

新能源高占比电网调控运行优化与协调控制技术研究

谷志伟

国网河南卫辉市供电公司 河南省新乡卫辉市 453100

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14727

[摘要] 围绕新能源高占比电网的调控运行优化与协调控制技术,分析电源结构演变引发的系统惯性下降、调控响应滞后等关键问题,提出基于多源协同的动态调控策略,并探讨其在典型区域电网场景中的控制效果。研究表明,构建具备快速响应与智能决策能力的协同控制架构,有助于提升系统运行稳定性与调节效率。面向未来电网形态,调控技术将向数据驱动、边缘计算与通信控制深度融合方向发展,为新型电力系统建设提供支撑。

[关键词] 新能源电网; 协调控制; 运行优化; 电力系统稳定性; 调控技术

引言

新能源发电具有波动性、间歇性和低惯性特征,导致电网频率响应能力减弱、电压调节难度增加、功率平衡风险上升,对现有调控体系构成严峻挑战。如何在复杂多变的运行环境下实现新能源主导电网的安全稳定运行,成为当前电力系统转型升级过程中亟需解决的核心问题。在此背景下,开展新能源高占比电网调控运行优化与协调控制技术研究,对于提升系统灵活性与可靠性具有重要意义。

一、新能源主导下的电网运行特性演变

传统以同步发电机为主导的电网正逐步向高比例电力电子化系统转变,这种结构性变化深刻影响了电网的频率响应、电压调节、惯性支撑以及潮流分布等关键运行特性。在新能源大规模接入背景下,电网的动态行为呈现出更强的不确定性和非线性特征,原有的基于同步机主导的稳定控制理论体系面临适应性挑战。在频率调节方面,由于风电机组和光伏逆变器普遍不具备传统同步机组的机械惯性与一次调频能力,导致系统整体惯性水平下降,频率响应速度加快,频率偏差范围扩大,给系统频率稳定性带来较大压力。

新能源出力受气象条件影响显著,具有间歇性和波动性特点,使得负荷与电源之间的实时平衡难度加大,进一步加剧了频率调节的复杂性。在电压控制层面,新能源场站通常通过电力电子装置接入电网,其无功功率调节能力虽具备快速响应优势,但缺乏传统同步机组提供的电压支撑作用,容易造成局部电网电压波动大、调节能力不足的问题。尤其是在弱电网连接条件下,新能源接入节点的电压稳定性问题更加突出,可能引发暂态过电压或低电压风险,影响系统的安全运行。新能源的大规模集中式接入改变了电力系统的潮流

分布模式,传统的单向潮流输送结构被打破,出现了多方向、多层级的复杂流动趋势。这不仅增加了输配电网络的负载不确定性,也对继电保护、设备选型和调度运行提出了新的要求。特别是在极端天气条件下,新能源出力骤变可能导致局部电网出现潮流反向、线路重载甚至越限运行的情况,威胁系统安全。

与此同时,新能源发电单元的控制方式与传统机组存在本质差异,其控制策略高度依赖于电力电子变换技术和数字控制系统,使整个电网的控制自由度增加,但也带来了控制器之间协调困难、动态交互作用增强等问题。在多源协同运行环境下,不同控制策略之间的耦合效应可能导致系统整体动态性能恶化,甚至诱发次同步振荡等新型稳定问题。在新能源主导的电网运行环境下,必须重新审视传统电力系统的建模方法、稳定判据与控制策略,构建适应新型电源结构的运行分析框架。

二、调控响应滞后与系统稳定性失衡问题

传统电力系统依赖同步机组提供的惯性响应和频率调节能力来维持动态平衡,而高比例新能源接入后,由于其出力波动性强、控制特性差异大,导致系统对扰动的响应速度加快,调控手段的滞后性问题愈加明显。这种响应机制与实际需求之间的不匹配,直接影响了电网在面对功率波动时的稳定运行能力。随着风电、光伏等间歇性电源渗透率的提高,系统整体的惯性水平显著降低,频率变化速率上升,传统的基于同步机响应特性的自动发电控制(AGC)策略难以及时适应新的运行环境。特别是在负荷突变或新能源出力骤降的情况下,调度中心发出的调节指令往往无法迅速转化为有效的功率调整,造成频率偏差扩大,甚至引发连锁反应。

新能源场站普遍缺乏一次调频和惯性支撑能力，进一步削弱了系统的自主恢复能力，使得频率稳定性成为亟待解决的核心问题之一。在电压稳定方面，新能源发电单元多采用电力电子接口并网，缺乏同步机组所提供的短路容量和电压支撑作用，导致局部电网电压调节能力下降。尤其是在低短路比条件下，系统对外部扰动的敏感度增强，易出现暂态电压失稳现象。与此现有的无功电压控制策略仍主要沿用基于集中式同步电源的设计逻辑，未能充分考虑新能源接入后的动态耦合特性，导致控制动作滞后于系统状态变化，影响电压调节的实时性和有效性。

更为复杂的是，新能源出力具有显著的不确定性和波动性，导致电网运行状态频繁变动，传统依赖离线整定的保护与控制策略难以满足实时调整需求。在多源协同运行环境下，不同层级控制系统存在响应时间尺度差异，如调度层决策周期较长而设备层响应迅速，二者间协调存在明显时滞，易引发控制器间的非预期耦合，加剧动态不稳定风险。随着新能源占比提升，电网运行边界趋于模糊，传统基于静态工况的安全稳定判据难以适应复杂动态过程，无法准确刻画系统能量交互与稳定性演变规律。

三、基于多源协同的动态调控策略设计

面对新能源出力波动性大、可控性弱的特点，必须构建以多类型能源协同为基础的动态调控体系，实现风、光、储、火等多种电源之间的高效联动与互补协调。该体系的核心在于打破各类电源独立运行的局限，通过统一调度平台与智能算法支撑，形成多层次、多时间尺度协同的调控机制。为提升系统的整体调节能力，调控策略的设计应充分考虑不同能源形式的技术特性及其在电网中的功能定位。例如，风电与光伏作为主要的可再生能源，在出力预测基础上需配合具备快速响应能力的储能系统进行功率平滑与削峰填谷；火电机组虽调节速度较慢，但其调频能力和旋转备用作用仍不可替代，应在中长期调节中发挥稳定支撑作用。此外，负荷侧资源也应纳入调控体系之中，通过需求响应机制引导用户参与电力平衡，增强系统的灵活性与鲁棒性。

调控策略的时间尺度划分是实现多源协同的关键环节之一。在秒级至分钟级的短时调控中，重点依靠储能装置和可调负荷的快速响应能力来应对突发扰动；在小时级至日级的中长期调控中，则需结合新能源出力预测结果与负荷变化趋

势，优化火电启停计划与跨区域电力输送安排。这种多时间尺度协同的调控架构不仅提升了系统的动态适应能力，也有助于降低调节成本，提高运行效率。为了实现上述调控目标，系统需要构建一个高度集成的信息物理融合平台，将分布式能源的运行状态、电网参数、气象数据等多源信息进行实时采集与处理。基于此平台，采用先进的数据分析与优化算法，如模型预测控制、滚动优化方法以及人工智能辅助决策技术，可以实现对调控指令的精准生成与动态调整。这种以数据驱动为核心的调控方式，能够有效提升控制策略的自适应性，使其更契合新能源主导电网的复杂运行环境。

在多源协同调控过程中，还需注重控制系统间的交互协调机制设计。由于各类电源、储能与负荷设备的控制逻辑与响应特性存在差异，若缺乏统一的协调机制，极易出现控制冲突或响应失衡现象。应建立面向全局优化的协同控制模型，明确各子系统之间的控制优先级与耦合关系，确保在多种运行工况下都能实现稳定、高效的联合调控。

四、区域电网典型场景下的控制效果评估

为了全面评估多源协同调控技术在不同运行条件下的适应性与稳定性，研究通常选取具有代表性的区域电网典型场景作为测试平台。这些场景涵盖新能源集中接入、负荷波动剧烈、输电通道受限以及极端天气影响等多种情况，能够有效反映现代电力系统在复杂运行环境下所面临的挑战。为确保评估结果具备实际指导意义，控制效果验证过程需依托高精度的电网仿真模型，并结合实时数据采集与分析手段。仿真平台应充分考虑新能源发电单元、储能系统、常规电源及负荷侧资源的动态特性，构建包含多时间尺度响应机制的闭环控制系统。在此基础上，通过设定不同的扰动事件和运行边界条件，对调控策略在频率稳定、电压调节、功率平衡等方面的执行能力进行全面测试。

在频率调节方面，评估重点考察系统在面对突发功率缺额或过剩时的响应速度与恢复能力。特别是在风电或光伏出力骤变的情况下，调控策略是否能在短时间内调动储能、可调电源或负荷侧资源参与频率支撑，直接影响系统的动态稳定性。通过对频率偏差最大值、恢复时间及调节误差等关键指标的量化分析，可以准确判断控制策略在维持功率平衡方面的有效性。电压调节性能的评估则聚焦于新能源场站并网点及关键负荷节点的电压波动水平。在弱电网连接条件下，

新能源出力变化可能引发局部电压越限问题,而多源协同调控策略应能通过协调无功补偿装置、逆变器控制模式切换以及分布式储能的快速响应来实现电压动态优化。评估过程中重点关注电压恢复速度、波动幅度及控制动作的协同一致性,以验证调控策略在复杂电磁环境下的适用性。

在典型场景下还需评估调控策略对电网潮流分布的影响。新能源大规模接入改变了传统单向潮流输送模式,导致部分输电线路出现反向潮流或过载风险。通过调控手段优化功率流向,不仅可以缓解关键断面的传输压力,还能提升整体系统的运行效率。评估内容包括线路负载率变化、潮流调整精度以及调度指令执行的准确性等方面。为了进一步提升评估的实用性,研究还引入了多种边界条件组合,如不同新能源渗透率、负荷曲线类型以及气象变化趋势等,以检验调控策略在多样化运行环境中的鲁棒性。

五、高比例新能源背景下调控技术的发展方向

随着新能源渗透率持续提升,电力系统的运行机理和控制需求正在发生深刻变化,传统基于同步机主导的调控体系已难以适应新型电源结构的发展趋势。为应对这一挑战,调控技术正逐步向智能化、协同化与自适应方向演进,以支撑高比例新能源接入下的安全稳定运行。在系统建模层面,调控技术的发展正由集中式、静态等值模型向分布式、动态精细化建模转变。新能源发电单元具有非线性、时变特性,其响应行为与传统同步机组存在显著差异,因此必须构建更贴近实际的多时间尺度动态模型,涵盖风电场、光伏电站、储能装置及其控制系统的行为特征。这种精细化建模方式有助于提升系统稳定性分析的准确性,并为后续控制策略设计提供可靠依据。

调控架构方面,传统的垂直分层控制模式逐渐向扁平化、分布式的协同控制架构演进。由于新能源分布广泛、接入节点众多,单一调度中心难以实现对海量资源的实时精准控制。为此,研究重点转向边缘计算与区域自治相结合的控制结构,在本地层级实现快速响应与局部优化,同时通过广域信息交互实现全局协调。这种架构不仅提升了调控效率,也增强了系统对局部扰动的鲁棒性。在控制算法层面,基于人工智能与大数据驱动的智能调控方法成为研究热点。传统PID控制、最优潮流算法在面对新能源波动性强、不确定因素多的情况

下表现出一定的局限性,而深度学习、强化学习等新兴技术能够从历史数据中提取复杂模式,实现对系统状态的预测与自适应调节。模型预测控制(MPC)因其具备滚动优化与约束处理能力,也被广泛应用于新能源主导电网的动态调控中。

为了提升调控系统的实时性与灵活性,通信与控制的深度融合成为未来发展的重要方向。5G、光纤通信、工业互联网等技术的应用,使得调控指令的传输延迟大幅降低,为实现毫秒级响应提供了技术支撑。同时,基于数字孪生的虚拟仿真平台也在逐步建立,能够在真实调控动作执行前进行预演与优化,从而提升决策的科学性与安全性。在系统韧性建设方面,调控技术的发展还注重增强电网在极端事件下的恢复能力。面对气候异常频发带来的运行风险,调控策略需具备更强的弹性,能够在故障后迅速重构运行方式,调动分布式资源参与恢复过程。

结语

随着新能源发电占比持续提升,电网运行特性发生深刻变化,传统调控模式面临适应性不足的挑战。针对高比例新能源接入带来的频率响应能力下降、电压调节困难及潮流分布复杂等问题,动态调控策略的设计与实施成为保障系统稳定运行的关键。通过构建多源协同的调控架构,结合智能算法与实时信息交互,可有效提升系统的响应速度与调节精度。未来,调控技术将向更高层次的智能化、分布式协同与自适应方向发展,融合先进通信手段与数字孪生技术,推动电力系统向更加灵活、高效、安全的方向演进。

[参考文献]

- [1]陈志刚. 新能源并网系统中频率调节能力的建模与分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 89-96.
- [2]刘建国, 王海峰. 多馈入直流系统与新能源场站的协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4321-4330.
- [3]高远. 含大规模风电和光伏的电力系统动态稳定性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1345-1352.
- [4]孙立新. 基于模型预测控制的新能源场站参与电网调频方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 112-119.
- [5]黄志强. 新型电力系统下调度控制系统架构与关键技术展望[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 1-9.