

# 发电站并网稳定性分析与控制策略研究

孙 曼

四川嘉陵江金溪航电开发有限公司 四川 南充 637000

**摘要：**随着电力系统负荷的增加，水电并网稳定性面临着诸多挑战，特别是在220kV高压出线情况下，负荷波动对系统频率与电压的稳定性产生影响。水电发电的惯性较大，能有效支撑系统频率和电压稳定性。然而，电网的稳定性变得更加复杂。为应对这些挑战，提出了多级调频体系与先进的电压稳定控制策略，包括电力系统稳定器（PSS）和静态VAR补偿器（SVC）来提高电力系统瞬态稳定性策略，这些策略有效提高了水电并网的稳定性，保证了电力系统的稳定运行。

**关键词：**水电并网；频率调节；电压稳定性；控制策略

## 引言

在当前电力系统中，水电站的并网稳定性带来了巨大的挑战。特别是在220kV高压水电站的并网过程中，负荷的波动和电力电子设备的广泛应用导致了电网频率和电压的动态稳定问题。水电站具有较强的惯性，但在负荷波动的背景下，其调节能力有限。为应对这一挑战，采用了多级调频控制策略和电压稳定控制措施，旨在提高电网适应负荷波动的能力，保证电力系统的稳定运行。

## 1 水电并网稳定性的挑战与问题

在220kV高压出线条件下，水电并网稳定性的挑战主要体现在负荷波动对系统频率和电压稳定性的影响上。作为传统电力系统的重要组成部分，水电站的大惯性可以在一定程度上缓冲频率和电压的波动。但是，随着负荷波动的增加，特别是当系统负荷突然变化时，水电站的惯性往往不足以应对这种波动，导致系统频率和电压波动的增加。负荷波动不仅影响了电网的稳定性，而且导致了电力系统频繁的启动、停止和调节，进一步加剧了电网的负荷不平衡和电压不稳定的问题。

随着电力电子设备比例的增加，水电并网电力系统表现出惯性小、阻尼弱的特点。电力电子设备的接入，虽然大大提高了系统的灵活性和可调度性，但也带来了新的挑战。由于电力电子设备的快速响应特性，系统的抗干扰能力相对较弱，容易导致系统出现宽频带振荡现象<sup>[1]</sup>。这种振荡可能在短时间内触发电网的频率波动，严重时会导致电网不稳定，从而影响电力的安全稳定的供电。此外，分布式负荷的接入进一步加剧了电网的复杂性。分布式负荷通常具有较强的随机性和不可控性，使得电网调度和控制面临更大的挑战。由于这些负荷不容易快速预测和响应，电网需要实时调整其调度策略，以确保负载和电力供应之间的平衡。这种不确定性增加

了传统调度方法的难度，特别是在负荷波动严重的情况下，电网调度员往往难以及时、准确地响应，从而增加了系统不稳定的风险。

电力系统的频率和电压的稳定性取决于各发电单元之间的协调。当水电接入电网时，由于水电站与其他类型发电设备的特点，系统对负荷变化的响应不够协调。水电站通常具有主要的稳定性和可持续性，但面对负荷波动，其调整范围有限，不能像火电机组那样快速响应负荷变化。这一特点使得水电并网系统在负荷波动较大的情况下可能无法进行有效的调度和稳定控制，从而增加了电网的运行风险。

## 2 控制策略在水电并网稳定性中的应用

电力系统的频率和电压稳定性取决于在水电并网稳定性控制策略的应用中，研究主要集中在提高系统对负荷波动的适应性和稳定性。对于220kV的高压水电站，控制策略的应用涉及多个层次。一方面，为了应对负载波动对频率稳定性的影响，系统通过一次、二次、三次调频机制实现了多级调频。这些调频机构可以根据负载变化程度和系统频率波动程度来调整发电机组的输出功率，以确保在不同的情况下能够有效地控制系统频率。一次调频能够自动调整水电站机组输出，以适应系统负荷变化引起的频率波动；二次调频通过调度中心根据全网的负荷情况精心调度机组，确保频率保持在设定范围内；三次调频则依赖于系统的全局调度，确保极端情况下电力供需达到最优平衡，以避免大范围的频率偏差或波动。这一系列调频机制可以有效地提高水电并网系统对负荷波动的适应性，提高频率的稳定性。

自动电压控制（AVC）系统在水电运行过程中起着极其重要的作用。它采用精确的实时监测和调节机制，以确保电压在负荷变化的条件下保持在一个稳定的范围

内。AVC系统的核心功能是动态调整发电机的输出电压或调整并网点电压，以确保电力系统的电压水平不受负载波动或外部干扰的影响。通过一种协同工作机制，该系统将传感器、控制器和执行机构紧密结合起来，以确保电网对各种电压波动做出快速、准确的响应。控制器根据传感器采集到的实时数据，分析系统状态，确定电压是否偏离预设值，并通过执行机构进行调整。该过程不仅可以消除瞬时电压波动，还可以长期保持电压的稳定性，避免因电压异常造成的设备损坏或系统故障。AVC系统的运行不仅限于单一的电压调整，还包括提高电网的整体稳定性。AVC系统通过精确的电压调节，帮助电网应对由负荷变化、发电设备调度或外部环境干扰引起的电压波动，确保电网在复杂运行条件下的高效运行。电压稳定在水电并网中尤为重要，因为水电站的发电特性和对负荷的调节能力往往与传统热电站不同，电压波动公差低，要求AVC系统提供更敏感和有效的调节机制。该系统通过自动调节手段，使水电站既能应对常规负荷波动，又能适应突发的大规模电网干扰，大大提高了水电电网的稳定性和运行可靠性。随着电力系统的发展，更加智能化和自动化，AVC系统的功能也在逐渐扩展。配合大数据和人工智能等技术的应用，未来的AVC系统将能够更准确地预测电压波动趋势，并提前采取措施减少人为干预的需求。这种自动、智能的控制方法将进一步提高电网在大负荷波动情况下的适应性，并提高系统的稳定性。

自动发电控制（AGC）系统是水电电网控制中不可缺少的技术之一。它通过实时监测电网负荷与发电量之差，自动调整机组的输出功率。AGC系统的基本功能是保持电网发电与负荷之间的平衡，确保电力系统在负荷变化时能够立即调整发电功率，避免负荷波动造成的电网不稳定。在实际运行中，AGC系统可以响应毫秒级的负荷波动，准确地控制不同尺度的负荷变化，从而优化发电机组的运行模式，最大限度地提高发电效率。系统

的调节不仅提高了机组的运行灵活性，而且使电网在动态负荷变化条件下保持稳定的工作状态，避免了负荷过高或过低引起的电压波动或频率偏差。AGC系统的核心在于其自动调整能力，它可以根据系统的实时数据判断负载变化趋势，及时调整各机组的发电输出，使系统的总功率始终满足需求。AGC通过精细控制，避免了人为操作造成的延迟和误差，提高了电网的运行效率和稳定性<sup>[3]</sup>。在水电并网系统中，AGC不仅依赖于传统的调控手段，而且还结合了对水电机组动态特性的精确控制，以最大限度地发挥水电的调控优势。AGC系统通过对各机组负荷和发电差的准确监测，保证了电网在负荷变化期间的平稳过渡，降低了负荷快速波动引起的系统压力。此外，AGC系统在优化电力调度方面也起到了关键作用。通过准确的负荷预测和实时反馈，系统可以提前识别潜在的负荷变化，避免出现过度调节或欠调节。这样，AGC不仅可以提高负荷波动的响应速度，还可以优化电网的长期运行模式，减少无功功率的浪费，减少系统的损耗。在水电并网过程中，由于水电机组具有较强的调节能力，进一步发挥了AGC的作用能力，AGC可以发挥其灵活性，确保电网在不同负荷条件下始终处于最佳运行状态。

在励磁系统方面，水电并网稳定控制策略也依赖于“静止可控硅自励”系统的支持。励磁系统对维持电压的稳定性至关重要。它通过实时监测和调节励磁电流来控制发电机的电压输出。通过对励磁电流的微调，机组可以保证机组在不同负载条件下保持稳定的输出电压，避免电压波动对机组的损坏或电力系统的不稳定。它可以根据电网的运行情况，实时优化励磁系统的调节方式，以应对由瞬时负荷变化或外部扰动引起的电压波动。

为了更直观地展示这些控制策略的效果，我们根据中国能源大数据报告（2024）的数据，编制了以下表格，以量化分析水电并网稳定性控制策略的实际效果。

表1 水电并网稳定性控制策略效果分析表

参数类别	单位 (kW/kV/s)	一次调 频效果	二次调 频效果	三次调 频效果	无功调节 AVC效果	有功调节 AGC效果	励磁系 统效果
系统频率偏差	Hz	0.05	0.03	0.02	-	-	-
电压稳定性	kV	0.15	0.10	0.08	0.05	0.03	0.02
响应时间	s	10	8	6	12	10	8
调频动态过程 品质	-	0.95	0.98	0.99	0.90	0.95	0.98
网损增加	kW	2.5	1.8	1.5	3.0	2.0	1.5
电力系统的潮 流无序变化	MW	5	3	2	6	4	3

### 3 水电并网稳定性控制策略的效果分析

在分析水电并网稳定控制策略效果时，系统的频率偏差、电压稳定性和响应时间是关键的评测指标。基于中心流形理论的小型水电并网系统的Hopf分岔分析提供了一种有效的分析方法。利用Matcont软件和中心流形理论，将复杂的高维功率系统简化为二维模型，可以计算出系统的Hopf分岔类型，并进一步分析了控制策略对系统稳定性的影响。通过计算系统的分岔稳定性指数，可以识别出不同控制策略下的不同干扰和负载波动条件下的动态响应和稳定性。这为深入理解不同控制策略在水电并网中的作用及其影响提供了重要的数学工具和理论支持。

在实际调度中，当所有发电机组进行一次调频时，虽然能提供较强的调频调节能力，但会在一定程度上影响调节系统的稳定性。在一次调频过程中，负载的波动会对系统产生很大的影响，进而增加系统的频率响应不稳定性。这是因为较高比例的负荷波动会导致系统中等效负荷的变化，迫使调频系统承受更大的压力，从而降低其稳定性。过多的依赖一次调频，特别是当负荷波动较大时，系统的频率波动可能会很剧烈，给电网的稳定性带来极大的风险。因此，在调频过程中，如何平衡调频能力和系统的整体稳定性，是在制定控制策略时需要考虑的一个重要问题。

一方面，如果只有部分机组参与一次调频，虽然可以减少系统负荷波动对系统频率的直接影响，但这样可能会导致机组输出波动增加，从而增加静态频率偏差。当一些机组参与调频时，由于负荷分布不均匀，一些机组可能会承受过多负载，从而导致这些机组的频率波动增加。这种波动一方面会影响电网的供电质量，另一方面，可能会加剧机组本身的运行压力，降低机组的长期稳

定性和使用寿命。因此，控制策略需要在减少系统负载的影响和避免机组波动的加剧之间找到适当的平衡点。

调频策略的选择还必须考虑到不同控制方法的短期及长期影响。一些调频策略可能在短期内有效，但从长期来看，由于频繁的监管操作，可能会导致系统的长期不稳定。例如，在负荷波动较大的情况下，频繁的调频操作可能使系统的频率波动周期较短，增加系统的不确定性，进一步影响电网的可靠性。因此，控制策略不仅要考虑系统的即时响应，还要评估其对系统长期运行稳定性的影响。通过对调频策略的不断优化，可以在保证系统稳定性的同时，提高水电并网运行的调度效率和运行可靠性。

#### 结语

水电并网稳定性分析表明，多级调频和电压控制策略对保证系统的稳定性具有重要作用。通过引入电力系统稳定器（PSS）和静态VAR补偿器（SVC）等先进的控制技术，不仅有效地解决了负荷波动造成的不确定性，而且为未来的大规模负荷波动提供了技术支持。未来，随着负荷波动的进一步改善，水电并网的稳定性控制策略需要更加完善和智能，结合现代通信和信息技术，为电力系统的高效运行提供更可靠的保障。

#### 参考文献

- [1]王猛.小型水电站并网方案的设计与研究[J].电工技术,2019,(19):60-61+81.
- [2]白晓清,刁哲伟,李滨.基于水电站并网测试的长线路电容效应影响及策略分析[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(04):132-139.
- [3]孙心洲,张超,刁雪芬.大型水电站并网运行方式与水力干扰分析研究[J].电网与清洁能源,2018,34(07):63-66.