

新能源电力系统的稳定控制与优化策略研究

陈义航

贵州织金平远清洁能源有限责任公司 贵州遵义 563000

摘要: 本文深入剖析了高比例新能源接入下电力系统的动态特性演变规律,并据此创新性地提出了一种分层协同的稳定控制框架。该框架的核心在于实施多时间尺度、多空间维度的协调优化控制策略,其核心目标是在确保系统安全的前提下,协同优化解决频率稳定快速恢复、电压动态精细调节与系统整体运行经济性提升等关键问题。结果表明,该方案能显著提升电网对高比例波动性新能源的消纳能力,有效增强系统韧性与动态稳定性,为构建安全、高效、经济的新型电力系统提供了重要的技术参考和实现路径。

关键词: 新能源电力系统; 稳定控制; 优化策略

引言

随着风电、光伏等新能源大量接入,电力系统运行特性发生变化。新能源出力波动性强,导致频率和电压稳定性下降,电力电子设备增多也削弱了系统惯量和抗扰动能力。现有研究多聚焦单一场景,缺乏多时间尺度的协同策略。本文从“源-网-荷”出发,构建适应新能源特性的控制与优化体系,提升系统的安全性与经济性。

1. 新能源电力系统的稳定控制策略

1.1 稳定控制的技术挑战

1.1.1 频率稳定性

在新能源电力系统的发展进程中,频率稳定性成为亟待攻克的关键难题。传统电力系统中,同步机组凭借其庞大的旋转惯量,在系统功率出现不平衡时,能够通过自身的动能释放或吸收来缓冲频率变化,维持系统频率的稳定^[1]。然而,随着新能源大规模替代传统同步机组接入电网,系统的惯量显著下降。新能源发电设备如风电、光伏等,主要依靠电力电子变换器并网,缺乏类似同步机组的旋转惯量,无法像传统机组那样快速响应功率波动。

风电和光伏的出力具有极强的不确定性,受风速、光照强度等环境因素的频繁影响而大幅波动。当新能源出力突然增加或减少时,电网的实时供需平衡被打破,频率偏差很容易超出允许的阈值。与此同时,传统调频资源如火电机组的调频能力有限,其调节速度和容量难以满足新能源电力系统快速变化的调频需求。在极端情况下,频率偏差过大可能引发连锁脱网事故,导致电网大面积停电,严重影响电力系统

的安全稳定运行。因此,如何提高新能源电力系统的频率稳定性,成为当前稳定控制策略研究的重要方向。。

1.1.2 电压稳定性

分布式新能源大规模接入配电网后,给电压稳定性带来了新的挑战。传统配电网的潮流通常是单向流动的,即从电源端流向负荷端。但新能源的接入使得潮流方向变得复杂,呈现出双向交互的特征。光照强度和风速的突变会导致逆变器输出功率发生剧烈变化^[2]。例如,在光照突然减弱时,光伏逆变器的输出功率会迅速下降,而风速的突然变化也会使风电逆变器的输出功率产生大幅波动。

这种功率的剧烈变化会使得配网线路末端电压越限的概率大幅增加。传统的电压调节装置如调压变压器、电容器等,其响应速度相对较慢,无法及时跟踪新能源出力的快速变化。当电压偏差超过一定范围时,局部电压崩溃的风险会急剧加剧,进而影响整个配电网的稳定运行。因此,需要研究新的电压稳定控制策略,以提高配电网对新能源出力波动的适应能力,确保电压在允许的范围内稳定运行。

1.1.3 振荡抑制

新能源机组采用电力电子接口并网,这一特性使得多设备间的宽频段交互变得复杂,容易诱发次/超同步振荡。次/超同步振荡是一种复杂的电磁振荡现象,其振荡频率范围广泛,可能与电网的固有谐振点发生耦合。当这种耦合发生时,会引发一系列严重问题。

一方面,设备保护装置可能会因为检测到异常的振荡信号而误动作,导致不必要的设备停运。另一方面,严重的

振荡甚至可能导致风机、光伏逆变器等设备大面积脱网,对电力系统的动态稳定性构成巨大威胁^[3]。振荡的产生和传播机制复杂,受到多种因素的影响,如电力电子设备的控制参数、电网的拓扑结构等。因此,深入研究振荡的产生机理,制定有效的振荡抑制策略,对于保障新能源电力系统的稳定运行至关重要。

1.2 分层协同控制框架设计

1.2.1 广域协调层

广域协调层在整个新能源电力系统分层协同控制框架中扮演着全局“决策中枢”的关键角色。它依托先进的PMU(同步相量测量装置)技术,能够实现对全网运行状态的秒级精准感知。PMU可以实时采集电网中各关键节点的电压、电流、功率等电气量信息,并将其以高速通信网络传输至广域协调层的控制中心。通过这些海量且精确的数据,控制中心能够精准捕捉新能源出力波动与负荷变化的趋势,为后续的决策提供坚实的数据支撑。

基于对全网运行状态的实时把握,广域协调层通过动态修正火电、水电机组的出力基准值,来统筹跨区域的调频资源。当新能源出力出现大幅波动时,它能够迅速协调不同区域的调频机组,合理分配调频任务,缓解风光随机性引发的频率偏差问题。同时,考虑到通信延时可能对控制效果产生的影响,该层引入了边缘计算节点。边缘计算节点能够对关键断面的潮流进行预判,提前生成调节指令。例如,在预测到某区域新能源出力即将大幅增加时,边缘计算节点可以提前调整相关联络线的功率分配,确保跨省联络线功率具有足够的安全裕度,避免因功率过载引发电网故障,从而在维持频率与电压稳定的同时,为下级控制层提供可执行的优化目标。

1.2.2 区域控制层

区域控制层作为承上启下的重要环节,引入了模型预测控制(MPC)算法,以15分钟为周期滚动优化本地设备的动作策略。在实际运行中,当光伏出力骤降时,MPC算法能够综合考虑储能系统的荷电状态以及SVG(静止无功发生器)的容量,动态分配无功补偿与有功支撑的比例。通过精确的计算和优化,能够避免配电网电压越限,保障电压在安全范围内稳定运行。

考虑到风光预测存在一定的误差,区域控制层采用了滚动修正机制。它会根据实时监测到的数据,不断更新控制

序列,使控制策略更加贴合实际运行情况。在台风、雷击等极端天气条件下,该层能够自动切换为鲁棒控制模式。鲁棒控制模式具有更强的抗干扰能力,能够降低设备过载风险,确保区域电网在恶劣环境下依然能够稳定运行。通过多设备的协同响应,区域控制层将广域协调层下达的全局指令分解为具体、可落地的本地控制信号,为设备执行层的精准执行提供指导。

1.2.3 设备执行层

设备执行层聚焦于逆变器、风机等电力电子设备的毫秒级快速调节。它采用自适应PID算法,能够根据实时采集的电压、频率偏差动态调整控制参数。例如,在低电压穿越场景下,自适应PID算法可以自动增强电流限幅保护功能,避免设备因电压过低而脱网,保障设备的稳定运行。

针对风机叶片惯性存在差异的问题,设备执行层设计了差异化的转速-功率跟踪曲线。通过这种差异化的设计,能够提升风电场群整体的响应一致性,使风电场能够更加高效、稳定地运行。同时,该层融合了本地电压/电流传感器数据,构建了“测量-控制-执行”的闭环链路。这种闭环链路减少了设备对上层通信的依赖,即使在通信中断的极端情况下,设备依然能够依据本地传感器数据维持基本的稳定运行,为新能源电力系统的稳定控制提供了坚实的底层保障。

2. 新能源电力系统的多目标优化策略

2.1 优化目标与约束条件

2.1.1 目标函数

新能源电力系统的多目标优化需围绕“经济性-安全性-环保性”三维目标协同推进。经济性目标聚焦发电成本优化与弃风弃光率控制,通过风光储联合出力策略动态匹配电价波动与设备运维需求,实现资源利用效率最大化。安全性目标强调极端场景下的抗扰动能力,优先调用抽蓄电站、氢储能等灵活性资源平抑功率突变,降低设备过载风险。环保性目标以碳减排为核心,优化火电调峰曲线,推动分布式新能源参与碳交易市场,建立绿电消纳与碳排放强度联动的激励机制。借助权重自适应算法动态平衡三目标优先级,避免单一目标过度倾斜引发系统失衡。

2.1.2 约束条件

新能源电力系统的优化需满足物理安全与运行规则的双重边界。物理约束方面,涵盖节点电压安全域的动态监测与联络线功率限额管控。在电力系统中,节点电压必须在—

定范围内波动,否则会影响设备的正常运行。通过无功补偿装置实时调节光伏逆变器等设备的无功出力,能够避免电压越限引发设备损坏。例如,当节点电压过高时,增加无功补偿装置的感性无功输出,降低电压;当节点电压过低时,增加容性无功输出,提升电压。

运行约束要求预留旋转备用容量以应对风光出力预测偏差。由于风光出力具有不确定性,预测结果可能存在误差。为确保电力系统的供需实时平衡,利用虚拟电厂聚合分布式储能与可控负荷,增强系统的调节裕度。虚拟电厂可以将分散的储能设备和可控负荷进行统一管理和调度,在风光出力不足时,释放储能的电能或增加可控负荷的用电量;在风光出力过剩时,储存多余的电能或减少可控负荷的用电量。

2.2 典型优化场景实施路径

2.2.1 多时间尺度协调调度

新能源电力系统面临风光出力预测误差与负荷波动等多重不确定性,为有效应对这些问题,建立“日前-日内-实时”三阶段协同优化机制至关重要。

在日前阶段,采用鲁棒优化模型,结合气象预报数据生成基础调度计划。由于气象预报存在一定误差,风光出力具有不确定性,鲁棒优化模型能够考虑各种可能的出力场景,预留抽蓄电站、氢储能等灵活资源的跨时段调节空间。例如,在预测到未来某时段可能出现风光出力不足时,提前安排抽蓄电站在低谷时段抽水储能,为高峰时段发电做好准备;对于氢储能系统,预留足够的氢气存储容量,以便在需要时进行发电。

日内阶段引入滚动修正策略,每15分钟更新一次储能充放电计划与火电机组爬坡速率。随着实时数据的不断更新,风光出力情况和负荷需求可能发生变化。通过滚动修正,能够及时调整储能系统的充放电状态,平抑光伏出力骤降引发的功率缺口。例如,当光伏出力突然下降时,增加储能系统的放电功率,补充电网功率;同时,根据负荷变化情况,合理调整火电机组的爬坡速率,确保发电功率与负荷需求相匹配。

2.2.2 虚拟电厂(VPP)资源聚合

虚拟电厂通过边缘计算与智能合约技术,将分布式光伏、储能集装箱、楼宇空调群等碎片化资源整合为可控聚合体,为新能源电力系统的稳定控制与优化提供了新的思路。

针对分布式资源主体间的利益冲突,设计基于贡献度

的收益分配模型。不同资源主体在虚拟电厂的运行中发挥的作用不同,贡献度也有所差异。通过基于贡献度的收益分配模型,能够公平合理地分配收益,激励各资源主体积极参与虚拟电厂的运行。同时,利用区块链智能合约自动执行结算,确保资源聚合的可持续性。区块链智能合约具有不可篡改、自动执行等特点,能够保证收益分配的公平、公正、公开,增强各资源主体对虚拟电厂的信任。该模式打破传统“源随荷动”的刚性约束,通过海量小微资源灵活组合,构建新型电力系统的弹性调节能力。

2.2.3 需求侧响应策略

需求侧响应在新能源电力系统的稳定控制与优化中发挥着重要作用,其核心在于建立“价格-激励-控制”三位一体的柔性负荷引导机制。

在价格信号驱动方面,构建峰谷分时电价与实时电价联动的动态电价结构。峰谷分时电价能够引导用户在用电高峰时段减少用电,在低谷时段增加用电;实时电价则能够根据电网的实时运行状态调整电价,进一步激励用户调整用电行为。例如,引导电动汽车充电桩在光伏出力高峰时段集中充电,此时电价较低,既能降低用户的充电成本,又能促进新能源的消纳;钢铁企业电弧炉在负荷低谷时段错峰生产,提高能源利用效率。

激励机制设计上,针对商业综合体空调群、数据中心备用电源等可中断负荷,建立容量补偿与电量折扣相结合的合约模式。容量补偿是对用户提供可中断负荷能力的补偿,电量折扣则是在用户实际参与调峰时给予的电费优惠。通过这种合约模式,确保用户在参与调峰时获得可量化的经济回报,提高用户参与需求侧响应的积极性。

控制策略优化层面,开发负荷集群协同控制算法。该算法能够依据电网运行状态自动切换空调温度设定阈值、调节冰蓄冷系统制冷周期,实现负荷曲线的平滑过渡。例如,当电网负荷过高时,适当提高空调的温度设定阈值,减少空调的用电负荷;调节冰蓄冷系统的制冷周期,使其在负荷低谷时段多制冷,在高峰时段释放冷量,从而减轻电网的负担,保障电网的稳定运行。

3、结语

本文提出的稳定控制与优化策略,通过分层协调与多目标决策机制,有效缓解了新能源并网引发的技术瓶颈。未来研究需进一步融合人工智能算法,强化极端天气下的系统

韧性，同时需完善政策机制以促进源网荷储协同发展。

参考文献：

[1] 孙桂卿,王其静,武凯. 新能源发电并网对电力系统稳定性的影响与调控策略研究[J]. 通信电源技术,2024,41(4):75-77.

[2] 张萍,胡龙,邸宏亮,等. 适应高比例新能源电力系统的抽水蓄能自适应调频控制及低频切泵策略[J]. 电力系统

保护与控制,2025,53(2):1-13.

[3] 张建新,刘宇明,邱建,等. 区域新能源并网暂态功角稳定分析与紧急控制策略优化[J]. 南方电网技术,2024,18(7):129-138.

作者简介：陈义航,1980年10月出生,男,汉族,贵州遵义人,本科学历,中级职称,主要工作方向为电力项目战略发展规划、工程建设、生产管理等。