

电力系统中的小扰动稳定性分析

郭江亚

洛阳龙羽集团有限公司洛宁分公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8594

[摘要] 随着新能源发电技术的大规模并网、电力电子化设备的广泛应用以及电网互联程度的不断加深，电力系统的结构形态与运行特性发生深刻变革，稳定性问题日益凸显。小扰动稳定性特指系统在受到微小干扰后，能够恢复至原有运行状态或过渡到新的稳定运行状态的能力。此类扰动在电力系统运行中频繁发生，若系统缺乏足够的小扰动稳定性，微小干扰可能被持续放大，引发电压偏移、频率波动甚至系统振荡，严重时导致大面积停电事故。本文结合电力系统发展趋势分析稳定性提升的关键路径，为电力系统规划设计、运行控制及优化调度提供理论支撑，助力新型电力系统安全稳定发展。

[关键词] 电力系统；小扰动稳定性；线性化建模；特征值分析；动态特性

[中图分类号] TM614

[文献标识码] A

Analysis of Small Disturbance Stability in Power Systems

Guo Jiangya

Luoyang Longyu Group Co., Ltd. Luoning Branch

[Abstract] With the large-scale grid connection of new energy generation technology, the widespread application of power electronic equipment, and the continuous deepening of power grid interconnection, the structural form and operational characteristics of the power system have undergone profound changes, and stability issues have become increasingly prominent. Small disturbance stability refers to the ability of a system to recover to its original operating state or transition to a new stable operating state after being subjected to minor disturbances. This type of disturbance frequently occurs in the operation of power systems. If the system lacks sufficient small disturbance stability, small disturbances may be continuously amplified, causing voltage offset, frequency fluctuations, and even system oscillations. In severe cases, it can lead to large-scale power outages. This article analyzes the key path to stability improvement based on the development trend of the power system, providing theoretical support for power system planning, design, operation control, and optimization scheduling, and assisting in the safe and stable development of the new power system.

[Key words] power system; Small disturbance stability; Linearization modeling; Eigenvalue analysis; dynamic characteristics

引言

电力系统小扰动稳定性分析是电力系统分析领域的经典课题，其核心价值在于提前识别系统潜在的稳定风险，为系统运行控制策略制定提供科学依据。传统电力系统以同步发电机为核心，稳定性分析主要围绕机电振荡问题展开；而新型电力系统中，新能源发电单元的低惯量、弱阻尼特性使得小扰动稳定性的影响因素更为复杂，分析难度显著增加。因此，深入研究小扰动稳定性的理论基础、分析方法及影响机制，对于适应电力系统发展变革、保障系统安全稳定运行具有重要的理论意

义与工程价值。

1 小扰动稳定性的判定准则

根据线性系统稳定性理论，线性化状态方程对应的系统是否稳定，取决于系统矩阵 A 的所有特征值的实部符号。若系统矩阵 A 的所有特征值的实部均小于零，则线性化系统是渐近稳定的，对应原非线性系统在平衡运行点附近具有小扰动稳定性；若存在特征值的实部大于零，则系统失去小扰动稳定性；若存在实部为零的特征值，而其他特征值的实部均小于零，则系统处于临界稳定状态，临界稳定在工程实践中通常被视为不

稳定状态。特征值的实部反映了系统受扰动后状态变量增量的衰减特性，实部的绝对值越大，衰减速度越快，系统的阻尼特性越好；特征值的虚部反映了振荡频率，虚部的绝对值越大，振荡频率越高。在电力系统中，常见的特征值包括同步振荡模式、区间振荡模式、局部振荡模式等，不同振荡模式对应不同的系统动态特性。通过分析各类特征值的分布情况，可全面掌握系统的小扰动稳定性水平及潜在的振荡风险。

2 影响电力系统小扰动稳定性的关键因素

2.1 发电机参数

发电机是电力系统的核心电源元件，其参数直接影响系统的小扰动稳定性。同步电抗 x_d 反映了发电机定子绕组的电抗特性，对发电机的电磁功率输出具有显著影响。增大同步电抗 x_d 会减小发电机的功角稳定裕度，降低系统的小扰动稳定性；反之，减小同步电抗 x_d 有助于提高系统的功角稳定性。暂态电抗 x'_d 与次暂态电抗 x''_d 反映了发电机在暂态与次暂态过程中的电抗特性，对系统的暂态稳定性与动态响应速度具有重要影响。阻尼系数 D 是影响系统小扰动稳定性的关键参数，直接决定了发电机转子振荡的衰减特性。阻尼系数 D 越大，转子振荡的衰减速度越快，系统的阻尼特性越好，小扰动稳定性越高；反之，阻尼系数 D 越小，转子振荡越容易发散，系统的小扰动稳定性越差。发电机的阻尼主要包括机械阻尼、电磁阻尼等，机械阻尼由发电机的机械摩擦、风阻等因素产生，电磁阻尼与发电机的电磁转矩特性相关。惯性时间常数 T_J 反映了发电机转子的转动惯量，对系统的频率稳定性与振荡模式具有重要影响。惯性时间常数 T_J 越大，发电机转子的抗干扰能力越强，系统的频率波动越小，但振荡频率越低；反之，惯性时间常数 T_J 越小，系统的频率波动越明显，振荡频率越高。

2.2 励磁系统参数

励磁系统是发电机的重要辅助系统，其核心功能是维持发电机端电压稳定，同时影响系统的小扰动稳定性。励磁调节器的比例系数 K_A 反映了励磁系统的调节灵敏度， K_A 越大，励磁系统对发电机端电压变化的响应速度越快，对系统电压稳定性的提升越有利。但过大的 K_A 可能导致系统阻尼减小，引发低频振荡，降低系统的小扰动稳定性。积分时间常数 T_A 反映了励磁系统的积分调节特性， T_A 越小，积分调节作用越强，有助于消除电压稳态误差，但过小的 T_A 可能导致系统振荡加剧。励磁绕组时间常数 T'_{d0} 反映了励磁绕组的电磁暂态特性， T'_{d0} 越大，励磁绕组的电磁过渡过程越长，系统的暂态响应速度越慢；反之， T'_{d0} 越小，系统的暂态响应速度越快。合理选择励磁系统参数，可在保证电压稳定性的同时，提高系统的阻尼特性，改善小扰动稳定性。

2.3 输电网络参数

输电网络是连接电源与负荷的关键环节，其参数对电力系统的小扰动稳定性具有重要影响。输电网络的主要参数包括线路电阻 R 、电抗 X 、电纳 B ，以及变压器的变比、电抗等。线路电抗 X 是影响系统小扰动稳定性的核心参数之一。线路电抗越大，输电功率的限制越严格，发电机之间的电气联系越薄弱，容易引发功角振荡，降低系统的小扰动稳定性。通过采用紧凑型输电线路、串联补偿装置等技术手段，可有效减小线路电抗，增强发电机之间的电气联系，提高系统的小扰动稳定性。线路电阻 R 对系统的阻尼特性具有一定影响，电阻越大，有功功率损耗越大，系统的阻尼越小，不利于小扰动稳定性；但电阻的影响相对较小，通常在分析中可根据实际情况适当简化。变压器的变比与电抗也会影响系统的小扰动稳定性。变压器电抗越大，对系统潮流的限制越明显，发电机与负荷之间的电气联系越弱，可能导致系统阻尼下降；变压器变比的调整会影响系统的电压分布与功率分配，进而影响系统的平衡运行点与特征值分布。

2.4 负荷特性

负荷是电力系统的重要组成部分，其特性直接影响系统的供需平衡与动态响应，对小扰动稳定性具有显著影响。从静态特性来看，负荷的电压调节效应系数与频率调节效应系数是关键参数。电压调节效应系数反映了负荷功率对电压变化的敏感度，频率调节效应系数反映了负荷功率对频率变化的敏感度。合理的负荷电压调节效应与频率调节效应有助于提高系统的电压稳定性与频率稳定性，增强系统对小扰动的适应能力。从动态特性来看，负荷的惯性特性、阻尼特性及响应速度对系统小扰动稳定性具有重要影响。感应电动机是电力系统中最主要的动态负荷，其启动与运行特性会影响系统的动态响应。感应电动机的转差率、惯性时间常数等参数会影响系统的阻尼特性，当大量感应电动机同时运行时，其集体动态响应可能引发系统振荡，降低小扰动稳定性。

3 电力系统小扰动稳定性的提升策略

3.1 优化系统参数配置

优化系统参数是提升小扰动稳定性的基础手段，通过调整发电机、励磁系统、输电网络等关键元件的参数，改变系统矩阵的特征值分布，提高系统的阻尼特性与稳定裕度。对于发电机参数，可通过技术改造增大阻尼系数 D ，例如采用新型阻尼绕组、优化发电机结构设计等，增强转子振荡的衰减能力；合理选择惯性时间常数 T_J ，在保证系统频率稳定性的同时，避免振荡频率过低导致的稳定性问题。对于励磁系统参数，可通过仿真分析与现场试验，优化比例系数 K_A 与积分时间常数 T_A ，在保证电压调节性能的前提下，提高系统的阻尼水平，避免因参数不当引发低频振荡。对于输电网络参数，可通过采用串联补

偿装置减小线路电抗，增强发电机之间的电气联系，提高系统的功角稳定裕度；优化变压器变比，改善系统的电压分布与功率分配，使系统运行在更优的平衡状态。参数优化需结合系统的实际运行工况，通过特征值灵敏度分析识别关键参数，采用智能优化算法寻找最优参数组合，确保优化效果的有效性与经济性。

3.2 改进控制策略

发电机励磁控制是影响小扰动稳定性的关键环节，传统的PID励磁控制策略难以兼顾电压调节与阻尼提升的双重需求。为此，可采用先进的控制算法，如自适应控制、模糊控制、模型预测控制等，根据系统运行状态的变化动态调整控制参数，在维持电压稳定的同时，提供额外的阻尼转矩，抑制系统振荡。例如，自适应励磁控制策略可实时识别系统参数的变化，自动调整控制增益，确保系统在不同运行工况下均具有良好的小扰动稳定性。新能源变流器控制策略的优化对于提升新能源高渗透电网的小扰动稳定性至关重要。可在变流器控制中引入虚拟惯量控制与虚拟阻尼控制，模拟传统同步发电机的惯量与阻尼特性，提高系统的惯量水平与阻尼能力；采用下垂控制、模型预测控制等策略，优化新能源发电单元的功率输出特性，增强其对系统扰动的适应能力。此外，通过协调控制多新能源发电单元的输出，可有效抑制功率波动对系统稳定性的影响。电力系统稳定器（PSS）是专门用于抑制低频振荡、提升小扰动稳定性的控制装置，其核心功能是通过检测发电机的转速偏差或功率偏差，向励磁系统发送附加控制信号，产生阻尼转矩，抑制转子振荡。传统PSS的参数通常基于特定运行工况设计，适应性有限。为此，可采用自适应PSS、模糊PSS、神经网络PSS等先进PSS技术，根据系统运行工况的变化动态调整控制参数，提高PSS的适应能力与控制效果。同时，通过多PSS协调控制，可避免不同PSS之间的相互干扰，最大化阻尼提升效果。

3.3 增强电网结构

增强电网结构是提升小扰动稳定性的重要保障，通过优化电网拓扑结构、加强电网互联、提高电网传输能力，改善系统的动态特性与抗干扰能力。优化电网拓扑结构可通过增加输电线路、建设环网结构等方式，增强发电机与负荷之间的电气联系，减小系统的等效电抗，提高系统的功角稳定裕度。例如，建设跨区域输电通道，可实现不同区域电网的功率互补，降低单一区域功率波动对系统稳定性的影响；建设环网结构可提高电网的冗余度，增强系统的抗扰动能力。加强电网互联有助于实现资源优化配置，提高系统的整体稳定性。通过互联，不同区域的电网可相互提供惯量支持与阻尼支持，缓解单一区域惯量不足、阻尼薄弱的问题。例如，新能源高渗透地区的电网通过与传统火电基地电网互联，可利用传统火电的高惯量与强阻

尼特性，提升新能源电网的小扰动稳定性。提高电网传输能力可通过采用特高压输电技术、柔性交流输电技术（FACTS）等先进技术手段，增强电网的潮流调节能力与控制灵活性。FACTS装置可实时调整电网参数，改善系统的潮流分布，抑制功率振荡，提升系统的小扰动稳定性。例如，可控串联补偿器可通过调节串联补偿度，改变线路电抗，抑制区间振荡；静止同步补偿器可通过提供无功功率支持，改善系统电压稳定性，增强系统的阻尼特性。

3.4 合理配置稳定控制装置

合理配置稳定控制装置是提升小扰动稳定性的补充手段，通过在系统关键节点配置专用的稳定控制装置，针对性地抑制振荡、提升阻尼。除了传统的PSS装置外，常用的稳定控制装置还包括电力系统阻尼控制器（PSDC）、静止同步串联补偿器（SSSC）、统一潮流控制器（UPFC）等。PSDC通过检测系统的振荡信号，向发电机或FACTS装置发送控制指令，产生附加阻尼转矩，抑制特定频率的振荡；SSSC可通过调节线路的等效阻抗，改变系统的振荡模式与阻尼水平，抑制区间振荡与局部振荡；UPFC集串联补偿、并联补偿与潮流控制功能于一体，可灵活调整系统的潮流分布与电压水平，显著提升系统的小扰动稳定性。稳定控制装置的配置需基于系统的小扰动稳定性分析结果，通过特征值分析与模态分析，识别系统的关键振荡模式、振荡中心及参与元件，将稳定控制装置配置在振荡中心附近或参与度较高的节点，以达到最佳控制效果。同时，需注重稳定控制装置与现有控制策略的协调配合，避免控制冲突，确保系统的整体稳定性。

4 结束语

小扰动稳定性是电力系统安全稳定运行的重要基础，其核心是系统在微小扰动下恢复至平衡状态的能力。发电机参数、励磁系统参数、输电网络参数、负荷特性及新能源发电接入是影响小扰动稳定性的关键因素。其中，发电机的阻尼系数、励磁系统的调节参数、线路电抗及新能源发电的低惯量特性对系统稳定性的影响最为显著。通过优化系统参数配置、改进控制策略、增强电网结构及合理配置稳定控制装置，可有效提升系统的小扰动稳定性。

[参考文献]

- [1]官泽旭，艾力西尔·亚尔买买提，辛焕海，等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析（二）：导出机理与稳定性分类探讨[J].中国电机工程学报，2022，42（14）：5126-5140.
- [2]朱志伟，史慧革，张振，等. 电力系统随机小扰动区间稳定性分析[J].轻工学报，2021，36（02）：102-108.
- [3]李晨辉，黄冬，刘国栋. 交直流混联系统小干扰稳定性分析[J].吉林电力，2019，47（03）：33-36+39.