

# 水轮发电机组并网运行的稳定性与控制策略

韩 敏 黄国强

陕西省引汉济渭工程建设有限公司 陕西 西安 710024

**摘要：**随着全球能源结构的转型和可再生能源的大力推广，水力发电作为一种清洁、可持续的能源形式，在全球范围内得到了广泛应用。水轮发电机组作为水力发电系统的核心，其并网运行的稳定性对于整个电力系统的安全、稳定和高效运行至关重要。本文旨在深入探讨水轮发电机组并网运行的稳定性问题，并提出相应的控制策略，以期提升水轮发电机组的运行效率和可靠性，为电力系统的可持续发展贡献力量。

**关键词：**水轮发电机组；并网运行；稳定性分析；控制策略；电力系统

## 引言

在能源需求日益增长、环保意识不断提升的背景下，水力发电以其独特的优势在全球范围内得到了广泛推广。水轮发电机组作为水力发电系统的核心设备，其运行稳定性对于保障电力系统的安全、稳定和高效运行具有举足轻重的意义。特别是在并网运行环境中，水轮发电机组面临着更为复杂的运行条件和挑战。因此，深入研究水轮发电机组并网运行的稳定性问题，并提出针对性的控制策略，对于提升整个电力系统的运行性能具有重要意义。

## 1 水轮发电机组并网运行的稳定性分析

### 1.1 并网运行的特点与挑战

并网运行的水轮发电机组需要与电网保持严格的同步，以确保电力系统的稳定运行。然而，在实际运行中，机组往往会受到各种内外扰动的影响，如负荷的突变、电网电压的波动等。这些扰动不仅会对机组的稳定性产生直接影响，还可能通过电网传播，对整个电力系统的稳定性构成威胁。

### 1.2 稳定性的多维度影响因素

水轮发电机组的稳定性受到多种因素的共同影响：

(1) 水力因素：水流量的不稳定、水头的变化等水力条件会直接影响水轮机的效率和出力，进而影响机组的稳定性。(2) 机械因素：机组的振动、轴承磨损、密封性能下降等机械问题都可能导致机组失稳<sup>[1]</sup>。(3) 电气因素：电网电压的波动、谐波干扰、功率因数变化等电气参数的不稳定也会对机组稳定性造成影响。

### 1.3 稳定性的综合评价指标

为了全面且深入地评估水轮发电机组在并网运行中的稳定性，必须构建一个综合且精细的评价指标体系。这一体系不仅需要涵盖机组运行中的多个关键方面，还需要能够实时反映机组的动态性能，从而确保对稳定

性的精准把控。振动幅值是评价机组稳定性的核心指标之一。水轮发电机组在运行过程中，由于水流冲击、机械部件的摩擦和电气磁场的作用，不可避免地会产生振动。通过精确测量轴承、机架等关键部位的振动幅值，可以有效判断机组是否存在异常振动，进而预防潜在的机械故障。频率偏差是另一项关键指标，它反映了机组转速与电网频率的同步程度。在并网运行中，机组必须严格保持与电网的频率同步，以确保电力系统的稳定运行。通过实时监测机组的频率偏差，可以及时发现并纠正转速的异常波动，防止因频率失步而导致的脱网事故。功率因数和电压波动也是评价机组稳定性的重要参数。功率因数反映了机组有功功率与视在功率的比值，是衡量机组电能转换效率的重要指标。而电压波动则直接影响了电能质量和电网的稳定性。通过实时监测这两个参数，可以全面评估机组在并网运行中的电气性能，确保机组在复杂多变的电网环境中保持稳定运行。

## 2 水轮发电机组并网运行的控制策略研究

### 2.1 控制策略的总体架构

为确保水轮发电机组在并网运行中的稳定性，本文提出了一种全面且高效的控制策略。这一策略融合了多变量控制、智能优化算法以及先进的实时监测技术，构成了一个完整的闭环控制系统。该系统能够实时捕捉机组的各项运行状态参数，包括但不限于振动幅值、转速偏差、电气性能等。基于这些实时数据，控制系统通过智能算法对机组的运行状况进行精准评估，并据此动态调整控制参数。这种动态调整机制不仅确保了机组在各种复杂工况下的稳定运行，还优化了发电效率，从而实现了水轮发电机组的高效、安全并网运行。

### 2.2 具体控制方法的深入剖析

#### 2.2.1 水力条件的优化与控制

(1) 精确调度与引水系统优化：这一步骤的关键在

于利用先进的水文预测模型。这些模型能够基于历史数据、气象条件以及地理特征，精确地预测水库的来水量。通过这种预测，可以合理地调度水库的水位，确保为水轮机提供稳定且适量的水头，这是保证机组稳定运行的基础。除此之外，引水系统的优化也是不可忽视的一环。传统的引水系统可能存在设计不合理、水头损失大等问题。为了解决这些问题，需要对引水系统进行细致的分析和优化。这包括但不限于调整引水渠道的形状和尺寸，优化进水口的设计，以及改进水流的导向结构。通过这些优化措施，可以有效地减少水头的损失，进而提高水轮机进水流量的稳定性和可控性。

(2) 水流控制技术：为了实现水轮机效率和稳定性的最大化，采用可调节导叶或喷嘴成为关键。这种技术允许根据实时的水流条件进行灵活调整，确保水轮机进口水流的角度和速度达到最佳状态。具体来说，可调节导叶能够通过改变其开度，来控制进入水轮机的水流方向和流量。当水流条件发生变化时，比如水流量的增减或水头的波动，通过及时调整导叶的开度，可以确保水流以最佳的角度冲击水轮机的叶片，从而提高水能的转换效率，同时减少不必要的能量损失<sup>[2]</sup>。另一方面，喷嘴的应用则更侧重于调整水流的速度。喷嘴的设计可以使水流在喷出时形成一定的速度和压力，这样当水流冲击水轮机叶片时，能够更有效地推动叶片旋转，进而提升水轮机的整体效率。同时，通过精确控制喷嘴的喷射角度和速度，还可以有效减少水流的紊乱，进一步增强机组的运行稳定性。

### 2.2.2 机械结构的改进与振动控制

(1) 结构优化与材料选择：首先，结构优化主要通过先进的设计方法来实现，其中有限元分析技术发挥着重要作用。这种方法可以对机组结构进行全面的应力分析和模态分析，从而精确地识别出潜在的振动源和结构弱点。基于这些分析结果，设计团队可以对机组结构进行优化，如调整部件的布局、增强关键连接部位等，以减少振动产生的可能性。与此同时，材料选择也至关重要。高强度、耐磨损的材料能够显著提高机组关键部件的耐用性和稳定性。例如，采用高强度合金钢或特种金属复合材料来制造轴承、齿轮等易损件，不仅可以延长这些部件的使用寿命，还能在高速运转和重负载条件下保持稳定的性能。此外，对于密封件和润滑系统，也需要选择高性能的材料，以确保机组在长时间运行过程中能够有效地防止油液泄漏和外界杂质的侵入，从而进一步提升机组的整体稳定性。

(2) 振动监测与减震措施：为了确保机组的稳定运

行，通过安装振动传感器能够实时监测机组的振动情况，提供关键的数据支持，帮助运维人员及时了解机组的运行状态。振动传感器不仅能够记录机组运行时的振动幅度和频率，还能捕捉到任何异常的振动模式。一旦传感器检测到异常振动，如振幅超标或频率突变，系统会立即发出警报，提示运维人员采取相应的措施。这种实时的监测系统为预防潜在的机械故障提供了有力的技术支持。当发现异常振动时，运维人员需要迅速而准确地采取减震措施。这可能包括调整机组的运行参数，如降低转速或调整负载，以减少振动产生的能量<sup>[3]</sup>。同时，检查并更换磨损的部件也是必要的步骤，因为这些部件的磨损往往是导致异常振动的主要原因。通过这些减震措施，可以有效地降低机组的振动水平，恢复其稳定运行的状态。

### 2.2.3 电气参数的精确控制与调节

(1) 励磁系统控制：在电气参数的精确控制与调节方面，励磁系统控制发挥着至关重要的作用。为了确保机组输出电压的稳定，必须采用先进的技术手段进行实时调整。其中，自动电压调节器（AVR）的应用显得尤为重要。AVR作为一种智能化的控制设备，能够根据电网电压的实时波动情况，迅速而准确地调整励磁电流。当电网电压出现波动时，AVR会立即响应，通过调整励磁电流来稳定机组的输出电压。这种实时的反馈和调整机制，确保了机组在并网运行中的电气稳定性。具体来说，AVR通过接收来自电压互感器的信号，实时监测机组输出电压的变化。当发现电压偏离设定值时，它会根据预设的控制算法，自动调整励磁电流的大小和方向，以使输出电压迅速恢复到稳定状态。这种精确的控制方式，不仅提高了机组的电气性能，还有效地保护了电网的安全稳定运行。

(2) 调速系统控制：为了精确控制水轮机的转速和出力，并保持机组与电网的同步，现代调速系统通常采用先进的控制技术。其中，可编程逻辑控制器（PLC）或数字式电液调速器发挥着关键作用。PLC作为一种高效、可靠的工业控制设备，具有强大的逻辑运算、顺序控制等功能。在调速系统中，PLC能够实时接收并处理来自各种传感器的信号，如转速传感器、负荷传感器等。根据这些信号，PLC可以迅速计算出当前水轮机的实际转速和出力，并与设定的目标值进行比较。然后，通过精确的控制算法，调整水轮机的导叶开度或喷针行程，从而实现转速和出力的精确控制。另一方面，数字式电液调速器则结合了电子技术和液压技术，具有响应速度快、控制精度高等优点。它能够根据负荷变化和电网频率波

动,实时调整水轮机的运行状态,确保机组始终与电网保持同步。这种同步性对于维护电力系统的稳定运行至关重要,因为它可以有效避免机组因转速或出力不匹配而导致的脱网或故障。

(3)无功补偿与谐波抑制:在水轮发电机组的并网运行中,无功补偿与谐波抑制是提升电能质量和并网性能的关键环节。为了实现这一目标,安装静止无功补偿器(SVC)或有源滤波器(APF)成为有效的技术手段。静止无功补偿器(SVC)能够快速提供动态无功支持,响应电网中的无功需求变化。当电网中的无功功率不足或过剩时,SVC可以迅速地进行无功功率的补偿或吸收,从而维持电网的电压稳定,减少因无功不平衡导致的电能质量问题。这种动态无功支持对于提高并网运行的稳定性和电能质量至关重要<sup>[4]</sup>。另一方面,有源滤波器(APF)则专注于减少谐波干扰。在电力系统中,非线性负载的使用会产生谐波,这些谐波会对电网造成污染,影响电能质量。APF通过实时监测电网中的谐波成分,并生成与之相反的谐波电流进行抵消,从而达到抑制谐波的目的。这样不仅可以净化电网环境,还能提高并网设备的运行效率和使用寿命。

### 3 控制策略的实施步骤与效果评估方法

在实施水轮发电机组并网运行的控制策略时,必须遵循严谨的实施步骤,并进行详尽的效果评估,以确保策略的有效性和机组的稳定运行。首要步骤是对机组进行全面的评估和性能测试。这一环节至关重要,因为它能够帮助工程师准确了解机组的当前状态,识别出可能存在的性能瓶颈或潜在问题。通过这些评估和测试,可以明确控制策略的具体需求和目标,为后续的策略制定提供坚实的数据支撑。接下来,根据机组的实际需求和性能特点,选择恰当的控制方法和技术手段进行实施。这包括但不限于水力条件的优化、机械结构的改

进、电气参数的精确控制等。在实施过程中,应确保每一步操作都严格遵循技术规范和安全标准,以防范任何可能的风险。实施完成后,控制策略的效果评估环节同样不容忽视。通过实时监测和对比分析实施前后的数据,可以客观地验证控制策略的有效性。这些数据包括但不限于机组的运行效率、稳定性指标、故障率等。若发现策略实施后机组的性能未达预期,则需进行必要的调整和优化,直至达到满意的效果。此外,建立长效的监测机制和反馈系统也是确保控制策略持续优化和改进的关键。通过定期的状态监测和性能评估,可以及时发现并解决机组运行中出现的新问题,从而确保控制策略始终保持在最佳状态。

### 结语

本文通过对水轮发电机组并网运行的稳定性进行深入分析,提出了一套综合的控制策略。这些策略涵盖了水力条件、机械结构和电气参数等多个方面,旨在提高机组的运行稳定性、增强电力系统的安全性和经济性。未来随着技术的不断进步和新能源的发展,我们期待水轮发电机组的控制策略将更加智能化、精细化和高效化。通过持续的研究和创新,我们将为全球能源结构的转型和可持续发展做出更大的贡献。

### 参考文献

- [1]白鹤滩水电站16台百万千瓦机组首次全开并网运行[J].水泵技术,2023,(04):53-54.
- [2]林春平.水轮发电机组并网运行频率调节系统的稳定性分析[J].中国新技术新产品,2017,(22):101-102.
- [3]曹雪兰,王二军.1000MW水轮发电机并网运行暂态稳定性问题研究[J].河南科技,2017,(07):92-95.
- [4]陈湘岳.水电站水轮发电机组的运行与维护分析[J].集成电路应用,2020,37(10):136-137.