

特高压开关设备的发展

李心一

提高输电电压，减少线路损耗，提升输电效率，解决远距离、大范围、大功率输电问题一直是输变电行业的目标之一。从上世纪 80 年代开始，前苏联、意大利、日本等国家相继开展了有关的研究和实践工作，取得了一些成果。

在我国，随着经济建设的蓬勃发展，对电网建设也提出了更高的要求。开展 1000kV 交流输电工程，建设更为高效、更加坚强的电网，实现由大型能源基地跨区域、远距离、大容量、低损耗输送电力成为我国当前电网建设的重中之重。为满足特高压电网发展需要，国家科技部在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》规划任务中，专门设立了题为“特高压输变电系统开发与示范”的重大项目，为我国的特高压电网建设展开专门研究，以支持国家电网公司规划的晋东南-南阳-荆门 1100kV 特高压交流试验示范工程的建设。该项目自 2006 年立项以来，已经取得了丰硕的成果，特别是晋东南-南阳-荆门 1100kV 特高压交流试验示范工程的顺利建设和投产，标志着我国在特高压输变电领域取得了骄人的成绩，立于世界之巅。

特高压开关设备的研究和生产是“特高压输变电系统开发与示范”中的重要一环，经过全行业相关人员两年多的不懈努力，我国特高压开关设备的研究和生产取得了飞速的发展，占据了世界领先的地位，为我国特高压交流输变电工程建设立下了汗马功劳。

在总结特高压开关设备研发成功经验，庆祝中国电器工业协会高压开关分会成立 20 周年之际，笔

者特意从发展历程的角度，回顾了特高压开关设备的研发过程，与同仁共勉。

1. 特高压开关设备的发展历程

1.1 上世纪八十年代中期，前苏联建设了世界上首条特高压（1150kV）输电线路，并将其投入商业运营。

前苏联的艾基图斯巴斯、车里亚宾斯克和西西伯利亚电煤联营体为了实现将几百万兆瓦的电能在 2000 多公里的范围传输，达到将能源基地大量的煤炭能源便捷传输到负荷中心的目的，规划建设世界上第一条 1150kV 输电线路。其目的是配套一系列大型火力发电厂建设，在哈萨克斯坦、乌拉尔、西伯利亚、中亚的电网系统之间建立一个强大的互联电网，实现电能的远距离、大容量、高效率输送，解决其能源基地远离其负荷中心的问题。



车里亚宾斯克-古斯塔纳-可可切塔夫-艾基图斯巴斯-拜阿努尔-依塔特

Chelyabinsk-Kustanay-Kokchetay-Ekibastuz-Barnaul-itat

前苏联规划的首条特高压（1150kV）输电线路全长 2300 多公里，即“车里亚宾斯克-古斯塔纳-可可切塔夫-艾基图斯巴斯-拜阿努尔-依塔特”，如图 1 所示。该工程采用分期建设分期投运的方式进行

建设, 首期建设的“艾基图斯巴斯-可可切塔夫-古斯塔纳-车里亚宾斯克”段线路全长 1208 公里 (图 1 中红色线路), 1983 年-1988 年间分段建设, 并首先分段投入 550kV 运行, 然后投入 1150kV 运行 (如表 1)。后来随着前苏联的解体, 该工程“艾基图斯巴斯-拜阿努尔-依塔特”段未再建设, 已经投入运行的线路也降至 550kV 运行。

前苏联特高压线路的变电站采用敞开式设计, 采用了一整套复杂的电气设备, 包括变压器、电抗器、断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器等, 这些设备均由苏联电气工业工厂研发制造。其中断路器采用 10 断口的空气开关, 开断电流 40kA, 额定电流 4000A, 配用气动操动机构。

限制过电压的电阻, 阻值 500Ω。整个线路进行了长期带电试验, 未投入商业运行, 目前该线路运行于 550kV。

由日本的特高压输变电线路来看, 特高压设备又得到了进一步发展。占地面积小, 可靠性高的 GIS 设备被首次使用于特高压输变电线路, 断路器单断口的开断能力已达到了 550kV/50kA, 这为特高压输变电线路实现商业化运行做了进一步的探索。

1.4、我国特高压输变电线路建设以商业运行为目的, 更具有挑战性。

我国水力、煤炭资源主要分布在西北、西南地区, 而电力、能源需求主要集中在东部, 随着我国国民经济的日益发展, 实现“西电东送”、建设大规模

表1

序号	线路分段和长度	投入550 kV运行时间	投入1150 kV运行时间
1	艾基图斯巴斯-可可切塔夫 (494.3)	1983年12月	1985年6月
2	可可切塔夫-古斯塔纳 (395.5)	1985年11月	1988年4月
3	古斯塔纳-车里亚宾斯克 (319.5)	1988年12月	原计划1995年
4	艾基图斯巴斯-拜阿努尔 (697)	1988年3月	原计划1995年
5	拜阿努尔-依塔特 (448)	1992年6月	

1.2 上世纪八十年代末期, 意大利继前苏联之后, 建设了世界上第二条特高压 (1000kV) 输电试验线路。

该线路只是一条用于试验的 1000kV 单回线, 从未投入运行。其中断路器采用敞开式结构, 4 个断口串联。与前苏联的特高压线路相比, 断路器的水平有了较大发展, 断口数由 10 个减到了 4 个, 这主要得益于 SF₆ 断路器的迅速发展, 使得单断口开断水平得到了很大提高。

1.3 1996 年, 日本建设了世界上第三条特高压 (1000kV) 输电试验线路, 首次将 GIS 引入到特高压开关设备中。

日本的特高压输电线路由日本东京电力公司组织建设, 地点在新臻明。该线路首次采用了 1100kV GIS 设备, 分别由三菱、东芝、日立三家公司各提供一相产品, 在线路上进行长期带电模拟试验。GIS 采用的断路器为双断口结构, 开断电流 50kA, 带有分、合闸电阻, 配用液压操动机构; 隔离开关设有

模输变电系统势在必行。我国目前的输电骨干网架主要为 550kV, 但大规模的 550kV 输电网架的建设将会占用大量宝贵耕地、产生大量传输损耗, 因此建设更为高效, 更加经济的 1000kV 特高压交流输变电系统, 实现我国从大型能源基地到电力急需地区的跨区域、远距离、大容量、低损耗、集约型的电力输送, 满足国民经济发展的需求成为我国当前能源建设的重大任务。

特高压输电具有输送容量大、送电距离长、线路损耗低、综合占地少等特点, 发展特高压输电, 有利于充分发挥电网的电力输送和网络市场功能, 满足经济社会发展对能源的需求; 有利于促进大煤电、大水电、大核电及大的可再生能源基地的集约化开发, 优化配置和高效利用能源资源; 有利于提升我国电工装备制造业的自主创新能力, 增强民族工业在国际、国内市场的竞争能力; 有利于提升我国电网的整体技术水平, 保障电网的安全运行和可持续发展。

建设特高压输变电系统，特高压设备研制是关键。我国对 1100kV GIS 的研究起步于 2006 年，当时国内的研究水平仅限于 800kV 水平，国外也少有可资借鉴的成熟经验，整体的研究基础不是很好。而我国的输变电事业的发展又要求研究成果可直接用于 1100kV GIS 产品研发，直接用于 1000kV 交流试验示范工程。由此，我国的特高压设备研究呈现出两大特点：

- ①电压等级高、技术参数高、可靠性要求高
- ②时间紧、任务重、责任大

2.我国特高压开关设备的研发现状

2.1 技术参数

我国的特高压开关设备技术参数要求较高，在我国决定发展特高压时，世界上没有一家设备生产厂商能提供满足我们需要的特高压设备。表 2 是我国对特高压设备的要求与当时世界上现有设备的技术差异。

表2

生产厂	东芝	三菱	日立	——	——	我国的要求
生产厂所在国家	日本	日本	日本	意大利	前苏联	
产品类型	GIS	GIS	GIS	GCB	GCB	GIS/HGIS
额定电压kV	1100	1100	1100	1050	1150	1100
额定电流A	2000/8000	8000	8000	——	4000	4000/6300
额定短路开断电流kA	50	50	50	63	40	50
断路器每极断口数	2	2	2	4	10	2/4
额定工频耐受电压kV	对地 1100	1100	1100	910	1150	1100
额定雷电冲击耐受电压kV	对地 2250	2250	2250	2250	2900	2400
额定操作冲击耐受电压kV	对地 1550	1550	1550	1675	2100	1800
断路器所配机构	液压机构	液压机构	液压机构	——	气动机构	液压机构

我国 1100kV GIS 技术参数：

- 1) 额定电压 1100kV
- 2) 额定电流 4000A / 8000A
- 3) 额定频率 50Hz
- 4) 额定短时耐受电流 50kA
- 5) 额定短路持续时间 2s
- 6) 额定峰值耐受电流 135kA
- 7) 额定绝缘水平见表 3
- 8) 断路器技术参数
- 额定短路开断电流： 50kA
- 短路电流直流分量衰减时间

表3 1100kV GIS额定绝缘水平

	相对地	断口间
额定工频耐受电压kV	2400	2400(+900)
额定雷电冲击耐受电压kV	1800	1675(+900)
额定操作冲击耐受电压kV	1100	1100(+635)

- 常数： 120ms
- 额定短路关合电流 135kA
- 开合线路充电电流的能力
- 1.3×1100/ kV 电压下 1200A
- 合闸电阻预接入时间： 8~11 ms
- 电寿命： 满容量开断 16 次
- 9) 隔离开关技术参数
- 开、合小电流能力
- 开、合电容电流（有效值） 2A
- 开、合母线转移电流的能力

- 转移电压 400V
- 开合电流（有效值） 1600A
- 开合次数 100 次

2.2 产品设计

为确保 1100kV GIS 产品的设计可靠、1000kV 特高压交流试验示范线路建设的顺利完成，我国国内的三个主要的 GIS 生产厂——西安西开高压电气股份有限公司、新东北电气（沈阳）高压开关有限公司、河南平高电气股份有限公司——分别与 ABB 公司、AE Power 公司、东芝公司合作，同时展开研究，分别向荆门、南阳、晋东南提供 1000kV 开关设

备,均取得了成功。

下面以西开电气的产品设计为例,谈一谈中国特高压 GIS 的研发现状。

2.2.1 断路器设计

断路器的原理见图 2。



图 2 断路器原理图

断路器灭弧室采用四个现有的成熟的灭弧室相串联的结构,整个灭弧室与并联合闸电阻分别布置在两个独立壳体中,操纵合闸电阻的电阻开关采用了合后即分的“合分开关”结构,处于另一个独立壳体中。灭弧室与电阻开关共用一台机构,采用连杆传动原理分别驱动,从而可靠完成合闸电阻的预接入,断路器结构见图 3。

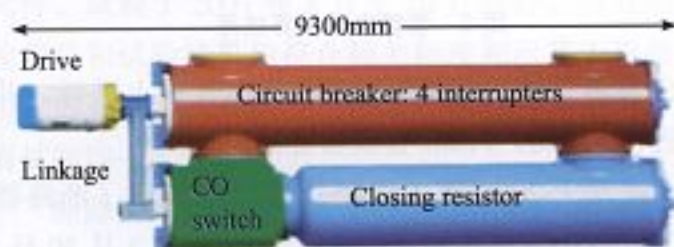


图 3 断路器结构示意图

断路器采用全铝焊接壳体,轻巧便捷,整个断路器重量只有 7.5 吨,远低于采用钢壳的产品,易于生产,便于安装。

相对于同类产品,该断路器由于采用了四断口串联结构,所需要的分闸速度较低,所需的操作功很小,仅需 16kJ。

断路器的电场情况是决定断路器设计成败的重要环节。在断路器设计中,采用二维和三维计算软件对断路器的电场结构进行了反复验算,反复优化,最终形成了目前的设计方案。

通过电场计算得出了断路器各部分的最大值,并且,所有的值均低于产品设计的许用值。产品已成功通过了型式试验验证。图 4 是断路器二维电场计算结果云图和部分点的极大值。

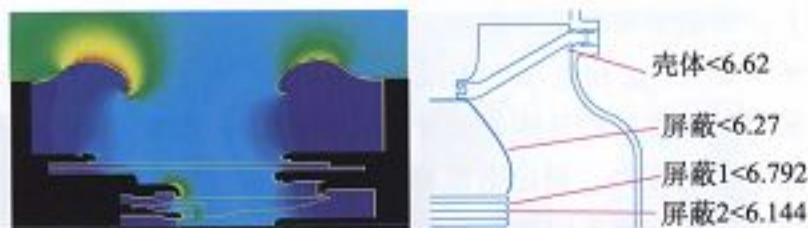


图 4 断路器二维电场计算结果云图和部分点的极大值

2.2.2 隔离开关设计

隔离开关采用直角型结构,配用电动操动机构。

隔离开关为单相操作,采用直连结构。可根据用户要求,设置观察窗,方便观察断口状态。可与接地开关组合,也可单独使用。壳体采用焊接结构。图 5 是隔离开关的外形结构。



图 5 隔离开关

该隔离开关结构简单,性能优良,零部件数量少,通用性强。

采用二维和三维计算软件对隔离开关的电场结构进行了反复验算,反复优化,最终形成了目前的设计方案。因为采用了良好的电场结构,使得隔离开关的 VFT 倍数最大只有 2.2pu,而使隔离开关不需设置 VFT 电阻,并成功通过了型式试验验证。

通过电场计算得出了隔离开关各部分的最大值,并且,这些值均低于产品设计的许用值,并已成功通过了型式试验验证。

2.2.3 套管设计

西开电气充分利用自有技术,并通过仿真模拟等手段对其进行发展和提升,成功研制出 1100kV SF₆ 气体绝缘复合套管,为世界首创,完全可以替代进口的气体绝缘瓷套管。该产品采用空心复合绝缘子作为外绝缘件和产品整体结构支撑件,采用 SF₆ 气体作为内绝缘,采用整体式弧形组合屏蔽作为内屏蔽,提高了绝缘水平,达到标准要求的 1.1 倍以

上；采用了塔形外屏蔽环，大幅降低产品的电晕水平，在 1.1 倍相电压下无线电干扰电压仅为 $16\mu\text{V}$ ；采用了大直径的导体，设计了良好的导电回路，增强了通流能力，额定电流超过了 8000A；产品整体达到了当今世界同类产品的最高水平，属国际领先水平。拥有完全自主知识产权，形成了发明专利 1 项（已受理）。

1) 套管通流能力设计

a) 设计目标：持续电流通流能力满足 $8000\text{A}\times 1.1$ 要求，短时耐受电流满足 $50\text{kA}/2\text{s}$ 要求，峰值电流满足 135kA 要求；

b) 计算得到的持续电流通流能力为 10814A ，满足设计要求；

c) 计算得到的短时耐受电流能力为 118kA ，满足设计要求；

d) 计算得到的峰值电流能力为 253kA ，满足设计要求。

以上计算表明，该设计可完全满足预定目标。

2) 套管电场计算

a) 设计目标：

雷电冲击耐受电压： $2400\text{kV}\times 1.1$ ；

操作冲击耐受电压： $1800\text{kV}\times 1.1$ ；

短时工频耐受电压： $1100\text{kV}\times 1.1$ 。

b) 计算结果表明，各部分电压分布合理；

c) 通过电场计算得出了套管各部分的最大值，并且，这些值均低于产品设计的许用值。产品已成功通过了型式试验验证。

图 6 是套管电场计算结果示意图。

2.3 型式试验

西开研制的 1100kV GIS 在国家高压电器质量监督检验中心等单位进行了全套型式试验，试验项目符合国家标准 GB 7674 和产品供货合同技术规范书的要求。试验结果合格，报告有效。

2.3.1 断路器容量试验

这是世界上首次进行如此高电压等级的容量试验，试验在中国西安 XIHARI 试验室进行，国网公司、监造代表和国网专家现场见证了试验的全过程。

西开、新东北和平高三家的产品同时在 XIHARI 进行试验，采用同样的试验程序和试验参数。断路

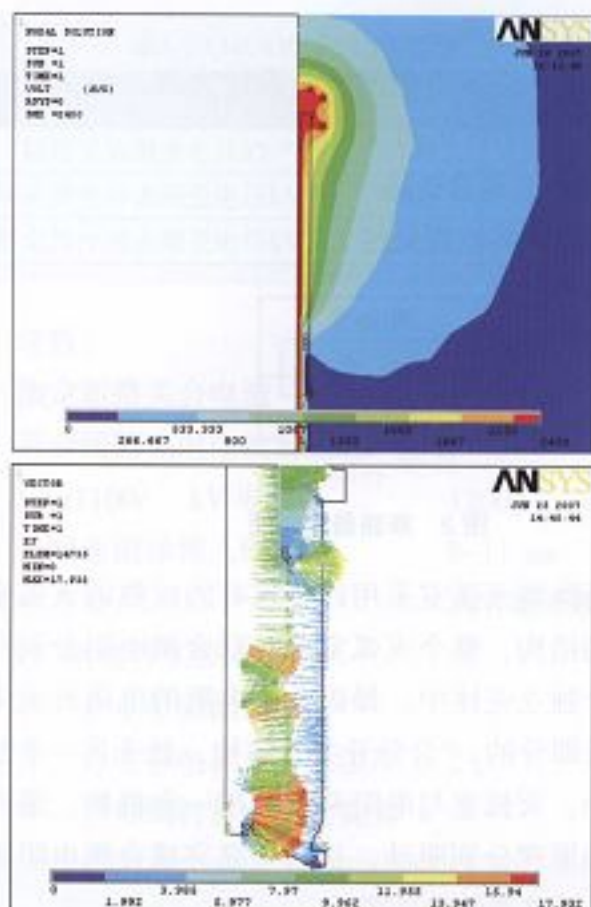


图 6 套管电场计算结果

器全套容量试验均按标准在 $1/2$ 试验极上进行，并需进行 T100a、T100s 整极验证试验。

西开于 2008 年 3 月 25 日第一个通过了断路器 T100a、T100s 整极验证试验，于 2008 年 3 月 30 日，第一个通过了断路器的全部容量试验。所有试验均为一次通过试验结果符合相关标准和示范工程技术协议的要求。

图 7 是 2008 年 3 月 25 日，西开产品正在进行整极验证试验。

图 8 是 2008 年 3 月 30 日，西开产品通过容量



图 7 断路器整极验证试验中

试验后，国网公司代表与国内监造代表、KEMA 监造代表、试验室代表、生产厂代表在试验室合影。



图 8 西开电气于 2008 年 3 月 30 日率先完成断路器容量试验

2.3.2 绝缘试验

这是世界上首次进行如此高电压的绝缘试验，试验在中国西安 XIHARI 试验室绝缘试验大厅进行，国网公司、监造代表和国网专家现场见证了试验的全过程。

受试验室场地和试验设备容量限制，绝缘试验在两个试验形态上进行，即 GIS（不含断路器）和断路器。

GIS 试验形态包含了除断路器以外的所有 GIS 元件，试验于 2007 年 8 月至 10 月进行。所有的试验项目和试验结果均符合相关标准和示范工程技术协议的要求，所有试验均按最严酷的条件进行，所有试验均一次成功通过。

断路器试验形态包含了断路器及部分试验附件，试验于 2007 年 11 月至 2008 年 1 月进行。所有的试验项目和试验结果均符合相关标准和示范工程技术协议的要求，所有试验均按最严酷的条件进行，所有试验均一次成功通过。

图 9 是 GIS 试验形态在进行绝缘试验。

图 10 是断路器在进行绝缘试验

图 11 是绝缘试验完成后，国网公司的监造代表、KEMA 监造代表、生产厂代表在试验极前合影。

2.3.3 套管试验

西开自主设计的 FDLW-1100/8-3K 气体绝缘复合套管属国际首创，其试验也是国际上首次进行。



图 9 GIS 绝缘试验进行中 图 10 断路器绝缘试验进行中



图 11 绝缘试验成功通过

试验在中国西安 XIHARI 试验室进行，国网公司、监造代表和国网专家现场见证了试验的全过程。

绝缘试验均按照技术要求的 1.1 倍进行，具体试验值如下：

雷电冲击 LI : 2640kV

操作冲击（干、湿）SI : 1980kV

短时工频耐受（干、湿），1min : 1210kV

无线电干扰水平在 1.1 倍相电压下测量，两次测量的结果分别是 $24\mu\text{V}$ 和 $16\mu\text{V}$ 。

局放测量试验分别在 1.05 倍、1.1 倍和 1.5 倍相电压下进行，测量的结果均符合相关标准和示范工程技术协议的要求。

介质损耗和电容量测量分别在 1.05 倍相电压下和额定电压下进行，介损的测量结果远低于要求值，介损和电容量基本不随电压升高变化。

套管还进行了 8800A 温升试验、动热稳定试验、端子拉力试验等。

图 12 是套管在进行绝缘试验；

图 13 是套管在进行无线电干扰水平测量试验；

图 14 是套管在进行温升试验。



图 12 套管绝缘试验 图 13 套管无线电干扰测量



图 14 套管温升试验

2.3.4 其它试验

隔离开关在瑞士 Baden 试验室通过了切环流试验, 试验电压 400V, 试验电流 1600A, 试验次数 100 次。

隔离开关在瑞典 STRI 试验室进行了切容性小电流试验。

产品按元件分别进行了温升试验和动热稳定试验, 试验时将主导电回路与外壳串联作为通流回路, 对主导电回路与外壳的通流能力同时同条件进行了考核。

断路器、隔离开关、接地开关分别按各自要求进行了机械寿命试验。

产品还进行了密封、微水含量测量、防护等级、噪音测量等试验。

图 15 是母线在进行温升试验;

图 16 是断路器在进行机械寿命试验。



图 15 母线温升试验



图 16 断路器机械寿命试验

2.4 工程应用

西开电气共为 1000kV 特高压交流示范工程荆门变电站提供了两个间隔的 1100kV H-GIS, 现已正式投入运行。

西开电气 2006 年底开始研发 1100kV GIS, 边设计、边试制, 于 2007 年 7 月至 12 月完成样机试制, 2007 年 11 月开始为荆门工程生产开关, 2008 年 9 月完成了全部型式试验, 于 2008 年 11 月完成了荆门工程的现场安装, 于 2009 年 1 月 6 日完成了试运行考核, 同日正式投入运行。截至目前, 西开电气

提供给荆门站的 1100kV H-GIS 已成功投运半年时间, 产品目前运行平稳。

图 17 是西开提供的 1100kV H-GIS 在荆门变电站现场。



图 17 运行中的 1100H-GIS

2.5 产品技术创新点

西开电气研制的 1100kV GIS 具有以下创新点:

- 产品整体设计采用工业设计的理念, 总体结构采用低型水平布置, 整个产品中心距地面高度为 1.3 米, 人机关系友好, 便于维护; 产品采用全铝壳体, 重量轻; 整体抗震性能好。

- 断路器采用四断口串联, 操动机构操作功为 16kJ; 灭弧室与合闸电阻采用并联分列式结构, 布置在各自独立的气室中; 合闸电阻开关采用了“合后即分”的设计。额定短路开断电流 50kA、衰减时间常数 120ms。

- 隔离开关、接地开关采用丝杠传动系统; 母线通流能力达到 8000A, 母线接头采用球形转换结构, 布置灵活, 适应于不同的连接要求; 电流互感器采用外置式整体浇注结构。

- 首次采用了特高压气体绝缘复合套管, 具有完全自主知识产权, 为国际首创。

3. 特高压开关设备的未来发展

在中国, 特高压输变电工程才刚刚开始, 预计未来的十几年时间, 将是中国特高压输变电系统迅猛发展的时代。作为特高压输变电线路的关键设备之一, 特高压开关设备也将迎来一个极为重要的发展时段。

3.1 中国后续特高压工程

3.1.1 皖电东送工程

皖电东送工程线路总长 660 公里, 全线线路采

用同塔双回设计, 全线共 4 座变电站。工程分两期建设, 其中一期共需 34 个间隔 1100kV GIS, 分别是淮南 7 个间隔, 皖南 10 个间隔, 浙北 10 个间隔, 沪西 7 个间隔。

皖电东送工程主设备技术条件已通过审查。主参数为:

-开断电流 50kA

-额定电流 6300A

四站均需 GIS 中采用快速接地开关、电压互感器、避雷器。

国网公司计划 2011 年 6 月底完成整个工程。

3.1.2 1000kV 三华主网架工程

国网计划在华北、华东、华中建设两纵两横四条特高压骨干线路, 分别是:

①锡盟——上海西

②陕北——长沙

③蒙西——潍坊

④雅安——南京北。

整个工程共计 28 座 1000kV 电站, 预计需要超过 300 个间隔的 1100kV GIS, 国网公司计划 2012 年建成, 以联结晋陕蒙煤电基地、四川水电基地和东中部负荷中心, 形成“三华”特高压同步电网。

三华主网架工程预计主参数为:

-开断电流 63kA

-额定电流 6300A

3.1.3 东北工程

东北工程由一条骨干线路, 外加若干分支组成, 共计将建设 7 座 1000kV 电站。骨干线路为宝清——哈尔滨——长春——辽宁四站, 计划 2010 年招标。

东北工程预计主参数为:

-开断电流 63kA

-额定电流 6300A

3.2 印度特高压工程

印度的特高压工程目前提出的最高运行电压为 1200kV, 正在进行可行性研究。

2009 年 5 月在北京进行的国际大电网会议上, 印度代表对中国的特高压发展取得的成绩和经验兴趣十分浓厚, 相信特高压建设在中国取得的成就将会对印度特高压的发展产生积极的影响。

3.4 未来特高压工程对特高压开关设备的要求

未来特高压工程必将对特高压开关设备提出更高的要求, 以解决更高层次的工程问题和实际需要。预计未来特高压开关设备将在以下几个方向进一步发展

- 研制更高参数的开关设备, 满足更大容量输送问题;

- 进一步提高产品的可靠性, 满足电网安全的需要;

- 更加集成化, 将电压互感器、避雷器、快速接地开关等元件纳入 GIS 的供货范围;

- 实现标准化设计、模块化生产, 进一步提高产品的工业化生产水平。

4 结语

发展特高压输变电技术, 实现大容量、远距离、高效率输电是输变电行业的发展方向, 符合中国的实际情况, 也是世界上与中国相似, 存在能源中心远离负荷中心, 需要进行大容量、远距离电能输送的国家和地区的可选方案之一。

中国的特高压试验示范线路成功投入商业运营, 标志着特高压输电技术进入了工程应用阶段, 特高压输变电设备的研发水平迈上了新的台阶。这是特高压输变电技术应用的良好开端, 为特高压输变电技术在更大范围内的应用奠定了了的基础。

未来几年, 特高压输电将迎来在中国发展的高潮, 对特高压输变电设备的要求也将更高。大力研发性能更为优良, 技术经济指标更高的特高压开关设备, 将成为开关设备制造厂商未来几年的重要课题。

特高压工程方兴未艾, 特高压设备研究正当其时, 相信特高压开关设备的发展即将登上更高的台阶。

参考文献

- [1] 《Innovation Solutions in Electric Equipment Development and Overhead Transmission Line Design of World's First Transmission Line Operating at 1150 kV Ekibastuz □ Kokchetav - Kustanai (USSR)》, 作者 L.V. Timashova, K.V. Khoetsian (JSC "R&D Center for Power Engineering")