

电力系统暂态稳定分析与增强措施研究

熊磊 36252819960402001X

摘要：电力系统暂态稳定是保障电网安全运行的核心问题，随着新能源大规模接入电网，电力系统的运行特性发生深刻变化，暂态稳定风险持续上升。本文首先阐述了电力系统暂态稳定的基本概念与分析方法，对比了时域仿真法、直接法等主流分析手段的优缺点，结合新能源接入场景分析了当前暂态稳定面临的主要挑战，最后从电源侧调控、电网结构优化、保护与控制协同三个层面提出了暂态稳定增强措施，为提升高比例新能源电力系统的安全稳定运行水平提供参考。

关键词：电力系统；暂态稳定；时域仿真；稳定增强；新能源接入

一、电力系统暂态稳定的基本概念与研究意义

电力系统暂态稳定指的是电力系统受到大干扰后，能够恢复到原有运行状态或者过渡到新的稳定运行状态的能力，这里的大干扰一般包括大型发电机跳闸、输电线路短路故障、大容量负荷突变等。与静态稳定关注小干扰下的稳定特性不同，暂态稳定研究的是大干扰过后系统功角、电压、频率等核心参数的动态变化过程，若在干扰后发电机功角持续拉开，发生功角失稳，或者出现电压持续崩塌、频率越限等问题，就可以判定系统暂态失稳，严重情况下会引发大面积停电事故，对社会经济运行造成巨大损失。

近年来我国电力系统发生了深刻的结构变革，传统火电占比持续下降，风电、光伏等新能源发电装机容量快速增长，截至 2024 年，我国风电光伏装机总容量突破 9 亿千瓦，占总装机容量的比例超过 30%，高比例新能源电力系统逐渐形成。新能源发电通过电力电子变换器并网，与传统同步发电机相比，不具备旋转惯性，也无法提供足够的电压支撑，当系统发生大扰动时，更容易引发功角失稳问题。同时，新能源基地往往集中分布在“三北”地区，电力需要通过特高压输电线路远距离输送到东部负荷中心，输电距离长、输送容量大，一旦发生大干扰，暂态失稳的风险远高于传统电网。因此，开展电力系统暂态稳定分析方法与增强措施的研究，对保障我国新型电力系统安全运行具有重要的现实意义。

二、电力系统暂态稳定主流分析方法对比

当前电力系统暂态稳定分析主要分为三类方法，分别是时域仿真法、直接法以及智能算法辅助分析方法，不同方法适用场景不同，各有优劣。

2.1 时域仿真法

时域仿真法是当前电力系统暂态稳定分析应用最广泛的方法，其核心思路是建立电力系统各元件的动态微分方程与代数方程，通过数值积分方法逐步计算干扰后各个时刻系统的状态变量，包括发电机功角、转子角速度、母线电压等参数，最终根据功角等参数的变化趋势判断系统是否失稳。时域仿真法的优势在于可以考虑各种元件的详细模型，包括励磁系统、调速系统、保护装置的动作特性，也可以适应不同类型的干扰场景，计算精度高，结果可信度强，是电力系统规划与运行中暂态稳定校核的标准方法。

但时域仿真法也存在一定的局限性，首先是计算速度较慢，对于大规模互联电网来说，元件数量多，微分方程阶数高，长时间仿真需要消耗大量的计算资源，难以满足在线实时稳定分析的需求；其次，时域仿真法只能给出特定运行方式、特定干扰下是否失稳的结论，无法给出系统的稳定裕度，也难以量化说明影响稳定的关键因素。

2.2 直接法

直接法又称为李雅普诺夫直接法，其核心思路是借助李雅普诺夫能量函数，通过计算干扰结束时刻系统的能量，和临界能量进行对比，直接判断系统是否稳定，不需要逐步计算整个动态过程。直接法最经典的应用是等面积定则，用于简单两机系统的暂态稳定分析，对于多机系统，也可以通过构造能量函数实现快速稳定判别。直接法的优势在于计算速度快，能够给出系统的稳定裕度，便于在线稳定分析与稳定控制决策，弥补了时域仿真法计算速度慢的不足。

但直接法的缺陷也十分明显，对于复杂大规模系统来说，构造准确的李雅普诺夫能量函数难度较大，同时为了简化计算，往往需要对元件模型做近似处理，会带来一定的计算误差，精度低于时域仿真法。近年来，研究人员提出了将直接法与时域仿真法结合的混合分析法，发挥两种方法的优势，既保证计算精度，又提升计算速度，是当前暂态稳定分析的一个重要研究方向。

2.3 数据驱动的智能分析方法

随着人工智能技术在电力系统领域的应用，基于数据驱动的暂态稳定快速评估方法逐渐发展起来。这类方法通过采集大量不同运行场景、不同干扰下的暂态稳定仿真数据，训练深度学习、机器学习模型，实现输入运行参数后快速输出稳定判别结果与稳定裕度。这类方法的优势在于计算速度极快，训练完成后可以实现毫秒级的稳定评估，适合在线应用，同时可以挖掘数据中隐藏的稳定特征，不

需要建立复杂的物理模型。但这类方法依赖于大规模高质量的标注数据集，对于训练数据未覆盖的极端场景，判别准确率会明显下降，模型的泛化能力还有待进一步提升。

三、高比例新能源电力系统暂态稳定面临的挑战

高比例新能源接入给电力系统暂态稳定带来了多方面的挑战，主要体现在三个方面：

第一，系统惯性水平降低，干扰后频率与功角变化速率加快。传统同步发电机提供的旋转惯性是抑制功角变化、维持暂态稳定的基础，新能源通过电力电子并网，不提供旋转惯性，随着新能源占比提升，系统整体惯量持续下降，当发生大干扰导致功率不平衡时，发电机转子加速度更大，功角变化速度更快，留给保护与控制动作的时间更短，更容易发生失稳事故。

第二，电力电子设备的动态特性复杂，增加了失稳风险。新能源并网变换器、直流换流站等电力电子设备的控制响应速度快，和同步发电机的电磁动态、机械动态耦合后，容易引发新的暂态失稳模式，比如次同步振荡、换流器控制失稳等，这些新型失稳模式和传统功角失稳相互影响，增加了暂态稳定分析的难度。

第三，大容量远距离输电模式下，暂态稳定的约束更强。我国新能源基地远离负荷中心，特高压直流输电是主要的电力输送方式，直流输电线路发生双极闭锁故障后，会导致送端系统功率过剩、受端系统功率缺额，功率不平衡量大，如果没有有效的控制措施，很容易引发送端系统功角失稳，对系统暂态稳定能力提出了更高要求。

四、结论

电力系统暂态稳定是电网安全运行的核心保障，随着高比例新能源电力系统的发展，暂态稳定问题更加突出，对分析方法与控制措施都提出了更高的要求。当前，时域仿真法仍然是暂态稳定分析的核心方法，结合直接法与数据驱动方法可以进一步提升分析效率，满足在线分析的需求。提升系统暂态稳定水平需要从电源、电网、控制多个层面协同推进，通过挖掘新能源的支撑能力、优化电网结构、完善紧急控制体系，有效应对新型电力系统下的暂态稳定挑战，保障电力系统安全可靠运行。

参考文献

[1] 陈皓勇, 王锡凡. 电力系统暂态稳定分析方法的回顾与展望[J]. 中国电机工

程学报, 2001, 21(03): 1-6.

[2] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论特高压交直流电网建设和智能电网发展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-11.

[4] 黎平, 李崇涛, 陈刚. 高比例新能源电力系统暂态稳定研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 178-187.