

抽水蓄能电站励磁系统设计与性能测试

宋文华

中国水利水电建设工程咨询西北有限公司 陕西 西安 710100

摘要：本文聚焦于抽水蓄能电站励磁系统设计与性能测试。先阐述抽水蓄能电站及励磁系统重要性，接着深入探讨励磁系统设计要点，涵盖设计原则、关键部件选型与参数设定等技术细节。随后详细分析性能测试内容，包括静态与动态测试项目、方法、标准及相关数据要求。旨在为抽水蓄能电站励磁系统的设计、建设及运行维护提供有价值的参考，提升电站整体性能与可靠性。

关键词：抽水蓄能电站；励磁系统设计；性能测试

引言

随着全球能源结构调整和可再生能源大规模接入，抽水蓄能电站在电力系统中日益重要。它可在用电低谷储能、高峰发电，平衡供需，提升电网稳定性。作为发电机组关键部分，励磁系统的性能直接影响电能质量和系统稳定。优良的励磁系统可快速调节电流，维持电压稳定，增强系统动态与暂态稳定性。因此，研究其设计与测试具有重要意义。

1 抽水蓄能电站励磁系统设计要点

1.1 设计原则

抽水蓄能电站励磁系统设计需遵循可靠性、快速响应、适应性和经济性四大原则。通过高质量组件与冗余设计确保高故障容错率；优化控制策略，实现电压调节时间 ≤ 0.1 秒、强励响应时间 ≤ 0.05 秒；具备在 $\pm 2\%$ 频率变化下自动调压的适应能力；并采用高效设备与算法降低能耗 $10\% \sim 15\%$ ，提升经济性。各项设计保障系统高效可靠运行。

1.2 关键部件选型

1.2.1 励磁功率单元

根据机组容量和工况，主要有旋转整流器、静止整流器和自并励静止励磁三种类型。旋转整流器适用于中小机组 ($< 50\text{MW}$)，结构简单、维护周期为 $6 \sim 12$ 个月，但响应速度和控制精度较低；静止整流器广泛用于 100MW 以上大型抽水蓄能机组，采用晶闸管整流，响应快、控制精度高，触发脉冲误差应 $\leq \pm 1^\circ$ ，并需配置完善的保护与冷却系统；自并励系统作为其特殊形式，直接从机端取电，结构简洁、响应迅速，但在机端电压降至 80% 额定值时仍需保证强励能力。设计时需考虑额定励磁电流与电压，并留有 $10\% \sim 15\%$ 裕量，强励倍数一般为 $1.8 \sim 2.0$ 倍，持续时间 $10 \sim 20$ 秒。整流桥宜采用 $N+1$ 冗余配置，冷却方式可选自然风冷或强迫风冷/水冷。控制系统

建议采用数字式励磁调节器 (DECS)，实现高精度闭环控制，同步信号应隔离滤波处理。灭磁系统应配备非线性电阻或灭磁开关，具备过流、过压、失磁等多重保护功能^[1]。

1.2.2 励磁调节器

励磁调节器作为抽水蓄能机组励磁系统的核心控制单元，主要实现自动电压调节 (AVR)、无功功率调节、手动励磁电流控制 (FCR) 及电力系统稳定器 (PSS) 功能，用于维持发电机端电压在设定范围内 (通常为额定电压的 $80\% \sim 110\%$)，具备 $\pm 0.5\%$ 以内的调节精度和小于 20ms 的响应时间。其应采用数字式 PID 控制算法并集成自适应控制策略，支持 Modbus、IEC61850 等通信协议，具备冗余双通道热备用结构以提高可靠性；同时配置 PT 断线、过压、欠压、失步等多种保护机制，并能记录故障信息供后续分析。推荐型号包括 ABB UNITROL 6000、GE EX2100e、南瑞继保 RCS9400-AVR 等。设计时需注意与同期装置、监控系统的良好配合，设置在线切换控制模式功能，并确保安装环境通风良好、远离强电磁干扰。

1.2.3 灭磁装置

灭磁装置是保障发电机安全运行的重要设备，在发生内部短路、失磁或失步等严重故障时，能够迅速切断励磁回路，防止事故扩大。该装置应具备快速灭磁能力，动作时间应小于 10ms ，灭磁残压不超过额定励磁电压的 10% ，并能吸收由发电机最大磁场储能所产生的能量。常见的灭磁方式包括电阻灭磁、逆变灭磁及混合灭磁，其中大型抽水蓄能机组多采用逆变+电阻的混合灭磁方案以兼顾响应速度与能量吸收能力。典型参数如最大灭磁电流 2000A 、灭磁电阻 $20\Omega/50\text{kW}$ (持续)、灭磁能量 $\geq 100\text{kJ}$ 等，灭磁开关建议选用直流专用高速断路器 (DCB)。设计中应合理布置灭磁电阻位置，配备温度监测与冷却措施，

确保长期可靠运行，并将其纳入全厂继电保护联动逻辑中，实现远方分闸与手动紧急操作功能^[2]。

1.3 参数设定

1.3.1 励磁系统参数整定

励磁系统参数整定是确保其动态响应与稳定性的关键环节。主要参数包括比例增益（ K_p , 0.1–10）、积分时间常数（ T_i , 0.1–10s）、微分时间常数（ T_d , 0–1s），影响电压调节的快速性与平稳性。整定时可采用Ziegler-Nichols法或仿真优化，结合MATLAB/Simulink等工具建模分析，模拟负载突变、短路等工况，调整参数以减小超调、抑制振荡。电压调差率（ $\pm 1\% \sim \pm 10\%$ ）用于并联机组间的无功分配，强励倍数（1.8–2.5倍）和强励时间（10–20s）则决定系统暂态稳定性。整定过程应基于发电机参数和电网需求，先仿真分析，再通过现场试验（如甩负荷、扰动试验）验证优化，确保满足《GB/T 7409.3》等相关标准。最终目标是实现电压快速稳定调节，提升电力系统安全性与运行可靠性。

1.3.2 保护参数设定

励磁系统的保护参数设定是确保其安全运行的重要环节，主要包括过励磁、欠励磁、失磁、转子过电压及整流器故障等保护。整定时应依据《GB/T 7409》等相关标准，结合机组参数、系统结构及运行经验进行设定，并通过仿真分析与现场试验验证。过励磁保护按电压/频率比设定，通常动作值为1.1~1.3倍额定电压，对应动作时间为60s至5s不等；欠励磁保护设定在额定无功功率的20%~30%，低于该值时报警或跳闸，防止系统电压崩溃。失磁保护依据机端阻抗、转子电压和无功反向判据设定，动作时间0.5~2s。转子过电压保护动作值设为额定电压的2~3倍，响应时间小于0.1s；整流器故障保护则通过电流不平衡或触发脉冲异常检测实现，动作时间应小于0.05s。整定流程一般包括：建立仿真模型（如PSCAD或MATLAB）→模拟典型故障场景→初步设定保护阈值→现场短路、甩负荷等试验验证→调整优化参数→固化定值并投入运行。全过程需兼顾灵敏性与可靠性，防止误动或拒动，保障系统稳定运行^[3]。

2 抽水蓄能电站励磁系统性能测试

2.1 静态测试

2.1.1 外观检查

对励磁系统的设备外观、接线、标识等进行全面检查，确保设备无损坏、变形，接线正确、牢固，标识清晰、准确。检查内容包括设备外壳是否有裂纹、划痕，接线端子是否松动、氧化，标识是否符合规范要求等。

2.1.2 绝缘电阻测试

测试对象包括励磁绕组、整流器、调节器及其连接回路等。测试使用500V或2500V绝缘电阻测试仪（根据设备额定电压选择），在设备完全断电状态下进行。测试前应将被测设备与外部电路可靠隔离，并充分放电至少5分钟，防止残余电荷影响测试结果。测试时，将测试仪“L”端接被测回路，“E”端接地，保持测试线绝缘良好，匀速摇动或启动测试仪，读取60秒时的绝缘电阻值。一般要求绝缘电阻不低于 $1M\Omega/kV$ ，例如额定电压为10kV的励磁绕组，其绝缘电阻应 $\geq 10M\Omega$ ；对于低压控制回路，通常要求 $\geq 1M\Omega$ 。测试完成后应对设备再次放电，确保安全。测试结果应记录并与历史数据对比，若显著下降，应查明原因并处理。

2.1.3 耐压试验

试验应在绝缘电阻测试合格后进行，避免对劣化绝缘施加高压造成损坏。试验前应将被试设备完全断电，并与外部电路隔离，拆除相关保护元件（如压敏电阻、整流模块等），并对设备充分放电。试验使用交流耐压装置，一般施加电压为额定电压的1.5~2倍，持续时间为1分钟。例如，额定电压为6kV的整流器回路，试验电压通常取9~12kV。试验过程中应设专人监护，观察设备有无异常现象，如放电声、冒烟、击穿或电压电流突变等。若出现异常应立即降压并切断电源。试验结束后，应对设备充分放电并恢复接线。

2.1.4 功能检查

对励磁系统的各项功能进行逐一检查，包括励磁调节器的手动/自动切换功能、电压调节功能、限制功能、保护功能等。通过模拟各种运行工况和故障情况，验证励磁系统是否能够按照设计要求正确动作^[3]。例如，在手动/自动切换功能检查中，应确保切换过程中发电机端电压无明显波动；在电压调节功能检查中，应验证励磁调节器能否根据给定的电压设定值准确调节发电机端电压，调节精度应符合要求^[4]。

2.2 动态测试

2.2.1 空载特性试验

在发电机空载状态下，逐步改变发电机的转速（或频率），测量发电机的端电压与励磁电流之间的关系，绘制空载特性曲线。通过空载特性试验可以检查发电机的磁路特性是否正常，励磁系统的调节性能是否良好。试验时，转速（或频率）的变化范围一般为额定值的80%~120%，每隔一定转速（或频率）间隔测量一次端电压和励磁电流。例如，对于额定转速为150r/min的发电机，转速变化间隔可取5r/min。

2.2.2 负载特性试验

负载特性试验用于评估励磁系统在发电机带负载运行条件下对电压的调节能力和稳定性。试验中应分别测试以下几类典型负载工况：空载（0%）、纯电阻负载（有功为主）、感性负载（滞后功率因数）、容性负载（超前功率因数）以及满载（100%额定负载）。在不同负载条件下，逐步改变发电机的有功功率（0~100%额定值）和无功功率（±50%额定值），记录发电机端电压、励磁电流、功率因数等参数的变化，分析励磁系统的响应速度、电压稳定性和调节精度。重点观察在突加/突卸负载时是否存在电压波动或恢复时间过长等问题。调节特性方面，应关注：是否能维持端电压恒定；负载突变时电压偏差与恢复时间；并网运行下与其他机组的无功协调能力。

2.2.3 阶跃响应试验

给励磁调节器输入一个阶跃信号，模拟电力系统的扰动，测量发电机端电压、励磁电流等参数的动态响应过程。通过分析阶跃响应曲线，可以得到励磁系统的调节时间、超调量、振荡次数等动态性能指标，评估励磁系统的快速响应能力和稳定性。阶跃信号的幅值一般取发电机额定电压的5%-10%，记录阶跃响应曲线的时间应不少于5s。

2.2.4 灭磁试验

试验应在发电机空载或低负载状态下进行。试验前，确认励磁系统各设备状态良好，灭磁回路接线正确，并投入录波装置以记录灭磁过程中励磁绕组的电流、电压变化曲线。试验时，先将发电机升压至额定电压并维持稳定，随后通过手动或保护信号触发灭磁开关动作，启动灭磁过程。试验过程中应记录以下关键参数：灭磁开始与结束时刻；励磁电流从额定值下降至接近零的时间（即灭磁时间）；励磁绕组电压峰值；灭磁电阻温度变化情况（如有监测）。根据设计要求，一般灭磁时间应小于1秒，且励磁电流应迅速衰减至安全范围，避免对转子绝缘造成损害。若试验中出现灭磁失败、残流过大或响应延迟等问题，应分析原因并调整灭磁参数或检查设备状态。

2.2.5 电力系统稳定器（PSS）试验

如果励磁系统配备了电力系统稳定器，需要进行PSS试验。通过在发电机上施加低频振荡信号，测量发电机

的电磁功率、转速等参数的变化，调整PSS的参数，使PSS能够有效地抑制电力系统的低频振荡，提高电力系统的动态稳定性^[4]。低频振荡信号的频率一般为0.1-2.5Hz，PSS试验应在发电机不同运行工况下进行，以验证PSS的适应性和有效性。

3 性能测试标准

抽水蓄能电站励磁系统的性能测试应严格按照国家和行业相关标准进行，如《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件》（GB/T7409.3）、《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置试验规程》（DL/T583）等。这些标准对励磁系统的各项性能指标、测试方法、试验条件等都做出了详细的规定，是进行励磁系统性能测试的重要依据。例如，在空载特性试验中，标准规定了空载特性曲线的形状和允许偏差范围；在阶跃响应试验中，标准对调节时间、超调量等指标提出了明确的要求。

结语

抽水蓄能电站励磁系统的设计与测试是保障其安全、稳定、高效运行的关键。设计应坚持可靠性、快速响应、适应性和经济性原则，合理选型并精确设定参数；测试需覆盖静态与动态项目，依标操作，确保性能达标。同时，应总结经验，持续改进，以适应电力系统发展需求。未来，随着技术进步和稳定性要求提升，励磁系统的研发将面临新挑战，需不断创新，提供更强技术支持。

参考文献

- [1]汤勋,肖康乐.抽水蓄能电站励磁系统原理和应用[J].水电站机电技术,2022,45(03):94-97.
- [2]曹坦坦,刘仁,张启超.抽水蓄能电站励磁系统起励方式优化探析[J].水电站机电技术,2025,48(02):34-37+140.
- [3]郭春平,许其品.大中型抽水蓄能电站励磁系统设计[J].水电站设计,2017,33(04):32-35.
- [4]夏向龙,方军民,杨柳燕,等.抽水蓄能电站励磁系统限制器静态模拟试验[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会.抽水蓄能电站工程建设文集2019.华东天荒坪抽水蓄能有限责任公司;安徽金寨抽水蓄能电站有限公司,2019:248-253.