[抽水蓄能]

抽水蓄能电站用电机起动回路开关装置的研制及工程应用

文/吕军玲[1] 曾广移[2] 马 冲[1] 徐 浩[2] 黄小凤[2]
1.西安西电开关电气有限公司；2.南方电网调峰调频发电有限公司

为解决抽水蓄能电站用重大装备的“卡脖子”难题，对发电电动机起动回路开关装置进行研制。叙述了该开关装置的研制背景、研制目标及产品方案，重点阐述了研制的关键技术，并通过型式试验进行验证。该产品的研制成功可以为小尺寸导体、高动热稳定参数开关产品的研制提供有力的基础支持。

随着全球能源互联网概念的提出，风电、光伏及核电等新兴能源和清洁能源的大规模开发利用，以及特高压、智能电网的大力发展，我国正加快建设以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展的坚强智能电网。抽水蓄能电站主要起到调峰填谷、调频调相及紧急事故备用等作用，它以灵活的运行方式、快捷的响应速度，已成为我国智能电网建设的重要组成部分，在保障电力安全、推动新能源健康发展中发挥了至关重要的作用。抽水蓄能电站是目前电力系统中最可靠、最经济、寿命周期最长、容量最大及技术最成熟的储能装置，配套建设抽水蓄能电站，是提高电网运行协调性和安全稳定性的最为经济有效的措施。但目前抽水蓄能电站装机占电源总装机的比重仅为1.4%，不能满足新能源快速发展的需求。未来我国抽水蓄能电站建设步伐还将进一步加快，发展前景十分广阔。

电机起动回路开关装置是抽水蓄能电站必不可少的设备，近年来，随着抽水蓄能电站的快速发展，对适用于该类型电站的电机起动回路开关装置的需求越来越迫切。目前国内尚无专门的电机起动回路开关装置，市场一直被少数几个国外企业垄断。国外生产该类装置的厂家有法国SDCEM和AE POWER公司。西安西电开关电气有限公司成功研制出该类装置，打破了国外公司在该领域内的垄断，进一步推进了重大装备国产化，全面提升了我国抽水蓄能电站用电机回路系列成套设备整体打包的供货能力。

产品主要技术参数

通过对用户和设计院的调研，充分考虑市场的覆盖性，结合绝缘水平、额定通流能力、短时通流/持续时间及动热稳定等方面的功能要求，确定项目主要技术参数为：额定电压24 kV；额定电流4 000 A；短时通流/持续时间6 300 A/50 min；额定短时耐受电流/时间160 kA/3 s；额定峰值耐受电流480 kA；额定绝缘水平（同时满足2 500 m高海拔要求）额定短时工频耐受电压65 kV；额定雷电冲击耐受电压 125 kV；机械寿命10 000次。

产品总体方案

产品由三个单极组成，每极包括起动回路开

基金项目：中国南方电网有限责任公司重点科技项目：抽水蓄能机组成套开关设备关键技术研究及应用（STKJM20190198）

关、接地开关，均装在金属箱体内，安装在同一底架上。每极为单断口结构，采用敞开式结构，以空气作为绝缘介质。主回路采用自然冷却，起动回路开关、接地开关配用电动操作机构，且均采用三相机械联动的传动方式。

根据工程应用的需求，该产品有两种布置形式：卧式结构（见图1）、立式结构（见图2）。

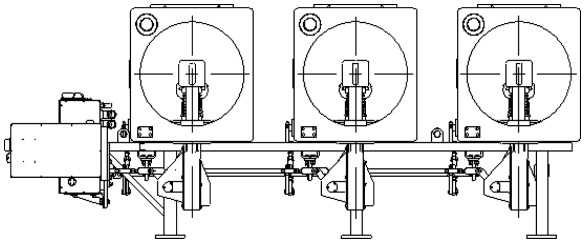


图1　卧式结构外形图

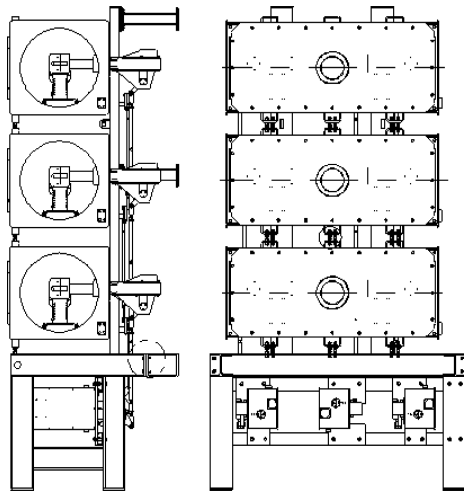


图2　立式结构外形图

主要部件特征如下：

1）起动回路开关。起动回路开关的断口及主回路对地均以空气为绝缘介质；主回路与箱体之间采用伞形绝缘子支撑，实现高电位与地电位的隔离；动静触头之间采用直插式结构，动触头通过曲柄滑块原理实现合闸和分闸操作。

2）接地开关。接地开关的断口均以空气为绝缘介质，实现高电位与地电位的隔离；动静触头之间采用直插式结构，动触头通过曲柄滑块原理实现合闸和分闸操作。

3）部件配置原则。根据产品在回路中安装位置的差异和功能的不同，分为起动开关、拖动开关和起动母线分段隔离开关。其中起动开关、拖动开关中只配置起动回路开关，开关断口两侧不配置接地开关，二次控制部分多集成在发电机断路器的控制柜中，不设置独立的LCP柜；起动母线分段隔离开关中配置起动回路开关和两组接地开关，接地开关配置在隔离断口两侧，设置独立的LCP柜。在工程应用中，以立式结构和卧式结构产品为基础，依据工程需求进行相应配置。

关键技术

1. 绝缘可靠性设计

电机起动回路开关装置主要以空气为绝缘介质。在研制过程中，主要考虑空气条件下主回路与支撑座、箱体侧壁之间距离，以及起动回路开关断口间的距离和触头形状。并用仿真软件对产品断口和主回路对地进行电场计算，通过多轮次优化设计，将断口间和主回路对地的电场降到合理区间，满足设计要求，保证产品在运行状态的电气可靠性。电机起动回路开关装置作为起动开关应用时，需要具有开断容性电流的能力，因此引入了引弧结构。引弧结构使起动开关的触头形成了弧回路和主回路，为了保证在分闸过程中弧回路电场强度始终大于主回路电场强度，使电弧在弧回路上起弧，进行了动态电场分步计算，采用等步长计算，校核起动开关在分闸过程中的电场变化，优化相应结构，以避免在开断过程中电弧由弧回路转移到主回路上烧蚀主回路的触头。不同位移条件下的电场强度云图如图3所示，其相应位置的断口间，弧回路最高电场强度始终大于主回路的最高电场强度，从而确保在容性电流开断过程中避免主触头起弧，能够有效提高起动开关的电气使用寿命。

2. 主导电回路设计与校核

根据抽水蓄能电站开关设备的需求，电机起动回路开关装置具有额定电压低、载流能力强及动热稳定参数高的特点。由于空间限制产品的尺寸不能太大，因此为了缩小单极主回路结构尺寸，断口间和主回路对地以空气为绝缘介质，通过电场仿真计算和温升仿真计算进行优化，使单极箱体尺寸最小化，减小产品整体占用空间，满足电力产品小型化、节能及环保的发展需求。

（1）温升计算

电机起动回路开关装置的额定电流为4 000 A。

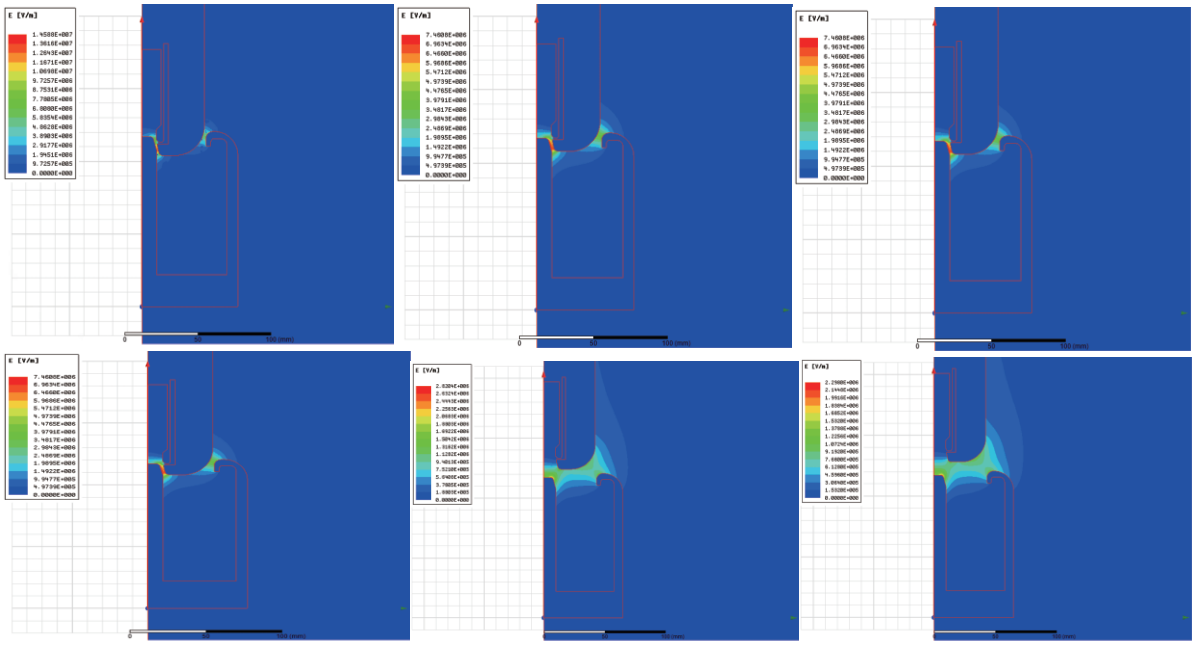


图3　不同位移电场强度计算云图

由于导体载流产生欧姆加热，并且工频下存在涡流效应，需要考虑在金属材料的发热作用下，电流从中心导体一端流入，从另一端通过箱体回流。箱体内部空气热传导、热辐射，箱体自身发热、导热，最终散失到空气中。采用电磁场、流场和热场耦合仿真计算，模拟实际温升工况。 温升仿真云图如图4所示。动触头温升最高，小于65 K，满足GB/T 11022—2011《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》。

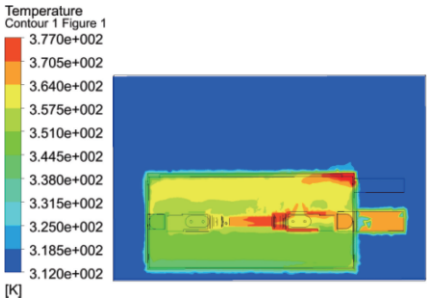


图4　温升仿真云图

（2）动热稳定核算

电机起动回路开关装置的额定短时耐受电流为160 kA/3 s，额定峰值耐受电流为480 kA。该产品通流导体尺寸小，但要承受较大的热冲击和电动力冲击。为了保证产品的动热稳定性能，静侧触指采用触指栅结构，并对最薄弱的触指和触头环节进行校核计算。

1）动稳定校核。动稳定主要考察在短路电流（峰值）下，产品承受短路电流（峰值）电动力的能力。在通流的各个环节中，动静触头的接触点为整个系统中最薄弱的环节，针对动静触头接触点进行动稳定校核，计算结果满足设计要求。

2） 热稳定校核。热稳定主要考察载流导体通流截面在额定短路电流下短路电流持续时间内的热容量承受能力。在通流的各个环节，针对最小截面位置的导体和触指进行热效应校核，计算结果满足设计要求。

3. 操作机构及传动结构设计

电机起动回路开关装置动触头系统采用曲柄滑块结构设计。依据触指与动触头之间产生的正压力得出摩擦力。通过仿真软件计算可得每相转矩，通过各传动环节的归算得出操作机构输出转矩，据此进行操作机构的选择。

根据运动过程中的动力学仿真，计算出各轴销运动过程中的最大力值。以各轴销所承受力值为输入进行静力学分析，对起动开关各环节进行强度计算，应力计算结果小于材料的屈服强度，计算结果满足设计要求。

型式试验

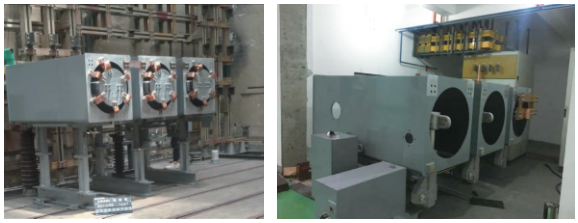
该产品严格按照国家标准GB/T 11022—2011《高压开关和控制设备标准的共用技术要求》、GB/T 1985—2014《高压交流隔离开关和接地开关》及用户技术文件等要求，在国家高压电器质量监督检验中心完成了全套型式试验项目。

1. 绝缘试验

根据产品的功能，充分验证产品的每种工况，顺利完成了标准要求的绝缘试验以及2500 m高海拔修正试验；断口工频耐受电压标准要求由80 kV修正到96 kV；雷电冲击耐受电压值由145 kV修正到176 kV。

2. 动热稳定试验

由于试验参数比较高，现有试验条件无法满足，故动稳定试验和热稳定试验拆分执行，如图5所示。动稳定试验电流峰值达到480 kA，需要承受超大的电动力，因此试验工装需要考虑电流输入侧和三相短接侧接线铜排对电动力的分解，避免由于接线铜排布置不合理，电动力对主回路强度产生影响；热稳定试验参数为160 kA/3 s，试验进出接线铜排的最小通流截面积和接触面积须满足电流密度要求。



a）动稳定试验　　b）热稳定试验

图5　动热稳定试验

3. 温升试验

温升试验样机箱体两端封闭，产品在最严酷的环境下通过了起动电流6 000 A/起动时间50 min；长期温升试验电流4 000 A。

4. 机械寿命试验

产品在未进行任何维护的情况下，一次性通过了10 000次机械寿命试验（卧式/立式结构）。试验形态如图6所示。

工程应用

研发成功的电机起动回路开关装置具有载流能力强、可靠性高及绝缘性能好等特点，深受用户的青睐。目前该产品已在某抽水蓄能电站进行首台（套）示范应用并已投运，如图7所示。

a）卧式结构　　b）立式结构

图6　机械寿命试验照片

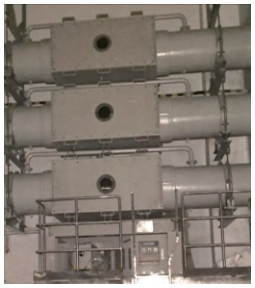


图7　首台（套）示范应用调试完成产品

结束语

综上所述，通过电机起动回路开关装置的成功研制，掌握了该类产品的关键技术，并为研制小尺寸导体、高动热稳定参数开关产品奠定了基础。通过该产品在某抽水蓄能电站首台（套）示范应用，开展了其大批量生产、制造、现场安装、调试、试验及运维等方面的研究，为我国抽水蓄能电站建设和后续稳定运行提供了有力保障。EA

（收稿日期：2022-09-30）

参考文献

[1] 宋旭东，陈小军，顾博川，等．基于一二次系统融合的高压开关柜智能运行研究[J]．电气应用，2020，39(12)：50-54．

[2] 吴昊，韩浩江，柴 俊，等．基于变电站开关柜的三相交流电相位核序方法[J]．电气应用，2021，40(7)：88-92，102．