

抽水蓄能电站电气主接线方式的探讨

张赓义 吕 优

陕西镇安抽水蓄能有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：抽水蓄能电站电气主接线设计需兼顾安全、可靠、经济与灵活。常见接线方式包括单元接线、扩大单元接线、单母线接线、双母线接线及桥式接线，各有适用场景与优劣。不同容量电站选择各异，小型侧重经济实用，中型平衡可靠与经济，大型追求高可靠。主接线需与电力系统、机组控制系统、励磁系统紧密配合，从接入点、短路电流控制、无功平衡、操作联动、保护协同、电源可靠性等方面实现协同，以保障电站稳定运行，满足电力系统调峰需求。

关键词：抽水蓄能电站；电气主接线方式；设计原则

引言

在电力系统调峰、储能需求持续攀升的当下，抽水蓄能电站凭借其强大的调节能力，成为保障电网稳定运行的关键手段。而电气主接线作为电站与电力系统相连的核心枢纽，其设计的合理性直接关乎电站运行的安全、可靠与经济。鉴于当前抽水蓄能电站容量与功能持续拓展，对电气主接线设计提出了新挑战。探讨不同接线方式特点及适用场景，对优化设计、提升电站性能意义重大。

1 抽水蓄能电站电气主接线设计原则

安全性是电气主接线设计的首要原则。在设计过程中，必须保证电气设备能够安全可靠地运行，防止发生短路、过电压等故障对设备和人员造成危害。主接线应具备足够的绝缘水平和动热稳定性能，能够承受短路电流产生的电动力和热效应^[1]。同时应设置完善的继电保护和自动装置，以便在故障发生时能够迅速切断故障回路，避免事故扩大。可靠性是指主接线在规定的时间内和规定的条件下，能够完成规定功能的能力。抽水蓄能电站作为电力系统的重要组成部分，其主接线的可靠性直接影响电力系统的稳定运行。设计时应根据电站的规模、重要程度和负荷性质，合理选择接线方式，确保在设备故障或检修时，能够最大限度地保证电站的正常运行。对于大型抽水蓄能电站，应采用可靠性较高的接线方式，如双母线接线等。经济性是指在满足安全性和可靠性的前提下，尽量降低主接线的投资和运行成本。在设计过程中，应综合考虑设备的选型、布置方式、线路长度等因素，优化主接线方案。在选择变压器时，应根据电站的容量和负荷特点，选择合适的容量和型号，以提高设备的利用率，降低能耗。同时应合理布置电气设备，减少线路的长度和损耗，降低运行成本。灵活性是

指主接线能够适应不同运行工况和负荷变化的能力。抽水蓄能电站具有发电和抽水两种运行工况，且在不同工况下的电气参数和运行方式有所不同。因此，主接线应具备良好的灵活性，能够方便地实现工况转换和负荷调整。此外主接线还应便于设备的检修和维护，在不影响电站正常运行的情况下，能够对设备进行检修和更换。

2 常见的抽水蓄能电站电气主接线方式

2.1 单元接线

单元接线是将单台发电机（或可逆式电动机-发电机组）与单台变压器直接连接成独立单元，再通过断路器接入高压母线的接线方式。其核心优势是电气回路简洁，省去复杂联络设备，减少故障点。某中型电站的4套单元接线中，每套含300MW可逆机组与340MVA主变，通过封闭母线连接，短路阻抗控制在12%以内，兼顾低损耗与抗短路能力。该接线的运行独立性显著，单元故障时仅需断开对应断路器，不影响其他单元。某电站1号机组故障时，其余3台机组仍正常运行，发电量损失控制在25%以内。经济性上，设备投资比双母线接线低15%-20%，适合机组台数 ≤ 4台的中小型电站。针对双向运行特性，衍生出两种形式：纯发电工况用“发电机-变压器”单元，通过出口断路器并网；抽水-发电工况用“电动机-发电机-变压器”单元，增设SF6气体绝缘换相开关（切换时间 ≤ 50ms），满足工况转换需求。

2.2 扩大单元接线

扩大单元接线将两台机组与一台大容量变压器连接成单元，再接入高压母线。其设备集约化优势明显，某电站2台350MW机组共用1台750MVA主变，较单元接线减少1台主变，节省投资约800万元，占地减少30%。主变多为三相双绕组结构，电压等级220kV或500kV，短路阻抗14%-16%以限制短路电流。运行中，每台机组出口均

设断路器,单机组故障时可隔离,另一台仍能运行。某电站2号机组故障后,1号机组保持运行,维持50%单元出力^[2]。但主变故障会影响两台机组,故需配置双重化继电保护(差动+瓦斯保护),动作时间 $\leq 20\text{ms}$ 。该接线适用于4-6台机组的中型电站,尤其适合地下厂房,某地下电站采用两组扩大单元接线,主变布置于地下洞室,通过竖井电缆接入地面开关站,节省大量成本。

2.3 单母线接线

单母线接线通过一条公共母线连接所有设备,电气设备经断路器和隔离开关与母线相连,结构简单且控制回路少,便于运维。某80MW小型电站采用110kV单母线,4台20MW机组经单元变压器接入,开关站设备比单元接线少25%,建设期缩短3个月。为提升可靠性,常采用分段设计,通过分段断路器将母线分为2-3段。某电站110kV母线分两段,每段接2台机组,一段故障时,分段断路器自动跳开,另一段仍能带2台机组运行,保障50%出力。分段断路器多为真空式,额定电流2000A,短路开断电流31.5kA。该接线设备投资仅为双母线的60%-70%,适合总容量 $\leq 100\text{MW}$ 的小型电站。但母线检修需全站停运,故采用可拆卸式架构,将检修时间控制在24小时内。

2.4 双母线接线

双母线接线设工作与备用两条母线,所有回路通过两组隔离开关分别连接两条母线,由母线联络断路器实现切换。其可靠性极高,某1200MW大型电站的500kV双母线接线,在工作母线故障时,通过倒闸操作30分钟内切换至备用母线,未造成停运。运行灵活性突出,可实现母线轮修,还能按负荷分配回路以平衡潮流。某电站夏季高峰时,4台机组分接两条母线,每条承担600MW负荷,使电流控制在额定值的80%以内,降低线损。但该接线设备成本高,比单母线高40%-50%,且占地大,适合总容量 $\geq 500\text{MW}$ 的大型电站。现代设计常配智能母线保护系统,采用采样值差动原理,动作时间 $\leq 15\text{ms}$,兼具自动倒闸功能。

2.5 桥式接线

桥式接线在两条母线间设桥断路器,为单、双母线的过渡形式,分内桥与外桥。内桥的桥断路器在线路侧,适合线路长($> 10\text{km}$)、故障概率高的场景,某电站采用后,线路故障时5分钟内恢复供电;外桥的桥断路器在变压器侧,适合变压器需频繁切换的场合,某调峰电站借此实现变压器轮换,年减少损失120万元。该接线设备仅为双母线的60%,投资低30%以上,且可靠性较好。某中型电站采用外桥接线,一台主变故障时,桥

断路器自动断开,另一台主变仍能保障70%出力。但扩建困难,适合2台机组的固定规模电站,常与GIS设备结合,采用全封闭结构,占地仅为敞开式的20%,适合山区电站。

3 不同容量抽水蓄能电站的电气主接线选择

3.1 小型抽水蓄能电站(容量小于100MW)

小型电站受限于规模和投资,主接线选择以“经济实用”为核心原则。单元接线凭借低成本优势成为主流,某60MW电站采用3套20MW机组单元接线,单套设备投资比扩大单元低120万元,且因无共用设备,故障影响范围可控。对于机组台数4台以上的小型电站,单母线接线更具性价比,某80MW电站通过110kV单母线连接4台机组,开关设备数量比单元接线减少30%,建设期压缩至18个月。若需提升可靠性,可采用单母线分段接线。某70MW电站将母线分为两段,每段接2台机组,分段断路器采用智能真空断路器,故障隔离时间 $\leq 100\text{ms}$,较不分段设计减少50%的停电损失。这类电站通常不采用双母线或桥式接线,因双母线投资超预算40%以上,而桥式接线的扩建限制难以满足后期增容需求。

3.2 中型抽水蓄能电站(容量100-500MW)

中型电站需在可靠性与经济性间平衡,扩大单元接线是优选方案。某300MW电站采用3组扩大单元(每组2台50MW机组),主变数量比单元接线减少3台,节省投资约2400万元,同时通过机组出口断路器设计,实现单机组故障隔离。对于地形受限的电站,桥式接线优势显著,某200MW山区电站采用外桥接线,GIS设备占地仅 80m^2 ,比单元接线节省60%空间,且线路故障恢复时间控制在8分钟内。单母线分段接线在中型电站中仍有应用,某150MW电站将220kV母线分为3段,每段接1-2台机组,通过智能分段保护实现故障自动隔离,可靠性接近双母线的80%,但投资仅为其65%^[3]。选择时需结合机组台数:4-6台机组优先扩大单元,2-3台机组可考虑桥式接线,需频繁扩建的电站则适合单母线分段。

3.3 大型抽水蓄能电站(容量大于500MW)

大型电站作为电力系统核心调峰资源,对可靠性要求严苛,双母线接线成为标配。某1200MW电站采用500kV双母线接线,配置双重化母线保护和智能倒闸系统,全年可用率达99.8%,较单母线减少80%的非计划停运时间。其灵活性可满足复杂运行需求,夏季高峰时通过母线切换实现8台机组负荷均衡分配,线损率控制在2.5%以内。虽双母线投资比扩大单元高35%,但长期效益显著。某800MW电站测算显示,双母线接线因减少停电损失,投运5年后即可收回额外投资。设计中常与3/2断

路器接线组合,某1000MW电站采用双母线带3/2断路器方案,短路电流耐受能力达63kA,满足系统远期发展需求,成为大型电站的标杆配置。

4 抽水蓄能电站电气主接线与其他系统的配合

4.1 与电力系统的配合

电气主接线作为电站与电力系统的连接枢纽,需从接入点选择、短路电流控制、无功平衡三方面实现协同。接入方案需结合网架结构,某300MW电站位于220kV电网负荷中心,采用“一机一变”单元接线直接接入区域变电站,输电距离缩短至5km,线损率控制在1.2%以内;而1200MW大型电站则通过500kV双母线接入跨区电网,利用母线联络断路器实现与主网的柔性互联,增强系统稳定性。短路电流耐受能力是关键设计指标,主接线中断路器的开断容量需与系统短路电流匹配。某500kV电站通过在主变低压侧设置限流电抗器,将短路电流从50kA降至31.5kA,使断路器选型成本降低20%。无功补偿方面,单元接线常配置低压电抗器与电容器组,某200MW电站在单元出口设置±10Mvar静止无功补偿器(SVC),电压波动控制在±2%以内,满足GB/T14285-2006的要求。

4.2 与机组控制系统的配合

主接线的开关设备需与机组监控系统(SCADA)实现无缝联动,构建“操作-反馈-保护”闭环。某电站的单元接线中,发电机出口断路器与机组LCU(现地控制单元)采用光纤通信,实现分合闸指令的毫秒级响应,工况转换时间缩短至60秒以内。对于双母线接线,隔离开关的切换操作通过程序化控制实现,某大型电站的倒闸操作流程经SCADA系统优化后,步骤从15步精简至8步,误操

作率下降70%。继电保护与控制系统的协同尤为重要^[4]。扩大单元接线中,主变保护与机组保护通过GOOSE网实现信息共享,某300MW电站配置的差动保护在机组故障时,能同时触发机组出口断路器与主变高压侧断路器跳闸,动作时间差 $\leq 5\text{ms}$,避免故障蔓延。此外,主接线设计需预留足够的通信接口,某中型电站采用的智能终端箱,可同时接入保护、测控、计量等8类信号,简化二次回路布线。

结语

抽水蓄能电站电气主接线设计是一个复杂且关键的环节,涉及多方面原则与多种接线方式。不同容量电站应根据自身特点,合理选择主接线形式,在确保安全可靠的基础上,兼顾经济性与灵活性。同时主接线与电力系统、机组控制系统的紧密配合不可或缺,这关系到电站能否稳定运行并有效融入电力系统。未来,随着技术进步与电站规模扩大,需持续优化主接线设计,提升其性能与适应性,为抽水蓄能电站的高效发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]曾凡芷(文/图),唐艳华(文/图).露天矿高陡顺层边坡动态稳定性评价与协同治理[J].能源新观察,2025(4):59-62.
- [2]李井忠.露天矿开采过程中矿山边坡稳定性的分析与控制[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(5):204-207.
- [3]张博超,童辉,杜飞.露天煤矿边坡稳定性及智能监测技术研究现状[J].中国矿业,2024,33(S02):92-97.
- [4]张秋燕.露天矿山边坡稳定性研究现状及稳控技术[J].现代矿业,2024,40(3):7-12.