

# 国产高压交流隔离开关的发展和向特高压的跨越

钟振蛟

(沈阳高压开关有限责任公司, 辽宁 沈阳 110025)

Discussion of Development of EHV and UHV Disconnecter in China

ZHONG Zhen-jiao

(Shenyang High Voltage Switchgear Co. Ltd., Shenyang 110025, China)

摘要: 回顾了我国40年来超高压和特高压隔离开关的发展历程, 对国产超高压和特高压隔离开关的水平进行了综合分析, 指出了与跨国公司产品存在的差距, 并总结了发展的主要经验。

关键词: 超高压; 特高压; 隔离开关; 发展; 水平分析;

技术参数

中图分类号: TM564.1

文献标志码: B

Abstract: The development course of EHV and UHV disconnector had been reviewed since last forty years in China, and the levels of domestic disconnector were analyzed synthetically. Comparisons between domestic products and multinational products had been pointed out, and the basic development experience had been summarized, too.

Key words: EHV; UHV; disconnector; development; discussion of level; technical parameters

## 0 引言

我国于20世纪60年代中及70年代末已自主研发出363、550 kV超高压隔离开关, 历经40年的不断创新、发展, 如今已成功跨入特高压时期, 并正在向世界电力科技高峰1000 kV级迈进。超高压和特高压交流隔离开关的诞生和发展是自力更生和改革开放形势下自主创新发展我国输变电设备的缩影。

## 1 我国超高压交流隔离开关发展的回顾

### 1.1 60年代的良好开端

随着刘家峡大型水电站的建设, 为解决其电力送出问题, 我国建设了第1条330 kV输电线路(刘天关线), 西安高压开关厂(西开)和沈阳高压开关厂(沈高)承担了联合设计开关设备的任务, 于1966年研制成功GW7-330/1500型三柱式隔离开关, 1970年交付电网运行<sup>[1]</sup>。这条全部使用国产设备的330 kV输电线路于1972年6月建成投产<sup>[2]</sup>, 高压开关设备于1975年8月通过一机、水电两部联合鉴定。同时为了

适应刘家峡水电站利用导流洞建设开关站要求设备体积小、占地面积省的特殊需要, 还首创了ZH1-330型敞开式组合电器, 即利用GW7型隔离开关与电流互感器、电压互感器或电缆头进行各种有机组合, 从而使电站布置紧凑、节省造价。这种结构形式在世界上是绝无仅有的, 已发展成具有中国特色的新品种, 1978年获全国科技大会奖。此后, 还研制了多种型式的363 kV隔离开关, 在覆盖了陕、甘、青、宁4省(区)的西北330 kV电网建设中发挥了重要作用。

### 1.2 第1代国产550 kV隔离开关的诞生

随着我国电网的扩大, 1976年开始建设500 kV输电线路, 但是高压开关设备只能依赖进口。为了促进550 kV开关设备的发展, 1978年国家决定兴建1条用国产设备装备的500 kV输电线路——锦辽试验线段, 国家安排沈高和西开两厂为这条试验线路研制550 kV开关设备<sup>[3, 4]</sup>。1981年, 沈高提供了GW6-550型剪刀式隔离开关和JW2-550型接地开关, 西开提供了GW7-550型三柱式隔离开关。按照机械和电力两部协议要求, 产品额定电流2500 A、峰值耐受电流100 kA、短时耐受电流40 kA、3s。这批产品数量不多, 仅20余组, 但却开创了我国自主设计独立制造550 kV隔离开关的先河。1985年通过两部运行鉴定, 这可称为我国第1代550 kV隔离开关。在研制过程中, 进行了产品绝缘结构和机械受力研究, 攻克了铝合金导体设计制造、绝缘试验、无线电干扰试验及开合小电容电流试验等技术难题, 为今后发展积累了宝贵经验。1988年锦辽线国产设备同时获得国家科技进步一等奖及机械委科技进步特等奖。

### 1.3 20世纪末550 kV隔离开关跨入第4代

1984年, 当我国兴建元锦辽海线和晋京线时, 沈高在认真总结锦辽试验线段设备研制经验的基础上, 自主设计研制了GW6-550型单柱剪刀式隔离开关、GW12-550型双柱水平断口折叠立开式隔离

收稿日期: 2007-02-05; 修回日期: 2007-07-12

作者简介: 钟振蛟(1935-), 男, 高级工程师, 从事高压开关设计、研发及工艺制造工作。

开关及 JW4-550 型接地开关。按照协议要求, 额定电流为 3 150 A、峰值耐受电流为 125 kA、短时耐受电流 50 kA、3 s。由于额定电流增大, 隔离开关采用了双导电闸刀结构。鉴于当时国内还不能生产高强度 500 kV 棒式绝缘子, 所以因地制宜采用了由 4 节 110 kV 绝缘子叠装而成的 3 根支柱组成三角锥形的支架结构。这是我国第 2 代 550 kV 隔离开关, 共有 240 组应用在元锦辽海线、晋京线及吉林东丰、安徽洛河、山东济南、天津等地。1987 年 9 月通过两部联合运行鉴定。

与此同时, 西开和河南平顶山高压开关厂(平高)参照外国产品先后研制成功单柱垂直断口偏折式和双柱水平断口折叠立开式两种 550 kV 隔离开关和接地开关, 结构形式上有所突破。产品采用单列瓷柱、单臂齿轮传动折叠伸缩结构, 传动元件及平衡弹簧均放置在上下导电管内, 导电关节采用滚轮触头导电盘, 结构紧凑且外形简洁。西开的型号为 GW10-550/2500、GW11-550/2500 及 JW3-550, 1985 年首批供给葛洲坝大江电厂使用, 1989 年 4 月通过两部联合运行鉴定。平高的型号为 GW16-550/2500、GW17-550/2500 及 JW5-550, 最先应用于山东邹县电厂, 1990 年 11 月通过两部运行鉴定。

1988 年, 西安电瓷厂采用先进的等静压技术制造出抗弯 8~14 kN 的 500 kV 高强度绝缘子, 沈高随即将第 2 代产品的三角锥形绝缘支架用单列瓷柱代替, 实现了轻小型化。随着电网容量的扩大, 西开、平高经过试验和改进, 于 1987 年及 1994 年把各自产品增容到额定电流 3 150 A、峰值耐受电流 125 kA、短时耐受电流 50 kA、3 s。这便是第 3 代隔离开关。

为了配合三峡工程建设和适应电网容量扩大的需要, 进一步提高 550 kV 隔离开关的技术参数, 沈高和西开于 1999 年末通过改进结构将额定电流提高到 4 000 A、峰值耐受电流提高到 160 kA、短时耐受电流提高到 63 kA、3 s; 平高于 2001 年初通过开发新产品实现了参数的提高。研制出的国产第 4 代 550 kV 隔离开关已在“西电东送”及三峡外送工程中广为采用。

#### 1.4 21 世纪自主创新超高压隔离开关再上新台阶

进入 21 世纪, 随着中国加入 WTO, 跨国公司大步挺进中国电力市场。为了提高竞争力, 各大厂加速产品升级换代的步伐, 使产品水平再上一个新台阶。

平高在巩固 GW16/17-550 型市场占有率的基础上, 开发完成了具有自主知识产权的 GW27-550 型隔离开关和 JW8-550 型接地开关。GW27 为三柱水平断口, 导电杆水平运动后轴向旋转, 操作力小、动作平稳、电接触结构合理、通流能力好。同时参照国外先进结构, 开发出 GW28-550、GW29-550 型新型产品。此产品结构特点是单臂齿轮传动折叠伸缩, 导电关节采用软联接, 结构简单, 而触头采用梅花触指

插入式, 并设有适应开合母线转换电流和小电流的引弧触头。由于触头封闭受环境影响小, 提高了产品免维护性能。上述产品已于 2001 年 10 月通过国家级鉴定<sup>[5]</sup>。随后研发的 GW46-550 型剪刀式隔离开关, 于 2006 年 8 月在 KEMA 试验站顺利通过短时耐受电流 63 kA、3 s, 峰值耐受电流 160 kA、开合母线转换电流 1 600 A(400 V)和小电流试验<sup>[6]</sup>, 并于 2007 年通过国家鉴定。

沈高于 2004 年底将 GW6-550 型改进为 GW6A-550 型, 保留双导电闸刀和触头钳夹范围大的特点, 优化机械传动系统, 提高了可靠性和防腐性能; 将 GW12-550 型改进为 GW12A-550 型, 保留连杆传动、导电关节为软联接和插入式触头等优点, 将副管取消做成单臂折叠形式, 使产品结构大为简化。GW6A、GW12A 型具有自主知识产权的产品。

2003 年 10 月西开和平高与美国南州电力开关有限公司(SSL)签订了转让技术和合作生产隔离开关的协议。据此西开研制完成 GW45-363、550 型及 RDA-1 型 363 kV 隔离开关, 平高研制完成 550 kV EV-1 型隔离开关。2003 年之前, 国内能够生产 363、550 kV 隔离开关和接地开关的只有沈高、西开、平高 3 个厂家。长沙高压开关有限公司(长高)近年来致力于超高压隔离开关的研制和生产, 2002 年开发完成 GW16A-550、GW17A-550 型隔离开关及 JW5A-550、JW6A-550 型接地开关, 2003 年研制成功 GW35-363、550 型及 GW36-363、550 型隔离开关。2003 年 11 月通过国家鉴定, 成为国内第 4 家生产超高压隔离开关的专业工厂。

随着电网的发展, 同塔双回平行架空输电线路越来越多, 要求接地开关具有开合感应电流的能力。于是 2003 年底, 沈高率先开发了具有开合感应电流能力的 550 kV 接地开关, 随后平高、西开、长高也相继开发了这种产品, 并且开合能力高于国家标准和 IEC 标准的要求, 满足了国内工程的需要。国产超高压交流隔离开关主要技术参数见表 1, 表中带“\*”的型号对应的参数也带“\*”。

## 2 从超高压向特高压的跨越

### 2.1 2005 年 800 kV 特高压隔离开关投入运行

为了适应黄河上游公伯峡等大型水电站及西北特大坑口电厂电力送出及实现西电东送和西部大开发的需要, 2003 年 2 月 19 日国家正式批准建设西北 750 kV 输电工程, 拉开了 21 世纪特高压在中国电力输送的帷幕, 也催生了我国特高压隔离开关。

西开(西安西电高压开关有限责任公司)与美国 SSL 公司进行技术合作生产的 GW45-800 型隔离开关为双柱水平断口直臂立开式, 导电杆摆动并自转, 分合闸动作平稳, 冲击力小。触头采用镶银工艺, 导

表 1 国产超高压交流隔离开关主要技术参数

制造厂	产品型号	额定电压/kV	额定电流/A	额定短时耐受电流/kA	额定短路持续时间/s	额定峰值耐受电流/kA	1 min 工频耐受电压(有效值)/kV		雷电冲击耐受电压(峰值)/kV		操作冲击耐受电压(峰值)/kV		接线端静态机械负荷/N			开合小电流能力/A		开合母线转换电流能力			接地开关开合感应电流能力				分、合闸时间/s
							对地	断口	对地	断口	对地	断口	纵向	横向	垂直	电容电流	电感电流	转换电流/A	恢复电压/V	次数	感性电流/A	感性电压/kV	容性电流/A	容性电压/kV	
西开	GW10/11' GW7、GW45	550	3 150/4 000	50/63	3	125/160	740	740 (+315)	1 675	1 675 (+450)	1 300	1 175 (+450)	3 000/2 000	2 000/1 500	1 500	2.0	0.7	2 500	400	100	200	25	25	32	12
	GW10/11、GW7、GW45、RDA-1'	363	1 600、2 500/3 150、4 000、5 000	40/50	3	100/125	570/610	650/671	1 300	1 300 (+230)	1 050	890 (+325)	2 000/1 500	1 500/1 000	1 500	1.0	0.7	1 600	350	100	200	250	25	25	7.5
平高	GW16/17、GW27、GW28/29、EV-1、GW46	550	3 150/4 000	50/63	3	125/160	740	740 (+315)	1 675	1 675 (+450)	1 300	1 175 (+450)	3 000/2 000	1 200	1 500	1/2'	0.5/1'	3 200	450	3	200/100	25/35	25/50	25/50	9.4±12.4
	GW16/17、GW7	363	2 500、3 150/4 000	50/63	3	125/160	576	576 (+237)	1 328	1 328 (+333)	1 045	950 (+330)	3 000/2 000	1 200	1 500	2	1	1 600	300	100	200	25	25	25	9.4
沈高	GW6A'、GW12A'、GW7、GW20/21	550	3 150/4 000	50/63	3	125/160	740	740 (+315)	1 675	1 675 (+450)	1 300	1 175 (+450)	3 000/2 000	2 000/1 500	1 500	2.0	0.5	2 500	450	3	200	30	25	32	9.4±12.4
	GW6'、GW7、GW12'	363	2 000、2 500/3 150、4 000	40/50	3	100/125	566/638	644/725	1 300/1 469	1 188	1 050/1 188	1 050/1 188	1 000/1 188	2 000/1 500	1 500/1 000	1 500	0.6	-	-	-	-	200	25	25	25
长高	GW16A/7A、GW35/36	550	3 150/5 000	50/63	3	125/160	740	800	1 675	1 675 (+315)	1 175	1 050 (+450)	3 000/2 000	2 000/1 500	1 500	2.0	0.5	2 500	450	100	200/300	25/35	25/50	25/35	12.4
	GW16A/7A、GW35/36	363	2 500、3 150/4 000	50/63	3	125/160	576	655	1 328	1 328 (+205)	1 050	960 (+334)	2 000/1 500	1 500/1 000	1 500	1.5	0.5	2 500	450	100	200	25	25	25	9.4±5

电性能好、耐磨损,具有触头自清扫和破冰能力强等优点,2005年9月已在我国第1条750 kV青海官亭至甘肃兰州东输电示范工程正式投入运行,填补了国内空白<sup>[7]</sup>。这是目前我国电压等级最高的输电线路,也是世界上海拔最高的750 kV输电工程。平高(河南平高电气股份有限公司)自主研制完成的GW27-800型隔离开关和JW8-800型接地开关,在通过型式试验后于2006年5月通过国家鉴定<sup>[5]</sup>。沈高[新东北电气(沈阳)高压隔离开关有限公司]自主研制完成的GW12A-800型隔离开关及JW4-800型接地开关,于2006年9月通过国家鉴定。

## 2.2 自主研制 1 100 kV 特高压隔离开关

2005年2月,百万伏级交流、±80万伏直流输电技术的前期研究工作开始,国家电网公司的晋东南-南阳-荆门百万伏交流输电示范工程,已于2006年8月奠基,预计2009年建成后直接投入商业化运行,国内4家开关制造厂都在短期内在800 kV的基础上独立自主开发出1 100 kV特高压隔离开关的新产品,国家电网公司对特高压交流隔离开关提出的主要技术参数见表2。

西开自主开发的GW46-1100型三柱水平开闸刀翻转式隔离开关,可两侧附装折叠式接地开关

表 2 国产特高压交流隔离开关主要技术参数

额定电压/kV		800			1 100
额定电流/A		4 000			4 000
额定短时耐受电流/kA		50			50
额定短路持续时间/s		3			2
额定峰值耐受电流/kA		125			135
海拔/m		1 000	2 000	3 000	1 000
绝缘	额定短时工频耐受电压(有效值)/kV	对地	960	1 086	1 100
		断口	960(+320)	1 086(+360)	1 100(+360)
水平	额定雷电冲击耐受电压(有效值)/kV	对地	2 100	2 350	2 400
		断口	2 100(+460)	2 350(+510)	2 400(+590)
	额定操作冲击耐受电压(峰值)/kV	对地	1 550	1 675	1 800
		断口	1 300(+630)	1 425(+720)	1 620(+810)
开合小电流能力		电容电流	2.0		1、2
		电感电流	1.0		0.5
开合母线转换电流能力		1 600 A, 400 V, 100 次			1 600 A, 400 V, 100 次
接地开关开合感应电流能力	电磁感应	感性电流/A	160, 200		待定
		感性电压/kV	20, 25		
	静电感应	容性电流/A	25		
		容性电压/kV	32, 100		
接线端静态机械负荷/N		纵向	3 000/2 000		3 000
		横向	1 500		3 000
		垂直	2 000/1 500		2 000

已通过西电公司技术鉴定。平高自主研发的 GW27-1100 型三柱水平开启闸刀翻转式隔离开关，可两侧附装立开式接地开关，已于 2006 年 8 月中旬在 KEMA 试验站通过了短时耐受电流、峰值耐受电流和开合母线转换电流、电容电感小电流等关键项目试验。沈高自主研发了 GW12A-1100 型双柱折叠立开式隔离开关，可两侧附装折叠式接地开关<sup>[6,8]</sup>。长高(湖南长沙高压开关集团公司)的 1 000 kV 特高压接地开关已通过了型式试验。这些 1 000 kV 特高压隔离开关将首选提供国家电网公司在武汉建设的特高压交流试验基地带电试验。



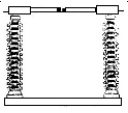
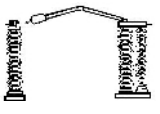
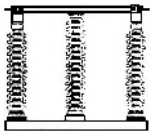
### 3 水平评述和发展经验

从 1980~2006 年，国产 550 kV 隔离开关装备了 300 多个 500 kV 变电站。据高压开关行业协会统计资料，自 1990~2006 年，国内共生产 550 kV 隔离开关和接地开关 5 243 组，363 kV 隔离开关和接地开关 1 954 组。

#### 3.1 水平评述

(1) 目前国际上流行的 6 种结构形式(见表 3)，在单柱垂直断口偏折式及双柱水平断口折叠立开式中，还有触头钳夹式或插入式两种产品可供选择。800 kV 及 1 100 kV 级特高压也已自主研发制成 3 种

表 3 国内外超(特)高压交流隔离开关主要参数比较表

结构形式	制造公司及型号	主要参数	简图				
单柱垂直断口	对折式	法国 AREVA P 德国 SIEMENS PR5 日本高岳 TPD2 ABB/HAPAM(荷兰) GSSB 沈高 GW6A 平高 GW46	420, 550 kV, 4 000 A, 80 kA/3 s 363, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 420, 525 kV, 4 000 A, 40 kA 420, 550, 800 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 363, 550 kV, 2 500~4 000 A, 50, 63 kA/3 s 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s				
	偏折式	法国 AREVA SPV, SPVL 法国 Egic SSP 加拿大 EMSPEC SP-15506 西开 GW10 平高 GW16, GW29 沈高 GW20 长高 GW16A, GW35	420~800 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 420~800 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 363, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/2 s 363, 550 kV, 2 500, 4 000 A, 40, 63 kA/3 s 363, 550 kV, 3 150, 4 000 A, 50, 63 kA/3 s 550 kV, 3 150 A, 50 kA/3 s 363, 550 kV, 3 150, 4 000 A, 50, 63 kA/3 s				
		平开式(中央开断)	法国 Egic DR 德国 SIEMENS CR 日本高岳 THBE ABB/HAPAM(荷兰) SSB 加拿大 EMSPEC SR-16200 法国 AREVA SPO, SPOL 法国 Egic OH 德国 SIEMENS KP5, TR5 ABB/HAPAM(荷兰) VKSB 加拿大 EMSPEC FVB-15506 西开 GW11 平高 GW17, GW28 沈高 GW12A 沈高 GW21 长高 GW17A, GW36	420, 525 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 363, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 420, 525 kV, 3 150 A, 40 kA/2 s 420, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 363 kV, 4 000 A, 63 kA/2 s 420~800 kV, 4 000 A, 60 kA/3 s 420~800 kV, 6 300 A, 75 kA/3 s 363, 550, 800 kV, 3 150, 4 000 A, 63, 50 kA/3 s 420, 550, 800 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 363, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/2 s 363, 550 kV, 2 500, 4 000 A, 40, 63 kA/3 s 363, 550 kV, 3 150, 4 000 A, 40, 63 kA/3 s 363~800, 1100 kV, 4 000, 3 150 A, 63, 50 kA/3 s 550 kV, 3 150 A, 50 kA/3 s 363, 550 kV, 3 150, 4 000 A, 50, 63 kA/3 s			
			双柱水平断口	立开式(折叠)	德国 SIEMENS VH 法国 Egic SV 美国 SSL EV, EV-1 日本高岳 TVR3 ABB/HAPAM(荷兰) VSSB- 加拿大 EMSPEC SB18160 西开(美国 SSL) GW45 平高(美国 SSL) EV-1	550, 800 kV, 4 000, 3 150 A, 63, 50 kA/3 s 420, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 550, 800 kV, 3 000, 4 000 A, 50, 63 kA/3 s 420~765 kV, 4 000 A, 40 kA 420, 550, 800 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 363, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/2 s 363, 550, 800, 1 100 kV, 3 150, 4 000 A, 50 kA/3 s 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s	
				平开式(闸刀平动)	西开 GW7 沈高 GW7	363, 550 kV, 2 500, 3 150 A, 40, 50 kA/3 s 363, 550 kV, 2 500, 3 150 A, 40, 50 kA/3 s	
	三柱水平断口				法国 AREVA S3CD 德国 SIEMENS DR 法国 Egic SRT ABB/HAPAM(荷兰) SSB 美国 SSL RDA-1 西开(美国 SSL) RDA-1 西开 GW46 平高 GW27	420, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 363, 550, 800 kV, 4 000 A, 80 kA/1 s 420, 550 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 420, 550, 800 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 420, 550, 800, 1 100 kV, 3 000 A, 50 kA/3 s 363 kV, 3 150 A, 50 kA/3 s 1 100 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s 550, 800, 1 100 kV, 4 000 A, 63 kA/3 s	

- [14] AUBRECHTT V, LOWKE J J. Calculations of Radiation Transfer in SF<sub>6</sub> Plasmas Using the Method of Partial Characteristics[J]. J Phys D: Appl Phys. 1994, 27(10): 2066-2073.
- [15] DIXON C M, YAN J D, FANG M T C. A Comparison of Three Radiation Models for the Calculation of Nozzle Arcs[J]. J Phys D: Appl Phys. 2004, 37(23): 3309-3318.
- [16] LINDMAYER M, SPRINGSTUBBE M. Three-dimensional Simulation of Arc Motion between Arc Runners Including the Influence of Ferromagnetic Material [J]. IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol. 2002, 25(3): 406-414.
- [17] RUCHTI C B, NIEMEYER L. Ablation Controlled Arc[J]. IEEE Trans Plasma Sci. 1986, 14(4): 423-434.
- [18] KARETTA F, LINDMAYER M. Simulation of the Gasdynamic and Electromagnetic Processes in Low Voltage Switching Arcs [J]. IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol. 1998, 21(1): 96-103.
- [19] 张晋. 低压断路器电弧动态数学模型及开断特性可视化仿真技术的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1999.
- [20] Rachard H, Chevire P, Henry D, et al. Numerical Study of Coupled Electromagnetic and Aerothermodynamic Phenomena in a Circuit Breaker Electric Arc [J]. Int J Heat Mass Transfer. 1999, 42(10): 1723-1734.
- [21] 陈旭. 低压断路器电弧等离子体数学模型及开断电弧背后转移现象的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2000.
- [22] DAUBE T, STAMMBERGER H, ANHEUSER M, et al. 3D Simulation of a Low-voltage Switching Arc Based on MHD Equations[C]// 14th Symp on Physics of Switching Arc. Brno, 2001: 45-50.
- [23] LINDMAYER M, MARZAHN E, MUTZKE A, et al. The Process of Arc-splitting between Metal Plates in Low Voltage Arc Chutes [C]// Proc 50th IEEE Hdm Conf. on Electrical Contacts. Seattle, 2004: 28-34.
- [24] GILLIGAN J G, MOHANTI R B. Time-dependent Numerical Simulation of Ablation-controlled Arcs [J]. IEEE Trans Plasma Sci. 1990, 18(2): 190-197.
- [25] HORINOUCI K, NAKAYAMA Y, HIDAKA M, et al. A Method of Simulating Magnetically Driven Arcs[J]. IEEE Trans Power Delivery. 1997, 12(1): 213-218.
- [26] SCHLITZ L Z, GARIMELLA S V, CHAN S H. Gas Dynamics and Electromagnetic Processed in High-current Arc Plasmas[J]. J Appl Phys. 1999, 85(5): 2540-2555.
- [27] DOMEJEAN E, CHEVRIER P, FIEVET C, et al. Arc-wall Interaction Modeling in a Low-voltage Circuit Breaker [J]. J Phys D: Appl Phys. 1997, 30(15): 2132-2142.
- [28] 孙海涛. 低压断路器开断电弧三维动态MHD数学模型及影响开断特性因素的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [29] CHEVRIER P, BARRAULT M, FIEVET C, et al. Industrial Applications of High-, Medium- and Low-voltage Arc Modeling[J]. J Phys D: Appl Phys. 1997, 30(9): 1346-1355.
- [30] ZHOU X, THEISEN P. Investigation of Arcing Effects During Contact Blow Open Process [C]// Proc 44th IEEE Holm Conf Electrical Contacts. Arlington, 1998: 100-108.
- [31] MARTIN B, STANISLAV K, HASSAN N. Influence of Vapour Pressure on the Dynamics of Repulsion by Contact Blow-off[C]// Proc 21st Conf Electrical Contacts. Zurich, 2002: 268-275.
- [32] LI Xing-wen, CHEN De-gui, WANG Qian, et al. Simulation of the Effects of Several Factors on Arc Plasma Behavior in Low Voltage Circuit Breaker[J]. Plasma Science & Technology. 2005, 7(5): 3069-3072.
- [33] LI X, CHEN D, LIU H, et al. Imaging and Spectrum Diagnostics of Air Arc Plasma Characteristics [J]. IEEE Trans Plasma Sci., 2004, 32(6): 2243-2249.

(上接第268页) 结构形式。

(2) 产品的主要技术参数已达到国际先进水平。800 kV 级产品可用在海拔 2 000 m 或 3 000 m, 其绝缘性能是目前世界上最高水平。1 100 kV 级产品的绝缘水平也达到国际水平。

(3) 国产隔离开关在绝缘水平、通流能力、无线电干扰、接线端静拉力、短时耐受电流持续时间、开合母线转换电流、接地开关开合感应电流以及整体强度试验等方面, 都高于国外产品。

(4) 国产超高压隔离开关, 从 1985 年算起已有六千多组在全国电力系统中运行, 时间最长已达 20 年, 800 kV 特高压隔离开关已安全运行近两年, 总体情况良好。

(5) 在产品外观、可靠性、稳定性、耐用性、防腐性和免维护方面以及关键原材料的品质与跨国公司产品存在着差距。外购通用件如轴承、自润滑轴套、不锈钢万向接头及紧固件等的质量也有待提高。

### 3.2 发展的主要经验

(1) 要广泛应用新设备、新技术、新工艺, 诸如加工中心、数控机床、数控板材冲、剪、折弯机等, 要将 SF<sub>6</sub> 断路器的设计制造和质量管理的理念应用到隔

离开关产品上。“工艺出精品, 精品出效益”。

(2) 在超高压和特高压隔离开关设计、制造和管理工作中, 推广应用数字化制造技术, 如虚拟设计的应用, 以提高研发能力、缩短研发周期、降低产品成本、增强产品的市场竞争力。

### 参考文献:

- [1] 吴美潮. 中国电气进入特高压时期 [J]. 电气世界, 2005(7): 60.
- [2] 刘本粹. 加快西北 750 kV 电网工程建设全面推动“西电东送”北通道进程[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 9-15.
- [3] 钟振蛟. 谈户外高压隔离开关的技术发展与结构演变 [J]. 高压开关行业通讯, 1999(7): 26-34.
- [4] 钟振蛟. 我国超高压隔离开关的发展和水平 [J]. 电器工业, 2006(9): 42-48.
- [5] 李建基. 我国高压开关行业最新发展述评[J]. 电力系统装备, 2005(11): 15-22.
- [6] 林军英. 平高集团在百万伏产品征程中再迈新步 [J]. 高压开关行业通讯, 2006(11): 31-32.
- [7] 孟修丹. 西北 750 kV 工程产品报告 [J]. 电力系统装备, 2005(12): 15-21.
- [8] 宋 泉. 高压开关设备存在的问题及相关技术的发展与研究 [J]. 高压开关行业通讯, 2006(11): 21-29.