

电力系统次同步振荡的宽频带监测与自适应阻尼控制策略

赵殿军

河南军明电力工程有限公司, 河南省新乡市, 453000;

摘要: 随着电力系统的规模不断扩大和复杂性增加, 次同步振荡问题日益突出, 对电网的安全稳定运行构成了潜在威胁。传统的监测和控制方法在面对宽频带振荡时表现出一定的局限性, 难以满足现代电力系统的需求。因此, 研究一种能够有效应对次同步振荡的监测与控制策略显得尤为重要。这不仅有助于提升系统的稳定性, 还能为新能源接入和远距离输电提供更可靠的技术支持。

关键词: 电力系统次同步振荡; 宽频带监测; 自适应阻尼控制; 策略

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 08. 026

引言

电力系统是现代社会重要基础设施, 其稳定运行关乎国民经济发展和人民生活秩序。近年来, 大规模新能源并网、高压直流输电技术应用及电力电子设备普及, 使电力系统动态特性显著变化。这些变化增加了次同步振荡发生频率和危害程度, 传统单一频段监测手段和固定参数控制方法在复杂工况下难以满足需求。因此, 探索适应宽频带特性的监测技术并结合灵活高效的自适应阻尼控制策略, 成为当前电力系统研究的关键问题之一。

1 电力系统次同步振荡理论分析

1.1 次同步振荡的产生机理

次同步振荡本质是电力系统中电磁与机械转矩、不同电磁元件间动态交互, 使系统能量在次同步频率下累积与释放。传统电力系统中, 次同步振荡主要源于汽轮发电机轴系机电耦合, 发电机定子旋转磁场与转子轴系机械惯性有转速差, 当电磁转矩次同步分量与轴系扭转振动固有频率接近时引发轴系扭振, 即“机电耦合型次同步振荡”, 典型场景如串联补偿线路与汽轮发电机相互作用 (SSO)。而在高比例新能源系统中, 振荡机理转向“电磁耦合主导型”, 新能源换流器控制环节有动态延迟, 其输出电流频率分量与电网阻抗、其他换流器控制带宽交互会形成次同步频段谐振, 例如风电变流器电流环带宽与电网等效阻抗谐振频率重叠易激发 10-50 Hz 次同步振荡, 光伏逆变器锁相环动态特性可能导致 50-100Hz 宽频振荡。此外, 储能系统充放电控制与电网频率交互、柔性直流输电换流器调制策略与交流电网暂态响应耦合, 也是宽频带次同步振荡新激发源, 这些机

理差异决定了宽频带振荡复杂特性。

1.2 宽频带次同步振荡的核心特性

宽频带次同步振荡区别于传统窄频振荡的核心特性如下: 一是频率范围扩展性, 其频率覆盖从低频段 (0.1-10Hz) 到中高频段 (100-200Hz), 不同频段振荡模态相互独立又可能耦合。比如某地区电网曾同时出现 15Hz 与 80Hz 振荡信号, 二者通过电网阻抗能量交换, 使振荡幅值相互放大。二是时变动态性, 新能源出力波动性会改变换流器控制参数与输出特性, 使振荡频率与阻尼比实时变化。例如风电出力从额定功率 30% 提升至 80% 时, 变流器电流控制比例系数调整, 可能使振荡频率从 25Hz 偏移至 40Hz, 阻尼比从 0.05 降至 0.02。三是多模态耦合性, 宽频带内存在多个振荡模态, 可能发生“频率靠近”或“模态混杂”现象。当两模态频率差小于 5 Hz 时, 形成耦合模态, 振荡幅值呈周期性波动, 增加振荡监测与抑制难度。

2 宽频带监测技术

2.1 宽频带信号采集技术

宽频带监测基础是精准采集多频段振荡信号, 核心是提升采样率和协同采集多源信号。传统 PMU 采样率多为 50/60Hz, 仅能捕捉 25Hz 以下低频分量, 宽频带采集需将采样率提升至 2-5kHz, 5kHz 采样率可确保 200Hz 信号无失真采集, 以满足 0.1-200Hz 宽频信号的 Nyquist 采样定理要求。同时, 采用多通道同步采集技术同步获取电压、电流、轴系振动、换流器控制信号: 电压信号用宽频电压传感器采集, 电流信号用罗氏线圈, 轴系振动信号用压电式加速度传感器, 换流器控制信号通过光纤直接采集, 且所有通道时间同步误差控制在 $1\mu s$

以内,避免频率计算误差。此外,因现场电磁环境复杂,采集装置需具备强抗干扰能力,采用差分输入、屏蔽接地、数字滤波等技术,抑制工业干扰对宽频信号的影响。

2.2 宽频带信号分析与模态识别算法

在宽频带信号采集的基础上,进一步的核心在于如何从复杂的多源信号中提取有效的振荡特征。这需要结合先进的信号处理方法和模态识别算法,以实现同时对同步振荡的精准定位与分类。例如,通过短时傅里叶变换(STFT)或小波变换(WT),可以对非平稳信号进行时频分析,捕捉振荡频率随时间的变化规律。此外,基于希尔伯特-黄变换(HHT)的经验模态分解(EMD)技术能够将复杂信号分解为若干本征模态函数(IMF),从而有效分离不同频段的振荡成分。为了更精确地识别振荡模态,还需引入系统辨识方法,如传递函数估计或状态空间模型构建,结合最小二乘法或卡尔曼滤波技术,提取系统的固有频率和阻尼比。这些算法的应用不仅能够提升监测精度,还能为后续的自适应控制提供关键参数支持。

2.3 宽频带监测系统架构设计

宽频带监测系统架构设计需综合考虑信号采集、传输、处理与存储的全流程,以实现同时对同步振荡的高效监测。系统采用分布式架构,前端部署多个监测节点,每个节点配备高性能数据采集模块,用于实时获取电压、电流及振动等多源信号。采集到的数据通过光纤通信网络传输至中央处理单元,确保数据传输的高可靠性和低延迟。中央处理单元集成时频分析算法和模态识别模块,能够对宽频信号进行快速分解与特征提取,并生成振荡模态的动态参数。为提升系统的鲁棒性,设计了冗余机制,包括双机热备份和自检功能,确保在设备故障或环境干扰下仍能保持稳定运行。此外,系统还配备了大容量存储单元和云端接口,支持历史数据的长期保存与远程访问,为后续的振荡分析和控制策略优化提供数据支撑。

3 电力系统次同步振荡的宽频带监测与自适应阻尼控制策略

3.1 监测-控制闭环协同机制

在监测与控制的闭环协同机制中,关键在于建立实时数据交互与动态策略调整的无缝衔接。监测系统通过边缘层、区域层和主站层的分层架构,将振荡信号的多

模态特征提取结果传递至控制系统。控制系统基于这些数据,结合当前电网运行状态,生成自适应阻尼控制指令,并将其反馈至相关节点的执行设备。为确保闭环系统的高效性,需设计低延迟的数据传输协议和高精度的控制算法接口。同时,在控制策略执行过程中,监测系统持续跟踪振荡参数的变化趋势,评估控制效果并及时修正偏差,从而形成动态优化的闭环流程。这种机制不仅提升了宽频带振荡抑制的响应速度,还增强了系统对复杂工况的适应能力。

3.2 基于宽频带监测的自适应控制参数整定方法

自适应控制参数整定方法的核心在于根据实时监测数据动态调整控制参数,以应对宽频带次同步振荡的时变特性。首先,通过监测系统获取振荡模态的关键参数(如频率、幅值和阻尼比),结合预设的控制目标(如提升阻尼比至0.08以上),采用优化算法计算最优控制参数。例如,针对低频段振荡,可利用粒子群优化(PSO)算法对换流器的附加阻尼控制器进行参数整定,调整比例系数和积分时间常数,使控制效果在1-2个振荡周期内达到稳定。对于中高频段振荡,则更适合采用遗传算法(GA)对储能系统的快速阻尼控制参数进行优化,优先考虑响应速度与抑制效果的平衡。

其次,为提高参数整定的效率和精度,需结合机器学习技术构建数据驱动模型。基于历史监测数据,训练支持向量机(SVM)或深度神经网络(DNN)模型,预测不同工况下的最佳控制参数组合。例如,在风电渗透率较高且负荷波动频繁的场景下,模型可根据当前电网运行状态推荐适合的锁相环带宽和电流环PI参数,避免因参数设置不当引发新的振荡。同时,模型需具备在线学习能力,通过不断更新训练数据,适应电网结构和运行条件的变化。

最后,为确保控制参数整定的鲁棒性,还需设计多重校验机制。一方面,通过仿真验证整定参数在极端工况下的适用性,例如模拟新能源出力骤降或电网短路故障场景,评估控制策略的稳定性;另一方面,引入冗余控制逻辑,当主控参数失效时,备用参数能够迅速切换,保证系统的连续运行。此外,整定过程中需充分考虑设备的实际物理限制,如换流器的最大输出功率和储能系统的充放电速率,避免因控制指令超出设备能力导致执行失败。

3.3 多源协同的自适应阻尼控制

在多源协同的自适应阻尼控制中,关键在于整合不同类型的控制设备以实现宽频带振荡的全面抑制。例如,当系统同时存在低频振荡和高频振荡时,需要协调换流器、静止无功补偿器(SVC)、储能系统以及静止同步补偿器(SVG)等多种设备的控制输出。通过监测系统的实时反馈,动态分配各设备的控制权重,确保整体阻尼效果最优。具体而言,当低频振荡占主导时,优先调用换流器和SVC的附加阻尼控制;而高频振荡较强时,则增强储能系统和SVG的快速响应能力。此外,为避免控制指令冲突,需设计优先级机制:对于幅值较大的振荡模态赋予更高优先级,并在控制参数整定时考虑设备间的动态交互特性。例如,若SVG与换流器同时作用于同一频率范围,可能因相位不匹配导致负阻尼效应,此时需通过相位补偿算法调整两者输出的一致性。最后,为了提升多源协同的鲁棒性,引入冗余控制策略,即在主控设备失效或性能受限时,备用设备能够无缝接管其功能,从而保障系统的持续稳定运行。

3.4 时变振荡场景下的鲁棒自适应控制设计

在时变振荡场景下,鲁棒自适应控制设计需充分考虑系统参数的不确定性和外部扰动的动态变化特性。首先,引入自适应观测器对系统状态进行实时估计,通过扩展卡尔曼滤波(EKF)算法处理非线性系统的状态更新问题,确保在振荡频率快速变化时仍能准确跟踪系统动态。其次,结合 H_∞ 控制理论设计鲁棒控制器,将外界干扰视为有界不确定性,构建闭环系统的Lyapunov函数,保证系统在最不利条件下的稳定性。此外,为提升控制系统的适应能力,采用模糊逻辑系统对控制增益进行在线调整:当监测到振荡幅值或频率变化速率超过预设阈值时,模糊规则库根据历史数据和当前模态参数动态调整控制器的权重系数,使控制策略能够灵活应对不同的振荡场景。对于多设备协同控制中的时延问题,设计预测补偿机制,基于振荡传播路径和设备响应特性,提前计算未来若干周期内的目标调节量,并通过插值算法平滑输出控制指令,避免因时延导致的控制失配现象。同时,为验证鲁棒控制策略的有效性,需开展多场景仿真测试,包括单模态突变、多模态耦合以及极端工况下的振荡抑制效果评估,确保控制系统的可靠性和泛化能力满足实际应用需求。

3.5 控制效果的在线评估与持续优化

为了实现控制效果的在线评估与持续优化,需建立一套完整的评估指标体系和优化机制。该体系应涵盖振荡抑制的核心目标,包括阻尼比提升幅度、振荡幅值衰减速率以及控制响应时间等关键参数。例如,当监测系统检测到某次振荡的阻尼比从初始值0.02提升至目标值0.08时,评估模块需量化这一过程的时间成本(如是否在2个振荡周期内完成)以及控制资源的消耗情况(如换流器输出功率波动范围是否超出额定值的 $\pm 5\%$)。此外,还需引入多维度评价标准,如控制策略对电网其他运行指标的影响(如电压稳定性、频率偏差),以避免单一目标优化导致系统整体性能下降。

在持续优化方面,可采用基于强化学习的自适应优化算法,通过实时交互数据不断调整控制策略。例如,当监测系统发现某类振荡场景(如低频段 $f=20\text{Hz}$ 、幅值 $A=8\%$)反复出现时,优化模块可通过历史数据训练模型,预测该场景的发生概率,并提前调整控制参数以降低振荡风险。同时,优化算法需具备自我修正能力:若某一控制策略在实际应用中表现不佳(如未能有效抑制振荡或导致设备过载),系统将自动记录失败案例并更新策略库,确保类似场景下选择更优方案。

为进一步提升优化效率,可设计分层优化架构。边缘层负责局部优化,针对单次振荡事件快速调整控制参数;区域层则聚焦于辖区内多次振荡事件的规律分析,提炼共性特征并优化区域性控制策略;主站层从全局视角出发,整合各区域优化结果,形成统一的控制策略模板,并通过仿真验证其在不同电网拓扑下的适用性。这种分层架构既能保证优化的实时性,又能兼顾全局一致性,为电力系统的稳定运行提供可靠保障。

4 结语

电力系统次同步振荡的宽频带监测与自适应阻尼控制策略的研究,对于促进分布式能源的健康发展,保障电力系统的安全稳定运行具有重要的理论意义和实际应用价值。

参考文献

- [1] 李立涅. 浅谈电力系统次同步振荡的自适应阻尼控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 31(7): 17-19.
- [2] 伍凌云. 基于电力系统次同步振荡的同步阻尼控制设计[J]. 电力系统自动化, 2024, 31(11): 21-23.
- [3] 周长春. 论电力系统次同步振荡的宽频带监测技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 23(10): 27-29.