

高比例新能源接入下电力系统频率稳定控制的鲁棒性优化方法

徐浩帅

郑州丰元电力工程设备有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着新能源技术的迅猛发展和广泛应用，电力系统正面临着前所未有的变革。高比例新能源的接入，虽然带来了清洁、可再生的能源供应，但同时也对电力系统的频率稳定控制提出了新的挑战。传统电力系统中，由于化石能源的出力相对稳定，频率稳定控制相对简单。然而，在新能源高比例接入的情境下，新能源出力的随机性和波动性显著增加，给电力系统的频率稳定带来了极大的不确定性。因此，如何在这种新的电力系统环境下，实现频率稳定控制的鲁棒性优化，成为了当前研究的热点和难点。

关键词：高比例新能源接；电力系统；频率稳定控制；鲁棒性优化方法

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.017

引言

随着全球对环境保护和可持续发展的日益重视，新能源的开发和利用已成为不可逆转的趋势。风能、太阳能等新能源具有清洁、无污染、可再生等优点，对于减少温室气体排放、缓解能源危机具有重要意义。然而，新能源的出力特性与传统化石能源存在显著差异，其随机性和波动性给电力系统的稳定运行带来了新的挑战。特别是在高比例新能源接入的情境下，电力系统的频率稳定控制问题变得尤为突出。

1 鲁棒性优化方法的理论基础

1.1 鲁棒控制理论概述

鲁棒控制理论是应对系统不确定性的重要控制理论分支，核心是设计在参数摄动、外部扰动及模型误差存在的情况下，仍能保证系统稳定运行并满足性能指标的控制策略。与传统控制理论依赖精确数学模型不同，鲁棒控制通过“最坏情况分析”处理不确定性，将系统参数变化、扰动范围等不确定性量化为有界集合，在集合内寻找使系统性能最优的控制方案。其关键理论包括 H_∞ 控制、滑模控制、模型预测控制（MPC）的鲁棒拓展等： H_∞ 控制通过极小化系统对扰动的最大灵敏度，实现扰动抑制与系统稳定的平衡；滑模控制利用不连续控制律迫使系统沿预设滑模面运动，对参数扰动具有强抗干扰能力；鲁棒 MPC 则通过在预测时域内考虑不确定性集合，滚动优化控制量，兼顾稳定性与控制精度。鲁棒控制理论的核心优势在于无需精确建模即可应对复杂不确定性，为高比例新能源接入下参数波动剧烈的电力

系统频率控制提供了理论支撑。

1.2 频率稳定控制的鲁棒性指标

频率稳定控制的鲁棒性指标是衡量控制策略抗不确定性能力的量化标准，需从稳定性、动态性能与抗扰能力三个维度构建。稳定性鲁棒指标用于评估系统在不确定性下的稳定裕度，主要包括鲁棒稳定裕度（系统参数摄动至临界稳定状态的最大允许范围）、特征值灵敏度（特征值随参数变化的变化率，灵敏度越低鲁棒性越强）及 Lyapunov 稳定性判据中的鲁棒 Lyapunov 函数衰减率。动态性能鲁棒指标关注控制策略的动态响应质量，涵盖频率最大偏差（扰动后频率偏离额定值的峰值，需小于 $\pm 0.5\text{Hz}$ ）、频率变化率（ROCOF，鲁棒控制需将其限制在 $0.5\text{--}1\text{Hz/s}$ 以内）、恢复时间（频率恢复至额定值 $\pm 0.2\text{Hz}$ 内的时间，通常要求小于 10 秒），这些指标需在参数波动时仍能满足设计要求。抗扰鲁棒指标量化控制策略对外部扰动的抑制能力，包括扰动抑制比（输出扰动与输入扰动的幅值比，比值越小抗扰性越强）、积分绝对误差（IAE，扰动后频率偏差的积分值，反映总扰动影响程度）及不确定性衰减率（系统对不确定性的衰减能力）。

1.3 鲁棒优化算法介绍

鲁棒优化算法是实现频率稳定控制鲁棒性的核心工具，通过在优化过程中引入不确定性约束，求解全局最优且鲁棒的控制参数。区间鲁棒优化算法将不确定性参数描述为区间集合，将鲁棒优化问题转化为在区间内寻找使最坏情况下目标函数最优的解，适用于参数边界已知但分布未知的场景，计算复杂度较低，易于工程实

现。随机鲁棒优化算法针对随机性不确定性（如新能源出力波动），通过概率分布描述不确定性，将目标函数转化为期望性能指标，结合蒙特卡洛模拟生成大量随机场景，求解统计意义下的鲁棒最优解，兼顾优化效果与概率可靠性。多目标鲁棒优化算法（如鲁棒 NSGA-II）同时优化频率稳定性能（如恢复时间）与鲁棒性指标（如稳定裕度），通过帕累托最优解集提供多个权衡方案，满足不同运行需求。此外，自适应鲁棒优化算法结合在线参数辨识，实时更新不确定性集合，动态调整优化参数，适用于时变不确定性系统，能持续维持控制策略的鲁棒性。

2 高比例新能源接入对电力系统频率稳定的影响

2.1 新能源出力的随机性和波动性

新能源（风电、光伏）出力的随机性与波动性源于自然条件的不可预测性，给电力系统频率稳定带来持续扰动。随机性体现在出力无法精确预测，短期（分钟级）预测误差可达 10%–15%，长期（小时级）误差更高，导致系统功率平衡难以精准维持，频率易出现随机波动。波动性则表现为出力在不同时间尺度上的剧烈变化：日内尺度上，光伏出力从日出到日落呈现“钟形”变化，风电则受阵风影响出现秒级至分钟级波动；季节尺度上，新能源出力随季节气候变化呈现显著差异，如冬季风电出力较高而光伏出力较低。这种波动使系统需频繁调整发电与负荷平衡，传统调频资源（如同步发电机）因响应速度滞后（通常秒级），难以完全平抑快速波动，导致频率偏差增大、波动频率升高，增加了频率稳定控制的难度。

2.2 新能源并网对系统惯量的影响

新能源并网通过替代同步发电机，导致电力系统惯量水平显著下降，削弱系统对频率扰动的天然抵抗能力。传统同步发电机依靠旋转转子储存动能，惯量越大，扰动时频率变化越平缓；而新能源机组通过电力电子逆变器并网，逆变器无旋转部件，几乎不提供惯量，仅能通过控制策略模拟虚拟惯量。当新能源渗透率超过 50% 时，系统总惯量可能降至传统系统的 1/3 以下，惯量不足直接导致两方面问题：一是频率变化率（ROCOF）急剧上升，扰动发生时频率在短时间内大幅跌落或升高，易触发发电机组、负荷的频率保护动作，扩大事故范围；二是频率稳定裕度缩小，传统一次调频的响应时间（2–5 秒）内，频率可能已突破安全阈值，导致系统频率失稳。此外，新能源场站的虚拟惯量控制参数若未协同优化，

可能出现惯量支撑不均，进一步加剧局部频率波动。

2.3 电力系统频率稳定控制面临的挑战

高比例新能源接入使电力系统频率稳定控制面临不确定性增强、控制资源协同难、新型动态问题凸显等多重挑战。不确定性量化难，新能源出力波动、参数时变（如逆变器控制参数漂移）等不确定性相互耦合，难以精确建模，传统基于确定性模型的控制策略易失效。控制资源协同复杂，调频资源从单一同步发电机扩展为“同步机+新能源+储能+柔性负荷”多元主体，各主体响应速度（储能毫秒级、同步机秒级、负荷分钟级）、调节能力差异大，协同控制难度高，易出现调节冲突或响应滞后。新型动态问题突出，新能源逆变器的快速响应特性可能与系统产生宽频振荡，虚拟惯量控制的参数不匹配会引发频率二次波动，进一步威胁频率稳定。此外，分布式新能源的广泛接入使系统从“集中式”向“分布式”转变，传统集中式频率控制难以覆盖末端电网，局部频率稳定问题日益显著。

3 高比例新能源接入下频率稳定控制的鲁棒性优化策略

3.1 频率稳定控制模型建立

频率稳定控制模型的建立需兼顾系统动态特性与不确定性描述，构建鲁棒性优化的基础框架。系统动态模型采用多区域互联系统模型，每个区域包含同步发电机（考虑励磁与调速系统）、新能源场站（含逆变器虚拟惯量模型）、储能系统（电化学/飞轮储能的充放电模型）、柔性负荷（可调节负荷的响应模型），通过功角-频率动态方程描述系统整体频率响应。不确定性建模是核心，采用区间模型描述新能源出力波动（如风电出力在预测值 $\pm 10\%$ 区间变化）、参数摄动（如同步机惯量 $\pm 5\%$ 变化），采用随机分布模型（如正态分布）描述短期出力随机扰动，将不确定性融入模型约束条件。目标函数设计以频率稳定性能与鲁棒性为优化目标，包括最小化频率最大偏差、ROCOF、恢复时间等动态指标，同时最大化鲁棒稳定裕度、扰动抑制比等鲁棒指标，通过加权系数平衡不同目标的优先级。约束条件涵盖各控制主体的调节范围（如储能充放电功率限制、新能源调频备用容量限制）、系统功率平衡约束及稳定性约束。

3.2 鲁棒性优化策略设计

鲁棒性优化策略设计需针对不确定性特性，实现控制资源的协同与控制参数的鲁棒整定。基于 H_∞ 的鲁棒调频控制通过设计 H_∞ 控制器，将新能源出力扰动、参

数摄动视为外部干扰,极小化干扰对频率的影响,同时保证系统稳定;针对多区域系统,采用分散 H_∞ 控制,各区域控制器独立设计但兼顾区域间交互影响,提升控制鲁棒性。滑模鲁棒控制策略适用于参数时变系统,设计滑模面为频率偏差与偏差变化率的线性组合,通过不连续控制律迫使系统沿滑模面运动,对新能源出力波动与参数摄动具有强抗干扰能力,同时引入边界层削弱抖振现象,提升工程适用性。多元主体鲁棒协同控制通过鲁棒优化算法分配各调频主体的调节量:储能承担毫秒级快速调频,通过鲁棒MPC优化充放电功率;新能源场站提供虚拟惯量与辅助调频,采用区间优化整定虚拟惯量参数;同步发电机与柔性负荷负责中长期调频,通过随机鲁棒优化协调调节时机,实现“快-中-慢”调频资源的鲁棒协同。

3.3 优化策略的仿真验证

仿真验证是评估鲁棒性优化策略有效性的关键手段,需构建覆盖多种不确定性场景的验证体系。仿真平台搭建基于PSCAD/EMTDC或MATLAB/Simulink,构建含高比例新能源(渗透率60%以上)、储能、同步机的多区域电力系统模型,集成鲁棒控制算法模块,实现控制策略的实时仿真。场景设计包括确定性场景(如同步机跳闸、负荷阶跃)与不确定性场景(如新能源出力随机波动、参数摄动),其中不确定性场景通过蒙特卡洛模拟生成1000+随机样本,覆盖出力预测误差、惯量变化等极端情况。性能评估从稳定性、鲁棒性、经济性三方面展开:稳定性评估频率最大偏差、ROCOF、恢复时间是否满足标准;鲁棒性评估在95%置信度下指标是否达标、最坏场景下系统是否稳定;经济性评估调频成本(如储能损耗、新能源备用成本)是否最优。通过对比鲁棒策略与传统PID策略的仿真结果,量化验证鲁棒策略的优势。

3.4 基于在线参数辨识的鲁棒自适应控制

基于在线参数辨识的鲁棒自适应控制,通过实时更新系统参数,动态调整控制策略,应对时变不确定性。参数辨识模块采用递推最小二乘法(RLS)或扩展卡尔曼滤波(EKF),实时采集系统频率、功率、新能源出力等数据,辨识同步机惯量、新能源虚拟惯量参数、负荷特性等时变参数,输出参数估计值与误差范围。鲁棒自适应控制律设计将辨识得到的参数不确定性纳入控制决策,采用模型参考自适应控制(MRAC)框架,以理想频率响应为参考模型,通过自适应律调整控制参数,

使实际系统输出跟踪参考模型,同时引入鲁棒项抑制辨识误差与未建模动态的影响。自适应调整机制根据参数变化率动态调整控制增益:当参数变化平缓时,减小增益变化速度,保证系统稳定;当参数突变(如新能源大规模脱网)时,增大增益变化速度,快速响应参数变化,避免频率失稳。该策略实现了“辨识-调整-控制”的闭环优化,持续维持控制鲁棒性。

3.5 考虑通信延迟的鲁棒预测控制

考虑通信延迟的鲁棒预测控制,针对广域频率控制中的通信延迟问题,提升控制策略的鲁棒性与时效性。延迟建模采用时滞系统模型描述通信延迟,将延迟视为有界不确定性(通常20-100ms),纳入预测控制的约束条件,避免延迟导致的控制指令滞后。鲁棒预测控制算法在预测时域内考虑延迟与新能源出力的不确定性集合,通过滚动优化求解最优控制序列,使未来多个时刻的频率偏差最小化;同时采用约束收紧技术,确保在延迟与扰动下控制量仍满足设备限制。预测校正机制利用最新测量数据(如当前频率、延迟时间)校正预测模型,更新不确定性集合与控制序列,减少预测误差积累。此外,采用分布式预测控制架构,将大系统分解为多个子系统,各子系统独立预测与控制,通过局部通信协调,降低对全局通信的依赖,进一步削弱通信延迟的影响,提升广域频率控制的鲁棒性。

4 结语

总之,本文提出的一系列鲁棒性优化策略不仅为理论研究提供了新的视角,更为实际电力系统的安全稳定运行提供了可行的解决方案。通过深入剖析高比例新能源接入带来的挑战,我们明确了鲁棒性优化的必要性和紧迫性。从频率稳定控制的鲁棒性指标构建,到鲁棒优化算法的介绍,再到具体优化策略的设计与仿真验证,每一步都紧密围绕提升电力系统的鲁棒性能展开。特别是在线参数辨识与鲁棒自适应控制、考虑通信延迟的鲁棒预测控制等创新点,为解决时变不确定性和通信延迟等实际问题提供了有效手段。

参考文献

- [1] 汪梦军,郭剑波,马士聪,王铁柱,张曦,罗魁,王国政. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2023,43(05):1672-1694.
- [2] 冯帅帅. 考虑新能源发电调控的电力系统频率稳定控制[D]. 武汉大学,2022.