[抽水蓄能电站]

国产抽水蓄能机组成套开关设备的发展

文/张会杰　程　立　张　鑫　麻强强　张小明　程小红
西安西电开关电气有限公司

介绍了抽水蓄能机组成套开关设备中存在的问题及在实际运行中的功能需求，以及国内外抽水蓄能机组成套开关设备发展现状，从技术参数、结构特点及成套供货能力等几个维度对国内外产品进行了对比分析。

抽水蓄能电站具有调峰、调频、调相、储能、系统备用和黑起动等多种功能，是当前技术最成熟、全生命周期减排效果最好且具备大规模开发的主要调节电源，与风电、太阳能发电及核电等能源配合效果较好。近年来，国内风电、太阳能发电等新型能源的快速发展给抽水蓄能电站的发展带来了契机。同时，抽水蓄能电站在全国范围的大规模建设，为国家“双碳”目标的实现奠定了坚实的基础。

抽水蓄能机组成套开关设备包括发电机断路器、起动开关、拖动开关、电气制动开关、相序转换开关和起动母线分段隔离开关等。目前，我国抽水蓄能电站都是采用进口开关设备，存在采购周期长、采购价格高及售后服务不及时等问题。为解决这些问题，亟须研制国产抽水蓄能机组成套开关设备。

抽水蓄能机组成套开关设备介绍

抽水蓄能机组成套开关设备作为抽水蓄能机组的核心设备，承担抽水发电两种功能，与常规水电站所用的开关设备相比，对电气及机械性能、可靠性和使用寿命等提出了更高要求。抽水蓄能机组成套开关设备接线图如图1所示。

（1）发电机断路器

发电机断路器设置在抽水蓄能机组发电电动机组与升压变压器之间，除在抽水和发电工况承载大电流外，还可以用来开断系统源与发电机源短路故障，保护发电电动机组与变压器可靠运行。在一些特殊工况下，发电机断路器还须具备低频开断、励磁电流开断的能力。

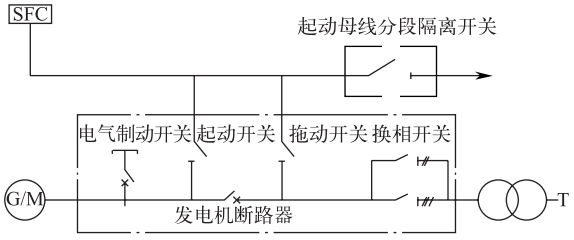

图1　抽水蓄能机组成套开关设备接线图

（2）起动开关与拖动开关

大型抽水蓄能电站的发电电动机普遍采用静止变频器（SFC）起动为主，背靠背（BTB）同步起动为辅的起动方式。BTB起动是指利用本电站的一台机组暂时以发电工况起动另一台抽水工况机组，这里的起动指的是机组抽水工况的起动过程。在SFC起动过程中，会用到起动开关；在BTB起动过程中，会用到一台机组设备的拖动开关和另一台机组设备的起动开关，同时需要在拖动开关的进线侧进行换相。起动开关和拖动开关工作电流较小，为短时、反复工作制。

在现行主流产品中，起动开关与拖动开关会集

成到发电机断路器中，该布置方式可节约开关设备的占地面积、离相封闭母线（IPB）的用量，结构也更为紧凑。

（3）相序转换开关

相序转换开关装置是实现发电与抽水功能转换的专用设备。该装置通过改变水轮机组出口三相母线的连接方式，达到对蓄能机组相序调整的目的，进而实现发电工况和抽水工况的转换。

（4）电气制动开关

在机组停机过程中，电气制动开关将机端短路的开关装置，利用同步电机的电枢反应，在发电电动机的转子灭磁以后使定子三相短路，同时给转子线圈提供励磁电流，使其产生与惯性作用方向相反的制动力矩。这样有利于发电电动机快速通过低转速区，减少推力轴承磨损，大大提高机组自动化水平，并减少检修和维护工作量。

（5）起动母线分段隔离开关

起动母线分段隔离开关用在SFC或BTB起动过程中，在实际运行中操作次数较少，但在一些特殊工况下，所需承受的额定短时耐受电流与峰值耐受电流值较大。起动母线分段隔离开关两侧带有接地开关，一般是立式布置的结构。

国外抽水蓄能机组成套开关设备介绍

抽水蓄能机组成套开关设备为多种开关的组合成套装置，由于其适用工况复杂，对设备的技术要求高，目前国外只有ABB、AE Power、GE和Siemens等几家公司能够生产。

（1）ABB抽水蓄能机组成套开关设备

瑞士ABB公司能够生产抽水蓄能机组用的发电机断路器、电气制动开关及相序转换开关等产品。其中，发电机断路器采用集成起动开关和拖动开关布置方式，断路器以SF_6作为绝缘和灭弧介质，起动开关和拖动开关以空气作为绝缘介质；相序转换开关采用三相五极结构，上下两侧布置；电气制动开关以发电机断路器替代。ABB还不能提供起动母线分段隔离开关。

（2）AE Power抽水蓄能机组成套开关设备

日本AE Power公司能够生产抽水蓄能电站所用发电机断路器、电气制动开关、起动开关、拖动开关及起动母线分段隔离开关等产品。其中，发电机断路器与起动开关、拖动开关采用分体式布置结构，起动开关与拖动开关布置在IPB分支母线上。这种布置方式占地面积较大，需要单独为起动开关与拖动开关设置底架。相序转换开关采用三工位结构实现换相。电气制动开关有两种结构，一种是以发电机断路器为基础；另一种是将电气制动开关断口封装在封闭母线中，起动母线分段隔离开关采用立式布置结构，两侧带接地开关。

（3）其他公司抽水蓄能机组成套开关设备

美国GE公司与德国Siemens公司能够生产抽水蓄能机组用的发电机断路器、电气制动开关和相序转换开关，但在国内抽水蓄能电站中使用较少。

相同的是，两家公司的发电机断路器都是采用集成起动开关与拖动开关的布置方式，相序转换开关都是采用三相五级结构。两家公司都不能提供起动母线分段隔离开关。

不同的是，GE公司的发电机断路器与电气制动开关以SF_6作为绝缘和灭弧介质，Siemens公司采用的是真空断路器与真空电气制动开关。

我国抽水蓄能机组成套开关设备介绍

我国市场上的发电机出口断路器有真空发电机断路器和SF_6发电机断路器两种类型。

真空发电机断路器受自身技术及结构特点制约，性能指标提升空间受限，目前额定电流达到6 300 A，额定短路开断电流达到80 kA，只适用于100 MW以下容量的机组。

目前火电机组、核电机组、常规水电机组及抽水蓄能电站机组的容量不断增大，真空断路器已不能满足大机组容量需求，而SF_6发电机断路器具有通流能力大、开断能力强的特点，已成为发电机出口断路器的主流产品。

（1）发电机断路器成套装置

国产抽水蓄能机组发电机断路器有两种布置方式：一种是集成式布置；另一种是分体式布置。集成式布置是将发电机断路器、起动开关、拖动开关和接地开关设置在同一箱体内；分体式布置是将发电机断路器、起动开关及拖动开关单独布置，有独立的箱体与底架结构。两种布置方式如图2和图3所示。

产品整体采用自然冷却的方式。两种布置方式中的断路器均以SF_6作为灭弧与绝缘介质，灭弧室采

用自能式灭弧原理，有效降低了操作功，解决了各种能量的短路电流的开断问题。产品配液压弹簧机构，传动方式为三相机械联动。

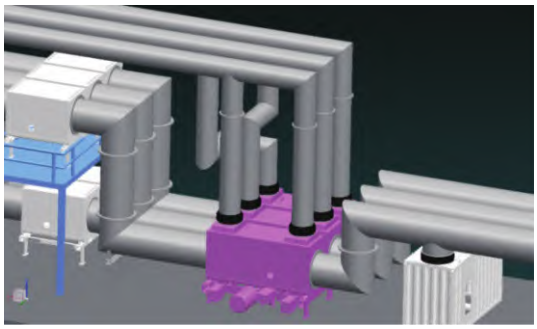

图2　集成式布置的发电机断路器

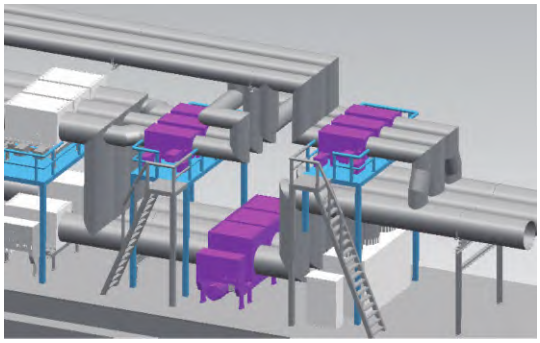

图3　独立式布置的发电机断路器

发电机断路器具有结构可靠和机械寿命长等特点，并具备低频开断、励磁电流开断的能力。

（2）起动开关与拖动开关

国产起动开关与拖动开关采用卧式布置结构，如图4所示，以空气作为绝缘介质，配电动操作机构，三相机械联动。起动开关具备一定容性电流开断能力。

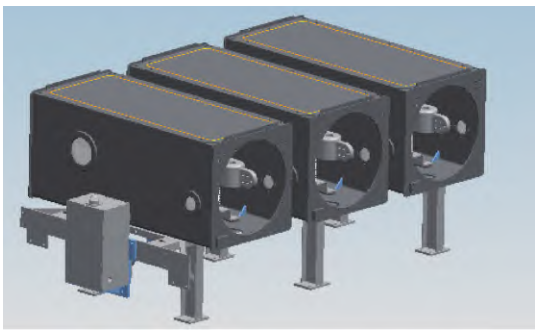

图4　起动开关与拖动开关

（3）电气制动开关

产品为三相共箱结构，即三个单元封闭在同一金属箱体内，如图5所示。产品内绝缘采用SF_6气体绝缘，相与相之间采用空气绝缘，能够有效缩小单极尺寸以及整体结构尺寸。采用空气和SF_6混合绝缘、散热的布置方式，能够有效降低SF_6气体的使用量，减少排放，满足环保型产品的要求。三极配用一台弹簧操作机构。

图5　抽水蓄能机组电气制动开关

（4）相序转换开关

产品为三相五极结构，由五个单极组成，如图6所示。整体结构为两层，可以上层两相下层三相，也可以是上层三相下层两相，共用相可以选择其中任何一相。上下两层分别固定在各自底架上。在三相布置一层中，相序开关两侧会带有接地开关，相序转换开关和接地开关采用空气绝缘介质。相序转换开关和接地开关配用电动机操作机构，每个单极的相序转换开关单独配置电动操作机构。

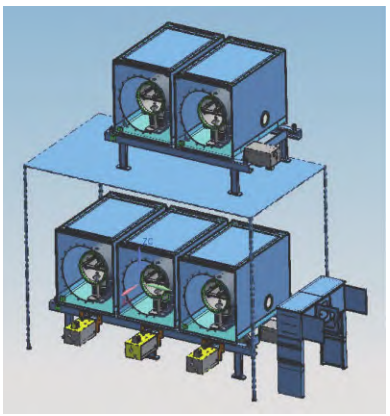

图6　相序转换开关

（5）起动母线分段隔离开关

产品采用立式结构，如图7所示。两侧带有接地开关，隔离开关与接地开关均以空气作为绝缘介质，配电动操作机构，三相机械联动。额定短时耐受电流达到160 kA/3 s，峰值耐受电流达到480 kA。

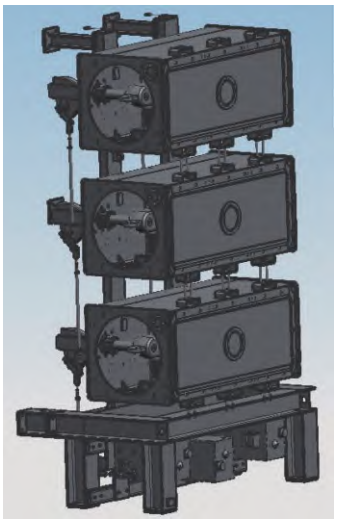

图7　起动母线分段隔离开关

国内外产品对比

从技术路线、产品结构、智能监控系统及成套供货能力四个维度对国内外抽水蓄能机组成套开关设备进行对比分析。

（1）技术路线

真空发电机断路器受自身技术及结构特点制约，性能指标提升空间受限。想要提高真空发电机断路器的额定电流与额定短路开断电流，需要将其进行并联，每相可能会有二三个并联的真空断口，但断口并联会出现如何分流的问题，同时成本会增加，产品的可靠性会降低。

SF_6发电机断路器具有通流能力大、开断能力强的特点，已成为发电机断路器的主流产品。

西开研制的抽水蓄能机组成套开关设备具有以下特点：

1）发电机断路器电寿命达到8次，高于最新标准要求（4次）；发电机断路器额定电流在自然冷却条件下达到15 000 A。

2）起动开关具备容性电流开断能力。

3）相序转换开关额定电流达到17 500 A，额定峰值耐受电流达到390 kA，额定短时耐受电流达到130 kA/3 s。

4）抽水蓄能机组成套开关绝缘水平满足3 000 m海拔使用要求。

（2）产品结构

国产发电机断路器可以根据用户需求及工程实际情况，采用集成式布置或分体式布置；国外公司产品只提供一种布置方式。

西开研制的发电机断路器都安装有压力释放装置，产品的防护措施更为安全可靠，当断路器气室内的气体压力超过阈值时，可以通过此套装置释放压力，再加上产品箱体外壳的保护，不会对人员造成直接伤害。

（3）智能监控系统

对高压开关设备实施状态监测和故障诊断，掌握其运行特性及变化趋势，对提高运行可靠性极为重要。美国50%以上的电力公司已经对高压开关设备实施状态检修，但在发电机断路器监测方面尚无应用。ABB公司的相关产品实现了对发电机断路器气室压力、温升和机械特性的监测，但缺少诊断分析功能。在国内，平高电气、思源电气及山东泰开也相继开发了开关设备状态监测应用软件，监测参量主要包括机械特性、气体状态及局部放电等内容，但在发电机断路器监测方面尚无成果。

研制的抽水蓄能机组成套开关设备可以配套安装智能监测设备，对开关设备的机械特性、SF_6气体状态、温升及隔离开关断口状态等进行实时监控。再通过专家诊断系统，对采集的数据进行状态识别、故障预测与综合评价，判断设备的运行状态，为设备的日常运维检修计划提供辅助决策，以提升设备的运行可靠性，降低设备的运维成本，实现智慧运维。

（4）成套供货能力

国内厂家能够提供抽水蓄能电站所需的全套开关设备，ABB、GE及Siemens不能提供起动母线分段隔离开关。

结束语

在实现“双碳”目标，加快能源绿色低碳转型，构建以新能源为主体的新型电力系统的新形势下，抽水蓄能电站必将迎来快速发展机遇。抽水蓄能机组成套开关设备作为抽水蓄能电站的核心设备，一直以来采用的都是进口设备，成为制约抽水蓄能电站发展的主要因素。随着国产抽水蓄能机组成套开关设备的研制成功，这一问题将会得到逐步改善。EA

（收稿日期：2022-08-29）