

核电机组功率振荡现象分析与抑制措施

文 宽

中广核苍南核电有限公司 浙江 温州 325000

摘 要: 本文聚焦核电机组功率振荡现象。先阐述核电机组基本原理,明确功率振荡定义及影响。接着从外部(电网故障、结构不合理)和内部(控制系统缺陷、设备故障)因素分析成因。随后研究抑制措施,包括优化控制策略、升级硬件、电网协调控制及仿真实验验证。最后通过卡拉奇“华龙一号”和秦山核电站320MW机组案例,验证措施有效性,为保障核电机组安全稳定运行提供参考。

关键词: 核电机组; 功率振荡; 稳定性分析; 抑制措施

1 核电机组功率振荡现象概述

1.1 核电机组基本原理

核电机组是利用核反应堆中核燃料(如铀-235)的裂变反应释放出的巨大能量来产生电力的装置。其核心过程可分为核反应堆内的核裂变反应、一回路系统热量传递、二回路系统蒸汽产生与做功以及发电机发电等几个关键环节。在核反应堆中,铀-235原子核吸收一个中子后发生裂变,分裂成两个或多个较小的原子核,同时释放出大量的能量和2-3个新的中子。这些新产生的中子又会继续引发其他铀-235原子核的裂变,形成链式反应。为了控制链式反应的速率,在反应堆中设置了控制棒,通过调节控制棒插入堆芯的深度来吸收中子,从而控制核裂变反应的强度^[1]。核裂变反应释放出的热量被一回路系统中的冷却剂(通常是水)吸收,使冷却剂温度升高并形成高温高压的蒸汽。一回路系统的冷却剂在反应堆和蒸汽发生器之间循环流动,将热量传递给二回路系统。在二回路系统中,蒸汽发生器将一回路传递过来的热量使二回路的水变成蒸汽,蒸汽推动汽轮机旋转,汽轮机带动发电机发电,从而将核能转化为电能。

1.2 功率振荡现象定义

核电机组功率振荡是指核电机组在运行过程中,其输出功率出现周期性的波动现象。这种功率波动不是由于外界负荷的正常变化引起的,而是机组自身内部或与电网相互作用导致的异常现象。功率振荡通常表现为功率在一定范围内上下波动,波动的频率和幅度各不相同,有的功率振荡频率较低,周期较长;有的则频率较高,周期较短。功率振荡可以通过功率-时间曲线来直观地观察,在正常情况下,核电机组的功率输出应该是相对稳定的,功率-时间曲线近似为一条水平直线。而当出现功率振荡时,功率-时间曲线会呈现出周期性的起伏,如同波浪一样。功率振荡的幅度可以用功率波动的最大值

与最小值之差来表示,频率则是指单位时间内功率波动的次数。

1.3 功率振荡对核电机组的影响

功率振荡对核电机组的安全稳定运行会产生多方面的不利影响。从设备安全角度来看,功率振荡会导致机组各部件承受交变的热应力和机械应力。例如,汽轮机的叶片在蒸汽压力周期性变化的作用下,会受到交变的弯曲应力和扭转应力,长期运行可能会导致叶片疲劳损坏,影响汽轮机的使用寿命和安全性。反应堆冷却剂系统的管道和设备也会因温度和压力的周期性波动而产生热胀冷缩现象,增加管道泄漏和设备损坏的风险。在运行稳定性方面,功率振荡会使机组的控制难度加大。机组的自动控制系统是根据设定的功率目标值来调节反应堆功率和汽轮机进汽量等参数的,功率振荡会使实际功率与目标值之间不断产生偏差,控制系统需要不断地进行调整,容易导致控制系统的不稳定,甚至可能引发更严重的故障。功率振荡还会对电网的安全运行造成威胁。核电机组通常是电网中的大型电源,其功率的大幅波动会直接影响电网的频率和电压稳定。当功率振荡幅度较大时,可能会导致电网频率偏离正常范围,影响其他用电设备的正常运行,严重时甚至可能引发电网崩溃事故。

2 核电机组功率振荡成因分析

2.1 外部因素

2.1.1 电网故障

电网故障是引发核电机组功率振荡的常见外部因素之一。例如,电网发生短路故障时,电网的电压和频率会急剧下降,这会导致核电机组的输出功率受到影响。为了维持电网的稳定运行,核电机组的自动控制系统会迅速调整机组的输出功率,但由于电网故障的突发性和复杂性,控制系统的调整可能无法及时、准确地适应电

网的变化,从而引发功率振荡。电网中的其他大型机组跳闸或负荷突然大幅变化等故障,也会引起电网功率平衡的改变,进而对核电机组的功率输出产生扰动,可能导致功率振荡的发生。

2.1.2 电网结构不合理

电网结构不合理也会增加核电机组功率振荡的风险。如果电网的联络线过于薄弱,传输容量有限,当核电机组与电网之间的功率交换发生变化时,就容易在联络线上产生功率波动,这种功率波动可能会反馈到核电机组,引发功率振荡。另外,电网中缺乏足够的无功补偿装置和电压调节设备,会导致电网电压不稳定。电压的波动会影响核电机组的电气性能和运行稳定性,进而可能诱发功率振荡。

2.2 内部因素

2.2.1 控制系统缺陷

核电机组的控制系统是保证机组安全稳定运行的关键。如果控制系统存在缺陷,如控制算法不合理、传感器测量误差大、执行机构响应迟缓等,都可能导致机组功率控制不准确,从而引发功率振荡^[2]。例如,在反应堆功率控制系统中,如果中子探测器的测量数据不准确,控制系统根据错误的数据进行调节,就会导致反应堆功率与汽轮机功率不匹配,进而引发功率振荡。汽轮机调速系统的执行机构如果响应迟缓,不能及时根据负荷变化调整汽轮机的进汽量,也会使机组的输出功率出现波动。

2.2.2 设备故障

核电机组中的各种设备,如反应堆压力容器、蒸汽发生器、汽轮机、发电机等,在长期运行过程中可能会出现故障。设备的故障会影响机组的正常运行,导致功率振荡。例如,蒸汽发生器传热管破裂会导致一回路冷却剂泄漏到二回路,影响二回路的蒸汽参数,进而使汽轮机的功率输出发生变化,引发功率振荡。汽轮机的通流部分结垢或叶片损坏,会改变汽轮机的效率,导致汽轮机功率不稳定,也可能引发功率振荡。

2.3 综合分析

核电机组功率振荡往往是外部因素和内部因素共同作用的结果。例如,电网故障作为外部因素,会引起机组功率的初始扰动,而机组内部的控制系统缺陷或设备故障等内部因素,会使机组对这种扰动的响应出现异常,无法及时有效地抑制功率波动,从而导致功率振荡的发生和加剧。机组的不同运行工况也会影响功率振荡的产生。在机组启动、停机或负荷大幅变化等过渡工况下,机组的动态特性较为复杂,控制系统和设备的调节难度加大,更容易受到外部和内部因素的影响,从而引

发功率振荡。而在机组稳定运行工况下,虽然也存在功率振荡的可能性,但相对来说概率较低。

3 核电机组功率振荡抑制措施研究

3.1 控制策略优化

3.1.1 改进反应堆功率控制策略

通过优化反应堆功率控制算法,提高控制系统对功率变化的响应速度和准确性。例如,采用先进的智能控制算法,如模糊控制、神经网络控制等,代替传统的PID控制算法。智能控制算法能够根据机组的实时运行状态和历史数据,自动调整控制参数,更好地适应不同的运行工况和扰动情况,从而有效地抑制功率振荡。

3.1.2 优化汽轮机调速系统控制策略

对汽轮机调速系统进行优化,提高其对负荷变化的跟踪能力。可以采用变参数控制策略,根据汽轮机的不同运行工况和负荷变化率,实时调整调速系统的控制参数,使汽轮机的进汽量能够快速、准确地跟随负荷变化,减少功率波动。另外,还可以引入前馈控制环节,将电网负荷变化的信号提前引入汽轮机调速系统,使调速系统能够提前做出调整,增强系统的抗干扰能力,抑制功率振荡。

3.2 硬件升级与改造

为有效抑制核电机组功率振荡,需对硬件进行全面升级与改造。首先是更新控制系统硬件设备,对核电机组现有的控制系统硬件展开升级工作。选用高性能的处理器,能大幅提升数据处理速度,快速响应机组运行中的各种指令与变化;采用高精度传感器,可更精准地捕捉机组运行参数,为控制系统提供可靠数据;配备快速响应的执行机构,能确保控制指令及时、准确地执行,提高控制系统的整体控制精度^[3]。改造关键设备也至关重要。对汽轮机进行通流部分改造,运用先进的叶片型线和气流通道设计,优化蒸汽流动,提高汽轮机效率,减少能量损失,让功率输出更稳定。对发电机进行绝缘升级改造,采用新型绝缘材料和工艺,提升发电机的绝缘性能,降低绝缘故障发生率,减少因绝缘问题导致的功率波动,保障机组稳定运行。

3.3 电网协调控制

加强电网与核电机组的信息交互是抑制功率振荡的关键举措。建立实时信息交互平台,能打破电网与机组间的信息壁垒。电网调度中心借此可实时掌握核电机组的运行状态,如功率输出、设备运行参数等,以及其功率调节能力,包括最大、最小出力范围和调节速度等。同时核电机组也能及时获取电网的负荷变化和故障信息,如负荷的突然增减、电网短路等故障情况。基于

这些信息,电网调度中心能根据核电机组实际情况,科学合理安排机组出力,避免因调度不合理引发功率振荡。在电网中合理配置无功补偿装置和电压调节设备必不可少。静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等可动态调节无功功率,提高电网电压稳定性和功率因数。采用电力系统稳定器(PSS)等电网稳定控制装置,能有效抑制电网中的低频振荡,降低电网故障对核电机组功率的冲击,保障机组和电网的稳定运行。

3.4 仿真与实验验证

为深入探究并有效抑制核电机组功率振荡,建立精确的机组仿真模型是极为关键的一步。借助先进的计算机仿真技术,构建涵盖核电机组各核心部分的详细仿真模型。这其中包含反应堆模型,它能精准模拟核燃料裂变反应过程及中子通量变化;一回路系统模型可反映冷却剂在反应堆与蒸汽发生器间的循环及热量传递;二回路系统模型能呈现水变蒸汽以及蒸汽参数变化;汽轮机模型可模拟蒸汽推动汽轮机旋转的动态过程;发电机模型能展现电能产生与输出特性;控制系统模型则可精准复现机组功率调节等控制逻辑。该仿真模型需高度精准,能够如实反映机组在不同工况下的动态特性,以及各部件间复杂的相互关系,为研究抑制功率振荡措施搭建可靠的试验平台。通过仿真模拟多种运行工况和故障场景,对所提出的抑制措施进行全面验证与优化。待仿真结果达标后,再在核电机组调试或停机检修时开展小规模实际实验,依据实验效果对措施进一步调整完善,确保其在实际运行中切实有效抑制功率振荡。

4 核电机组功率振荡案例研究

4.1 卡拉奇“华龙一号”机组功率振荡案例

4.1.1 事件经过

卡拉奇“华龙一号”机组在某次运行过程中,突然出现功率振荡现象。机组功率在短时间内出现了较大幅度的波动,波动频率较高,严重影响了机组的安全稳定运行。

4.1.2 原因分析

经过详细调查和分析,发现此次功率振荡的主要原因是电网故障引发了机组的初始扰动,而机组内部的汽轮机调速系统存在缺陷,响应迟缓,无法及时有效地抑制功率波动。同时电网与机组之间的信息交互不畅,电网调度中心未能及时了解机组的运行状态,采取不恰当的调度措施,进一步加剧功率振荡。

4.1.3 处理措施及效果

针对此次功率振荡事件,采取以下处理措施:首

先,对汽轮机调速系统进行优化,改进控制算法,提高了执行机构的响应速度;其次,加强电网与机组之间的信息交互,建立实时信息监测和反馈机制;最后,对电网调度中心的调度策略进行调整,避免不恰当的调度操作。经过处理后,机组的功率振荡得到了有效抑制,恢复安全稳定运行。

4.2 秦山核电站320MW机组功率振荡案例

4.2.1 事件经过

秦山核电站320MW机组在一次负荷调整过程中,出现了功率振荡现象。机组功率在负荷调整后未能稳定下来,而是出现周期性的波动,波动幅度逐渐增大,对机组和电网的安全运行构成了威胁^[4]。

4.2.2 原因分析

通过分析发现,此次功率振荡的主要原因是机组的反应堆功率控制系统与汽轮机调速系统之间的协调性不好。在负荷调整过程中,两个系统的调节动作不一致,导致机组功率出现波动。机组的某些设备存在老化问题,性能下降,也影响了机组的稳定运行。

4.2.3 处理措施及效果

为解决此次功率振荡问题,采取了以下措施:对反应堆功率控制系统和汽轮机调速系统进行联合调试和优化,提高两个系统之间的协调性;对老化设备进行更换和维修,恢复设备的性能。经过处理后,机组的功率振荡现象消失,运行稳定性得到了显著提高。

结束语

核电机组功率振荡关乎机组与电网安全稳定运行。本文全面剖析其成因,涵盖内外部多方面因素,并针对性地提出控制策略优化、硬件升级改造、电网协调控制及仿真实验验证等抑制措施。通过实际案例分析,验证了这些措施的可行性与有效性。未来,需持续深入研究,不断完善相关技术与策略,以更好地应对功率振荡问题,保障核能电力事业安全发展。

参考文献

- [1]赵俊,胡劲,吴坤.方家山核电厂核级DCS安全改进[J].电子技术应用,2021(S1):211-216.
- [2]郑丽馨,陶书生,王倩,张浩,焦峰,许友龙,吴彦农.核电厂运行事件报告准则研究及应用[J].核安全,2021,20(05):27-33.
- [3]宋健君.某核电机组海工系统安全隔离运行研究[J].中国设备工程,2023,(S2):63-66.
- [4]孙玉彪.再热蒸汽温度控制对核电机组运行可靠性的影响探讨[J].产业与科技论坛,2022,21(16):37-38.