

[开关设备]

国产大容量发电机断路器的发展与应用

文/张 鑫 程 立 何晨光 麻强强 张小明
西安西电开关电气有限公司

介绍了发电机断路器的作用，特别是应用于200 MW以上机组，对额定短路电流100 kA以上的国产大容量发电机断路器的技术发展情况与工程应用进行说明，并与国外技术进行对比。

发电机断路器作用

发电机断路器（GCB）是安装在发电机和变压器之间的断路器，可以高效地开断发电机电源和系统源短路故障，保护发电机和变压器，避免事故扩大。通过GCB可实现输电系统倒送电，减少厂用变电源和启动/备用变电源切换操作次数，保证厂用电系统稳定运行。简化运行操作规程，提供低电压并网点，快速切断失步故障，与高电压并网点形成双保险。

国外发电机断路器技术发展

1969年BBC（ABB前身之一）研发出世界上第一台空气绝缘发电机出口负荷开关和断路器，1985年ABB公司推出第一台HE型SF₆发电机断路器。除ABB外，GE(ALSTOM)、三菱、西门子及AE Power等公司相继推出不同参数的发电机断路器系列产品。真空断路器在短路开断能力和额定电流能力有着短板，大容量断路器以SF₆断路器为主。国内第一台进口大容量SF₆发电机断路器为葛洲坝水电站1986年投运的ABB出产的HEK3型。迄今为止，我国大部分的电站都进口大容量发电机断路器，以ABB和GE（ALSTOM）为主。ABB在业绩和技术上独占鳌头，目前最大可提供2 000 MW发电机用SF₆断路器，其额定短路电流最高可达300 kA，额

定电流28 500 A，增强冷却型可达33 500 A，利用离相封闭母线纵向强制风冷可高达57 000 A。

国内发电机断路器技术现状及国内应用

1. 大容量发电机断路器技术难度

与普通断路器相比较，发电机断路器特点是低电压、大电流。通过GB/T 1984—2003《高压交流断路器》和GB/T 14824—2021《高压交流发电机断路器》对额定电压24 kV断路器的部分试验参数进行对比，见表1，不难看出发电机断路器额定电流和额定短路电流更大，额定短路电流直流分量和瞬态恢复电压上升率高。对现有的高压电器试验技术和灭弧室设计来说要求较高。

表1 参数对比表

	额定短路 电流I _{sc} /kA	额定电 流/A	直流分量 I _{DC} (%)	T100a RRRV / (kV/μs)
发电机断路器	63	6 300	75	6.0
普通断路器	63	6 300	52	0.47

发电机断路器动作频繁且因额定电流和额定短路电流较大，运动触头较大，需要高可靠的触头运动系统与配备大功率操动机构。对于机械可靠性要求高。

发电机断路器额定电流大，都是满电流运行，导体温度较高，对于绝缘件耐高温老化能力要

求高。

2. 国内技术发展

大容量发电机断路器技术及试验技术难度较大，我国在该领域内一直属于空白，直至2008年，西安西电开关电气有限公司开始立项研发ZHN10-24型大容量发电机断路器，于2013年按照GB/T 14824—2021《高压交流发电机断路器》完成了型式试验，产品外形图如图1所示。该产品为我国首次自主研发适用于600~800 MW发电机的大容量SF₆发电机断路器成套装置，拥有完全自主知识产权，填补了国内空白，使我国成为国际少数该类高端设备生产国家之一，其综合性能达到国际同类产品的先进水平。



图1 产品外形图

该产品研发过程中，针对发电机断路器领域内大电流短路、电流耐受、开断关合、高性能绝缘及导电材料等技术从零开始逐项突破。设计出具有自膨胀室和压气室双室结构的大容量自能式灭弧室，利用电弧能量热膨胀效应实现了超大容量短路电流的开断，同时小压气效应兼顾中小电流的开断要求。该灭弧室结构巧妙，充分利用电弧能量，大大降低了操作功，同时成功研制了环氧绝缘浇注件的耐高温工艺新配方，形成企业核心专有技术。在机械强度不降低的前提下，提高了绝缘子的玻璃化转变温度，在国内率先解决了环氧浇注件高玻璃化温度与高强度要求不能兼顾这一行业长期困扰的问题，成功研制了高导电率铸铝合金新配方，其导电率高于常规铸铝合金。

该产品断路器采用SF₆作为绝缘介质，膨胀室与压气式分立结构的自能灭弧室，隔离开关接地开关为空气绝缘，额定短路电流160 kA，额定电流27 000 A。2013年首次在向家坝水利发电厂投运四台，随后相继在溪洛渡水利发电厂、三峡水利发电厂、巴基斯坦K2K3核电站、乌东德水利发电厂、新疆准东五彩湾北一电厂及内蒙古朱家坪火电厂等电站投运，运行状态稳定。

2018年西安西电开关电气有限公司又完成了适用于400 MW以下机组用发电机断路器成套装置的研发，该产品额定短路电流100 kA，额定电流15 000 A，电寿命8次，机械寿命20 000次。满足在24 kV的3 000 m高海拔绝缘要求。并于2021年于西藏大古水电站和雅砻江杨房沟水电站投运。

2020年推出了抽水蓄能电站用发电机断路器（可集成起动隔离开关），起动隔离开关（可独立集成在发电机断路器内部）、换相开关、母线分段隔离开关、分支母线隔离开关及制动开关等抽蓄电站成套专用开关设备，两种典型布置结构的方案如图2所示。其中发电机断路器进行低频开断研究并通过试验，产品可以在20 Hz低频开断55 kA短路电流，满足抽水蓄能电站工况，已经供货梅州抽水蓄能电站。

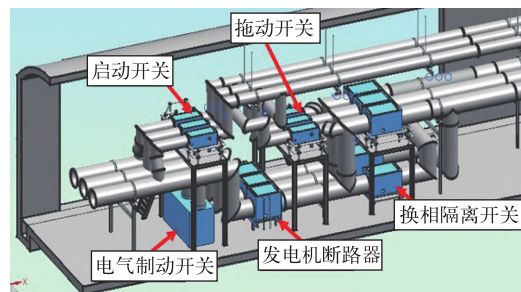
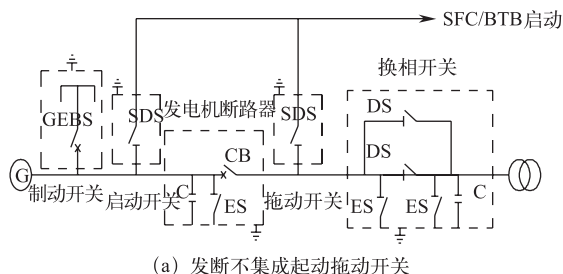
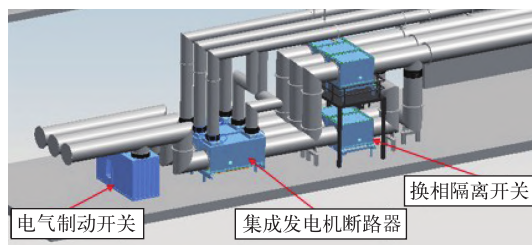
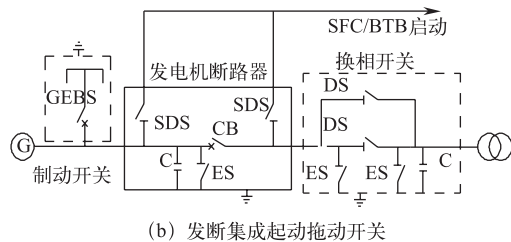


图2 抽蓄设备布置图

2021年完成燃机电站用发电机断路器成套设备的研发,该产品集成互感器、避雷器和启动开关(SDS),满足F级和H级机组的要求,主接线如图3所示,同时供货华能海南洋浦燃气电厂。

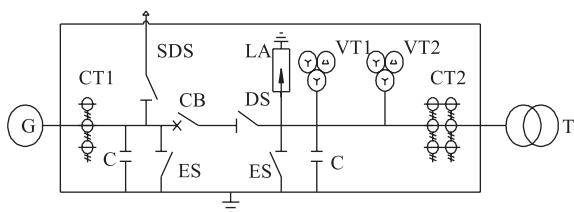


图3 燃机用发断主接线图

为满足800~1 000 MW发电机需求,2021年西安西电开关电气有限公司研发完成ZHN10-30型号170 kA发电机断路器成套设备,容量试验现场照片如图4所示。额定短路电流170 kA,额定电流28 000 A,电寿命5次。在研发期间大容量实验室为了提升试验能力,进行了国内首次发电机源短路开断试验,该产品能够开断135 kA非对称度130%的发电机源短路电流,产品满足G2级要求。

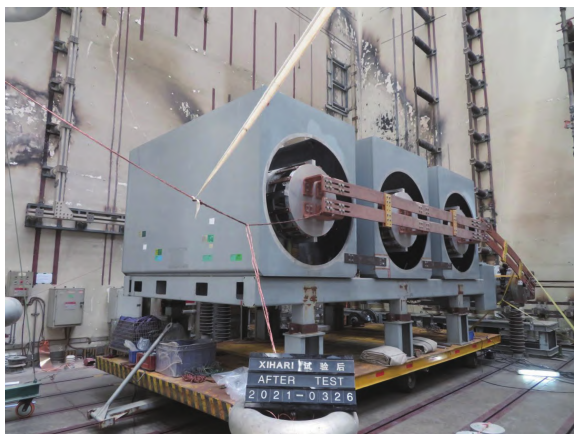


图4 试验现场照片

至此,国产发电机断路器满足核电站、水电站、火电站、燃气电站及抽水蓄能电站的工况要求。

目前西安西电开关电气有限公司正在研发用于更大容量的核电机组用发电机断路器,该断路器额定短路电流195 kA,额定电流离相封闭母线强迫风冷36 000 A,目前已完成大部分型式试验。

与进口设备对比

目前西安西电开关电气有限公司经过十余年的

不断研发,技术上、售后服务上具有明显的优势,主要优势为:

1) 电寿命试验验证。GB/T 14824—2021《高压交流发电机断路器》(以下简称《标准》)明确规定了电寿命为型式试验且满足4次开断要求。西安西电开关电气有限公司生产的160 kA和170 kA发电机断路器经过5次电寿命试验验证,100 kA发电机断路器电寿命高达8次,IEC-IEEE 62271-37-013—2015《高压开关设备和控制设备第37-013部分:交流发电机断路器》对于电寿命未强制要求试验验证。

2) 系统源非对称短路电流的直流分量大。额定短路电流一般由交流分量和直流分量组成,直流分量以一定的时间常数衰减。若触头分离时刻直流分量超过20%,则需考虑直流分量对开断性能的影响,称为非对称电流开断。对于非对称电流开断,短路电流中交流分量有效值相等的情况下,直流分量越大,非对称电流开断难度越大,也说明了产品开断非对称短路电流的能力越强。《标准》要求系统源非对称短路电流的直流分量大于75%,西安西电开关电气有限公司100 kA发断直流分量达82%,160 kA发断直流分量达86%,170 kA发断直流分量高达91%。

3) 安全防护措施更可靠。全系列断路器设置了压力释放装置,当断路器内气体压力超过压力释放装置的阈值时,装置动作释放气体,从而保护整套发电机断路器装置的零部件安全,完全避免内部压力过高产生的破坏性事故。

4) 绝缘裕度大。全系列产品满足高海拔绝缘要求,同时满足我国地理地貌需求。

5) 配置灵活。全系列产品可选配智能化监控元件、互感器及避雷器等元件,可对发电断路器实施SF₆气体状态、机械特性、导体温度及隔离触头位置等在线监测和故障诊断,检测明细见表2,通过故障诊断模型实施提前预警,提升发电机断路器设备的运行安全性,从而减少因为非停导致的经济损失,满足不同应用场景用户的需求。

国产产品主要面对国内用户,可以根据用户的不同需求,在保证性能和质量的前提下进行个性化定制和结构调整,适用于不同的工程。经过十余年的不断研发,目前国产设备能够满足国内火电站、

水电站、燃气电站、抽水蓄能电站及核电站的建设需求。

表2 智能监测明细

监测类型	监测量	监测目的
机械特性	触头位移	实现对分合闸时间、分合闸速度和分闸线圈电流以及机构异常报警监测
	电流	
SF ₆ 气体	露点、密度、气压及气体温度	SF ₆ 气体压力、密度微水历史及趋势显示及报警
导体温度	导体温度	一次导体温度历史、趋势显示及分析
电寿命	一次电流	电寿命测算
隔离触头位置	触头位置	同发电机断路器
发电机状态	电流	操作机构发电机电流状态曲线显示、异常告警

结束语

发电机断路器作为电站关键设备，在研发国产设备中不仅在发电机断路器产品方面积累了丰富的技术成果，而且为大容量试验室在试验回路设计、试验方法等方面积累了大量经验，同时为发电机断路器设备制造行业和大容量试验技术培养了一批专业的技术人才。相关技术成果和试验经验，将在系列化发电机断路器产品研发中得到进一步的推广和应用。EA

(收稿日期：2022-02-21)

参考文献

[1] 高压交流发电机断路器：GB/T 14824-2021[S].
[2] High-voltage switchgear and controlgear-Part 37

-013 alternating-current generator circuit-breakers；IEC/IEEE 62271-37-013—2015[S]
[3] 赵力楠，元复兴，李鹏，等．真空发电机断路器国内外发展水平[J]．高压电器，2011，47(8)：80-84．
[4] 郭建仙，姜志成，郭航．大型单元接线火电机组无起/备电源起停技术研究与应用[J]．电气技术，2016(2)：102-104．
[5] 周道军．大型机组发电机断路器配置分析[J]．电气技术，2020(7)：102-105．
[6] 苏郁馥，赵力楠．发电机断路器的应用市场和产品开发[J]．高压开关行业通讯，2007(3)：1-2．
[7] 程立，朱琦琦，吕军玲，等．使用大容量发电机断路器的生命周期成本与收益分析[J]．高压电器，2013，49(8)：295-298．
[8] 高享想，纪祥贞，马健，等．大容量发电机断路器短路试验程序分析与讨论[J]．高压电器，2017，83(2)：172-177．
[9] 周道军．大型机组发电机断路器配置分析[J]．电气技术，2016(2)：102-105．
[10] 赵庆斌，黄实，吴钊．发电机断路器非对称电流开断电流参数的计算与标准的分析[J]．高压电器，2013，49(9)：113-118．
[11] 王昱婷，郑馨怡，马斌．110 kV断路器控制回路存在问题分析及改造[J]．电气应用，2021，40(11)：50-55．

