

高压开关设备技术方向探讨

王晋根

近几年,随着我国电网新增装机容量的快速增长,输配电设备市场快速增容。但我国电网建设一直滞后于电源建设,电网与电源投资的比例为33%/67%,而国外为60%/40%,电网建设欠帐较多。这次拉动内需,国家对电网建设加大了投资,对改善这种状况具有积极意义。随着西电东送、区域电网联网、高压进城等工程的推进,加上全球大气温室效应提升,环境污染加重,电网建设对相关产品的技术水平有了新的要求。本文主要探讨高压开关行业的技术发展方向,以期起到抛砖引玉的作用。

特高压与超高压开关设备

1. 1100kV与800kV开关设备

2008年12月我国第一条交流特高压1000kV工业示范线路(晋东南-南阳-荆门)已成功调试运行近3个月,这标志着我国以交直流特高压为主网架的全国联合大电网工程建设拉开了序幕。

我国可开发水电资源约5亿多千瓦,但3/4分布在云、贵、川、藏西南地区。我国煤碳资源70%以上分布在新疆、陕西、宁夏、山西北部、内蒙西部等西北部地区,而负荷中心则多在东部的沿海地区,无论是西南的大水电开发,还是西北大型坑口煤电开发,都要涉及到西电东送,北电南送,涉及2~3千公里输送3亿kW以上的电力,500kV电压等级不可能完成这个任务,交流百万伏等级及 ± 800 kV特高压直流电网才能完成此任务。我国电网规划于2020年前需要建设53个交流特高压变电站、变电容量3.36亿kVA,线路长度4.45万km。已有消息称,第一条特高压线路投运后,往南会延长到长沙,往北

会延伸到陕、晋、内蒙西部等“火电三峡”煤电基地。我们国家第二条交流特高压输电线由淮南经浙江到上海的线路已上网工程招标,即将开发建设,据华东电网披露信息,长三角将建交流特高压环网。长江上游、支流大水电站将以多条 ± 800 kV特高压直流送到沿海地区。特高压开关设备市场估计在2009年将陆续起步。

前苏联埃基巴斯图兹-库斯塔奈约900多公里的1150kV特高压交流输电线路于上世纪80年代运行了5年多的时间,该线路变电站采用敞开式变电站,主开关采用压缩空气断路器,每相5个柱10个断口,整个变电站占地面积十分庞大,以埃基巴斯图兹为例,变电站占地高达58.76万 m^2 。我国是一个人口大国,山地又多,因此变电站只能发展全封闭组合电器GIS或HGIS(混合绝缘组合电器),全部采用GIS设备,则变电站的占地面积仅为常规变电站的1/4。

我国第一条示范线路的3个变电站,是采用GIS、HGIS(混合绝缘)的变电站。为了减少尺寸、简化结构,断路器除湖北荆门采用单相四断口外,均采用国际上最先进的单相双断口灭弧技术。

目前GIS国产化最薄弱的环节是液压操动机构及制造工艺。能提供百万伏级GIS的国内三大企业均或多或少与外国厂商(东芝、日立、ABB)进行了技术合作,真正做到自主品牌还有不少路要走。

750kV电压等级是西北电网主网架电压,第一条750kV线路已延长到西宁,由兰州东到银川东的第二条750kV输电线路已建成投运。西北电网已规划750kV区域电网,有22个变电站,38条线路;

陕西省、甘肃省已规划本省 750kV 主网架并抓紧实施。由于西北地区（含新疆）地处高原，受沙尘侵袭，与特高压一样 750kV 主网等级开关设备也是以 GIS 为主，一些平原地区也可采用 HGIS 或罐式断路器。

2. 550kV及363kV开关设备

500kV 电压等级在没有发展 1000kV 电压等级以前是西北电网以外各区域电网主网架电压，我国有几个区域电网如华东电网装机已超过 1 亿 kW，强化区域电网内部结构是必然趋势。前几年国产化未上来，加之进口比较多，因此国产化 GIS 装用量少，近两年由于 1000kV、750kV 电压等级带动，国产化 GIS 有了较大增长。由于我国高海拔、污秽、寒冷等恶劣环境影响及节省变电站占地面积需要，GIS 装用量要求比较多。在一些平原地区出于经济上考虑，罐式断路器及柱式 SF₆ 断路器也有需求。GIS (HGIS)、罐式断路器及柱式断路器装用比例约为 40%：30%：30%。

330kV 电压等级仅是西北地区电网电压，750kV 电压等级上来后 330kV 电压等级功能变为接受分配 750kV 输送来电能。由于西北多数为高海拔地区，沙尘也较多，一般电网多用 GIS、罐式断路器，用柱式断路器很少。由于国产化产品使用经验多，通常采用国产化开关设备较多。

超高压断路器多数用户愿用液压机构，气动机构只要解决好空气潮湿、噪音等问题，用户也愿意用的。

3.直流特高压换流站

由于直流输电没有系统振荡问题，比同样电压等级交流输电线路送得更远，电晕损失也小一点，线路绝缘要求比交流低（尤其是电缆），因此在远距离、大容量、点对点输电、区域电网间联网、孤立电网、海岛电网与大电网联网等方面可以发挥其优势。但直流输电难以降压、分叉、联网，换流站投资相当高限制了其更多发挥作用。我国已建、待建超特高压工程有十多项，如三峡到长三角，广东、华北与东北区域网间±500kV 背靠背联网，西北网、华中网背靠背联网工程（正扩建），正开工的±800kV 云广与四川（向家坝）上海间特高压直流，宁东

（宁夏）至山东±660kV 超高压直流工程，都是世界上最高直流输电电压。在超特高压换流站直流侧不可能装那么高的高压直流开关设备，一般是在交流侧装超高压断路器。从目前趋势来看，以采用 GIS、HGIS 为主，在直流回路（接近地侧）中，为控制直流输电运行方式，也装一些较低电压直流开关设备，当然这种开关技术要求较高，市场并不大，目前还是以进口产品为主。中国是世界上直流输电工程最多、电压等级最高的国家，但目前直流输电核心技术——换流阀还是依靠与国外厂商合作，国产化还有不少路要走。

高压开关设备

高压领域内，110kV、220kV 电压等级在省网中是二次输电电压，是将 500kV 或 330kV 输电线电能再转送出去，在负荷大的大中城市直接参与配电。在域网中，SF₆ 断路器及 GIS 开关设备是无法取代的产品。SF₆ 有优良的绝缘性能和开断能力，目前还没有找到一种可以取代它的介质。在抵御苛刻环境、建水电站和大型火电厂及高压进城时，要求采用尺寸小、抗苛刻环境要求时，非 GIS 莫属。而且 GIS 重心低，抗震能力强，在较高地震影响区域将更多地受到青睐。为了降低设备的造价，SF₆ 断路器的组合电器将会更多地被采用，预计 GIS 在高压开关设备中的比重将会达到 50%以上。

前几年在高压 SF₆ 断路器中，自能灭弧和弹簧机构是比较热的，一些单位争相开发。自能灭弧是利用短路电流电弧本身能量帮助熄灭电弧，操作功要求小，因此弹簧机构有可能从中压延伸到高压。但利用喷口阻塞效应，热膨胀原理熄灭电弧能力与短路电流大小有关，电流小时开断性能不好，燃弧时间特长，甚至开不断（需加装压气装置），而短路电流特别大时，灭弧室承受应力特大，开断也不稳定。而且自能灭弧断路器最小开距增大，最小燃弧时间增长，平均燃弧时间提高。只有不太小也不太短路电流开断比较有利，至于高压弹簧机构国内工艺材料适应不了，特性分散性大，不稳定事故率高，一些用户不放心。因此不少用户 252kV SF₆ 断路器指名要进口液压机构或液压弹簧机构，要花不

少外汇。有一个厂家 252kV SF₆ 自能灭弧断路器配国产弹簧机构，好不容易短路开断电流达到了 50kA，指称已达到世界先进水平，但就是卖不出去。后来买进口液压弹簧机构重做试验才进了市场。今后不光要开发自能灭弧 SF₆ 断路器，也应开发压气式 SF₆ 断路器，以适应小电流开断及大短路电流开断，并提升国内工艺材料水平，开发液压弹簧机构，以适应市场需要。

行业内一些专家呼吁开发 126kV 及以上真空断路器，并已开展了多年工作，有的厂进口了日本真空灭弧室生产了一些 72.5kV 及 126kV 真空断路器，其技术前景如何呢？一些高校研究表明，真空灭弧开距增加，电弧控制难度增加，电弧会弯曲，轴向长度增加、散热困难。日本学者认为大额定电流用常规方法解决不了，机械强度要求高，户外断路器的绝缘也不好解决。另外电容电流开断、小电感电流开断等对电压敏感的开断也有挑战性。

目前，在额定电流不大、短路开断电流 40kA 及以下条件下，单断口 126kV 技术上是可行的，但成本比 SF₆ 高得多，200kV 单断口为时尚早。至少在近 5 年内 126kV 真空断路器要完全取代 SF₆ 断路器是不现实的。

在中西部地区，为了降低造价、减少变电站占地面积，在丘陵及平原地区，老变电站改造等需要敞开式组合电器或手车式组合电器。如 ABB 的以 SF₆ 断路器为基础的 COMPASS 型组合电器很受欢迎。对 126kV GIS 不仅要考虑尺寸大小而且要考虑有多少绝缘裕度、可靠性。三相共箱式，无论是开断还是绝缘都有相向影响问题，因此有的用户宁愿采用三相分箱式。据说有的国家开发的 GIS 小型化水平很高，但是国内用户不买最小的 GIS，而是采用国内生产裕度较大、尺寸稍大的 GIS。看来一味强调 GIS 小型化牺牲可靠性，并不一定是上策。

高压、超高压隔离开关

隔离开关由于结构简单、价格低并未引起厂家和用户的重视，而且由于以往电网中大量使用事故率较高的油断路器和液压机构，因此隔离开关质量问题并不突出。随着高压断路器无油化发展，高压



断路器质量和运行可靠性显著提高，高压隔离开关运行质量问题日益突出。

隔离开关是高压开关的主要品种之一，主要功能是使被检修设备和人员隔离带电设备和电网；其次是“倒闸作用”，即改变运行及待运行变电站及电网的接线方式。某些隔离开关还可以开合母线环流、切母线小电容电流、切线路小感应电流及关合短路电流等。隔离开关承担着保护被检修设备和人员的责任，隔离开关本身有故障，只能停运部分变电站及线路来处理或更换隔离开关而造成严重停电损失，因此高压隔离开关安全性和可靠性显得十分重要。

1. 户外隔离开关

户外高压隔离开关主要存在以下三个方面问题：

- (1) 适应苛刻环境条件能力差，机构及传动零部件生锈、腐蚀，使隔离开关操作不动，或合分不到位，造成严重事故。
- (2) 导电零件、触头因氧化、污秽等原因接触不良，使负荷能力显著下降，甚至只能承受额定负荷电流的 50%。

(3) 大量高压、超高压隔离开关已运行 20~30 年或更长时间，已超过使用寿命，产品老化，使可靠性显著下降，发生支柱瓷绝缘子断裂，运行中隔离开关自动分闸等严重事故，造成重大经济损失和

社会影响。

另外, 2008年初南方大范围冰冻雨雪灾害, 户外隔离开关普遍存在破冰能力差的问题。

当前隔离开关首先要解决适应酸雨、灰沙等防腐措施, 重要结构、传动件应采用不锈钢、镀厚锌措施。外露触头应有防尘及破冰能力, 并有自清扫能力。

为了减少隔离开关占地面积, 在超特高压隔离开关中应开发完善水平或垂直伸缩式, 也有用户需要垂直剪刀式。对于机械稳定性要求高及变电站接线需要, 也有采用双柱式或三柱式结构的。

2. GIS隔离开关

随着GIS在高压、超高压领域使用比重提高, GIS隔离开关使用量不断增加, 对于GIS隔离开关, 首先要满足尺寸要求及电场对整体结构的要求。对于超高压GIS隔离开关(如550kV、800kV), 由于开断母线小电容电流可能引发超瞬态过电压, 在中国有的核电站已发生过变压器损坏事故, 应模拟实验方法, 改进开断特性, 提高限制过电压措施。

对于三相共箱式126kV及以上GIS, 为优化结构, 减小尺寸, 国内外都在研究开发具有三工位GIS隔离开关, 也就是把隔离开关与接地开关结合在一起。有的厂为了满足小型化要求, 委托国外公司开发, 这无疑提高了产品成本。

中压开关设备

随着全球大气温室效应提升, 环境污秽加重, 城市化和人口密度增加, 对中压开关设备提出了更高要求, 可从以下几个方面来探讨。

国网公司近年来事故率统计中, 较高的是绝缘事故, 占53.2%, 障碍率最高的是漏气, 占14.9%; 其次是拒合、拒分, 主要表现为机械障碍; 而开断关合故障很少, 占3.2%, 主要是老旧断路器。绝缘事故中, 主要形式有柜内放电、CT闪络和相间闪络三种, 原因是断路器与开关柜不匹配, 绝缘尺寸不够, 隔板及绝缘件吸潮。因此, 减少事故率是中压开关的主要发展方向及应解决的问题。

中压开关设备一般包括一次、二次配电设备和控制设备。高压降压变电站侧一般是中压配电的首

端, 其功能是对降压后的电能进行第一次分配, 一次中压配电设备是指其位置是在高压(110kV、220kV)变电站降压侧或中压配电设备距离高压降压变电站近或较远的地方。

我国有些地区的供电部门规定, 一、二次配电以12kV配电变压器1000kVA容量为界, 1000kVA以上为一次配电, 主元件采用断路器, 而1000kVA及以下为二次配电, 除总开关采用断路器外, 分支开关一般采用负荷开关或负荷开关+熔断器, 控制柜采用接触器或接触器+熔断器。

一、二次配电设备的性能参数、配电方式、配电设备的配置有较大的差别。二次配电开关设备数量特别大, 其数量约为一次配电开关设备的6~7倍。以往我国二次配电与一次配电一样也用断路器, 但变压器内部故障要求全开断时间小于20ms, 否则变压器有爆炸危险, 而断路器全开断时间通常为50~60ms, 满足不了要求, 因此系统中时有变压器爆炸。改革开放以来, 采用负荷开关加限流熔断器的方式日益增多, 限流熔断器开断时间可以小于10ms, 具有明显优势, 通常“负荷开关加限流熔断器”价格小于断路器, 因此, 负荷开关、熔断器需求量日趋增多。由于配电箱小型化又适应苛刻的严酷环境条件和可靠性要求, 二次配电设备中C-GIS及三工位SF₆负荷开关趋旺, 而真空负荷开关由于没有可见隔离断口, 用户要求加装串接隔离断口(隔离开关), 而增加了柜子尺寸, 提高了成本而限制了发展, 压气式和产气式负荷开关由于开断能力差, 尤其是转移电流开断能力差, 目前仅在小容量及不重要的场合使用。

控制设备是指大型电动机启动操作或控制设备, 一般电压等级为3kV、6kV和10kV, 主要有接触器和熔断器FC回路柜、高压电动机起动机柜等。

以下就中压开关设备中, 产品和技术方面存在的主要问题及其应对技术措施, 初步归纳如下:

1. 40.5kV开关设备。目前我国环境条件日益严峻, 污秽、酸雨影响大, 特别是40.5kV开关柜事故比较严重, 绝缘等问题比较突出。甚至在正常工作电压下会有严重电晕放电。为此, 应改进电场、表面涂覆, 采用抗污秽能力强、尺寸小的固封真空灭

弧技术, 加强 C-GIS 等工艺、材料的研究与开发, 以减少故障率。

2. 真空是当前高压开关中性能最好的两种灭弧介质之一。在中压领域内, 中国市场的真空开关具有压倒性优势。真空开关有灭弧能力强、可频繁操作的优点。但在小电感电流开断时截流过电压、电容电流开断时重击穿过电压方面, SF₆ 开关具有较好的性能, 这是真空开关难以代替的。解决小电流开合问题可用真空同步开关, 但要注意其可靠性。

总之, 从绝缘介质角度来看, 空气廉价, 到处都有, 但易受环境影响; 固体绝缘和复合绝缘尺寸小、价格高, 但有老化不利的一面, 只要老化寿命不小于产品寿命即可。真空绝缘性能好, 但要创造较大空间较高真空度也有困难。可以说, 中压领域以真空为主, SF₆ 和真空应在各自领域内发挥作用。

3. 固封极柱真空断路器由于绝缘可靠性高、尺寸小, 特别是在 40.5kV 及 24kV 中得到了满意应用, 深得一些用户欢迎, 其市场以较快速度发展。实际上这不是最新技术, 国外有的公司在 20 年前已开发成功, 当然这一产品由于成本高, 工艺技术复杂, 实现自主工艺有不少困难。厦门 ABB、厦门华电都是邀请外国专家开发设计浇注工艺, 自己浇注的。如果自己不上浇注工艺, 而购买其他厂家的固封真空极柱, 其价格就是难以逾越的障碍, 也就难以参与规模化市场竞争。

4. 中压控制设备

中压控制设备与低压控制设备不同的是电压高, 控制对象的负荷比较大, 控制设备电寿命高, 适于频繁操作 (如几十万次、上百万次电寿命)。在控制设备中磁吹空气式、油式在高压中已不用了, 最新一代控制设备都用 SF₆ 和真空介质。国内多用真空, 除非随成套设备进口会用 SF₆。高压接触器在高压开关中统计数量较少, 在高耗电领域内, 如冶金、钢铁、石化、矿山等使用较多, 目前发电厂用 FC 回路柜用得较多, 其他行业也可能用负荷开关等代替。

5. 永磁机构也是一些厂家极力推崇的操动机构, 由于永磁机构操作功小, 机械寿命长, 在一些频繁操作场所优越性明显。实际上永磁机构也是一种特殊的电磁机构, 需要比弹簧机构容量更大的操作电

源。对这种操动机构, 用户有一个接受过程, 也有一个完善的过程。目前, 永磁机构的应用已经起步, 但不宜操之过急, 首先要把弹簧机构可靠性提高。

6. 固定柜与手车柜的发展趋势。目前 IEC 标准侧重于把标准立足于固定柜, 由于真空断路器、SF₆ 断路器易于维护, C-GIS、负荷开关柜 (环网柜) 得以大量应用, 因此固定柜相对手车柜来说, 其应用的比重正在上升, 特别是在 C-GIS、负荷开关柜和大电流的场合。当然手车柜尺寸小、检修方便, 适合于频繁操作, 更换易损件方便, 在有些场合还是难以替代的。总体上讲, 我国固定柜比例会逐步上升, 但手车柜相当长时间不会退出历史舞台。

发电机断路器与厂用电开关设备

1. 发电机断路器处于发电机与升压变压器之间, 平时用于发电机同期并网, 发生电网近发电机故障时可迅速切除发电机供给短路电流 (200ms 以内), 以避免对发电机造成机械损坏。在厂用电供给方面, 可以从发电机断路器外侧直接引入系统供给厂用电, 方便启动发电机。自从三峡水电站采用 ABB 发电机断路器后, 大型发电机装不装发电机断路器的争议已划上了句号。发电机断路器额定电压有 12kV、24kV、36kV, 其容量分三档, 即:

- 小容量为 4000A~8000A/40kA~100kA
- 中容量为 10000A~20000A/100kA~200kA
- 大容量为 20000A~50000A/200kA 以上

发电机断路器技术上的难点在于比普通断路器额定电流大的多, 短路开断电流特别大。散热不好解决, 短路电流非周期分量高 (由发电机供短路电流, 直流分量可达到 40%~50%, 甚至更高), 而由系统供给短路瞬态恢复电压上升率又特别高, 可达到普通断路器的 3 倍 (6kV/μs)。由于技术难度大, 国际上也只有极少数几家大公司 (如 ABB、阿海法等) 垄断性开发和生产大容量发电机断路器。上世纪 80 年代, 沈高曾从原阿尔斯通引进了压缩空气大容量发电机断路器, 由于价格高、占地面积大、噪音严重, 只生产几台就停了。小容量真空发电机断路器以西门子为代表, 此外, 北开、天水长开在引进西门子技术的基础上也开发了一些产品, 但多数

用户只认可西门子产品。总之，电力部门还是很需要发电机断路器的，但市场不是很大（国家限制中小火电厂建设，市场更小），技术门槛又特别高，国内只有极少数厂家可开发中小容量发电机断路器。

2. 故障电流限流器，是一种限制短路电流装置。当发生故障电流超过整定值时，它能在几个 ms 的时间内，实现限流或限流开断。目前，利用超导原理的电子式限流装置尚在研发中。

3. 厂用电开关设备是指电厂的自用电设备，如磨煤机、粉碎机、输煤机、风机、水泵等。这种开关设备额定电流不大，但短路电流很高，短路电流直流分量较高，一般入口用断路器柜，分支回路多用 FC 回路柜（接触器加限流熔断器）。

组合电器、复合电器、中高压开关站、变电站发展趋势

随着城市人口密度不断提高，城市用电密度快速增长，高压进城及苛刻环境的发展，特别需要发展一些小型化，且在工厂内预装了能抵御苛刻环境条件的组合电器、复合电器、开关站及变电站。这需要打破常规，改变原来电器专业分工界线，以适应这种趋势。

1. 组合电器与复合电器

组合电器是指组合在一起的各种元件，仍具有其各自独立的结构，复合电器是指一个元件兼有两个及以上元件的功能，但在结构上已无法独立。因此，复合电器更能减小尺寸，降低成本。如三工位 SF₆ 负荷开关是一种转动式结构，有三个工作位置，即闭合、隔离、接地，可具有负荷开关、隔离开关和接地开关三种元件功能，但结构上无法独立分开。

手车柜也可看作是断路器与隔离插头的复合电器。真空断路器的一体化弹簧机构，则是断路器本体与机构复合。开关元件在开关柜内布置方式有“正装”布置，如 KYN28A-12 中置柜，也有“侧装”布置，如 XGN15A-12 (F.R) SF₆ 负荷开关固定柜。一般“正装”布置检修调正方便，而“侧装”布置尺寸小，与母线接线方便一些。

2. 复合式真空断路器

真空断路器的多功能复合式结构，是国际上最

新发展动向之一。如西门子公司的 NXAair 中置柜，采用创新的 NXACT 型真空断路器，集开断、隔离、接地及连锁于一体。原 ALSTOM 公司的 VISAX 柜，通过真空断路器本体纵向旋转，实现开断、隔离、接地的三工位，并实现连锁。而日本日立、三菱公司则开发出四工位真空断路器，四工位是在真空灭弧室内完成。目前这些技术已开始商业化，将会引发中压成套开关设备革命性变化，值得我们关注。

3. 成套开关站与变电站

为了减小变电站的尺寸与体积，减少用户的成套困难，简化现场变电站装配与调试，降低变电站投资成本，用户特别希望制造厂能提供成套变电站，并且能在工厂内预先装配调整好。中压开关设备中的空气绝缘开关柜实际上就是最原始的中压开关站。随着制造技术的进步，成套开关站已发展到 SF₆ 气体绝缘 126kV 以上（到 1100kV）GIS，中压 C-GIS 开关柜。

在中压领域（52kV 以下），末端变电站还把变压器也组合进来，实现了在工厂里直接生产成套变电站即预装式变电站（箱变）的目标。一些国家已成功开发出 SF₆ 气体绝缘变电站，这种变电站有比较好的防火灾性能，体积小，方便在现场整体安装，特别适用于隧道、地下、高海拔、高寒等场合，因此也是变电站重要的发展方向。

4. 开关设备电子化、智能化、网络化二次系统发展趋势

随着传感器和信息技术的发展，传统的电磁式、机电式的控制、保护、计量装置及手动操作、人工读数的落后方式正被淘汰。而有各种电量、非电量传感器、计算机自动化显示数字信息及具有信息采集、记忆、逻辑判断、在线检测技术、远程自动执行指令的智能化功能，并有通讯功能、遥控、遥测、遥讯、遥调功能的系统自动化技术正在兴起。

智能化、自动化技术可以简化产品结构，提升输配电设备的成套水平、技术水平，提高产品质量及可靠性。未来产品尤其是高中压成套设备，二次系统集成化、综合化是提升产品技术水平的重要措施之一。