

抽水蓄能电站发电电动机的特点

刘 新 张廣义

陕西镇安抽水蓄能有限公司 陕西 西安 710000

摘要：随着全球能源结构向清洁低碳转型，以风电、光伏为代表的新能源装机规模持续攀升，但其固有的间歇性和波动性对电网稳定性构成挑战。本文聚焦抽水蓄能电站发电电动机，阐述其运行与结构特点。运行上，具备双向旋转、频繁起停、需专门起动措施及过渡过程复杂等特性；结构方面，涵盖总体布置、定子、转子及推力轴承等结构特点。此外，文章还介绍了异步启动、同步启动、静止变频启动（SFC）、同轴小电机启动等发电电动机的启动方式，旨在为深入了解抽水蓄能电站发电电动机提供全面参考。

关键词：抽水蓄能电站；发电电动机；特点

引言：在能源结构不断优化、电力系统对灵活调节能力需求日益增长的背景下，抽水蓄能电站凭借其独特的储能与调峰优势，成为保障电网安全稳定运行的关键设施。发电电动机作为抽水蓄能电站的核心设备，兼具发电机与电动机功能，其性能优劣直接影响电站整体效能。它既要在发电工况下将水能转化为电能，又需在抽水工况下把电能转换为机械能，实现水的提升。深入研究抽水蓄能电站发电电动机的特点，对于提升电站运行效率、保障电力系统稳定、推动能源可持续发展具有重要意义。

1 抽水蓄能电站发电电动机的运行特点

1.1 双向旋转

抽水蓄能电站发电电动机的核心运行特性之一是双向旋转能力，这源于其配套的可逆式水泵水轮机在抽水与发电工况下的旋转方向相反。为实现双向同步运行，电机需在电气和机械层面进行针对性设计：电气上通过转换电源相序实现转向切换，需在电气主接线和开关设备中配置相序转换装置；机械上则需优化通风冷却系统和轴承结构，以适应正反转工况下的散热与润滑需求。推力轴承则采用对称支撑轴瓦布局，避免因转向变化导致油膜分布不均。此外，定子铁芯需采用现场叠积工艺增强整体性，减少双向旋转产生的振动对磁路的影响。英国迪诺威克抽水蓄能电站的机组数据显示，其双向旋转工况下径向力波动可达常规机组的2-3倍，这对电机结构的抗疲劳性能提出了更高要求。

1.2 频繁起停

抽水蓄能机组在电力系统中承担调峰填谷、调频调相等任务，需每日启停数次，部分电站甚至达到每小时数次工况转换。以迪诺威克电站为例，其单台机组年启停次数达1250-2500次，工况转换频率超常规水电站的

10倍。这种高频启停导致电机内部温度剧烈波动，定子线棒因热胀冷缩产生应力集中，可能引发绝缘老化或结露问题。为应对此挑战，电机设计需采用热弹性绝缘材料，并优化线棒固定方式——传统径向支撑被斜向支撑取代，以减少温度变形导致的径向位移；定子线棒则通过波状垫片楔紧，防止频繁启停引发的松动。此外，电机需配置电加热器，在停机时维持内部温度，避免结露损坏绝缘。

1.3 需有专门起动措施

由于同步电机在电动机工况下缺乏起动转矩，抽蓄能机组必须依赖外部装置实现软起动。主流起动方式包括异步起动、同步起动、静止变频启动（SFC）及同轴小电机启动，其中SFC因能精准控制转速与电流，成为大型机组的首选方案。以300MW级机组为例，SFC系统可在30秒内将机组从静止加速至95%额定转速，随后投入励磁并网，整个过程电流波动控制在±5%以内，有效避免了对电网的冲击。异步起动则需在转子磁极设置阻尼绕组或采用实心磁极结构，通过感应电流产生起动转矩，但此方式会产生大量热量，需额外配置冷却系统。同轴小电机启动适用于中小型机组，其通过同轴连接的异步电机将主电机拖至亚同步转速，再切换至同步运行，但该方式增加了设备复杂度与维护成本。

1.4 过渡过程复杂

抽水蓄能机组工况转换涉及水力、机械与电气系统的强耦合瞬态过程，其复杂性远超常规水电站。以水泵工况失电为例，导叶拒动时机组将经历水泵-水泵制动-水轮机工况的连续转换，期间转轮径向力可增至设计值的4-5倍，导叶动水力矩脉动振幅达最优工况的5-9倍，可能引发机组剧烈振动甚至结构损坏。美国赫尔姆斯电站的实测数据显示，飞逸工况下导叶力矩脉动频率可达

10Hz，对轴承润滑与冷却系统构成严峻挑战。此外，工况转换过程中输水系统压力波动剧烈，压力钢管与引水隧洞需承受 $\pm 30\%$ 额定水头的瞬态压力变化，这对管道结构强度与调压室稳定性提出更高要求。为应对复杂过渡过程，机组需配置高精度调速器与励磁系统，通过导叶开度与励磁电流的协同控制，将转速波动限制在 $\pm 0.5\%$ 以内，电压波动控制在 $\pm 2\%$ 额定值，确保系统安全稳定运行^[1]。

2 抽水蓄能电站发电电动机的结构特点

2.1 总体布置

抽水蓄能电站发电电动机采用立式结构，根据推力轴承位置分为悬式和伞式两种类型。悬式机组推力轴承位于转子上方，结构稳定性高，适用于额定转速超过400-500r/min的高转速机组；伞式机组推力轴承位于转子下方，整体结构更为紧凑，适用于低转速场景。为满足双向旋转需求，电机设计需兼顾正反转工况下的力学平衡，推力轴承采用对称支撑结构，通风系统配置双向扇风装置，确保冷却气流均匀覆盖。电机主体由定子、转子、上下机架和主轴构成。定子机座采用钢板焊接圆筒体结构，内部设置多层环板和加强筋，增强整体刚度以承受电磁拉力和故障冲击。转子系统采用三段轴结构（上端轴、转子支架、下端轴），通过高强度螺栓连接，便于运输与现场组装。大容量机组通常采用分瓣运输方式，定子铁芯和机座现场叠积，减少合缝装配误差。上下机架分别支撑推力轴承和导轴承，形成稳定的机械支撑体系，确保机组在频繁启停和工况转换过程中的动态稳定性。

2.2 定子结构特点

抽水蓄能电站发电电动机的定子结构需适应双向旋转、频繁启停及高强度电磁负荷等特殊工况。定子铁芯由高导磁性硅钢片叠压而成，采用现场分段叠积工艺，通过定位筋与机座固定，形成可自由热膨胀的弹性结构，减少因温度变化导致的铁芯变形。铁芯沿轴向设置多层通风槽，与槽楔通风沟配合，强化冷却气流循环，应对正反转工况下的不对称热负荷。定子绕组采用F级绝缘系统，线棒经真空压力浸渍（VPI）处理，形成无空隙的致密绝缘层，提升抗热老化与机械振动能力。线棒为热压成型结构，端部采用渐开线形绑扎固定，降低离心力引发的绝缘损伤风险。定子机座为钢板焊接圆筒体，内部布置多层环板与加强筋，增强刚度以承受电磁拉力及短路冲击。机座外壳预留空气冷却器安装接口，部分大容量机组采用直接水冷或蒸发冷却技术，进一步提升散热效率。

2.3 转子结构特点

抽水蓄能电站发电电动机的转子采用凸极式结构，需满足双向旋转、高离心力及频繁启停的严苛工况。转子主体由主轴、转子支架、磁轭和磁极组成，整体设计强调高强度与抗疲劳性能。磁轭是核心部件，多采用整圆环锻件或高强度叠片结构，前者因整体性好、刚度高，常用于大容量高转速机组；后者则通过分层叠压减少热应力，适应变工况运行。磁极通过磁极键与磁轭紧固连接，每个磁极配备励磁线圈和阻尼绕组，阻尼条可抑制高速旋转时的振动，防止磁极松动。转子支架采用圆盘式或臂式结构，圆盘式支架设计为双向扇风形状，强化正反转工况下的通风冷却效果。主轴与转子支架通过高精度配合及螺栓紧固，确保动力传递稳定性。转子表面进行动平衡校准，减少运行时的机械振动。

2.4 推力轴承结构特点

抽水蓄能电站发电电动机的推力轴承需承受双向旋转产生的轴向负荷，并适应频繁启停的工况，其结构设计突出高稳定性与低摩擦损耗。轴承采用对称支撑布局，推力瓦通常选用巴氏合金材料，通过弹性油箱、弹簧簇或弹性盘等支撑结构实现瓦间负荷均匀分配，弹性元件可自动补偿热变形与机械偏差，确保负荷均匀度小于5%。为应对正反转油膜稳定性挑战，轴承设计为双斜面或阶梯面结构，配合高压油顶起装置，在启停阶段注入高压油形成静压油膜，减少干摩擦损伤。润滑系统采用喷淋式或外循环冷却方式，部分机组配置智能监测模块，实时调控油温、油压及瓦温，防止油膜破裂。推力镜板采用高精度磨削工艺，表面粗糙度达Ra0.2以下，与推力瓦配对研磨，降低运行摩擦系数^[2]。

3 发电电动机的启动方式介绍

3.1 异步启动

异步启动是抽水蓄能电站发电电动机在水泵工况下常用的启动方式，其原理基于感应电动机的电磁感应效应。启动时，定子绕组直接接入电网，产生旋转磁场；转子因短路绕组（如鼠笼结构）切割磁感线而产生感应电流，进而形成电磁转矩，驱动转子加速旋转。当转速接近同步转速（约95%额定转速）时，通过励磁系统投入直流电流，使电机牵入同步，完成启动过程。该方式分为全压启动和降压启动。全压启动结构简单，但启动电流大（可达额定电流的4-7倍），可能引发电网电压波动和定子绕组温升问题；降压启动通过串联电抗器或变压器抽头降低启动电压，可减小电流冲击（如降至额定值的4倍），但启动转矩随之降低，需权衡启动性能与设备成本。异步启动的优点是技术成熟、成本较低，无需额

外变频设备；缺点是启动电流大，对电网稳定性要求较高，且需优化控制策略以减小同步过程中的电流冲击，适用于对启动经济性要求较高的场景。

3.2 同步启动

同步启动是抽水蓄能电站发电电动机实现精准、平稳启动的重要方式，其核心在于通过外部同步电源或自同步技术，使电机在启动阶段即保持与电网频率、相位严格一致。启动时，定子绕组接入同步频率的交流电源，转子通过直流励磁建立固定磁场；在电磁转矩作用下，转子被直接拖动至同步转速，无需经历异步加速过程，从而避免电流冲击与转矩波动。同步启动可分为他励同步启动和自同步启动两类。他励同步启动依赖外部同步电机或变频装置提供稳定频率与相位，适用于对启动精度要求极高的场景；自同步启动则通过短暂异步运行后投入励磁，使转子磁场自动锁定电网频率，技术更简洁但需精确控制励磁时机。该方式的优点是启动电流小（接近额定值）、转矩平稳，对电网影响极低，且可实现快速软启动；缺点是需配置同步电源或高精度控制系统，设备成本较高，多用于对电网稳定性要求严格或需频繁启停的大容量机组。

3.3 静止变频启动（SFC）

静止变频启动（SFC）是抽水蓄能电站发电电动机水泵工况下的主流启动方式，通过静止变频装置输出0-50Hz可调交流电，利用定转子磁场同步转矩将机组从静止拖动至额定转速。其核心优势在于无级变速、启动平稳，电流冲击小（接近额定值），且能实现四象限运行，在电机制动时可将能量回馈电网。SFC系统由输入变压器、整流器、逆变器、直流平波电抗器及输出变压器构成，通过晶闸管换流桥实现交-直-交变换。启动过程分为低速脉冲换相（依赖强制断流实现换相）和高速自然换相（利用电机反电动势换相）两阶段，全程由控制系统动态调节频率与电压，确保机组平稳加速至并网条件。该方式支持多机组分时启动，且设备维护简便，是

大型抽水蓄能电站的首选启动方案。

3.4 同轴小电机启动

同轴小电机启动是一种通过辅助电机驱动主发电机-电动机转子旋转的机械启动方式，其核心结构是将一台小容量异步电机（或同步电机）与主电机同轴连接，利用辅助电机输出转矩实现主电机从静止到额定转速的平稳加速。启动时，小电机先接入电网，通过齿轮联轴器或直接耦合带动主电机转子旋转，待主电机转速接近同步转速时，主电机定子绕组通电并投入励磁，完成牵入同步过程，随后小电机脱离或空载运行。该方式的优点是结构简单、可靠性高，无需复杂电力电子装置，且启动电流较小（通常不超过主电机额定电流的2倍），对电网冲击低；缺点是需额外配置辅助电机及传动机构，增加设备占地与成本，且启动时间较长（约1-3分钟）。同轴小电机启动多用于中小容量抽水蓄能机组或对电网稳定性要求较高的场景，部分工程通过变频调速优化小电机性能，进一步提升启动灵活性^[3]。

结束语

抽水蓄能电站发电电动机作为双向能量转换的核心设备，兼具发电与电动功能，其设计需适应频繁启停、双向旋转及复杂工况转换。其结构特点包括立式悬式或伞式布局、对称支撑推力轴承、现场叠积定子铁芯及高强度转子支架，以应对高转速与双向受力。启动方式灵活，采用异步、同步或静止变频启动（SFC）以适应不同容量需求。冷却系统结合径向通风与水冷技术，确保热稳定性。

参考文献

- [1]黄小红,吴金水,小野田勉.抽水蓄能电站发电电动机特点[J].水电与抽水蓄能,2021,2(05):45-50.
- [2]姜茜.水轮发电机及发电电动机的最新技术[J].东方电机,2021,39(06):82-87.
- [3]赵政.抽水蓄能电站发电电动机国产化[J].大电机技术,2022(01):5-9+18.