化; 协同控制; 分层控制; 源网荷储

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.03.006

## 引言

随着新能源大规模接入、电力电子设备广泛应用以及用户用电行为日益多样化, 配电网运行环境和运行机理发生了深刻变化。传统以单向供电和人工调度为特征的配电网运行模式, 已难以适应高比例分布式电源、高波动负荷和多元化运行目标的现实需求。在此背景下, 智能配电网应运而生, 其核心特征在于对配电系统运行状态的全面感知、对控制资源的灵活调配以及对复杂运行场景的快速响应。基于此, 本文从智能配电网整体运行需求出发, 系统研究配电自动化系统的协同控制机制, 旨在为提升配电网运行效率和智能化水平提供理论支撑与技术参考。

## 1 智能配电网与配电自动化系统的技术特征

智能配电网是在传统配电网基础上, 深度融合信息技术、自动控制技术和先进电力电子技术形成的复杂系统。其运行特征主要体现在结构形态的复杂化、运行方式的主动化以及控制目标的多元化<sup>[1]</sup>。一方面, 大量分布式电源和储能装置接入, 使配电网由单一辐射型结构向多源、多向潮流结构转变; 另一方面, 负荷响应能力不断增强, 用电需求呈现出明显的随机性和不确定性。在发展趋势上, 智能配电网更加注重系统的自愈能力和协同运行能力, 通过构建高度信息化和智能化的控制体系, 实现对运行风险的提前预判和对运行状态的

动态优化。这一趋势对配电自动化系统提出了更高要求, 使其不仅需要具备传统意义上的监控与控制功能, 还应具备支持多主体协同决策和自适应控制的能力。

配电自动化系统最初以故障监测和隔离为主要目标, 其核心功能集中于开关状态监测、简单逻辑判断和人工辅助操作。随着技术进步, 系统逐步向综合在线监控、远程控制和运行优化方向演进, 形成了以主站系统为核心、以子站和终端设备为支撑的分布式自动化体系。在智能配电网条件下, 配电自动化系统的功能边界不断拓展, 其角色由“被动执行控制指令”转向“主动参与运行决策”。系统需要综合利用实时数据、历史数据和预测信息, 对配电网运行状态进行综合评估, 并在多目标约束条件下生成协同控制策略。这一转变使协同控制机制成为配电自动化系统设计与运行中的核心问题。

## 2 配电自动化系统协同控制的理论基础

### 2.1 协同控制理论在配电自动化系统中的适用性

协同控制理论起源于复杂系统控制与多智能体系统研究, 其核心在于通过信息共享、目标一致与策略协调, 实现多个控制单元在分布式条件下的整体性能优化<sup>[2-3]</sup>。智能配电网环境下的配电自动化系统, 天然具备多控制主体并存、多运行目标耦合以及运行环境高度不确定等典型复杂系统特征, 因而为协同控制理论的应用提供了现实基础。从系统结构看, 配电自动化系统涵盖主

站、子站、馈线终端及大量现场智能设备，各控制单元在功能定位、响应速度和控制精度方面存在显著差异；从运行目标看，系统需要在供电可靠性、电能质量、运行经济性与安全性之间进行综合权衡，单一控制目标已难以满足智能配电网运行需求。

在此背景下，引入协同控制理论，有助于突破传统集中控制或孤立控制的局限，通过构建统一的控制目标体系和协调机制，使各控制单元在保持相对独立性的同时服从系统整体运行目标。协同控制强调局部控制与全局优化之间的动态平衡，其理论内涵与配电自动化系统由“被动响应”向“主动调控”转变的演进方向高度契合。通过协同控制机制，配电自动化系统能够在分布式电源波动、负荷快速变化或故障扰动等复杂工况下，实现控制策略的协调一致，从而提升系统运行的稳定性与鲁棒性。

## 2.2 分层分区控制与多主体协调机理

分层分区控制理论是实现配电自动化系统协同控制的重要方法论基础，其基本思想是按照电网结构特征和控制功能需求，将系统划分为不同控制层级和运行区域，并在此基础上明确各层级、各区域的控制目标与权限边界。在智能配电网中，主站层通常承担全网运行态势分析与全局控制策略制定任务，侧重于长期或中周期优化；区域子站层负责协调区域内分布式电源、储能及负荷资源，强调区域运行安全与电压质量控制；终端层则直接面向现场设备，实现快速、精细的局部控制<sup>[4]</sup>。

分层分区控制并非简单的层级划分，而是通过信息交互和控制协同实现纵向贯通与横向联动。一方面，上层控制通过目标分解和约束下达，引导下层控制单元的运行行为；另一方面，下层控制单元基于实时运行状态进行自主调节，并将反馈信息上传至上层，实现控制策

略的动态修正。在此过程中，多主体之间通过标准化信息模型和统一通信机制实现状态共享，为协同控制提供必要条件。通过分层分区与多主体协调相结合，配电自动化系统能够在保证局部快速响应能力的同时，兼顾全局运行优化，为智能配电网下协同控制机制的构建奠定坚实的理论基础。

## 3 智能配电网下配电自动化系统的协同控制框架

### 3.1 面向智能配电网的协同控制总体架构

在智能配电网运行环境日益复杂的背景下，配电自动化系统的协同控制不再局限于传统意义上的“监测—控制”闭环，而是逐步演化为以数据驱动和智能决策为核心的综合控制体系。从系统架构层面看，协同控制框架通常由感知层、通信层、控制层与决策层构成，各层之间通过统一的数据标准和接口规范实现有机衔接。感知层依托智能终端、传感器及在线监测装置，对电压、电流、功率、开关状态及环境参数等关键运行信息进行高频采集，为系统运行状态感知提供基础数据支撑<sup>[5]</sup>。通信层则通过配电通信专网和无线通信技术，实现多源数据的可靠传输，保障信息交互的实时性与完整性。在此基础上，控制层承担具体控制指令的执行任务，包括开关分合、无功调节、分布式电源出力控制以及储能充放电控制等，是协同控制机制落地实施的关键环节。决策层位于系统架构的高层，负责对多源运行数据进行综合分析，并在多目标约束条件下生成协调一致的控制策略。该层通常引入状态估计、负荷预测和优化决策等功能模块，使控制决策由经验驱动向数据驱动转变。通过上述分层架构设计，配电自动化系统能够在保障局部快速响应能力的同时，实现全局运行目标的统一协调，为智能配电网下协同控制机制的有效运行提供结构支撑。

表1 智能配电网下配电自动化系统协同控制框架及功能分工

层级	主要组成	核心功能
感知层	智能终端、在线监测装置、传感器	运行数据采集、状态量实时监测
通信层	配电通信专网、无线通信网络	数据传输、信息交互与同步
控制层	馈线自动化装置、调压调无设备、储能控制单元	控制指令执行、局部运行调节
决策层	配电自动化主站、智能分析与优化模块	状态评估、预测分析、策略生成

表1中各层级通过统一数据模型和标准化接口实现信息交互，共同构成配电自动化系统的协同控制体系。

### 3.2 主站—子站—终端协同控制模式

主站—子站—终端协同控制模式是当前配电自动化系统中应用最为广泛的控制组织形式，其本质是一种

典型的纵向协同控制结构。主站作为系统的核心控制单元，主要负责全网运行状态的综合分析、控制目标的统一制定以及跨区域协调控制策略的下发，强调全局性和统筹性。子站则处于承上启下的中间层级，既需要执行主站下达的控制策略，又需结合区域内配电网结构特征和实时运行状态，对控制指令进行细化和调整，以确保

策略实施的可行性与有效性。终端设备直接部署于现场,是实现控制动作的最终执行单元,其控制响应速度和可靠性直接影响协同控制效果。

在协同控制机制下,各层级之间并非单向指令传递关系,而是通过双向信息交互形成动态闭环。当局部运行状态发生快速变化或出现异常工况时,子站和终端可在预设权限范围内实施自主控制,并将执行结果和运行反馈实时上送主站,为上层决策提供依据。主站则根据全网态势变化对控制策略进行动态修正,实现纵向层级之间的协同联动。该模式有效兼顾了集中控制的全局优化能力与分布式控制的快速响应优势,是智能配电网条件下配电自动化系统协同控制的重要实现形式。

## 4 源—网—荷—储协同控制机制及其运行机理

### 4.1 分布式电源与配电网协同控制机理

在智能配电网条件下,分布式电源已由传统“不可控电源”逐步转变为可参与系统调控的重要运行单元,其出力特性和接入方式对配电网运行状态产生深远影响。由于分布式电源多呈现出容量小、分布广、波动性强等特点,若缺乏有效的协同控制机制,极易引发局部电压越限、潮流反转以及保护配合失效等问题。因此,在配电自动化系统中构建分布式电源与配电网的协同控制机理,是保障系统安全稳定运行的关键环节。协同控制机制的核心在于将分布式电源运行状态纳入配电自动化系统的统一调控框架,通过实时感知其出力变化,并与网络运行状态相结合,动态调整控制策略。一方面,配电自动化系统可基于分层控制原则,在主站层面制定分布式电源参与电压控制和功率平衡的整体策略,在区域层面实现出力协调分配;另一方面,在终端层面通过快速控制装置对逆变器参数进行调节,实现对局部运行状态的精细化控制。通过上述协同机制,分布式电源不仅能够满足自身运行约束,还可在一定程度上承担调峰、调压等辅助服务功能,从而提升配电网整体运行的灵活性与稳定性。

### 4.2 储能与负荷侧协同调控机制

储能系统和负荷侧资源是实现智能配电网柔性调控的重要手段,其在协同控制机制中的作用主要体现在缓冲新能源波动、优化负荷曲线以及增强系统抗扰能力等方面。储能系统具备快速充放电和双向调节能力,能够在配电自动化系统的统一调度下,对短时功率失衡

进行有效补偿;负荷侧资源则通过需求响应机制,引导用户在不同时间段调整用电行为,为系统运行提供柔性调节空间。

在协同控制框架下,储能与负荷侧调控并非独立运行,而是与分布式电源和配电网运行状态形成联动关系。配电自动化系统通过综合分析负荷预测结果、分布式电源出力预测以及网络运行约束,确定储能充放电策略和负荷响应方案,并在不同控制层级间进行协调实施。当系统处于高负荷或新能源出力不足状态时,可优先调度储能放电并引导部分可中断负荷参与响应;当新能源出力富余时,则通过储能充电或负荷转移实现能量消纳。该协同调控机制有助于提升配电网运行的经济性与安全性,是智能配电网背景下配电自动化系统协同控制的重要组成部分。

## 5 结论

智能配电网的发展对配电自动化系统提出了更高层次的协同控制要求。本文从理论和技术层面对智能配电网下配电自动化系统的协同控制机制进行了系统分析,构建了多层级、多对象协同控制的总体框架,并探讨了源—网—荷—储协同控制的实现路径。研究表明,通过完善协同控制机制、强化数据融合与分层控制设计,可有效提升配电网运行的安全性、灵活性与经济性。相关研究成果可为智能配电网配电自动化系统的规划、设计与运行提供参考。

### 参考文献

- [1]王波安,周荣亮.基于智能感知技术的配电自动化系统设计[J].电气时代,2025,(12):104-107.
- [2]叶俊雄.基于物联网的10kV智能配电自动化系统的设计与应用[J].自动化应用,2025,66(23):196-200.
- [3]高涵宇,高瑞金,代贵生,等.面向配电系统故障检测的馈线自动化智能定位研究[J].电子设计工程,2025,33(22):15-19.
- [4]何猛.配电自动化系统中的大数据分析 with 智能决策技术研究[J].建设科技,2025,(S1):25-27.

作者简介:袁继光,男,汉,1977-12,本科,山东省济宁市,现有职称:工程师,具体研究方向(专业):电力工程。