

新能源高渗透电网暂态稳定控制技术研究

李恒森 41132119820314391X

摘要

随着双碳目标推进，风电、光伏等新能源发电并网规模持续扩大，电力系统电源结构逐渐由传统同步发电机主导转变为高比例新能源参与的新型形态。新能源发电通过电力电子装置并网，具有响应速度快、惯性低、抗扰动能力弱的特征，显著改变了电网的惯量水平与暂态响应特性，给大扰动下的系统暂态稳定控制带来全新挑战。本文梳理了新能源高渗透电网暂态稳定的核心问题，分析了现有暂态稳定控制技术的应用局限，从多时间尺度协同、源网储联动等方向探讨了暂态稳定控制技术的发展路径，为提升高渗透电网安全稳定运行水平提供参考。

关键词

新能源高渗透；电力系统；暂态稳定；稳定控制

一、新能源高渗透电网暂态稳定的核心挑战

传统电力系统中，同步发电机的转子运动特性决定了系统暂态稳定过程，大扰动发生后，依靠同步机的惯性响应与继电保护、紧急控制的配合，可以快速平息功率波动，恢复系统稳定。但在新能源高渗透电网中，新能源发电替代了大量同步发电机，一方面系统整体转动惯量大幅降低，大扰动发生后频率和电压变化速率显著加快，留给稳定控制的响应时间窗口被大幅压缩；另一方面，新能源并网换流器的控制特性与同步机完全不同，换流器的电流限幅特性会在大扰动下改变电网的功率传输特性，甚至引发功角失稳、电压失稳的耦合，改变了传统暂态稳定的演化规律。

此外，新能源发电具有较强的随机性与波动性，电网运行点时刻变化，不同运行场景下暂态稳定的薄弱环节存在显著差异，传统基于典型故障场景预设的稳定控制方案难以适配灵活多变的运行状态。部分新能源富集区域位于电网末端，网架结构相对薄弱，大功率扰动下容易出现局部区域功率失衡，若控制不及时会引发连锁故障，甚至导致大面积停电事故。这些特征共同决定了，传统基于同步发电机特性设计的暂态稳定控制体系无法完全适配新能源高渗透电网的需求，必须开发适配新型电力系统结构的暂态稳定控制技术。

二、现有新能源高渗透电网暂态稳定控制技术分析

当前应用于高渗透电网的暂态稳定控制技术主要分为电源侧控制、电网侧控制与负荷侧控制三类。电源侧控制中，新能源场站的低电压穿越控制是保障暂态过程稳定的核心技术，现有技术通过优化换流器的控制逻辑，让新能源场站在电网电压跌落时保持并网，并向电网提供无功支撑，避免大量脱网引发功率缺口。部分研究提出了虚拟同步机控制技术，让换流器模拟同步发电机的惯量与调频特性，提升系统的整体惯性水平，改善暂态过程的频率响应。但虚拟同步机控制存在惯性响应与稳定性的矛盾，参数设计不当反而会引发振荡，且单场站提供的惯量有限，难以应对高渗透场景下的大扰动。

电网侧的暂态稳定控制主要依赖传统的紧急控制体系，包括故障切除、切机切负荷、解列控制等。传统紧急控制基于离线计算预设控制策略，在故障发生后匹配预设策略执行控制，响应速度快，但适应性较差，当电网运行方式偏离预设场景时，容易出现控制过量或控制不足的问题。近年来广域测量系统（WAMS）的发展为实时稳定控制提供了基础，基于实时量测的暂态稳定预测控制，可以根据当前电网运行状态实时计算控制量，提升了控制的适应性，但受通信延迟影响，高速暂态过程中容易出现控制滞后的问题，如何平衡控制精度与响应速度仍是需要解决的问题。

储能侧的快速响应特性为暂态稳定控制提供了新的资源，电化学储能的功率响应速度可以达到毫秒级，能够在扰动发生后快速提供功率支撑，抑制频率和电压的快速变化。现有技术主要利用储能参与暂态频率控制，通过预设的控制逻辑快速吸收或释放功率，平抑暂态功率偏差。但当前储能的整体配置规模仍然较低，单站功率容量有限，如何整合分布式储能资源参与全网暂态稳定控制，降低控制成本，仍是需要进一步研究的问题。

三、新能源高渗透电网暂态稳定控制技术发展方向

首先，构建多时间尺度协同的暂态稳定控制体系是核心发展方向。新能源高渗透电网的暂态过程包含了换流器级的毫秒级电磁暂态过程、转子运动的百毫秒级机电暂态过程，不同时间尺度的稳定问题相互耦合，单一时间尺度的控制难以实现全局稳定。因此需要开发分层协同的控制架构：换流器层优化快速电流控制，实现毫秒级的电压支撑；场站层实现惯量与一次调频响应，百毫秒级平抑功率波动；全网层实现紧急控制的实时优化，秒级完成全局功率平衡。通过不同层级控制的协同，既保证响应速度，又实现全局优化，避免不同控制之间的冲突。

其次，推动源网储联动的分布式协同控制。传统集中式控制对通信依赖度高，

在大电网中难以覆盖所有薄弱点,而分布式控制利用本地量测信息实现本地控制,响应速度更快,可靠性更高。未来可以通过设计多 Agent 协同控制框架,让新能源场站、储能、可控负荷都作为独立的控制单元,根据本地量测信息感知系统暂态状态,自主执行控制动作,同时通过有限的信息交互实现全局协同,既降低了通信压力,又提升了控制的适应性。针对暂态稳定的不确定性,可以引入人工智能技术,基于海量运行数据训练暂态稳定预测与决策模型,实现对不同运行场景下的快速决策,提升控制方案对随机运行状态的适配能力。

最后,完善适应高渗透电网的稳定控制标准与资源配置机制。暂态稳定控制需要调动源网荷储各环节的资源,现有技术标准更多关注新能源场站的并网安全性,对各主体参与系统稳定控制的义务与权利划分不够清晰。需要进一步完善技术标准,明确不同主体提供暂态稳定支撑的技术要求,同时建立相应的市场化激励机制,引导各类市场主体主动参与稳定控制,提升系统整体的稳定控制能力。此外,针对高比例新能源场景下暂态稳定风险的变化,需要优化稳定控制的配置原则,根据不同区域的渗透水平合理配置控制资源,优先利用新能源与储能的可调能力,降低控制成本,提升控制效率。

四、结语

新能源高渗透电网是我国新型电力系统建设的必然发展方向,暂态稳定控制保障系统安全运行的核心技术。传统暂态稳定控制技术受运行模式与响应特性的限制,难以完全适配高渗透电网的稳定需求,未来需要结合先进量测技术、人工智能与分布式控制理论,构建多时间尺度、多主体协同的暂态稳定控制体系,充分挖掘源网荷储各环节的稳定控制潜力,提升系统应对大扰动的能力,为新能源的大规模开发利用提供安全保障。

参考文献

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 现代电力系统暂态稳定分析与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源高比例接入电网的稳定问题及解决途径研究[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3463-3470.
- [3] 辛保安, 郭剑波, 李万仁, 等. 新型电力系统安全稳定运行关键技术研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6501-6514.
- [4] 张剑楠, 汤广福, 于光远, 等. 高比例新能源电力系统暂态稳定控制技术研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 2-14.

