

特高压、超高压、高压、 中压开关设备实用技术

TEGAOYA CHAOGAOYA GAOYA

ZHONGYA KAIGUAN SHEBEI SHIYONG JISHU

李建基 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



特高压、超高压、高压、 中压开关设备实用技术

李建基 编著

机械工业出版社

本书讲述了中压、高压、超高压及特高压开关设备技术的最新发展水平和动向,介绍了最新研制的产品。高压、超高压及特高压产品包括断路器、气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)、复合式组合电器(H-GIS)及隔离开关;中压产品包括真空断路器、各种类型负荷开关、空气绝缘开关柜、气体绝缘充气柜(C-GIS)、环网柜、箱式变电站及电缆分接箱等。书中不仅介绍了国内、外产品本身的结构特点和产品的运行经验,还介绍了国内外最新标准对高压开关产品的最新要求。

本书可供高压开关设备制造业的管理人员及技术人员、电力企业的设计人员及运行人员,以及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

特高压、超高压、高压、中压开关设备实用技术/李建基编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-111-33875-8

I. ①特… II. ①李… III. ①高压开关柜-开关电源 ②中压开关-开关电源 IV. ①TM591 ②TM564

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第050141号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:阎洪庆 版式设计:霍永明

责任校对:肖琳 封面设计:路恩中 责任印制:李妍

高等教育出版社印刷厂印刷

2011年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·533千字

0 001-3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-33875-8

定价:59.80元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

我国电网建设正在快速向前发展。一方面表现在电网的建设投资已超过电源的建设投资，使电网与电源和谐发展，改善了过去那种“重发轻送不管用”的局面。在电网建设中，不仅注重骨干电网，而且作为输配电的城市电网和农村电网也有了大发展，使电力能上网也能下网，以便供电给千千万万的用户。另一方面，随着电力的大发展，我国电网的电压已有中压、高压、超高压、特高压。2009年1月6日，我国首条1000kV线路投运，这是世界上首条真正投入商业运行的最高电压线路。同时，我国现已建有220kV及以上线路40多万km。

电网的大发展为高压开关设备制造业提供了千载难逢的发展机遇。高压开关设备在线路中起控制和保护作用。当线路运行时，随着高压开关的关合，强大的电力源源不断地流向用户，而当线路发生故障（如短路）时，高压开关一马当先，立即切除故障，保障线路的安全。因此，高压开关对线路的安全运行至关重要。

近20多年来，特别是改革开放以来，高压开关行业经历了辉煌的发展历程。这从高压开关行业协会来看，会员单位从20年前的七八十家发展到如今的七八百家；高压开关行业的产值从20年前的25亿元发展到现在的1000多亿元；生产配套能力从20年前的几百万千瓦发展到现在的过亿千瓦；生产开发的产品从20年前的仿制和技术引进发展到现在自主创新的完全国产化；产品电压等级从中高压上升到超高压和特高压。如我国自主创新，开发出550kV单断口SF₆断路器和GIS、800kV双断口SF₆断路器和GIS，合作和自主开发出1100kV GIS和H-GIS。这些产品已达到世界先进水平。

从高压开关行业近期的发展来看，2009年全年实现工业总产值1340.64亿元，比上年增长17.02%。增强了自主创新能力，加大了新产品的开发投入，投资额比上年增长29.23%，新产品产值达到工业总产值的28.98%。2009年末，行业资产总额达到1263.87亿元，优化了产品结构，淘汰落后产能，新产品不断涌现。2009年，高压开关行业生产126kV及以上电压等级气体绝缘金属封闭开关设备11033间隔，生产126kV及以上电压等级高压SF₆断路器9234台，生产各型号金属封闭开关设备570797面，满足了电力发展和电网建设的需求，支持和保障了1100kV高压交流试验示范工程、世界上首个±800kV直流输电工程等国家重点建设项目的顺利实施。

为了反映在高压开关领域的技术创新和研发的新产品，并介绍国内外高压开关技术发展水平和动态，特编写此书供广大读者了解最新发展水平与动向，供用户产品选型和制造厂家制定产品发展规划等参考。

本书的编写和出版得到了行业和同仁的大力支持，并提供了大量的宝贵资料，在此一并致以衷心的感谢。

由于本书涉及的产品面广，加之高压开关设备处于不断发展之中，作者水平有限，所介绍的内容有不全和不妥之处，恳请广大读者批评指正，不胜感激。

作者

2011年5月

目 录

前言	
第一章 我国电力工业与高压开关设备	1
第一节 电源	1
第二节 电网	2
第三节 我国电网的高压开关装用量和运行情况	8
第二章 高压开关设备总论	10
第一节 高中压元件	10
第二节 中压金属封闭开关设备	12
第三节 高压开关设备	13
第四节 断路器的基本技术参数	13
第三章 高压压气式 SF ₆ 断路器	16
第一节 压气式 SF ₆ 断路器的结构	16
第二节 压气式 SF ₆ 断路器的工作原理	16
第三节 瓷柱式与罐式断路器的比较	18
第四章 高压自能式 SF ₆ 断路器	20
第一节 第一代自能灭弧室	20
第二节 第二代自能灭弧室	22
第五章 550kV 单断口罐式 SF ₆ 断路器	26
第一节 西开 550kV/50kA 单断口断路器	26
第二节 平高 LW55—550/Y4000 型单断口罐式 SF ₆ 断路器	27
第六章 800kV 罐式 SF ₆ 断路器	30
第一节 LW13—800 型罐式 SF ₆ 断路器	31
第二节 LW55—800 型罐式 SF ₆ 断路器	34
第三节 LW56—800 型罐式 SF ₆ 断路器	37
第七章 气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS)	39
第一节 GIS 的结构特点	39
第二节 GIS 的基本组成元件	41
第三节 GIS 的三相共筒化、复合化和小型化	45
第四节 GIS 的二次现代化	46
第八章 550kV GIS	48
第一节 ZF15-550 (L)/4000-63 型 GIS	48
第二节 ZF8A-550 型 GIS	49
第九章 800kV 气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS)	53
第一节 西开电气 800kV GIS	53
第二节 平高电气 ZF27-800 型 GIS	54
第三节 新沈高 ZF15-800 型 GIS	55
第十章 混合技术开关设备	56
第一节 混合技术开关设备的优势	56
第二节 混合技术开关设备的应用情况	57
第三节 国网公司对 110~500kV 变电站通用设备的有关规定	57
第十一章 特高压交流开关设备技术	58
第一节 平高 ZF27-1100 (L)/Y6300-50 型全 GIS	60
第二节 新沈高 ZF6-1100 (L)/Y6300-50 型 H-GIS	64
第三节 西开电气 ZF17-1100 (L)/Y4000-50 型 H-GIS	66
第四节 特高压大容量 1100kV/6300A-63kA GIS	69
第十二章 日本 1100kV 特高压开关设备技术	71
第一节 导言	71
第二节 550kV 63/50kA 单断口 SF ₆ 断路器	71
第三节 1100kV GIS	72
第十三章 刚性气体绝缘输电线路 (GIL)	78
第一节 对刚性气体绝缘输电线路新国标的解读	78
第二节 GIL 的应用	79
第三节 GIL 的优势	79
第四节 GIL 应用示例	80
第十四章 高压 SF ₆ 断路器操动机构	84
第一节 液压、气动、弹簧操动机构原理	

和应用比较	84	第二十二章 中压及高电压真空	
第二节 液压、气动、弹簧操动机构优缺点		断路器	133
比较	84	第一节 中压断路器的发展历程	133
第三节 高压 SF₆ 断路器操动机构发展		第二节 中压真空断路器不断走向	
趋势	85	辉煌	133
第四节 高压断路器配用的典型操动		第三节 我国中压真空断路器技术	135
机构	85	第四节 中压真空断路器的结构演变	137
第十五章 高压断路器可靠性调查		第五节 真空断路器的产品类型	138
(国际大电网会议的调查) ..	91	第六节 典型真空断路器示例	139
第一节 国际上可靠性调查的故障定义 ..	91	第七节 国外典型企业及真空断路器	
第二节 国际大电网会议 (CIGRE) 对断路		产品	140
器可靠性的调查	91	第八节 高电压真空断路器	149
第三节 国际可靠性调查结果及其分析 ..	92	第二十三章 大容量发电机断路器	156
第四节 国际调查中断路器不同部位发生的		第一节 发电机断路器的技术和标准	
故障率	92	要求	156
第五节 国际调查中断路器不同原因的		第二节 特大容量 SF₆ 发电机断路器	156
故障率	93	第三节 ZCN-24 型 SF₆ 发电机断路器	
第十六章 国外 GIS 技术的进步和运行		成套装置	159
经验	95	第四节 大容量真空发电机断路器	160
第一节 日本 GIS 技术的进步	95	第二十四章 真空灭弧室	166
第二节 日本 GIS 的发展历程	97	第一节 真空灭弧室的结构	166
第三节 超高压 GIS 的发展	98	第二节 真空灭弧室的触头材料	168
第四节 日本 GIS 的运行经验	98	第三节 真空灭弧室的触头结构	168
第十七章 超高压隔离开关	100	第四节 真空灭弧室工艺的改进	170
第一节 用途与分类	100	第五节 真空断路器的固封极柱	172
第二节 结构型式	100	第六节 我国真空灭弧室的发展	178
第三节 国内外超高压隔离开关		第二十五章 真空断路器的操动机构 ..	180
产品水平	102	第一节 电磁操动机构	180
第四节 国内 800kV 隔离开关产品	105	第二节 弹簧操动机构	180
第十八章 国外高压开关设备技术的		第三节 永磁操动机构 (PM)	182
进步	110	第二十六章 I_s-快速限流器及其	
第一节 ABB 气体绝缘组合电器 (GIS)		开关柜	185
技术的进步	110	第二十七章 中压开关柜	190
第二节 西门子高压和超高压开关		第一节 中压开关柜技术	190
设备	114	第二节 中压开关设备 (开关柜) 的新标	
第三节 Alstom 高压开关设备	117	准及新要求	196
第十九章 我国 GIS 和 H-GIS 组合电器		第三节 对 IEC 62271-200—2003 新标准的	
运行情况分析	118	解读	199
第二十章 日本高压断路器可靠性		第四节 中压开关设备故障电弧保护方案	
调查	120	示例	203
第二十一章 大地震对高压开关设备的		第五节 特快速真空接地开关	206
破坏	130	第二十八章 充气柜 (C-GIS)	209

第一节	气体绝缘开关设备的优势	209	第一节	概述	258
第二节	空气柜的结构	209	第二节	箱式变电站	260
第三节	结构及工艺特点	214	第三节	GRC 箱体	261
第四节	中压充气柜的技术进步	215	第四节	地理箱变	262
第二十九章	环网柜	227	第五节	预装式变电站最新标准	264
第一节	环网柜的发展	227	第三十二章	电缆分接箱	268
第二节	ST ₆ 负荷开关的发展	228	第一节	电缆分接箱技术	268
第三节	典型的环网柜结构示例	228	第二节	环网柜、箱式变电站与电缆分接箱选型	270
第四节	非 SF ₆ 气体环网柜	233	第三十三章	六氟化硫气体	273
第三十章	负荷开关-限流熔断器组合		参考文献		290
	电器	241			
第三十一章	预装式变电站	258			

第一章 我国电力工业与高压开关设备

自新中国成立 60 多年以来，我国电力工业发生了巨变，取得了辉煌的成就。

第一节 电 源

在这 60 多年的巨变中，我国发电装机容量突飞猛进地增长。

1949 年新中国成立初期，我国电力装机容量只有 173 万 kW。2009 年，以中国电力投资集团公司所属的拉西瓦水电站 6 号机组投产为标志，我国电力装机容量突破 8 亿 kW。2010 年，我国电力装机容量达到 9.8 亿 kW。

其中，火电装机容量建国初仅为 169 万 kW，2009 年 7 月，我国 6000kW 以上火电机组装机容量就达 60902 万 kW；水电装机容量在建国初仅为 36 万 kW，而到了 2008 年底，达到 1.72 亿 kW，稳居世界第一；核电装机容量从 1991 年实现零的突破后，到 2009 年全国装机容量达到 907 万 kW。

解放初，我国电网规模只有 35kV 及以上送电线路（含 20kV）6475km；2009 年 7 月底，我国 220kV 级以上输电线路达到 40 多万 km，电网以最广泛的布局、最细致的触角、最大范围的延伸，超过美国，跃居世界第一位。

解放初，我国电压等级最高为 220kV；2009 年 1 月，我国自主研发、设计和建设的具有自主知识产权的 1000kV 交流输变电工程晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程顺利通过 168h 试运行，正式投运，成为当今世界技术水平最高的电网。

1952 年，我国能源消费总量仅为 0.47 亿 t 标准煤，2008 年达到 28.5 亿 t 标准煤。我国能源消费结构也不断向优质化方向发展，煤炭在能源消费总量中所占比重从 1952 年的 95% 下降到 2008 年的 68.7%，优质能源比重上升明显。石油比重上升了 14.6%，其中，水电、核电、风电和天然气等优质能源比重提高了 11.7%。

据了解，从 1882~1949 年，我国电力装机容量为 185 万 kW，即使在建国三年后，我国电力装机容量也仅为 197 万 kW，其中水电为 19 万 kW，火电为 178 万 kW。

1987 年，我国电力装机容量第一次突破了 1 亿 kW。但这一数字从 1 亿 kW 增至 2 亿 kW，仅仅用了 8 年时间；从 5 亿 kW 发展至 6 亿 kW、7 亿 kW，都分别用了不到 1 年的时间。2009 年底，我国电力总装机容量已达 8.7 亿 kW。

这无疑是以我国发电设备制造业快速发展为前提的。据悉，经历 60 多年的建设与发展，我国发电设备制造业的自主设计、自主创新能力提升：先后具备了批量生产 30 万 kW 机组和 60 万 kW 机组的条件和能力；100 万 kW 超超临界火电机组和 30 万 kW 循环流化床电站也已基本进入自主设计阶段；70 万 kW 水电机组实现了自行成套、第三代百万千瓦核电机组自主化工作顺利进行……

1. 火电

火电一直是我国主要的发电模式。1956 年，淮南田家庵电厂投产一台 6000kW 的机组，那是我国第一台国产火电机组。据悉，“一五”期间，苏联援建我国有 24 项电力项目，除了丰满水电站外，其余均为火电项目。这些项目的建设奠定了新中国火电发展的基础。

改革开放 30 多年来，我国电力工业装备水平和技术水平发生了根本性变化。1978 年，我国电力工业主力机组以 10 万 kW 为主，少数电厂建设了一批苏制 20 万 kW 机组。而到 2007 年底，

30 万 kW、60 万 kW 及以上大型发电机组已分别占我国总装机容量的 50.15% 和 21.53%，并逐步向百万级超超临界机组发展。据悉，截至 2008 年底，我国已制造超临界机组 158 台，其中 60 万 kW 超临界 107 台，100 万 kW 超超临界 51 台，火电装备水平有了很大提高。

2. 水电

1957 年 4 月，我国在黄河上的第一座水电站开工建设。随后刘家峡、龙羊峡等一批单机容量为 30 万 kW 级型机组投入运行；单机容量为 40 万 kW 的李家峡、单机容量为 55 万 kW 的二滩，以及 30 多台单机容量为 70 万 kW 的三峡、龙滩机组顺利投产；目前正在建设中的溪洛渡、向家坝、拉西瓦、白鹤滩、乌东德等电站，单机容量从 70 万 kW 向着 100 万 kW 机组发展。2009 年全国水电装机容量达到 1.97 亿 kW，居世界第一。

3. 核电

1981 年，我国依靠自己的科技力量设计与建造的第一座 30 万 kW 核电站——秦山核电站一期工程得到批准，1983 年开工建设，1991 年并网发电，结束了我国大陆无核电的历史；随后，我国首座 100 万 kW 压水堆核电站于 1994 年投产发电；2005 年我国核电技术自主品牌 CPR1000 示范工程——岭澳核电站二期开工，这加快了我国全面掌握第二代改进型百万 kW 核电站技术，形成自主技术品牌核电站设计和设备制造能力。2007 年底，我国共投入运行 11 个反应堆 910 万 kW；批准在建核电机组 24 台，总装机容量为 2540 万 kW。我国迎来了核电建设的新高潮。

4. 可再生能源发电

仅用十几年的时间，我国的可再生能源发电技术发展迅速，特别是风力发电和太阳能发电产业。

我国风电事业始于 1986 年建立并网投产的风电场——荣成风电场。

在 2004 年前，我国仅有 6 家风机整机制造企业，目前已进入整机制造业的企业已达 70 多家，风电规模连续三年实现翻倍增长。2009 年，风电装机容量已达 2200 多万 kW（居世界第三）。我国已确定 7 个千万 kW 级风电基地，2020 年我国风电总装机容量将达到 1.5 亿 kW。

2008 年中国太阳能光伏电池年产量为 200 万 kW，占全球产量的 30% 以上，居世界第一。太阳能热水器使用量超过 1.25 亿 m^3 ，占世界使用总量的 60% 以上，居世界第一。

生物质能开发利用也有较大的发展。到 2008 年底，生物质能发电总装机容量为 315 万 kW，大型沼气池 1600 多处，农村沼气用户为 3000 多万户，年产沼气约 140 亿 m^3 ，生物液体燃料年产量为 165 万 t。

我国电力节能和效率持续提高。2009 年全国供电标准煤耗 342g/(kW·h)，比上年同期降低 38g/(kW·h)。线路损耗率为 6.55%，比上年同期降低 0.24 个百分点。尽管如此，要实现 2020 年我国单位 GDP 的排放强度比 2005 年下降 40%~45% 的目标，节能减排的任务还很艰巨，为此要急需转变发展方式。

电力工业作为国民经济的支柱产业，既要向全社会提供稳定的服务，也要发展低碳经济、发展电力，通过能源高效利用、清洁能源的开发，减少污染排放和产业结构调整、产业创新，实现低碳、高效和可持续发展。加强节能减排是“十二五”规划的重要趋势和原则。

第二节 电 网

1. 电网与电源进入协调发展

2007 年，全国电力基本建设投资为 5492.91 亿元，其中电网基本建设投资为 2451.41 亿元，同比增长 17.1%。电网建设投资占电力投资的比例由 2005 年的 31.10% 上升到 2007 年的 44.63%。2008 年，全国电力基本建设投资继续增长，达到 5763.29 亿元，同比增长 1.52%，其中电源投资

为 2878.73 亿元，电网投资为 2884.56 亿元，电源投资同比下降 10.78%，电网投资增长 17.96%，电网投资占电力基本建设投资的 50.05%。电网投资首次超过电源投资。

2009 年，我国发电装机容量达到 8.7 亿 kW。电源基本建设投资调整加快。其中，水电、核电、风电基本建设投资额同比分别增长 2.33%、74.91%、43.90%。火电建设投资额同比下降 11.11%，占电源投资比重仅为 40.20%。

2009 年，全国电力建设完成投资 7558 亿元，同比增长 19.93%。其中，电源投资为 3711 亿元，占全部电力投资的 49.10%，同比增长 8.92%。电网投资为 3847 亿元，比上年增长 32.89%，占全部电力投资的 50.90%。专家估计，“十二五”规划期间，电源与电网投资比例将为 4.5:5.5。这就逐步解决了我国电网建设长期处于落后的状况，扭转了过去“重发轻供不管用”的局面。在电网建设中，国家拿出 40 亿元用于城乡电网建设改造，说明除建设骨干网架外，还关注配电网建设。若只关注骨干电网建设，而不关注配电网建设，则会造成电网出现“头重脚轻”，电力“能上网却不能下网”，这样有电还是用不上。因此，只有加大配电网建设，电能才能输送到千家万户，服务于国家建设和人民生活的需要。预期未来 10 年我国电网建设将迎来黄金期。

在电网中，随着国民经济的发展，有些配电电压兴起，如 20kV 配电电压、风电及电气化铁道配电电压，并对高压开关提出了特殊要求。

2. 24kV 配电网与 24kV 开关设备

(1) 10kV 与 20kV 配电电压

国网公司于 2007 年下达了“关于推广 20kV 电压等级的通知”（简称《通知》）。一时间，20kV 配电电压成为电力部门和电力设备制造部门关注的热点。

1956 年 1 月，我国电力工业部开始在全国推行 10kV 配电。配电网采用 10kV 供电，对我国经济和电网发展起到了重要促进作用。我国一直将 10kV 作为中压配电电压，有 65% 的供电量通过 10kV 等级输出。但随着经济持续快速发展和城市化水平不断提高，10kV 配电系统越来越显示出容量小、损耗大、土地占用量大、环保性能差等缺点。采用 20kV 配电电压可以提高供电能力、减少土地占用量、减少建设投资、降低损耗和提高电压质量，还可简化电压等级（有条件地区可简化为 220/20/0.4kV），取消 10kV 和 35kV 电压等级。

(2) 20kV 配电电压在国外的实践

在国外，据不完全统计，欧洲国家中 80% 的中压电网采用 20~25kV 电压等级，亚洲已有 9 个国家或地区采用 20kV 配电电压，还有非洲的埃及、赞比亚、安哥拉等国采用 20kV 电压等级。美国、法国、加拿大、德国、日本、韩国、新加坡等国的实践均证明，采用 20kV 供电能取得很好的经济效益。

(3) 20kV 配电电压在国内的推广

20kV 电压等级已于 1983 年引入 IEC 标准（IEC 60038—1983）。我国国家标准《标准电压》共出版了 4 个版本，分别为 GB 156—1980、GB 156—1993、GB 156—2003、GB 156—2007。在 1993 年版和 2003 年版标准中均已将 20kV 作为标准电压等级（但 1993 年版注明在用户需要时才采用）。

其实在《通知》下达之前，我国有些地区已采用 20kV 配电电压。如江苏省的苏州工业园（1996 年）和辽宁省的本溪南芬地区（2003 年），都取得了较好的效果。《通知》下达之后，各地纷纷响应，特别是江苏省于 2008 年 8 月决定在全省 13 个地市范围内开展 20kV 电压等级的试点推广。截止 2008 年底，江苏在全省 13 个地市共建投产 20kV 项目 49 个，2009 年计划 20kV 项目 139 个。目前，试点用户均表示，应用 20kV 供电，降低了营运成本，用电质量得以提升。

但《通知》推广 20kV 电压等级，并不是立即取消 10kV 而一律改用 20kV，具体到一个地区，是否要上 20kV，要经过分析论证。有专家建议，有的区域可以直接引用，特别是新建工业园区、开发区、新城区等新兴区域或现电网非常薄弱、未来电力需求增长迅速的区域；有的则适时引用，

如现状电网有一定规模,但供电能力和设备现况需进一步提高、以满足发展需求的区域;还有的地区则要研究引用的时机和条件,如10kV供电系统相对成熟稳定,在一定时期内可以满足电力需求进一步需要的区域。

这里以南京电网推广20kV电压等级为例。南京供电公司自2007年经过研究和规划,将南京各地供电区域划分为10kV供电区域(南京明城墙以内的老城区)、20kV新建区域(老城区外新兴的工业园区、开发区、居住区等)及20kV与10kV混供区域(以上以外的区域)。

因此,20kV电压等级在国内正在推广,但需要较长的时间。

(4) 24kV 开关设备

20kV电压等级的推广,使24kV开关设备应运而生。同10kV等级一样,对20kV等级同样需要各种类型开关设备。如在市区以内,设备多选用户内真空断路器、限流熔断器、负荷开关、空气绝缘开关柜、箱式气体绝缘柜(C-GIS)、环网柜、箱式变电站及电缆分接箱等;又如在户外线路上,多选用柱上断路器、重合器、分段器、负荷开关及跌落式熔断器等。

(5) 国外 24kV 开关设备技术成熟

我国先建立的20kV线路,采用了国外成熟的24kV开关设备。如在苏州工业园采用的开关设备为ABB(中国)有限公司的ZXO型充气柜, Safe plus型扩展式环网柜,施耐德(中国)投资有限公司的SM6型扩展式环网柜,西门子(中国)有限公司的8DC11型充气柜,原Areva公司的M24、FBX型环网柜等。在辽宁省本溪芬南地区20kV配电网,使用了原Areva公司24kV开关柜和真空断路器,以及ABB中国(有限)公司的柱上重合器、负荷开关、跌落式熔断器等。

国外制造商早就制造有24kV开关设备,对我国推广20kV电压等级,表现得很活跃。如施耐德(中国)投资有限公司于2008年4月2~22日先后在江苏淮安、南京召开20kV技术交流暨研讨会,推广该公司不断改进和完善的24kV开关产品。

(6) 国内 24kV 开关设备的兴起

20kV电压等级的推广,为国内企业带来了商机。许多企业抓住这一机遇,大力研发24kV开关设备,包括上面提到的户内设备和户外设备。

特别是江苏电力设备制造企业,如扬州北辰电气设备公司适时地开发出3种24kV开关设备,包括24kV开关柜、真空断路器和户外柱上负荷开关。

该公司于2008年1月19日拿到国家高压电器质量监督检验中心《型式试验报告》后,就与客户签订了55万元开关柜订单。又如江苏东源电器集团于2009年3月13日在苏州举办了24kV新系列开关设备产品推介会,24kV开关设备包括VED-24型固封式真空断路器、ZW32-24型户外柱上真空断路器、HZF-24型户外负荷开关、HXGN-24型环网柜、KYN28-24(P)型程序化开关柜、YB-24预装式变电站等。

最后要指出,在开发24kV开关设备时,要注意2007年10月颁布的江苏省电力公司编制的《20kV通用设备技术规范》。该规范分为《20kV变电设备技术规范》11篇和《20kV配电设备技术规范》16篇。从江苏省电力公司企业标准与国家标准比较中可以看出,企业标准的工频耐压值要高于国家标准的规定值。例如,GB/T 10022—1999《高压开关设备标准的共同技术要求》规定,对24kV而言,额定短时工频耐受电压(1min,有效值)规定为50kV(通用值)和60kV(断口间);而江苏省电力公司企业标准《20kV配电设备技术规范》对24kV规定额定短时工频耐受电压为50(65)kV(对地)和64(79)kV(断口间)。因此,电力设备制造企业在研制24kV开关时,一定要注意电力公司企业标准对24kV开关设备的额定短时工频耐受电压值有高于国家标准的要求。

3. 风电及开关设备

风电的优势是不需要燃料,不占耕地,没有污染,运行成本低。

全球风能协会提出的目标：①2010 年全球风电累计装机容量为 1.75 亿 kW；②2020 年全球风电累计装机容量为 15 亿 kW。

我国专家预测风电发展规划：①2010 年全国风电装机容量累计达到 3000 万 kW；②2015 年全国风电装机容量累计达到 8000 万 kW；③2020 年全国风电装机容量累计达到 1.2 亿 ~ 1.5 亿 kW；④到 2020 年，全国电力装机容量达到 12 亿 ~ 15 亿 kW，预测风电装机容量可占 7% ~ 9%。

2008 年全球累计风电装机最多的 15 个国家分别为美国 (25170MW)、德国 (23903MW)、西班牙 (16754MW)、中国 (12210MW)、印度 (9645MW)、意大利 (3736MW)、法国 (3404MW)、英国 (3241MW)、丹麦 (3180MW)、葡萄牙 (2862MW)、加拿大 (2369MW)、荷兰 (2225MW)、日本 (1880MW)、澳大利亚 (1494MW)、爱尔兰 (1244MW)。

全球风能发展趋势：1) 风电机组的技术向增大单机容量、降低单位千瓦重量、提高线损效率的方向发展；2) 近海风电场建设，需要开发单机容量更大的机组。在海上安装的最大样机是德国 R. E. Power 公司的 5000kW 机组，风轮直径为 124m。

我国能源局千万千瓦级风电基地规划：①分别在内蒙古、甘肃、新疆、河北、江苏等风能资源丰富地区，开发启动 6 个千万千瓦级风电基地的规划和建设工作，打造“风电三峡工程”；②甘肃酒泉千万千瓦级风电基地建设已经启动，已经投运 50 万 kW，到 2015 年风电装机容量达到 1200 万 kW 以上，到 2020 年达到 2000 万 kW 以上；③新疆哈密地区千万千瓦级风电基地，规划在哈密东南部和北部建设 2000 万 kW 风电场；④内蒙古总规划建设 5000 万 kW，其中蒙西 2000 万 kW，蒙东 3000 万 kW；⑤河北规划沿海北部地区建设 1000 万 kW；⑥江苏规划建设 1000 万 kW，其中苏北沿海 700 万 kW。

目前，我国首座、也是亚洲首座大型海上风电场——东海大桥海上风电场全部风机安装取得圆满成功，并于 2010 年 6 月底前全部并网发电。

东海大桥海上风电示范项目共有 34 台 3MW 风机，每台“大风车”塔筒有 30 层楼高 (90m)，叶片长 45m，总装机容量为 102MW，预计年上网电量为 2.67 亿 kW·h。

风电场的输变电工程不同于一般，它是将风电发电机发出的 690V 低压电经高压输电线路送至

升压站，一般升压至 10kV 或 35kV，通过接入系统线路与电网并联 (见图 1-1)。因此，风电输变电需要 40.5kV 箱式变电站。在 40.5kV 箱式变电站中，除了 35kV 升压变压器外，还需要 40.5kV 环网柜，其内装 SF₆ 负荷开关和限流熔断器。由于风电场塔架处地方狭小，且风电场环境恶劣，一般采用体积小

的 SF₆ 环网柜。如上海东大桥海上风电场选用 ABB 40.5kV Safe 环网柜，一是体积小，仅为常规设备的 1/3，二是内充 SF₆ 气体，能很好地抵御外部环境的污染。我国许多企业参与风电用 40.5kV 箱式变电站的制造。如天津三源电力设备制造公司最新设计的风电用箱式变电站，额定电压为 40.5kV，变压器容量为 1600kV·A。在设计时，风道结构能解决变电站内大容量变压器的温升问题。同时采用玻纤水泥外壳，解决沿海一带风电用箱式变电站的防腐问题。该箱式变电站可呈目字形或品字形布置，同时国内也为风电用箱式变电站开发出风电用 40.5kV 限流熔断器，如西安五环特种熔断器公司开发的 40.5kV 全范围高压限流熔断器，额定电流为 63A。

随着风电的发展，需要更多的 40.5kV 箱式变电站，其中需要配套的高压开关设备为 40.5kV 环网柜和 40.5kV 限流熔断器等。

4. 电气化铁道与开关设备

国家发展和改革委员会发布全国铁路中长期规划调整方案，确定到 2020 年铁路里程总长为 12

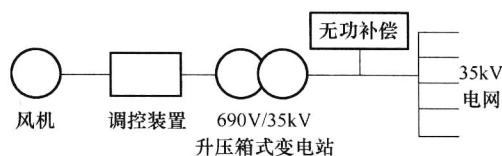


图 1-1 并网型风电原理图

万 km 以上。这比铁道部最初提出的 10 万 km 目标有较大幅度的提高。其中复线率和电化率分别达到 50% 和 60%。到 2010 年, 全国铁道营业里程达 9 万 km 以上, 其中客运专线约为 7 000km, 复线、电化率均达到 45% 以上。

电气化铁路是指用电力机车作为牵引动力的铁路。世界上第一条电气化铁路于 1879 年在德国柏林建成。我国于 1961 年建成第一条电气化铁路——宝成铁路的宝鸡至凤州段。电气化机车上不设原动机, 其电力由铁路电力供应系统的高压电经牵引变电所和接触网组成。来自高压输电线路的高压电经牵引变电所降压整流后, 送至铁路架空接触网, 电气机车通过滑线弓受电, 牵引机车行驶。电气化铁路具有的优越性是节省能源, 热效率可达 20% ~ 26%, 运输能力大、功率大, 可使牵引总重提高; 运输成本低、维护少、机车车辆周转快、整备作业少、耗能少、污染少、粉尘与噪声小、劳动条件也较好等。

电气化铁路的心脏是牵引变电所。建立在铁路沿线的牵引变电所从通用电网引入 220kV 或 110kV 三相交流电源, 将三相电转换为适合电气列车使用的单相交流 27.5kV 或 55kV 电源并送上接触网。为确保牵引供电万无一失, 牵引供电系统都采用“双备份”模式。

牵引供电系统的基本构成如图 1-2 所示。

电力牵引供电系统与电力系统相比, 其特点是负荷波动大, 故障率特别是瞬时故障率高, 工作条件恶劣。对于客运专线来说, 还具有牵引负荷大, 受电时间长, 集中负荷时段特征明显, 可靠性要求更高等特点。

电气化铁路的动脉是接触网。我国电气化铁路接触网采用额定电压为

25kV, 牵引站变压器二次电压为 27.5kV 和 55kV 两种。接触网的制式有 BT 和 AT 两种, 其中 BT 制采用 27.5kV, AT 制采用 55kV。过去我国电气化铁路主要采用 BT 制, 少量采用 AT 制。

电气化铁路供电包括 27.5kV 系统和 10kV 系统。10kV 系统为铁路的通信、信号以及日常工作 and 生活供电。27.5kV 系统则为电力机车供电。10kV 系统为三相系统, 三相负荷基本平衡。27.5kV 为两个单相系统, 但两者的负荷特性又不相同, 各自的负荷情况又与各自的线路情况、电力机车类型、列车载重等因素有关。因此, 27.5kV 系统的工作条件要比 10kV 系统复杂、恶劣。

电气化铁路用的开关有其特殊性, 这与接触网的要求有关。电气化铁路对电压等级有特殊要求, 除 110kV 电压外, 还需要 27.5kV 和 55kV 电压等级。接触网为单相制, 接触网—电机车—铁轨构成单相回路, 因此需要如 27.5kV 开关亦为单相式。频繁操作又是电气化铁路一大特点, 电气化铁路用高压开关开、合短路次数多, 接触网年百公里短路跳闸次数达 60 ~ 80 次, 工作电流波动大, 为 0 ~ 1000A 左右, 高速接触网可达 1500A 以上, 改变运营方式也会引起正常操作频繁。开关安装使用环境差等。

电气化铁路开关设备的选型主要与线路等级、供电方式、外部环境条件有关。

如变电所高压侧的 126/252kV 断路器通常选用户外支柱式断路器, 也可选用 GIS 或 PASS。该设备均为通用设备, 其技术要求基本与电力系统所用设备一致。27.5kV 侧的开关设备有户外柱上式断路器、户内空气绝缘开关柜 (AIS) 和气体绝缘充气柜 (C-GIS)。

27.5kV 开关为铁道专用设备, 该类设备通常是在 40.5kV 设备基础上改型生产的, 其绝缘性能要求要高于 40.5kV 设备。户内气体绝缘充气柜 (C-GIS) 由于其体积小、可靠性高、免维护的特性, 目前已在 300km/h 及以上时速的客运专线中大量采用。27.5kV/2 × 27.5kV 开关柜主要技术参

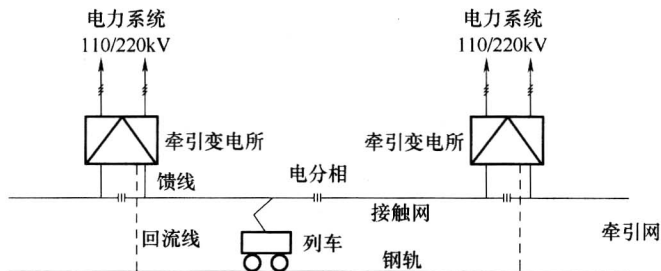


图 1-2 牵引供电系统的基本构成

数见表 1-1。

表 1-1 27.5kV/2 × 27.5kV 开关柜主要技术参数

内 容	技 术 参 数
系统标称电压	27.5kV
最高工作电压	31.5kV
额定电压	2 × 27.5kV, 1 × 27.5kV
额定电流	1250 ~ 3150A
额定频率	50Hz
额定短时耐受电流 (3s)	31.5kA
额定峰值耐受电流	80kA
一次母线峰值耐受电流	80kA
分、合闸机构和辅助回路的额定电源电压	DC 110V
控制回路、辅助回路 1min 工频耐压	2kV
电流互感器和电压互感器的二次绕组 1min 工频耐压	3kV
开关柜一次母线	单母线不分段方式
断路器额定短路电流开断次数	≥20 次
断路器额定分闸时间	≤0.045s
断路器额定合闸时间	≤0.1s
断路器额定操作顺序	0-0.3s-CO-180s-CO
SF ₆ 气体年漏气率	<0.5%
开关柜进出线方式	电缆下进下出
额定 1min 工频耐受电压 (有效值)	
对地、相间及普通断口间	≥95kV
隔离断口间	≥110kV
额定雷电冲击耐受电压 (峰值)	
对地、相间及普通断口间	≥200kV
隔离断口间	≥220kV

电气化铁路用的高压开关有断路器、负荷开关、快速隔离开关及成套设备 (如 C-GIS) 等。

目前许多公司大力开发电气化铁路用开关设备, 如 AE 帕瓦公司开发出电气化铁路专用的 55kV 柱上真空断路器, ABB 公司 2008 年开发出电气化铁路用 2 × 1.5-R 型双极 GIS 开关设备。该设备用 SF₆ 气体绝缘, 采用 VD4X-R 型真空断路器及三工位开关。母线—三工位开关—真空断路器呈下、中、上布置。其参数为 31.5kV—50Hz—2500A, 31.5kA。

“十一五”期间, 我国建设的电气化铁路约为 2.5 万 km。按电气化铁路营运里程每公里需要发电设备容量约为 700kW 计算, 新增发电装机容量为 1750kW, 以及相应的 220kV、110kV 的变电所设备和线路。预计“十一五”期间新增电力机车约 12500 辆、牵引变电所 625 座以及为主配套的开闭所、分区亭等, 需要牵引变压器 1250 台, 110kV 断路器 3750 台, 27.5kV 断路器 2500 台以及电车线、通信电缆、隔离开关、开关柜、低压配电屏、负荷开关、互感器、避雷器、电抗器等。

这轮电气化铁路建设和改造要求国产设备的使用率和国产化率由原来的不足 10% 提高到 70%。这必然会国内电气设备制造企业带来大量订单和良好的发展机遇。

第三节 我国电网的高压开关装用量和运行情况

不同电压等级所需高压开关数量不同,电压等级越高,所需开关数量越少。这里以所需断路器为例,有这样的估算数据:电力每增加1万kW,约需550kV断路器0.1台,252kV断路器0.72台,126kV断路器2.49台,12kV断路器100~150台。由此可知,在配电领域,如12kV级断路器用量很大。其他配电类型开关数量也会相应大幅增加,如断路器:隔离开关为1:3~1:4,断路器:负荷开关为1:5~1:6。作为成套装置的配电网开关柜、C-GIS、环网柜、F-C回路柜、负荷开关-熔断器组合电器及箱式变电站亦会大幅增加。因此,随着配电网建设的加大,对中压开关设备的需求将大大增加,这对中压开关制造业非常有利。

我国电网主要由国家电网公司和南方电网公司经营。国网公司经营区域覆盖26个省、市、自治区,覆盖国土面积88%以上。南网公司覆盖广东、广西、云南、贵州和海南等地。

1. 国网公司高压开关设备装用量与运行情况

国家电网公司对2008年12kV及以上高压开关设备状况进行了分析总结。

截止2008年底,国网公司12~800kV高压断路器(含GIS间隔)在运总量为414549台,同比增长63092台,增长率达到18.0%,无油化率为95.1%,同比上升1.68%。其中126kV及以上SF₆瓷柱式和罐式断路器共61748台,126kV及以上GIS共13768间隔,同比分别增长13.9%和38.5%。

近三年的SF₆断路器和GIS设备装用量及增长率有如下几个特征:①2008年72.5kV以上等级设备均保持快速增长,均在10%以上;②GIS设备连续两年高速增长,均超过38%,分别是敞开式SF₆断路器增长速度的2.77倍和3.49倍;③敞开式SF₆断路器在各电压等级的增长率,2008年同比增长均高于2007年。

从投运年份看,近5年投运的开关设备占59.2%,近10年投运的开关设备占到86.8%。这说明国网公司系统九成的72.5kV及以上开关设备寿命不到规定使用寿命的一半。

从断路器非计划停运情况看,2008年国网公司系统72.5kV及以上断路器(含GIS间隔)非计划停运907次,同比下降593次,非计划停运率为1.32次/(百台·年)。非计划停运主要集中在126kV和252kV电压等级,占88.6%,其中363kV和252kV断路器强迫停运率最高。

从断路器非计划停运责任原因和部位原因看,2008年,72.5kV及以上断路器(含GIS间隔)总共发生与断路器质量和性能密切相关的1~4类非计划停运856次。其中设备自身原因造成523次,占61.1%;因人员原因有82次,占9.6%;因外部原因有251次,占29.3%。在设备本身原因造成的非计划停运中,属于操动机构及传动环节的有308次,占58.9%;属于断路器本体的有54次,占10.3%;属于外部及二次回路元件的有161次,占30.8%,其中二次回路及继电器87次,占外部环节的54.0%,二次回路中属于分合闸线圈原因的有19次,占二次回路及继电器总数的21.8%。

从操动机构分析看,在历年统计数据中,操动机构和二次回路是造成设备非计划停运的关键部位,分别占58.9%和16.7%。2008年数据表明,由油压机构及其储压筒造成的停运次数占机构类的48.4%,主要表现为渗漏油、部件变形损坏及打压频繁等故障。

从二次回路看,2008年因二次回路造成的非计划停运次数占16.7%,仅次于液压机构。二次回路故障主要表现为分合闸线圈损坏或卡涩、二次接线松动或绝缘下降、辅助控制开关或继电器转换不到位等。此类故障几乎全是因为元件质量不过关引起的。

从外部原因看,72.5kV及以上断路器外部原因造成非计划停运251次,其中冰雪灾害和地表破坏造成221次,占88.0%。统计中发现,发生瓷柱式断路器地震非计划停运186次,占74.1%,

而罐式断路器为 35 次，占 13.9%。因此，对地震多发地区，GIS 和罐式断路器是优选方案。

从存在的问题看，有断路器的制造质量问题、液压机构问题依然突出、GIS 设备安装质量亟待提高、对二次回路配件质量重视不够、早期的 LW13 和 LW12 系列罐式断路器存在重大缺陷、状态检测手段尚不成熟、检测和分析方法缺乏统一标准。

2. 南网公司高压开关设备装用量与运行情况

南网公司包括广东电网、广西电网、云南电网、贵州电网及海南电网等。2008 年在运的变电站 500kV 58 座、220kV 435 座、110kV 1815 座、35kV 400 座、10kV 11 座，共计 2719 座。2008 年在运敞开式断路器 550kV 728 台、252kV 3477 台、126kV 10676 台、40.5kV 6310 台、12kV 1551 台，共计 22742 台。2008 年在运高压开关柜 40.5kV 2204 面、12kV 67522 面，共计 69926 面。2008 年在运高压隔离开关 550kV 1214 组、252kV 12020 组、126kV 33096 组，合计 71579 组。

在运高压开关存在的问题，对于 126kV 高压开关而言，2008 年因断路器自身原因的有 523 次，占非计划停运率的 57.7%，其中国产设备 86%，非计划停运率 0.992 次/(百台·年)；对液压机构而言，液压机构占设备自身原因总数的 35%；对 GIS 而言，近几年来，GIS 装用量急剧增加，年增长率保持在 30%~40%。存在安装质量和制造质量问题，如广东的莞城站和香山站停电事故经认真调查分析，事故的根本原因为母线安装后两侧触头间的可移动间距过大，触指插入深度不够，接触不良。究其责任在厂家结构设计没有考虑加工和安装误差、母线管加工质量失控、现场安装无相应有效的质量控制标准和手段。经对 9 个变电站共 139 间隔 252kV GIS 停电检查，不符合要求的触头数占触头总数的 18.8%；对于高压隔离开关，存在的问题是目前仍有大量未完善的国产 GW4、GW6、GW7 等型隔离开关，还有部分厂家完善化改造不彻底；对于二次回路配件质量重视程度不够，约有 25% 以上非计划停运均是由二次回路接线和辅助控制元器件引起的；对于高压开关柜，存在母线 PT、避雷器的接法问题，在运的 PT 柜，有 150 面避雷器直接接于母线上，对 12kV 手车柜，明确指出“母线设备柜的 PT 及避雷器不能直接接母线，应接在小车上”。

第二章 高压开关设备总论

高中压开关设备是指用于发电、输电、配电和电能转换有关的开关电器。习惯上将高中压开关设备的额定电压分为中压（3.6kV、7.2kV、24kV、40.5kV）、高压（72.5kV、126kV、252kV）、超高压（363kV、550kV、800kV）及特高压（1100kV）等。高中压开关设备的额定电压高于线路的相应标称电压。

高中压开关设备包括元件和成套装置。成套装置包括中压金属封闭开关设备和高压开关设备。

第一节 高中压元件

1. 断路器

断路器是能关合、承载、开断运行回路的正常电流，也能在规定时间内关合、承载及开断规定的过载电流（包括短路电流）的开关设备。

按灭弧介质不同，断路器可分为油断路器、压缩空气断路器、SF₆断路器、真空断路器、磁吹断路器、固体产气断路器。现在中压领域 SF₆断路器和真空断路器已成为两大支柱，其余产品已被淘汰。在高压领域，以 SF₆断路器为主导。

2. 真空断路器

1) 特点：熄弧能力强，燃弧时间短，全分断时间也短；触头电磨损小，电寿命长，触头不受外界有害气体的侵蚀；触头开距小，减小了操动机构的操作功，机械寿命也长；结构简单，维修工作量小，真空灭弧室与触头不需检修；体积小，重量轻；环境污染小；适合于频繁操作和快速切断。

2) 用途：适用于作为配电和控制设备，尤其适用频繁操作，控制高压电动机，切合电容器组，保护大型硅整流装置等高压电器设备使用。

3. SF₆断路器

SF₆断路器特点是灭弧能力强，介质强度高，单断口的电压可以做得很高，介质恢复速度特别快；允许开断次数多，检修周期长。

SF₆断路器分瓷柱式和罐式两种，均采用性能优越的 SF₆气体作为绝缘和灭弧介质，开断性能好。瓷柱式 SF₆断路器具有机械强度高、维护工作量少、机械寿命长等优点，主要用于发电厂、变电站、大型厂矿等使用场所；罐式 SF₆断路器重心低，结构稳固，抗震性好，特别适用于多地震、严重污秽地区和山区变电站、城网供电所。

4. 负荷开关

负荷开关是一种能关合、开断及承载运行线路正常电流，也能在规定时间内承载异常电流的开关。它主要工作在 10 ~ 35kV 的小容量配电系统中，用来开断和关合负荷电流及规定的过载电流，也可用来开断、关合电容器组和大容量输电线路中的空载变压器和空载线路。

常见种类有压气式负荷开关、产气式负荷开关、油负荷开关、真空负荷开关、SF₆负荷开关等。现主要用 SF₆负荷开关和真空负荷开关。

5. 隔离开关

隔离开关是一种没有灭弧装置的开关设备，一般只用来关合和开断有电压无负荷的线路。主要