

# 微电网与配电网柔性互联与协同运行技术

杨新良 沈鸿斌

嘉兴市恒光电力建设有限责任公司南湖分公司 浙江 嘉兴 314033

**摘要：**文章聚焦微电网与配电网柔性互联及协同运行技术。阐述柔性互联装置分类特性、电力电子变换器关键技术及数学模型。分析协同运行中功率分配、电压频率稳定性、故障隔离恢复等关键问题。介绍分层控制架构、多时间尺度协同控制等控制策略。探讨未来技术高效化等升级方向与标准化建设需求，旨在为该技术发展及应用提供全面的理论支撑与实践参考。

**关键词：**微电网；配电网；柔性互联；协同运行

引言：在能源转型与新型电力系统建设背景下，微电网与配电网的协同发展意义重大。柔性互联技术作为两者高效融合的关键，能提升电网灵活性与可靠性，促进新能源消纳。然而，当前该技术在装置特性利用、协同运行控制等方面面临诸多挑战。深入研究微电网与配电网柔性互联及协同运行技术，对于推动能源高效利用、保障电力系统稳定运行具有重要的现实意义和迫切性。

## 1 微电网与配电网柔性互联技术基础

### 1.1 柔性互联装置分类与特性

微电网与配电网柔性互联装置是实现两者高效融合的核心载体，主要分为基于电力电子技术的柔性装置和传统改进型互联装置两大类。其中，柔性交流输电装置（FACTS）如统一潮流控制器（UPFC）、静止同步补偿器（STATCOM），可实现有功与无功功率的独立调节，提升电网潮流控制灵活性，降低线路损耗，将输电走廊利用率提升30%以上。柔性直流互联装置（如VSC-HVDC）凭借模块化多电平换流器（MMC）拓扑，具备响应速度快、控制精度高的优势，可有效解决分布式电源接入带来的电压波动问题，适用于新能源富集区域的互联场景。传统改进型装置如智能软开关（SOP），通过优化控制策略实现功率的灵活转移，成本较低且兼容性强<sup>[1]</sup>。各类装置均具备快速响应、灵活调控的核心特性，其中VSC类装置响应时间可达毫秒级，能适应微电网与配电网间功率的动态变化，为两者协同运行提供可靠的硬件支撑，同时兼顾经济性与稳定性，满足不同场景下的互联需求。

### 1.2 电力电子变换器关键技术

电力电子变换器是柔性互联技术的核心支撑，其关键技术主要集中在拓扑结构设计、控制策略优化和器件性能提升三个方面。拓扑结构上，模块化多电平换流器（MMC）已成为主流方案，通过子模块冗余设

计实现99.99%的可用率，可有效抑制新能源并网时的宽频振荡，同时具备谐波补偿能力，使总谐波畸变率（THD）控制在2%以下。控制策略方面，模型预测控制（MPC）、滑模控制等先进算法的应用，实现了变换器输出电压、电流的精准调控，提升了系统抗干扰能力，解决了传统控制响应滞后的问题。器件性能上，以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）为代表的宽禁带半导体器件规模化应用，使变换器开关速度提升10倍，效率提高30%以上，体积缩小50%，显著提升变换器的功率密度和运行可靠性，为柔性互联系统的高效运行提供核心保障，推动了微电网与配电网互联技术的升级迭代。

### 1.3 柔性互联的数学模型

柔性互联的数学模型是实现微电网与配电网协同调控、性能分析和优化设计的基础，需结合互联装置特性、网络拓扑及运行规律构建，主要包括互联装置模型、网络潮流模型和耦合关系模型三大类。互联装置模型基于电力电子变换器的工作原理，采用状态空间法描述其输入输出特性，明确电压、电流与功率之间的数学关系，如VSC换流器的数学模型需考虑其P-Q控制、V<sub>dc</sub>-Q控制等不同运行模式的影响。网络潮流模型结合配电网辐射状拓扑和微电网分布式电源特性，采用节点电压法建立潮流方程，计入分布式电源的随机性和负荷的波动性，准确描述功率在两者之间的传输规律。耦合关系模型则重点刻画微电网与配电网之间的功率交互、电压频率耦合等关系，量化互联装置对系统运行状态的影响。通过合理简化和精准建模，可实现对柔性互联系统运行状态的精准仿真与预测，为后续控制策略设计和系统优化提供可靠的理论依据，支撑系统的安全稳定运行。

## 2 微电网与配电网协同运行关键问题

### 2.1 功率分配与经济调度

功率分配与经济调度是微电网与配电网协同运行的

核心问题,核心目标是在保障系统安全稳定的前提下,实现能源资源的最优配置,降低运行成本,提升新能源消纳能力。功率分配方面,需协调微电网内部分布式电源、储能装置与配电网之间的功率流动,既要避免配电网过载,又要充分发挥微电网的削峰填谷作用,实现分布式电源就近消纳,解决大规模分布式电源接入导致的功率反送问题。经济调度则需综合考虑分布式电源发电成本、储能充放电成本、电网购电成本及负荷需求,建立多目标优化模型,平衡经济性、环保性与可靠性。当前研究存在配电网对微网需求响应主导作用未充分挖掘、不同利益主体响应特性区分不精细等问题,需通过优化调度算法,实现各单元协同运行,在满足用户用电需求的同时,最大限度降低系统运行成本,提升整体运行效益,推动“源网荷储”协同发展。

## 2.2 电压与频率稳定性

电压与频率稳定性是微电网与配电网协同运行的前提条件,直接决定系统能否安全可靠供电。随着分布式电源(如光伏、风电)的大规模接入,其出力的随机性和波动性易导致系统电压偏移、频率波动,尤其是在微电网孤岛运行或柔性互联装置切换过程中,稳定性问题更为突出。电压稳定性方面,分布式电源出力波动、负荷变化及功率交互都会影响配电网节点电压,需通过柔性互联装置的无功调节能力、储能装置的快速响应,抑制电压越限,提升静态电压稳定性,可采用静态电压稳定指标(SVSI)量化评估系统电压状态。频率稳定性方面,微电网容量较小,惯性较低,负荷或电源出力的突变易导致频率大幅波动,需通过协同控制策略,协调分布式电源、储能装置与配电网的频率调节能力,实现频率的快速恢复与稳定。目前,通过优化柔性互联装置配置和控制策略,可将电压控制精度提升至 $\pm 1\%$ ,频率响应时间控制在50ms以内,有效保障系统电压与频率稳定。

## 2.3 故障隔离与恢复控制

故障隔离与恢复控制是保障微电网与配电网协同运行可靠性的关键,核心是在系统发生故障时,快速隔离故障区域,减少故障影响范围,实现非故障区域的快速恢复供电。由于微电网与配电网存在复杂的功率耦合关系,故障发生时易出现故障扩散,影响整个系统的安全运行,尤其是直流故障可能导致系统瘫痪。故障隔离方面,需利用柔性互联装置的快速开关特性(如固态变压器可实现 $10\mu\text{s}$ 级直流故障隔离)和智能保护装置,精准识别故障类型、位置和范围,快速切断故障线路,防止故障蔓延至非故障区域,同时避免对分布式电源和负荷造成损坏。恢复控制方面,需制定合理的恢复策略,

协调微电网与配电网的功率分配,优先恢复重要负荷供电,逐步恢复系统正常运行状态,通过分层控制架构实现故障恢复过程的有序调控,提升系统的容错能力和供电可靠性,确保故障后系统快速恢复至稳定运行状态<sup>[2]</sup>。

## 3 柔性互联与协同运行控制策略

### 3.1 分层控制架构设计

分层控制架构是实现微电网与配电网柔性互联及协同运行的核心框架,通过将控制任务分层划分,实现各层级独立控制、协同配合,兼顾控制精度、响应速度和系统稳定性,有效解决单一控制架构难以满足复杂系统调控需求的问题。分层控制架构通常分为三层,第一层为底层控制,基于下垂控制方法,主要负责分布式电源、储能装置和负荷的本地控制,通过调控逆变器输出,实现功率分配均衡和本地电压、频率的初步稳定,响应速度最快,可快速应对局部运行状态变化。第二层为中层控制,主要负责微电网内部及微电网与配电网之间的功率协调、电压频率校正,消除底层控制的累积误差,实现区域内的协同调控,确保微电网与配电网运行状态的同步性。第三层为顶层控制,基于系统整体运行目标,负责全局经济调度、故障统筹处理和整体优化,制定控制策略并下发至中底层,实现系统整体效益最大化。

### 3.2 多时间尺度协同控制

多时间尺度协同控制是应对微电网与配电网运行状态动态变化的关键策略,针对不同时间尺度下的系统需求,构建分层级、差异化的控制体系,实现各时间尺度之间的协同配合,提升系统调控的灵活性和适应性。根据负荷响应时间和系统调控需求,可将时间尺度分为秒级、分钟级、小时级和日前四个层级,不同时间尺度对应不同的控制任务和响应资源:秒级响应主要依靠可中断负荷、柔性互联装置,应对突发功率波动和故障,保障系统瞬时稳定;分钟级响应依托储能装置、电动汽车,实现功率平衡调节;小时级和日前响应则聚焦于经济调度和功率规划,优化分布式电源出力和负荷分配。通过对多形态负荷资源依据响应时间进行分级与时序建模,提出微网多时间尺度可调度能力评估方法,建立基于可调度能力评估的协同控制模型,可实现不同时间尺度控制策略的无缝衔接,兼顾系统稳定性和经济性,经算例验证可有效实现配网与微网的协同经济安全运行。

### 3.3 自适应控制方法

自适应控制方法针对微电网与配电网运行状态的随机性、不确定性,可实时调整控制参数和策略,确保系统在不同运行工况下均能保持良好的控制效果,解决传统固定参数控制适应性差的问题。该方法通过实时采集系统运

行数据（如电压、频率、功率、通信延迟等），利用智能算法分析系统运行状态，动态优化控制参数，调整控制策略，实现控制目标的自适应跟踪<sup>[3]</sup>。例如，针对WMNs通信网络延时优化问题，可采用交互增强型强化学习算法，结合自注意力机制提升节点对网络状态的感知能力，同时引入TOPSIS算法构建自适应奖励函数，根据场景变化调整控制策略，优化通信延迟。在电压频率控制中，自适应控制可根据分布式电源出力波动，实时调整柔性互联装置的调节参数，抑制电压频率波动，提升系统的抗干扰能力，确保系统在复杂工况下稳定运行。

### 3.4 信息物理系统（CPS）融合

信息物理系统（CPS）融合是推动微电网与配电网柔性互联及协同运行智能化升级的核心方向，通过将物理系统（微电网、配电网、互联装置、负荷等）与信息系（通信网络、数据处理、控制中心等）深度融合，实现系统的全面感知、精准调控和智能决策，契合新型电力系统“源网荷储”融合发展需求。CPS融合的核心是构建“感知-传输-处理-控制”的闭环体系，通过各类传感器实现系统运行状态的全面感知，采集电压、频率、功率、故障等各类数据；通过高速通信网络实现数据的实时传输，保障信息交互的及时性和可靠性；通过大数据、人工智能等技术对数据进行分析处理，实现故障诊断、状态预测和优化调度；通过控制中心下发控制指令，实现对物理系统的精准调控。这种融合模式可打破物理系统与信息系统的壁垒，实现多源信息的共享与协同，提升系统的智能化水平，解决传统系统信息孤岛、调控滞后等问题，同时强化信息安全防护，为柔性互联与协同运行提供全方位的技术支撑，推动系统向高效、智能、可靠方向发展。

### 4 未来发展趋势与挑战

未来微电网与配电网柔性互联及协同运行技术发展有诸多趋势与挑战。技术升级方向聚焦高效化、智能化、集成化和多元化：高效化推广宽禁带半导体器件应

用，优化相关结构策略，推动新型装备创新；智能化深度融合多种技术，构建协同控制体系，提升自主决策能力；集成化推动装置与储能等一体化集成，构建“源网荷储”一体化系统；多元化发展交直流混合柔性互联技术，探索新业态融合。同时标准化与规范化建设是技术规模化推广应用的重要保障，当前该领域存在标准缺失等问题，制约技术普及与系统互联互通<sup>[4]</sup>。未来将重点从三方面推进：设备标准化，制定核心设备相关标准，推广高可靠等设备；控制与通信标准化，统一控制策略规范等，制定信息安全标准；工程建设与运行管理标准化，制定规划、建设、运维等标准，完善调度运行控制方法标准，加强国际合作推动标准体系与国际接轨，为技术规模化应用提供制度保障，助力新型电力系统建设目标达成。

### 结束语

微电网与配电网柔性互联及协同运行技术是新型电力系统发展的关键支撑。尽管在技术升级和标准化建设等方面取得一定进展，但仍面临诸多挑战。未来，需持续推动高效化、智能化等技术升级，加强标准化与规范化建设，提升系统稳定性与经济性。通过不断探索创新，该技术有望在能源领域发挥更大作用，为实现“双碳”目标、构建清洁低碳能源体系贡献力量。

### 参考文献

- [1]魏元健,刘益青,徐枫,等.柔性互联配电网中光储充微电网选址及定容方法[J].济南大学学报(自然科学版),2026,40(1):65-74.
- [2]李洋滨,栗时平,龙坤,等.配电网故障下柔性多状态开关平滑切换策略[J].现代电力,2025,42(1):12-18.
- [3]王治然,杨祺铭,黄玉雄,等.考虑动态互联微电网与网络重构的弹性配电网多源序贯协同供电恢复方法[J].电力建设,2025,46(9):13-26.
- [4]阮解琼,李裕,张立芸,等.多能互补的柔性互联智能配电网拓扑结构设计[J].电工技术,2023(15):229-232,235.