

直流工程关键设备 高压技术监督及试验

马仪 颜冰 侯波 马御棠 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

直流工程关键设备高压 技术监督及试验

马 仪 颜 冰 侯 波 马御棠
王景林 王 科 钱国超 谭向宇
邹德旭 程志万 周仿荣 于 虹
胡南南 侯亚非 丁 薇 徐肖伟
刘红文 申 元 彭 晶 黄 然
彭庆军 彭兆裕 项恩新 李振超
金 皓 钟剑明 郭晨鋈 周兴梅
何 顺 刘光祺 马宏明 黑颖顿
翟 兵 杨明昆 李 昊

编著



机械工业出版社

本书针对直流输变电工程的建设与调试,从技术监督的角度,介绍了关键设备重要阶段(监护和出厂验收、安装和投产验收)的绝缘类试验项目技术要点,并分享了解决实际问题的经验。全书介绍了换流变压器、晶闸管阀、平波电抗器在停工待检(H点)和现场见证(W点)时的关键测试项目及技术要点,分享了解决换流变压器和晶闸管阀在出厂期间发现的不合格检测项目的经验;介绍了换流变压器、直流场设备、接地极现场试验时的关键测试项目及技术要点,分享了解决换流变压器、直流线路在现场交验收期间发现的不合格检测项目及相关问题的经验;着重对换流站内25类电气设备,包括直流侧高压设备、换流变压器、500kV交流电气设备的交接试验报告进行了详细审查,分类总结了常见易犯的问题。本书是电网企业及发电企业从事直流工程建设、管理、运行、试验的技术人员全面了解直流一次设备高压技术监督的专业书籍,同时可供电力企业相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

直流工程关键设备高压技术监督及试验/马仪等著. —北京:机械工业出版社, 2017.9

ISBN 978-7-111-57723-2

I. ①直… II. ①马… III. ①直流输电线路-电力设备-高电压-技术 IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第196494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:张俊红 责任编辑:阎洪庆 责任校对:刘 岚

封面设计:路恩中 责任印制:常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2017年11月第1版第1次印刷

145mm×210mm·8印张·232千字

标准书号:ISBN 978-7-111-57723-2

定价:45.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

自序



进入新世纪，伴随电力工业的快速发展，国内的电力工程技术由引进逐步向输出发展。尤以特高压交直流、柔性直流为代表的高端电力工程实践的陆续投产，在国际上已经打响名声。传统的双端直流输电工程，在我国已经发展了近30年，其关键技术已大部分国产化。伴随工程化的对外输出，有关直流技术的运维，在积累丰富经验的同时，亦逐步向输出发展。

直流技术市面上的相关著作较为丰富，《直流工程关键设备高压技术监督及试验》一书，从直流一次设备技术监督切入，以点带面介绍了国内在直流技术运维方面的有益经验，有一定独特性。全书从电力技术监督的角度，针对绝缘技术监督，介绍了关键设备重要阶段（监造和出厂验收、安装和投产验收）的绝缘类试验项目技术要点，并以具体工程为例，简介了实际发现的问题。

本书分别从出厂验收及现场交接进行了内容介绍。出厂验收阶段：第2、3、4章分别选择关键设备换流变压器、晶闸管阀、平波电抗器，针对停工待检（H点）和现场见证（W点）中的关键项目，重点介绍了试验原理、试验接线、注意事项、结果判断，并在每种检测项目中分享了编者实际参与总结的见证技巧；第8、9章以实际参与发现的具体见证问题为例，较详细地介绍了问题发现的过程、处理方式及结果。在现场交接阶段：第5、6、7章分别选择关键设备换流变压器、直流场、接地极，对现场交接的关键项目，较详细地介绍了试验方案，并分享了具体的试验测试数据；第10章以参与发现的具体实际问题为例，分析了问题发现的过程、处理方式及结果；第11



章简明扼要介绍了直流输电线路验收的规范性操作，并分享了直流线路验收发现的问题；第 12 章分享了换流站内直流侧所有高压设备、换流变压器、500kV 交流主要电气设备的交接试验报告审查中发现的常见易犯问题。

技术监督是涵盖设备选型、设计制造、监造出厂、安装调试、运行维护、检修试验和技术改造等全过程的工作。涵盖内容庞杂，其所体现的技术服务特性明显。全书内容对了解直流工程一次设备技术监督有借鉴意义，所归纳的问题案例亦可作为学习的素材。

马 仪

前 言 >>



DL/T 1051—2007 定义的“电力技术监督”是指在电力规划、设计、建设及发电、供电、用电全过程中，以安全和质量为中心，依据国家、行业有关标准、规程，采用有效的测试和管理手段，对电力设备的健康水平及与安全、质量、经济运行有关的重要参数、性能、指标进行监测与控制，以确保其安全、优质、经济运行。DL/T 1054—2007 定义的“绝缘监督”是指以安全和质量为中心，以标准为依据，以有效的测试和管理为手段，对高压电气设备绝缘状况和影响到绝缘性能的污秽状况、接地装置状况、过电压保护等进行全过程监督，以确保高压电气设备在良好绝缘状态下运行，防止绝缘事故的发生。

随着国家经济和技术的发展，高压直流输变电工程的建设和运行愈发成熟，特别是进入新世纪，在电压等级、容量大小、网架结构、设备制造等方面，都有了长足的进步。云南作为水电资源大省，在已有 $\pm 800\text{kV}$ 楚穗、 $\pm 800\text{kV}$ 普侨、 $\pm 500\text{kV}$ 牛从直流送出工程的基础上，结合电网规划及云南省经济发展的需要，实施了国内首个由省级电网公司调度和运维的 $\pm 500\text{kV}$ 永富直流输变电工程。

云南电网有限责任公司电力科学研究院，作为工程所在地的主要技术支撑单位之一，全面参加了该直流工程关键设备的监造验收、安装、调试及生产过程中的多项技术监督工作。

绝缘监督作为电网企业主要监督的八大内容之一，主要涉及电气一次设备绝缘性能、防污闪、过电压保护及接地。本书针对直流输变电工程的换流变压器、晶闸管阀、直流场设备及接地极等直流关键一次设备的关键项目，以出厂验收和安装投产验收两个阶段为重点，从出厂试验见证、现场试验和报告审核三个环节，对实际开展的技术监督工作进行了全面技术总结，并分享了实际发现的问题及有益经验。



本书共 12 章，主要内容和编写情况如下：

第 1 章由侯波、马仪、王科、谭向宇编写，主要内容为直流工程高压技术监督简介，让读者对技术监督的范围及成效有个初步认识。

第 2 章由颜冰、邹德旭、刘光祺编写，第 3 章由于虹、丁薇、谭向宇、彭晶编写，第 4 章由周仿荣、申元、黑颖顿编写。这 3 章着重对换流变压器、晶闸管阀、直流场设备的关键出厂试验项目进行了介绍，使读者能够较全面、深入地了解关键设备出厂见证阶段绝缘类试验项目需关注的要点。

第 5 章由邹德旭、王景林、颜冰、钱国超、刘光祺编写；第 6 章由颜冰、邹德旭、刘光祺、彭庆军、钱国超编写；第 7 章由马仪、马御棠、王科、周仿荣、黑颖顿编写。这 3 章着重对换流变压器和直流场设备的现场验收关键项目及接地极投产验收进行了介绍，使读者能够较全面、深入地了解关键设备现场验收项目的试验要点。

第 8 章由颜冰、刘光祺、邹德旭、王景林、钱国超编写；第 9 章由彭晶编写；第 10 章由刘光祺、颜冰、邹德旭、徐肖伟、刘红文、王景林、钱国超编写；第 11 章由马仪、申元、黄然、周仿荣、丁薇编写。这 4 章着重总结了换流变压器及晶闸管阀出厂及现场试验，直流线路现场验收时的一些问题，通过这些暴露问题的技术分析与经验分享，使读者能够认识直流工程关键设备的典型和易发缺陷。

第 12 章由马仪、王科、颜冰、侯波、马御棠、程志万、徐肖伟、钱国超、谭向宇、邹德旭、周仿荣、于虹、胡南南、丁薇、刘红文、申元、彭晶、黄然、彭庆军、彭兆裕、项恩新、李振超、郭晨璿、何顺、刘光祺、马宏明、黑颖顿、杨明昆编写，主要是对 500kV 交流电气设备、换流变压器、晶闸管阀、直流套管、直流场设备等进行了交接试验报告的技术性审核，及时督促整改后检查闭环，并分享了问题清单。

全书由马仪、侯波、王景林、侯亚非、周兴梅、李昊负责校核，钟剑明、翟兵、金皓参与了大量的现场试验工作。

由于编者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者不吝赐教。

编 者

目 录 >>



自 序 前 言

第 ① 章 直流工程高压技术监督	1
1.1 引言	1
1.2 依托工程概述	2
1.3 直流工程关键设备绝缘技术监督	4
1.3.1 出厂试验见证	6
1.3.2 现场交接试验	11
1.3.3 报告审核	14
1.4 直流工程绝缘技术监督成效	15
第 ② 章 换流变压器出厂试验见证	16
2.1 概述	16
2.2 长时感应电压试验	18
2.2.1 试验接线	18
2.2.2 试验程序	19
2.2.3 注意事项及结果判断	20
2.2.4 应用实例及分析	21
2.3 短时感应电压试验	24
2.3.1 试验接线	24
2.3.2 试验程序	24



2.3.3	注意事项及结果判断	25
2.3.4	应用实例及分析	25
2.4	外施交流电压耐受试验	27
2.4.1	试验接线	27
2.4.2	试验程序	28
2.4.3	注意事项及结果判断	29
2.4.4	应用实例及分析	29
2.5	雷电冲击试验	31
2.5.1	试验接线	32
2.5.2	试验程序	32
2.5.3	注意事项及结果判断	33
2.5.4	应用实例及分析	34
2.6	操作冲击试验	37
2.6.1	试验接线	37
2.6.2	试验程序	38
2.6.3	注意事项及结果判断	38
2.6.4	应用实例及分析	39
2.7	外施直流电压耐受试验	42
2.7.1	试验接线	42
2.7.2	试验程序	42
2.7.3	注意事项及结果判断	43
2.7.4	应用实例及分析	43
2.8	极性反转试验	46
2.8.1	试验接线	46
2.8.2	试验程序	46
2.8.3	注意事项及结果判断	47
2.8.4	应用实例及分析	48
第 3 章	晶闸管阀出厂试验见证	50
3.1	概述	50
3.2	四重阀单元	52



3.2.1	四重阀单元对地直流电压试验	52
3.2.2	四重阀单元交流电压试验	55
3.2.3	四重阀单元操作冲击试验	55
3.2.4	四重阀单元雷电冲击试验	57
3.3	阀支架结构	58
3.3.1	阀支架直流电压试验	58
3.3.2	阀支架交流电压试验	61
3.3.3	阀支架操作冲击试验	63
3.3.4	阀支架雷电冲击试验	66
3.4	单阀	67
3.4.1	阀直流电压试验	68
3.4.2	阀交流电压试验	70
3.4.3	阀操作冲击试验	73
3.4.4	阀雷电冲击试验	76
3.4.5	阀陡波前冲击试验	79
3.4.6	阀非周期性触发试验	82
3.5	阀组件	85
3.5.1	试验前准备	86
3.5.2	最大持续运行负荷试验及 BOD 试验	89
3.5.3	暂态欠电压试验	90
3.5.4	最小延迟角试验	91
3.5.5	断续直流电流试验 (a_{\min})	92
3.5.6	最小关断角试验	93
3.5.7	恢复期间暂态电压试验	94
3.5.8	最大暂态运行负载试验	96
3.5.9	断续直流电流试验	97
3.5.10	单波次故障电流再加正向电压试验	98
3.5.11	多波次故障电流不再加正向电压试验	99
3.5.12	阀抗电磁干扰试验	100
3.5.13	特殊性能试验	100



第 ④ 章	干式空心平波电抗器出厂试验见证	101
4.1	概述	101
4.2	中频振荡电容器放电试验	103
4.2.1	试验接线	103
4.2.2	试验程序	103
4.2.3	注意事项及结果判断	104
4.2.4	应用实例分析	104
4.3	端对端雷电全波及截波试验	106
4.3.1	试验接线	107
4.3.2	试验程序	107
4.3.3	注意事项及结果判断	107
4.3.4	应用实例分析	108
4.4	端对地外施直流耐受试验	111
4.4.1	试验接线	111
4.4.2	试验程序	111
4.4.3	注意事项及结果判断	112
4.4.4	应用实例分析	112
4.5	端对地雷电全波及截波冲击试验	113
4.5.1	试验接线	114
4.5.2	试验程序	114
4.5.3	注意事项及结果判断	114
4.5.4	应用实例分析	114
4.6	端对地操作冲击试验	118
4.6.1	试验接线	118
4.6.2	试验程序	118
4.6.3	注意事项和结果判断	119
4.6.4	应用实例分析	119
第 ⑤ 章	换流变压器现场交接试验	123
5.1	概述	123
5.2	绕组连同套管的直流耐压试验	124



5.2.1	试验接线	124
5.2.2	试验程序	124
5.2.3	注意事项及判断标准	126
5.3	绕组连同套管的感应耐压试验和局部放电测量	126
5.3.1	试验接线	127
5.3.2	试验程序	127
5.3.3	注意事项及结果判断	129
5.4	工程实践	130
5.4.1	被试换流变铭牌参数	130
5.4.2	试验结论	131
5.4.3	部分试验数据	132
5.4.4	现场试验图片	133
第 6 章	直流场设备现场直流耐压试验	135
6.1	概述	135
6.2	极线直流场设备直流耐压试验	136
6.2.1	试验依据	136
6.2.2	试验接线	136
6.2.3	试验程序	137
6.2.4	注意事项及判断标准	138
6.3	中性线及接地极直流场设备直流耐压试验	138
6.3.1	试验依据	138
6.3.2	试验接线	138
6.3.3	试验程序	139
6.3.4	注意事项及判断标准	140
6.4	直流穿墙套管现场直流耐压试验	140
6.4.1	试验依据	140
6.4.2	试验接线	140
6.4.3	试验程序	141
6.4.4	注意事项及判断标准	141
6.5	工程实践	142



6.5.1	被试设备主要铭牌参数	142
6.5.2	试验数据	143
6.5.3	现场试验图片	143
6.6	直流耐压试验装置一体化改造	144
6.6.1	实施技术方案	146
6.6.2	现场组装	149
6.6.3	小结	150
第 7 章	接地极现场试验	151
7.1	概述	151
7.2	直流接地极的测试参数及测量方法	152
7.2.1	试验基本要求	152
7.2.2	接地极馈电电缆分流系数测量	152
7.2.3	接地极接地电阻测量	153
7.2.4	接地极极址地面的跨步电压测量	154
7.2.5	接地极极址设备的接触电压测量	155
7.3	并联分体式接地极测试实例分析	156
7.3.1	接地极主要参数	156
7.3.2	接地极馈电电缆分流系数	157
7.3.3	接地极接地电阻	157
7.3.4	接地极极址地面的跨步电压	158
7.3.5	接地极极址设备的接触电压	161
7.3.6	单极大地运行方式时的测试	161
7.3.7	现场试验小结及经验	164
第 8 章	换流变压器出厂试验问题分析	165
8.1	绝缘纸板质量引起局放超标问题	165
8.1.1	试验描述	165
8.1.2	故障排查及分析	167
8.1.3	处理结论	168
8.2	零部件接地不良引起局放超标	169



8.2.1	试验描述	169
8.2.2	故障排查及分析	170
8.2.3	处理结论	171
8.3	调压线圈引起局放异常	171
8.3.1	试验描述	171
8.3.2	原因分析	172
8.3.3	处理结论	175
8.4	操作冲击试验击穿	175
8.4.1	试验描述	175
8.4.2	原因分析	177
8.4.3	处理结论	178
第 9 章	晶闸管阀出厂试验问题分析	179
9.1	试验描述	179
9.2	原因分析	180
9.2.1	阀组件结构	180
9.2.2	垫片功能、试验和受力	181
9.3	处理措施分析	186
9.3.1	加固电抗器的可行性分析	186
9.3.2	更换垫片的可行性分析	187
9.3.3	更换电抗器及试验测试	188
第 10 章	换流变压器现场问题分析与缺陷处理	190
10.1	YY 型换流变压器套管内部放电	190
10.1.1	试验描述	190
10.1.2	局放异常分析	192
10.1.3	小结	196
10.2	换流变压器网侧套管将军帽过热故障分析及处理	196
10.2.1	过热缺陷分析	196
10.2.2	现场改造方案	196
10.2.3	小结	199



10.3	500kV 油纸绝缘套管色谱异常分析	200
10.3.1	某站 500kV#2 主变压器 B 相高压套管异常	200
10.3.2	某站 500kV#1 主变压器 A 相高压侧套管异常	202
10.3.3	小结	204
10.4	换流变压器其他问题	204
10.4.1	YY 型换流变压器阀侧套管漏气引起局放异常	204
10.4.2	YD 型换流变压器附件悬浮电位引起局放异常	205
10.4.3	YD 型换流变压器内部气泡引起局放异常	206
10.4.4	YY 型换流变压器直流耐压试验异常	208
第 11 章	直流输电线路现场验收要求及问题分析	210
11.1	验收要求	210
11.1.1	隐蔽工程验收	210
11.1.2	中间验收	211
11.1.3	竣工验收	221
11.2	工程验收典型问题及处理	221
11.2.1	缺陷整体情况	221
11.2.2	竣工验收典型缺陷	222
第 12 章	报告审核	228
12.1	审核目录	228
12.2	审核依据	233
12.3	审核问题清单	233
12.4	报告审核小结及经验	239
	参考文献	240



第 1 章 >>

直流工程高压技术监督

1.1 引 言

直流输电技术发展已超过百年，1970 年就有输送距离 1350km、输送容量 1440MW、电压等级 $\pm 400\text{kV}$ 的直流输电工程投产，1977 年已有输送距离 1500km、输送容量 1920MW、电压等级至 $\pm 533\text{kV}$ 的直流输电工程运行。1984 年，电压等级 $\pm 600\text{kV}$ 、输送容量 3150MW、输送距离 792km 的巴西伊泰普直流输电工程投运后，保持电压等级和输送容量之最 25 年之久。至 2010 年中国南方电网的楚穗 $\pm 800\text{kV}/5000\text{MW}$ 直流输电工程投产，标志着全球直流输电技术发展及工程化的焦点及重点完全转移到中国。

国内的直流输电工程始于 20 世纪末期， $\pm 100\text{kV}/500\text{A}$ 舟山直流输电工程为首条直流工程于 1989 年投产，随后 1990 年的 $\pm 500\text{kV}/1200\text{A}$ 葛上直流输电工程投产。进入 21 世纪后，多个直流输电工程相继投产。在引进消化吸收的基础上，从 2010 年开始，高电压等级、大输送容量、多端直流等一系列直流方面的高难度工程实施技术陆续在国内实现，国内直流工程从跟随迈向引领。

西电东送为国家“西部大开发”战略中的重点工程，主要包括北部通道、中部通道和南部通道。云南地处中国西南边陲，属于南方电网辖区，作为水电资源大省，进入新世纪电网规模急剧增大，为西电东送南部通道的关键电源点。云南省内现有 $\pm 800\text{kV}$ 楚穗直流输电



工程的楚雄换流站、接地极及部分直流线路， $\pm 800\text{kV}$ 普侨直流输电工程的普洱换流站、接地极及部分直流线路， $\pm 500\text{kV}$ 牛从直流输电工程的牛寨换流站、接地极及部分同塔双回直流线路， $\pm 500\text{kV}$ 金中直流输电工程的金官换流站、接地极及部分直流线路， $\pm 350\text{kV}$ 鲁西背靠背直流工程， $\pm 500\text{kV}$ 永富直流工程的永仁换流站、富宁换流站、接地极和直流线路。云南已经成为直流输电技术的“集合地”。确保直流工程的安全稳定运行，电气设备是关键，通过技术监督对电气设备的健康水平及与安全、质量、经济运行有关的重要参数、性能、指标进行监测与控制，是确保其安全、优质、经济运行的有效方式。

DL/T 1051—2007 和 DL/T 1054—2007 对电力技术监督、八大类主要监督内容、五阶段过程监督做了规定。DL/T 586—2008 对监造，及“停工待检”“现场见证”“文件见证”三种监造方式，做了规定。DL/T 377—2010 对高压直流设备范围进行了界定，GB 50150—2016 对换流站内的交流电气设备试验标准进行了规定；DL/T 5235—2010、DL/T 5231—2010 对直流输电线路及接地极的验收标准进行了规定。

目前，还缺少系统全面介绍直流工程一次设备高压技术监督方面的书籍，本书对于从事高压直流技术监督的广大工作者具有重要参考意义。

1.2 依托工程概述

$\pm 500\text{kV}$ 永富直流输变电工程，属云南电网有限责任公司建设运维，工程输电容量 3000MW （单极容量 1500MW ），电压等级为 $\pm 500\text{kV}$ ，额定电流为 3000A ，同期建设其交、直流配套设施。工程起点位于云南省楚雄州永仁换流站（地处云南省楚雄州东北 112km 的永仁县猛虎乡，作为整流站运行，整站示意如图 1-1 所示），工程落点为云南省文山州富宁换流站（云南省文山壮族苗族自治州文山市以东的里达镇，作为逆变站运行，整站示意如图 1-2 所示），线路