

电力系统低频振荡抑制控制方法研究

陈福有 622301198103178773

摘要：随着特高压互联电网规模持续扩大以及新能源并网渗透率不断提升，电力系统整体惯性水平降低，动态稳定特性发生显著改变，低频振荡问题已经成为威胁电网安全稳定运行的核心隐患之一。本文梳理了电力系统低频振荡的产生机理，分析了传统抑制方法应用中的局限性，探讨了广域测量背景下新型抑制控制方法的发展方向，对比了不同控制策略的应用效果，最后对低频振荡抑制技术的未来研究方向做出展望。研究表明，融合多源量测信息与人工智能技术的分层协同控制方案，能够更高效地应对多模式、跨区域低频振荡，提升电网动态稳定裕度。

关键词：电力系统；低频振荡；振荡抑制；广域控制

一、引言

电力系统互联能够实现大范围的资源优化配置，提升系统供电可靠性与运行经济性，但也使得动态稳定问题愈发突出，其中低频振荡是互联电网最为典型的动态稳定问题之一。低频振荡指的是互联电网中发电机转子之间发生的频率在 0.1~2.5Hz 范围内的功角振荡，按照振荡范围可以分为局部振荡和区间振荡，局部振荡频率一般在 1~2.5Hz，主要表现为区域内机组之间的相对摇摆，区间振荡频率多在 0.1~1Hz，表现为不同区域之间大容量发电机组的功角相对摆动，传播范围广、影响程度大，严重时会引发大面积停电事故。近年来，双碳目标推动下我国新能源并网规模快速增长，电力系统常规同步机组占比持续下降，系统整体惯性降低，阻尼特性进一步恶化，低频振荡发生的频率与风险显著上升，对现有低频振荡抑制控制方法提出了新的挑战。因此，研究更加高效、适应性更强的低频振荡抑制控制方法，对于保障特高压互联电网的安全稳定运行具有重要的理论与现实意义。

二、低频振荡产生机理

目前学术界对低频振荡产生机理的主流认知包括负阻尼机理、强迫振荡机理和分岔机理三类。负阻尼机理是解释低频振荡的经典理论，该理论认为当电力系统重负荷运行时，励磁调节器的放大倍数过高会引入负阻尼，当负阻尼的绝对值大于系统本身的正阻尼时，系统总阻尼为负，功角振荡幅值会持续增大，最终引发失稳。强迫振荡机理则认为，电力系统中存在持续的周期性扰动，当扰动频率接近系统固有振荡模式频率时，会发生共振现象，引发大幅值的低频振荡，这类

振荡不会因为系统存在正阻尼而衰减，只有消除扰动源才能抑制振荡。

三、传统低频振荡抑制控制方法

传统的低频振荡抑制方法主要包括电力系统稳定器（PSS）和静止无功补偿器（SVC）附加阻尼控制器两类，其中 PSS 是应用最广泛的阻尼控制装置。PSS 以发电机转速、功率或者频率作为输入信号，通过在励磁调节器中引入附加转矩，抵消励磁系统产生的负阻尼，增加系统的正阻尼，从而抑制低频振荡。该方法结构简单、成本较低，技术成熟，对于局部低频振荡具有较好的抑制效果，但也存在明显的局限性：一方面 PSS 是本地控制器，输入信号来自本地量测，对于跨区域区间低频振荡，本地信号不能很好地反映区间振荡模式，无法提供足够的阻尼；另一方面，系统运行方式变化时，振荡模式的参数会发生改变，固定参数的 PSS 难以适应多种运行工况，在运行方式变化大时抑制效果会明显下降。

SVC 等柔性交流输电系统（FACTS）装置的附加阻尼控制器，利用 FACTS 装置快速调节系统电压和阻抗的特性，通过附加阻尼控制环节提供额外的阻尼，能够在一定程度上改善系统阻尼特性，抑制区间低频振荡。但是这类装置同样依赖本地信号，对区间振荡的观测能力不足，而且控制器参数设计需要精准的系统模型，当系统运行方式变化、网络结构改变时，控制器的控制效果也会受到影响。

四、新型低频振荡抑制控制方法

4.1 广域阻尼控制方法

广域测量系统（WAMS）的发展为低频振荡抑制提供了新的技术基础，基于同步相量测量单元（PMU）能够获得全网同步的电压、电流、功角等动态量测信息，使得广域阻尼控制成为可能。广域阻尼控制器选取能够清晰反映区间振荡模式的广域信号作为输入，针对区间振荡模式设计阻尼控制环节，能够有效弥补本地控制器对区间振荡抑制能力不足的缺陷。目前广域阻尼控制的研究主要集中在输入信号选择和控制器设计两个方面，输入信号选择方面，已经提出了基于可观性分析、留数法、能量函数法等多种信号筛选方法，能够选出对目标振荡模式可观性最强、控制效果最好的输入信号；控制器设计方面，现代控制理论中的 H_∞ 控制、滑模控制、自适应控制等方法被广泛应用，能够更好地应对系统模型不确定性和运行方式变化的问题。例如自适应广域阻尼控制器能够根据系统运行状态实时调整控制器参数，保持良好的阻尼特性，适应运行方式的变化。

4.2 人工智能-based 抑制方法

人工智能技术的快速发展，为解决模型不确定性、运行工况多变情况下的低频振荡抑制问题提供了新的思路。基于数据驱动的人工智能控制方法不需要精准的系统数学模型，能够利用海量的运行数据学习系统的动态特性，设计适应性更强的控制器。目前应用较多的包括神经网络、强化学习、模糊控制等方法，模糊控制不需要精确模型，能够利用模糊规则处理系统的不确定性，结合遗传算法、粒子群算法优化模糊规则参数，能够获得较好的抑制效果；深度强化学习则通过智能体与系统环境的交互学习，不断优化控制策略，能够应对复杂多变的运行工况，对于新能源高渗透率下系统动态特性变化快的场景，深度强化学习控制器能够自适应调整控制策略，持续提供足够的阻尼，抑制低频振荡。

4.3 多装置协同抑制方法

随着电网中 PSS、FACTS 装置、高压直流输电系统、新能源电站都具备了提供附加阻尼的能力，多控制装置协同抑制低频振荡成为新的研究方向。分层协同控制框架将控制分为本地控制层和广域协调层，本地控制器负责抑制局部振荡，广域协调层利用全网量测信息，对多个本地控制器进行协调优化，避免多个控制器之间出现控制冲突，提升整体阻尼效果。

五、结论与展望

低频振荡始终是互联电网安全稳定运行的重要威胁，传统的本地控制方法对于区间振荡和多变运行工况的适应性不足，难以满足高比例新能源电网的稳定需求。广域测量技术和人工智能技术的发展，推动了低频振荡抑制控制方法的发展，广域阻尼控制能够有效抑制区间振荡，数据驱动的智能控制方法能够适应系统运行特性的变化，多装置协同控制能够整合各类控制资源，提升整体抑制效果。未来低频振荡抑制控制的研究方向主要集中在三个方面：一是应对高比例新能源电力系统低惯性、弱阻尼特性的新型抑制方法，充分挖掘新能源并网逆变器、直流输电等电力电子装置的阻尼调节能力；二是考虑通信不确定性、延迟的鲁棒广域阻尼控制方法，提升控制方法的工程实用性；三是融合物理模型与数据驱动的混合控制方法，兼顾控制性能与可解释性，推动新型抑制方法的工程落地。

参考文献

- [1] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性导论[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 方勇杰, 徐泰山. 电力系统低频振荡与广域阻尼控制[J]. 电力系统自动

化, 2006, 30(2): 1-6.

[3] 胡学浩. 电力系统低频振荡分析与控制研究综述[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 1-6.