

水利电力部科学技术情报室

交直流换流站

1972

水利电力部科学技术情报室

前 言

1972年国际大电网会议第14专业小组(交流/直流换流站)有八篇论文和一份专业报告。本译文集译载了这八篇论文和专业报告(14-00)的附件“讨论纪要”。所涉及的问题共分四个方面:综述现有直流工程1970年运行情况的有一篇(14-07);介绍新建工程设计和试验问题的有两篇(14-04和14-05);介绍可控硅阀的试验方法、试验标准和现场试验情况的三篇(14-01、14-03和14-06);论述直流输电设备控制和保护系统的有两篇(14-02和14-08)。这些论文有以下一些主要内容:

1. 论文(14-07)综述了1970年国外现有九项工程的安全运行情况,对发生的故障作了归纳和分析,提出了一些初步的对策。已建成的九项工程,总装置容量为350.8万千瓦,全部采用汞弧阀,有两项工程部分地换装了可控硅阀。高压汞弧阀的故障频率最高,但构成事故停电的小时数只占全部停电时间的1%以下。电缆和变压器等常规设备的事故和检修则几乎占了全部停用时间。汞弧阀的故障主要有逆弧、换向失败和继起逆弧。作者指出:采用自动控制保护系统能有效地消除逆弧和换向失败故障;但对继起逆弧尚不了解,可能的措施是安装自动重合装置、改进控制保护系统和阀的工作条件,如限制阀在小电流下运行。据介绍,自动重合装置的成功率达85%。

2. 论文(14-04和14-05)介绍了纳尔逊河和伊尔河新建工程的设计和试验情况。这两项工程的设计容量分别为162万千瓦和32万千瓦。从所介绍的内容来看,新建工程在技术上的发展趋势是:采用可控硅阀(运行可靠、维护方便、容易变更容量),实现全盘自动化和远动化(应用逻辑连锁系统进行遥控程序操作),提高设备可用率(主要措施是加强监控装置)以及发挥改善交流系统运行的作用。为了满足遥控的需要,有必要采用多通道通讯系统和加强站用电备用电源。据介绍,直流输电系统自动控制功率潮流的特点,可以改善交流系统故障时的稳定,如阻尼受端交流系统的扰动、控制送端系统的频率以及在交流系统电压突降时确保恢复系统正常运行的能力。

3. 论文(14-01、14-03和14-06)分别介绍了在日本佐久间新变频站所作的可控硅阀现场试验情况,瑞典对可控硅阀所承受的各种电气强度的分析意见和相应的试验方法以及西德、瑞士共同对油浸可控硅阀所作的高压试验情况。论文(14-01)介绍了三方面的试验,即零功率因数运行试验、背靠背试验和连接50赫-60赫试验。据称试验达到了预期目的,运行可靠性有待长期运行考验。论文(14-03)指出,阀所受的电气强度与阀组的接线方式有关,并认为电压试验需在整体阀组上进行,而电流试验则可在单一阀组件上进行。论文(14-06)介绍了油浸可控硅阀在合成试验回路和大功率单相试验回路中,所进行的电压分布和不连续电流运行特性等试验。据称曾用人工制造换向失败的方法,取得了阀击穿时的有关资料。

4. 论文(14-02和14-08)论述了多端直流系统的控制和保护问题。多端系统比两端系统投资较省,输电损失也少,但要求使用高速保护装置和高速稠密的通讯系统。

为了供有关同志参考,本译文集还译载了其他专业小组的四篇论文(21-03、31-08、32-04和33-14)。这四篇论文分别论述了直流电缆绝缘配合,在多端直流系统中使用直流断路器的必要性,三端网络的模拟试验方法以及直流系统的过电压保护问题。

出 版 说 明

第24届国际大电网会议是1972年8月在法国巴黎举行的。会议共有论文154篇。为了供有关同志了解当前国外高压电网方面的技术动向，我们组织选译了其中大部分，将陆续按专业分专辑出版。参加这一专辑编译工作的，有陕西省电管局中心试验所和河北电力学院的同志。

译文中有缺点和错误之处，请批评指正。

1972年国际大电网会议论文翻译小组

1973年9月

目 录

前言

直流输电工程现况

1970年世界高压直流输电工程实绩调查 (14-07)	(1)
-----------------------------------	-------

新建直流输电工程的设计和试验

纳尔逊河高压直流输电换流站的设计及试验 (14-04)	(15)
-----------------------------------	--------

伊尔河高压直流换流站系统的设计 (14-05)	(30)
-------------------------------	--------

可控硅阀试验

125千伏高压直流可控硅换流阀的现场试验 (14-01)	(41)
------------------------------------	--------

可控硅阀的试验 (14-03)	(53)
-----------------------	--------

高压直流油冷阀的试验结果 (14-06)	(67)
----------------------------	--------

直流输电设备的控制和保护系统

高压直流输电多端网络的数字控制 (14-02)	(79)
-------------------------------	--------

多端高压直流输电系统的控制和保护 (14-08)	(90)
--------------------------------	--------

有关直流输电的其它问题

直流电缆绝缘配合 (21-03)	(95)
------------------------	--------

多端环网的高压直流断路器 (31-08)	(106)
----------------------------	---------

三端高压直流系统性能的模拟试验 (32-04)	(118)
-------------------------------	---------

高压直流过电压保护器及其应用 (33-14)	(133)
------------------------------	---------

附录

第14专业小组 (交流/直流换流站) 讨论纪要 (14-00) 附件	(159)
--	---------

1970年世界高压直流输电工程实绩调查

(14-07) *

提 要

国际大电网会议第14专业小组的年度报告论述了高压直流输电工程的成果。这篇报告介绍1970年世界各地所有投入运行的直流输电工程的情况,对作者过去所写报告[1]中介绍的资料补充了新的内容。统计采用表格方式,并和1968年的主要调查数据相对照。作者注意分析了限制可用率的一些主要故障。

1. 引 言

越来越多的直流输电工程已投入运行,为了便于对各种直流输电工程进行比较,很需要制订标准调查报告书格式,以便积累经验。为此,工作组拟好一份一致同意的报告程序,并已作为1968年第10专业小组进度报告的附录A(第43-01报告)予以发表。有直流输电工程投入运行的各国,每年按此格式提出资料,供第14专业小组(交流/直流换流站)研究。这篇调查报告就是根据各国提供的资料写成的。

2. 新 建 工 程

上次报告[1]以后,北起赛里罗、南至锡尔马的太平洋西北-西南高压直流互联系统,以及从哥特兰岛到瑞典本土的直流线路的可控硅阀组的扩建部分均已投入运行[2]。

上述第一项是迄今为止已投运工程中最大的一项。然而在它投运将满一年的时候,一次地震严重地破坏了锡尔马换流站。在1970年5月21日至1971年2月9日这一段运行期内输电量共计30亿度,也就是说这正好是1968年全部直流输电工程项目总输电量的一半。

为了将高压直流输电用可控硅阀投入运行,哥特兰工程进行了扩建。今后数年,研究这项可控硅阀工程,并将其性能与汞弧阀工程进行比较,将有一定好处。必须指出,一项革新是取消了旁路阀,但当需要时,主阀可用来起相同的作用。

3. 关于实绩的一般说明

3-1 表格说明

在本调查报告里,将着重说明可用率方面的主要限制和已投运工程的主要成果。为了

* 作者F.H.LAST, R.M.MIDDLETON(英国),以第14专业小组名义提出。

简明起见，许多资料均用表格形式介绍，这时要使用引言中提到的报告程序所明确规定的类别和术语。主要状况将详细写入本报告的第4部分，但不可避免地只能是各成员国对每项工程所提出的详细报告的一个提纲。

3-2 装置容量和使用情况

在表1中汇总了目前投运的全部工程项目，并指明了投运年份以及1968年和1970年的可用率。加拿大不列颠哥伦比亚省到温哥华岛的高压直流联络线现已满载投运，并且上节提到的太平洋互联系统现在也可列入已投运项目的表格中。表1中列出的可用率数字，依据公认的定义考虑了各种原因引起的输电限制，其中也包括维修和测试。1970年所有工程的平均可用率为82%，而所有工程的月平均可用率在全年中约有三分之一的时间超过了99%。由于可用率是按两端传输100%容量的基础计算的，未考虑为适应交流输电而引起的换流站容量的重复性，同时，如果在某些情况下，换流站按实际的需要运行，可用率将会更高一些，所以这些可用率的数字并不象许多报导中所提到的那样低。在下述许多情况下，采用高压直流输电往往是合理的，如需要用很长海底电缆的地方，或者在长距离架空线路所经过的地区（至少一年中有一部分时间）是难以接近的地方。尽管这些线路上的事故率可能不会高于短的线路，但其事故检修的时间不变，并且将直接影响到可用率。

运行中的工程项目以及1968年和1970年的可用率

表 1

工 程 项 目 和 投 运 年 份	容 量 (万瓩)	直 流 电 压 (千伏)	可 用 率 (%)	
			1968年1~12月	1970年1~12月
哥特兰(Gotland), 1954, 1970 ⁽¹⁾	3	150	98.1	95.9
英-法海峡, 1961	16	±100		
英国方面			79.0	70.5
法国方面			94.5	94.8
伏尔加格勒-顿巴斯, 1962	75	±400	89.0	76.0
康梯-斯堪(Konti Skan), 1965	27	250	76.8	83.9
丹麦方面			95.2	95.92
瑞典方面			77.9	89.6
佐久间(Sakuma), 1965	30	±125	94.7	95.1
新西兰, 1965	60	±250		92.1
撒丁岛(Sardinia), 1966	20	200	37.1	53.5
温哥华, 1968	31.2	260	80.4 ⁽²⁾	63.5
太平洋互联系统, 1970	144	±400		
赛里罗(Celilo)方面				86.22 ⁽³⁾
锡尔马(Sylma)方面				79.7 ⁽³⁾

(1) 1万瓩可控硅阀扩建于1970.6.9开始运行；

(2) 1968.8.1起在降低功率7.5万瓩，130千伏下运行；

(3) 1970.5.21开始运行。

运行时间、传输能量和潮流方向见表2。在1968年，平均装置容量达234万瓩，总计传输能量近60亿度。到1970年底，换流站平均装置容量达350.8万瓩，并且全年总计传输

能量超过100亿度。直流功率的流向也很值得注意。虽然这个问题在这里不能详加研究，但是可以看出，高压直流联络线的适应能力在许多情况下是有价值的。因此，在考虑将来可能应用时，不应忽视这种适应能力。

运 行 时 数 和 输 送 电 能

表 2

工 程 项 目	功 率 输 向	1968年 1 ~12月		1970年 1 ~12月	
		实际运行时数 (小时)	输 送 电 能 (百万度)	实际运行时数 (小时)	输 送 电 能 (百万度)
哥 特 兰	哥 特 兰	6039	103.7	2995	44.3
	瑞 典 本 土	2512	29.8	4771	76
英-法海峡	法 国	25	2.6	133	5.9
	英 国	5501	735.4	4248	557
伏尔加格勒-顿巴斯	顿 巴 斯	总计5060	332	2792	599
	伏尔加格勒		755	2758	383
康梯-斯堪	丹 麦	6527	1097.8	796	122.9
	瑞 典	1514	193.3	6522	1479.2
佐 久 间	50 赫	3554	247.1	1138	80.8
	60 赫	1051	75.7	830	59.3
新 西 兰	北 岛		2032	8280	2988
撒 丁 岛	意大利本土	1974	87.5	1051	66.9
	撒 丁 岛	4138	85.9	6530	300.3
温 哥 华	温哥华岛	3611 ⁽¹⁾	258 ⁽¹⁾	8064	1186.7
太平洋互联系统	赛 里 罗			829 ⁽²⁾	380 ⁽²⁾
	锡 尔 马			3468 ⁽²⁾	2168 ⁽²⁾

(1) 从1968.8.1起; (2) 从1970.5.21起

3-3 主要故障

3-3-1 概况 最频繁的故障无疑是由于高压阀的工作性能所引起的，但是这不应掩盖基本的事实，即在许多换流站内，停运时间的大部分是由常规设备故障和维修试验工作所造成的。表3中22行的数字证实了这一点。因维修而损失的时间，差不多等于变压器和电缆故障引起的时间损失。在1970年中，对每项直流输电工程来说，这样的时间损失总起来将大大地超过由其它原因所造成的时间损失。

直流输电系统的绝大多数故障都属于短暂的性质，或者自行消除，或者通常在一个阀组上采用闭锁来消除故障，而当故障消除后，立即自动撤除闭锁。这些故障在表4中分为6类。为了方便起见，表3和表4的界限用1分钟来区分，但是在实际上，绝大多数列入表4的偶然性故障仅造成不到1秒钟的间断。一次逆弧现象往往在0.5~1.0秒内就可消除，而不需将阀组闭锁就可自行消除的“换向失败”，其持续时间一般不大于20毫秒。因此，这些扰动现象通常在换流器所接入的交流系统中没有什么明显的反应。在较小的系统中，可能产生某些摇摆，但这通常是在允许范围以内。继起逆弧(Consequential arc-ba-

3. 故障次数和总的等值可用率损失小时数

1970年1~12月

	哥特兰		英-法海峡				伏尔加 格勒- 顿巴斯		康梯-斯堪				佐久间		新西兰		撒丁岛		温哥华		太平洋互联系统					
			英 国		法 国				丹 麦		瑞 典										赛里罗		锡尔马			
	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时	次数	小时		
1.交流断路器 2.同期补偿机 3.交流滤波器和静止电抗补偿 4.换流器变压器 5.交流侧控制和继电保护 6.交流侧其它装置 7.直流过电压保护 8.高压阀持续逆弧 9.高压阀持续起逆弧 10.高压阀持续换向失败 11.高压阀其它装置 12.冷却装置 13.控 制 线 14.控制和调节装置 15.直流滤波器和阻尼装置 16.电缆、接地电极、架空线路 17.直流侧其它装置 18.操作过失 19.测试过失 20.原因不明	1	1:23			1	120									1	54:46	4	4:06			4	4:09				
			3	20:29												1	0:08	4	40	1	0:06					
			1	0:20	4	106										1	0:32	8	2564			2	2:08	6	19	
	6	0:35	1	0:12												1	0:23									
					1	4										4	1:25	1	4:03							
			9	22:3	10	1:42	10	1:04								10	1:42									
			3	1:13	28	1:42	18	0:44	1	0:02						18	0:44									
					4	0:24			7	1:03						1	0:17									
			15	2:25												1	0:17									
	1	1:40	1	1:17	6	1:15			2	0:43																
			1	3:30					1	0:04																
			3	1:27																						
	4	3:00	2	1:19	7	1:15	8	2:54	2	4:35						8	2:54									
	1	19:09			1	0:18																				
	2	191	1	1944	2	72	18	65:22								18	65:22									
	9	28:38	2	12:43					1	0:09						4	30:15									
									8	0:59						8	0:59									
									1	0:05	1	1:32	2	1:05												
	21.次数总计和等值故障持续时间	24	246	42	2212	64	304	73	103	16	12:11	15	636		8	3:49	475	106	38	3988	46	67	107	289	121	288
	22.等值的维修和测试时间	109		372		60		1970		345		279			422		589		85		2594		455		806	

等值时间 = $\frac{b}{a} \times$ 实际时间，其中 a 为阀组总数， b 为限制期间未用的阀组数

ck, 简称CAB*) 经常要求跳开换流站或者阀组的开关, 但也不一直都是这样的。而在采用自动重合闸的地方, 重合成功率一般可达到85%。所以, 尽管表 4 中列出的持续期不到 1 分钟的偶然性故障次数很多, 但是由于阀的工作不正常而造成的时间损失并不多, 在 1970 年, 将全部投运工程项目的损失累计起来, 也不过是 73 小时 10 分钟。

这些概况有助于了解曾在各个阶段纠缠着各项直流输电工程的阀的故障问题。在许多换流站已着手对原有阀进行改进并采取了另外一些措施, 但是这些工作均尚未完成, 也没有积累充分的运行经验, 所以无法得出最终结论。然而, 已有一定的成效, 现在可以预言, 今后会获得更好的成果。

限制功率传输持续时间不满1分钟的偶然性故障次数 表 4

		哥 特 兰	英-法海峡		伏 尔 顿 加 格 勒 斯	康梯-斯堪		佐 久 保	新 西 兰	撒 丁 岛	温 哥 华	太 平 洋 互 联 系 统	
			英国	法国		丹麦	瑞典					赛里罗	锡尔马
造成闭锁 撤除闭锁程 序的故障	逆 弧	199	168	1119	18	61	157	24	900	47	177	378	449
	继起逆弧					4	20				58	30	87
	换向失败		59	5	16	3	19		113	22	13	58	75
	其 它				92	5			4	3	1	1	2
不造成闭锁 撤除闭锁程 序的故障	换向失败		6164	11		27	108	19	9665		325	不详	153
	非持续性 线路故障					102	7		10	44		58	92
总 计		199	6391	1135	126	202	311	43	10692	116	574	185	858

3-3-2 高压汞弧阀 高压阀的经济设计充其量也不过是一种折衷方案, 而且目前必须允许汞弧阀中存在次数有限的逆弧 (AB) 和通弧 (AT) 现象[3]。在早期的一些工程项目中, 阀并不怎么被强调, 并且因为在控制系统的设计中, 采用了闭锁和自动撤除闭锁的方式, 来扼制阀性能方面的这些缺陷, 所以没有发生什么问题, 也没有显著影响功率传输。

在较大的康梯-斯堪和新西兰工程中, 大容量的高压阀本身就是个经济上的必要条件。已经制成了所需要的大容量阀, 并且在大功率实验室作了全部运行条件下的试验。但是, 换流站的运行不久立刻表明, 实验室里的试验仍不足以说明继起逆弧现象。因而要求进行彻底的试验, 这样康梯-斯堪工程几乎成了一个实际规模的试验站, 今后的工业运行将证明实验室工作的结果[4,5]。对这些工程采取的措施, 已结合在温哥华和太平洋互联系统的阀上使用, 但是仍然有新的问题发生。对太平洋互联系统的研究表明, 可能产生其它的继起失效现象[6], 这些现象已被称为并举逆弧 (SAB)。

可以问, 为什么在实验室试验中没有发现这些现象呢? 肯定的回答是, 实验室试验往往是用特定的设备来对已知的现象进行验证。在试验前已规定了确切的运行条件, 而试验将表明试验对象是否经得起预定的考验。很少能通过试验来指出某些前所未有的现象, 而这些现象在获得运行经验之前是不会了解的。此外, 在实验室中仿制确切的运行条件几乎

* CAB及SAB可参考IEEE杂志动力装置及其系统汇刊, 1972年, PAS-91 卷 2 期中的一篇论文 “Sylmar 高压直流输电换流站中的汞弧阀扰动的经验” ——译注

也是不可能的，即使大容量的试验站也不过只能近似地作到这一点。作者认为，对于高压直流输电用的可控硅阀，情况也是同样的，并且对此不应忽视。

差不多也在这个时候，大容量高压阀的材料使用和工艺过程也得到改进。由于这两方面所取得的进展，高压阀的制造条件目前已达到多样和更为完善的阶段。瓷件必须同时满足机械方面和制造方面的各种要求，而在起初，电气方面的性能则多少有些被忽视。现在知道，早期的瓷件在这方面存在着某些缺点，并可能受到所谓电解老化的损坏[7]。现已研制成功新的瓷件材料，它们不会因时间和温度的关系而老化。

很早就知道，在阀内进行精确的温度控制是极为重要的，但是温哥华和太平洋互联系统的高压阀运行经验证明：在快速变化的动态条件下，甚至要求对温度进行更为精确的测定。有关这方面的某些改进工作正在进行中。

辅助回路对阀的工作性能具有重大影响，不能认为变更阀的内部部件是唯一有效的方法。正如在 3-3-1 节中指出的，因此控制系统是为扼制逆弧而设计的，所以，早期的一些工程项目都很成功。

已经发现，在阀的工作性能中，重要的因素是：小电流、大电流、燃弧角和暂态条件。而且许多故障是相继发生的。因此，仔细地设计控制系统、保护逻辑和外部阻尼，就可避免或者很迅速地消除一些严重情况。这方面的研究结果表明，可以减少阀扰动对系统影响的严重性。

这些领域内的进展是快的，但是迄今为止还没有一个换流站全部用上了这些方法，所以改进后的效果仍然不怎么显著。但在今后一、两年内将会得到一些肯定的统计结果。

3-4 年度报告程序

引言中提到的报告程序已经使用了六年。现在大家同意扩大其范围。所以从 1972 年起，各国将使用第 14 专业小组在 14-17 (WG04) 01 文件中所规定的新程序。

对现有表格作了些小的变动，但是主要的改革目的是，想把交流系统发生暂态过程时的直流输电系统的动态性能资料列入报告中。虽然曾打算进行各种阶段试验，并且也保存有某些换流站的记录，但对所有直流输电工程的数据还没有进行有系统的核对。可以相信，在设计新的工程项目时这种资料将是有价值的。

4 工程项目详述

4-1 哥特兰工程

4-1-1 概况 表 1 中的可用率未包括两个换流站中因装设和投入可控硅阀桥而引起的损失。若考虑这些时间，这项工程的可用率就要降为 83.7%，但是，用这个低的数字算出来的使用时间和可用时间之比为 100%。

1970 年 6 月 9 日，两组可控硅阀桥（每个换流站有一组）开始了工业运行，直至 1971 年 4 月 27 日，即取得资料的最后日期，这两组阀桥已运行了 7500 个小时。据报告：工作性能较好，可用率也较高，总损失仅为 2 个小时。

时间最长的一次停运是由于电缆故障造成的。虽然在电缆上的电压有所升高，但是故

障原因与其说是由于电压升高，不如说是由于外部机械损伤为妥。

4-1-2 可控硅阀故障 尽管上述 7500 小时的运行是成功的，但要正确地判断出将会发生些什么故障则尚为时过早。

发生在高湿度条件下的起动暂态过程，在支持绝缘结构上造成了几处外部闪络。这时没有造成严重损坏，在更换了少数绝缘零件和改善了通风条件后便迅速解决了问题。

一些短路的可控硅装置已经换掉。这些是在每三个月进行一次的例行检查中发现的，它们可能已使用了一些时间。当任何一个阀的故障危及其余的可控硅装置时，就发出紧急指示。可以认为，可控硅和二极管产生的许多故障，往往与旁路开关的误操作有关。计算结果没有证明，会发生高得足以使可控硅元件发生危险的过电压，但是为了进一步降低任何可能发生的危险，旁路开关的正常操作程序已经改进。

此外未报导其它缺陷，想从这些很有限的统计资料得出肯定的说明还为时过早。特别有意义的是，这一套新投产设备的缺陷非常少。

4-1-3 直流侧的其它故障 虽然直流侧的故障次数比以前几年高，可是总的的时间损失则相对地减少了。这里必须列举的主要故障是：旁路开关自动控制回路的故障，以及一台隔离变压器的损坏。

汞弧阀总的逆弧几率为每阀组在每个有效工作月发生 4.5 次。大部分逆弧现象发生在与可控硅阀组安装有关的试验工作中。特别需要指出的是，根本没有发生过继起逆弧现象。1970 年对已经工作了五年的 4 台汞弧阀进行了内部检查。电极的情况一般较好，只需作一般性的修整。这些在哥特兰工程中采用的老式阀，例外地避免了在别的曾经加强设计的工程中所发生过的问题。

4-1-4 直流电缆故障 将附加的桥进行串联，已可使电缆的额定电压从 100 千伏升为 150 千伏，这时最大的介电强度达 31 千伏/毫米。原设计的介电强度是比较适当的，技术与试验结果表明，电缆和其联结头均可承受更高的运行电压，这一点已由以前的运行经验所证实。

表 3 列出的两次故障，都不是由于过高的运行电压所造成。时间最长的停运为 185 小时，这是由于铁锚将海底电缆破坏所造成。另一次偶然事故造成了 6 小时的停运，是由于一个换流站里的电缆头密封泄漏所引起。

4-2 英-法海峡工程

4-2-1 概况 1970 年整个工程由于电缆故障而造成的最长停运时间，不少于 2016 小时，或者说占总的等值故障持续时间的 80%。另外的重大事件是：在英国方面的换流站，有两个电缆过电压保护器，在备用设备不能立即使用的情况下，发生了故障；以及在法国方面的换流站，有一个断路器和一个换流器变压器的分接头开关发生了故障。

在这段时间内，汞弧阀的工作性能并不好，但是，没有直接对互联线路的可用率造成重大限制。现在又确定了补救措施，并已开始了第一阶段的工作，但是还不够先进，所以目前还不能看到好处。

4-2-2 交流侧故障 在法方换流站里，交流滤波器靠单独的断路器投入。这个断路器在合闸时造成了一次事故，损失了 120 个小时。这次事故并非由于特殊严重的条件而引起。在一台换流器变压器的分接头开关发生了许多次触头焊住现象后，最终造成了事故，

已用新部件进行了更换。由于发生问题的分接头是在变压器的外部，这项工作容易完成，所以没有造成长时期的停运。

英方换流站中交流滤波器的电容器故障，曾引起停运20小时。这段时间主要用来查找故障的电容器，由于在设计上全部采用了没有外部指示的内部熔丝，所以必须采用各种电测方法。不能认为故障是由特殊原因（诸如过电压之类）造成的，它往往是由一般的老化现象而引起。

4-2-3 直流侧故障 在这一工程中还未采用现在已普遍流行的自熄弧直流过电压保护器。每次火花放电都靠闭锁阀组和跳开主断路器来消除。虽然没有采用自动重合闸，但是时间损失一般很少。两个换流站中的火花放电，绝大部分发生在阀扰动的情况下，主要是众所周知的要产生过电压的逆弧和连续燃弧现象，它们或者立即导致故障，或者在隔一短时间后导致故障。表3所列英方换流站损失223小时中的差不多全部时间，是由于一次偶然性故障所造成，在这次故障中英方换流站有两个电缆过电压保护器遭受损失。在一个换流站中实际上同时损坏两个过电压保护器的事件这还是第一次。因为在换流站没有可供立即使用的备用设备所以才造成了长期停运。

从表3可以看出，与辅助装置的情况不同，由不良的阀性能而直接造成的总时间损失是很少的，实际上总计也不过为5小时44分钟。即使将次要的影响也加以考虑，同其它的原因比较起来还是小的。然而，法方换流站在1968至1970年间逆弧次数每年以5倍增长，其总数已超过1000次，这种情况是不能忽视的。同样，英方换流站启动换向失败的情况（1970年超过6000次）也不能加以忽视。由于在换流站中进行了各种各样的试验，并且两个运行单位和制造厂联合起来对问题进行了认真研究，结果得出了结论：各种主要故障均发生在英方换流站。这两个换流站在一切重要方面均设计得完全相同，但是，出现的情况是在过去几年中，功率流向主要是向英国输送，这就增加了逆流站问题的严重性。

现已决定在英方换流站更换质量不能满足现代实际需要的阳极瓷件，同时更新所有的高压阀。这些工作当然要占用一些时间，但同时又不想降低可用率，这将取决于备用阀，因为在工作过程中可用备用阀来代替工作阀。此外，还准备在上述两站中的所有阀上进行一些小的改进，这主要是改进引燃系统，使阀的辅助装置现代化。

尽管需要进行这些工作，但应该指出，英方换流站完全没有发生过继起逆弧现象，而法方换流站在1970年仅发生4次继起逆弧现象，总的可用率损失仅为24分钟。对这种故障未用自动重合闸。此外，绝大多数的高压阀已运用了近10年，但不需要作任何内部更新。

两站间的遥控装置有几次曾暂时不能使用，需要人工去变更程序，因而在某些情况下造成了少数停运。对直流环节的运行而言，遥控系统并非绝对必要，一般可免去不用。至于其余的缺点则都是次要的。

4-2-4 直流电缆故障 正如引言中所指出的，1970年可用率降低的主要原因是电缆故障。没有因外部机械损伤而引起的故障。一段海底电缆在带负荷时发生了故障。当第一次故障修好后进行试验时，第二次故障又发生在同一电缆上约一公里长的距离内。这两次故障都发生在接头部位，因缺乏其它指示装置，所以只好假定这可能是由于故障设备造成的游离现象而引起。

在陆地上还在电缆盒里发生了两次故障，但因很容易检修，所以共计仅损失了72小时。有时认为许多报道的电缆故障是由于受到铁锚和捞网的破坏所造成。但对本工程来说

并不是这种情况，尽管在海峡里船只来往很频繁，但电缆敷设在海中将近10年来，仅有一次故障可明确地归因于船只，而另一次故障则有明显的迹象表明为铁锚所损伤。

4-3 伏尔加格勒-顿巴斯工程

1970年的可用率为76%，和1968年的89%比较是降低了，其主要原因是需要维护和修理直流输电线路，同时也因为要架设一条新的500千伏交流线路，其中有一段路径相同。架设这段重要的新线共要求停运1700小时。功率流向主要取决于伏尔加河的丰水期，而在其它时期则将电能输入伏尔加地区。

阀的工作性能总的来说是好的。1970年仅发生18次逆弧现象，并且如前所述，迄今为止，这项工程中没有发生过继起逆弧现象。除逆弧外，由阀性能引起的其它偶然性故障的时间损失也是微不足道的。

不满1分钟的中断现象总数为126次，其中有92次在表4中不好分类。后面的这个数字，是由于紧跟着过电压保护器动作之后，桥和输电线自动重合成功，并且继电保护和控制系统的故障也很少。表3中最长的停运时间，除维修和测试方面的原因外，还有因接地线断线而造成的故障。还应提到的是表3第17项的停运情况，即：一个400千伏套管发生了火花放电；一个旁路开关误动作造成了中断；和一个线路电抗器的套管发生了故障。

4-4 康梯-斯堪工程

4-4-1 概况 由于异常的气候条件，瑞典在1970年普遍缺少水电能源，但可通过直流互联线路从热能充足的丹麦输入电能。

电缆故障时间和维修停运时间几乎相等，这些是使可用率降为88.9%的主要因素，尽管如此，这一工程的综合使用率在此阶段仍为73.9%。

4-4-2 交流侧故障 在交流侧未发生过严重故障，但是应该指出，因附近一个150千伏变电所的三相短路使丹麦方面换流站造成了30分钟中断，结果停运了4个小时。原因很简单，因为若辅助设备断开时间大于15分钟，就不允许在3小时内重新启动阀组。这种限制是为了避免阳极瓷件因突然冷却而受到损坏的危险。为了避免类似事件，将来应考虑更为可靠的辅助电源。

4-4-3 直流侧故障 1969年开始的阀改进计划的效果现在已日益明显。这样就减少了所有的阀扰动现象，特别是逆弧和换向失败率现在已降得很低。继起逆弧几率的降低还不那么显著。评价阀性能的主要困难在于那些在这段时期内仍在运行但没有经过改进的老式阀组。并且这些阀组的性能无疑将随着时间的推移而越加恶化。在可以看到改进工作的真正效益之前，需要在所有阀组上全面开展工作，并在今后几年中继续收集有关阀工作性能方面的数据。

但值得注意的是，瑞典方面换流站的断路器自动重合闸在所有继起逆弧情况下的成功率达85%，只有3次继起逆弧现象因跳闸而停运时间超过1分钟。用户的看法是，目前的阀性能标志着暂时性阀故障或阀扰动的最低可接受水平。

4-4-4 直流电缆故障 在莱塞（Lacsoc）岛和瑞典之间的直流电缆上发生过两次故障。两次故障均认为是由拖网造成的。第一次故障发生在晴天，很快就修好了。第二次发生在10月30日，恶劣的天气使修复工作一直拖到11月25日。

4-5 佐久间工程

佐久间变频站的工作性能,在考查期内较好,可用率达95.1%。而且实际上,从1965年到现在为止,最低的年可用率为88.4%。

过去一年中没有发生过继起逆弧现象。没有因故障造成重大的停运,可用率取决于等值的维修和测试时间。

4-6 新西兰工程

4-6-1 概况 虽然由于各种因素使国家对尖峰负荷和能量供应的要求均比预期的要低,但是从南岛到北岛的本莫尔-海瓦特(Benmore-Hayward)高压直流输电线路,利用情况却比前几年提高了。南岛上两个新建水电厂的投入运行,使高压直流输电线路的利用情况提高,这相应地使本莫尔电厂的发电量成比例地下降。1970年的可用率为92.1%,而使用率为55.2%。

1970年的维修时间较多,部分原因是由于发生了大量的偶然性继起逆弧现象,这样对海瓦特的一台110千伏多油断路器平均每隔一周就要求进行一次仔细检修。阀的改进工作也使维修时间有些增加,虽然工作是在备用阀上进行的,但是工作阀的切换和再投入都要占用一定时间。另外一个效用不明显的原因,是有时要对一些设备进行额外维修,否则这些设备将被闲置起来。无疑,如果要求这条线路输送的电量更多些,那么,总的等值维修时间将会降低。

4-6-2 交流侧故障 交流侧的主要问题在于多油断路器。在一次偶然性的故障中,一台110千伏的多油断路器未能正确地跳开,因而使两个阀经受了30~45秒的继起逆弧电流。

在海瓦特,次数频繁的继起逆弧现象加重了多油断路器的负担。表3中指出,在1970年有336次持续性的继起逆弧现象。这比本工程选择断路器时所预料的次数要高得多,因而需要过多的维修时间。最近,空气断路器已经定货,打算在1972年初进行安装,来替换海瓦特的多油断路器。由于这样作可以减少维修时间,所以,预期在1973年中将取得效益。

还完成了另外一些改进工作,值得提及的有本莫尔增装的尾水管抽空装置,这样,当打算在本莫尔水库蓄水时,便可使发电机作为同期补偿机运行。

4-6-3 直流侧故障 本莫尔水电厂上空的雷电暴风雨导致了直流线路上的保护间隙发生动作,造成了暂时断电,并记录了本莫尔直流线路棒形间隙的第一次动作。指出以下事实是比较有意义的,即在这个时期内,北岛上的总负荷为107万瓩,其中54万瓩是由南岛输入,而南岛的负荷这时仅为41万瓩。

如上所述,有一次断路器未能正确地清除继起逆弧现象。两个重建阀经受了30至45秒的短路电流,但其损坏程度十分轻微。仅有一个电流分流器损坏,部分原因是由于过电流,另一部分原因是因为随后发生了火灾。在以后试投时两个阀中有一个性能不良,当打开后发现在两个阳极下面的几个电极已遭到损坏。另一个阀经过检查后又重新投入运行,不需要进行任何的修复工作。

象在康梯-斯堪工程上一样,在投运后不久便出现了继起逆弧现象。大多数继起逆弧

现象发生在启动时或将脉冲次数从6次变成12次运行时，但为了恢复阀组运行，很少需要将阀更换。阀的改进计划于1968年12月开始，到1970年12月，这一工作已完成全部阀的75%。发生在新阀上的继起逆弧几率，和1965年原有的阀相比不相上下。虽然在原有阀和改进阀之间性能方面已有某些不同，但仍需要继续努力认真地确定它们的意义，并找出各种不同的运行条件是否对工作性能有所影响。

4-6-4 直流输电线路故障 早期的报告中曾谈到电缆终端站和线路的某些段落上有严重的盐污。这些问题已有明确答案，不会由于这方面的原因而造成停运。用大地作为输电回路的系统正在顺利地继续运行着。在海瓦特的一个悬吊式防止过电压电容器组件上的几个防雾绝缘子，早在1970年初就已严重损坏。对其损坏原因曾有某些疑问，电解作用虽然可疑，但没有完全肯定。

4-7 撒丁岛工程

4-7-1 概况 1970年限制可用率的主要原因有：南达而马齐奥（S.Dalmazio）1号换流器变压器的决定性检修；北部的一次电缆故障造成对厄尔巴（Elba）岛停电；以及科西嘉（Corsica）地区架空线路上的紧急维修等。但在1970年9月末达到了满功率可用率。

1970年的可用率为53.5%，较前几年大为提高，而直流环节的可用率仅为20.9%。值得指出的是，流向岛上的功率大约是岛上输出功率的4倍。要下结论还为时过早，但是现已表明，直流环节投运初期发生的问题，大部分业经克服。

4-7-2 交流侧故障 1970年的文件报道了1968年在南达而马齐奥地区有两台换流器变压器发生了故障。先对1号变压器进行了临时性检修，2号变压器则在大修时重新设计了线卷，于1969年重新投入。1号变压器的最后检修是在1970年9月完工的。因为岛上的电厂正在进行大修，需要变压器满功率运行，所以第二台变压器的检修实际上推迟了开工日期。

由于同期补偿机的轴承系统发生故障曾造成了121小时的停运。由于交流滤波器的各种故障还引起了4次短期停运。应当提到，当5次谐波部分的一台电抗器因油冷系统故障而过热损坏时，在进行检修过程中，虽然没有5次谐波滤波器，但直流环节仍能继续维持运行。

4-7-3 直流侧故障 最近刚刚对旁路阀进行了改进，并且完成了逆弧和继起逆弧保护系统的改造工作。据报道逆弧和继起逆弧的次数已经降低。在这方面应该指出，在表3和表4中列出的数字，大约有一半均发生在辅助装置有缺陷的一个未加改进的阀上。但是，由于直流环节在运行方面的局限性，直至9月份尚不能明确决定为了正常运行还应做些什么改进工作。将来的报告应澄清情况，还应证实改进工作是否具有持久的效果。阀的辅助装置已引起了少量的麻烦，主要是妨碍了故障指示系统的工作，该系统依靠空气压力把信息从阴极电位传递到地电位。

过去，传播条件曾对无线电控制环节的工作性能造成不良影响，但装上附加设备后，使控制信息在防止干扰方面有了效果。据报道：试用了一种利用对流层散射的附加电路，其试验情况是良好的，这种方法将用来改进夏季的无线电通讯。

4-7-4 直流输电线路故障 在报告期中，迄今共有9次电缆故障。众所周知，其中

有些是由于捕鱼作业所造成的损坏。目前正在研究克服或降低这种危险的办法。

科西嘉地区架空线路的杆塔，由于接近沿海而受到严重腐蚀，需要进行处理和重新涂漆。据报道：以前为了防止岛上架空地线腐蚀而采取的一些方法是成功的。

现在已把硅脂正式应用在南特雷萨（S.Teresa）开关站的设备以及开关站附近某些杆塔的绝缘子上。在1970年已报道过，用这些方法克服污闪效果较好。还应提及，一般认为，在暴风雨时该地区的污秽程度比较严重。

接地电极系统没有引起过停运或限制功率的情况。但是，在撒丁岛上采用的镀铂电极因电化学效应腐蚀得比预料的要快。作为试验装置，已改作了几个镀层比原规定更厚的电极，其性能将与标准电极进行比较。

4-8 温哥华工程

4-8-1 概况 当1968年第一期工程投运时，利用了一条从温哥华到阿尔诺（Arnot）变电所间的现有备用交流电缆。电缆的额定电流为600安，因此最大输送功率限制在7.5万千瓦。在完成第二期工程和敷设专用直流电缆以后，1970年是该工程装置容量达到31.2万千瓦的第一个完整年份[8]。

第一期工程中采用了早期设计的汞弧阀。在第二期工程开始前，参照其它工程中的经验改进了设计，因而对第二期工程采用了新的方案。在这段时期中已经看出老式阀的工作性能较差，故决定对所有老式阀进行改造。到1970年底，第一批改好后的在第一期工程中使用的阀已投入运行。

维修和测试时间总计为2594小时，这是决定可用率为69.5%的重要因素，这时综合的使用率则为43.3%。

4-8-2 交流侧故障 温哥华岛换流站一台230/132/12千伏自耦变压器的差动保护动作了两次，造成了故障停运。初步认为：第一次是误动作。第二次是由于12千伏隔离开关不完全闭合引起了相间和相对地的接地故障，使其局部损坏。

温哥华岛终端站的高通滤波器因有空气漏入而使瓦斯保护动作。确信空气已进入油冷系统中低于大气压运行的部分。为了不发生类似事件，对管路系统进行了改进。因阿尔诺方面5次谐波滤波器冷却系统中的电动机接触器发生故障也造成一次停运。

保护装置误动作5次也造成了故障停运。这些偶然故障中有两次是由3次和11次谐波滤波器不平衡保护的动作造成。一次操作不当是电压测试插头松动。其余则因系统频率超过规定（61.36赫）而造成。正在考虑从设计上进行改进，使系统频率偏移时对保护系统不产生影响。另外三次故障停运是阿尔诺高通滤波器的瓦斯保护误动作造成。可以认为，这些误动作是由于油泵切换时在油冷系统中造成的冲击引起的。在交流系统几个周波内接续发生的六次逆弧现象（但在通过大的超前电流的阀内没有发生逆弧现象）使换流器变压器的断路器跳了闸。断路器的自动重合闸延迟了1分钟，结果使换流器变压器的差动保护发生了动作。这件事被怀疑是：由于一个阀重复逆弧产生的单向大电流可能使变压器承担大的涌流所致，而这个涌流则未经保护系统适当地加以扼制。

4-8-3 直流侧故障 在1970年的绝大部分时间内，第一期工程中未加改进的阀全部仍在运行，这个因素造成了表4中所列的多次阀扰动现象。在这个时期的末尾，第一批改进过的阀才投入了运行。在下半年里逆弧频率约为每月每阀组二次，而由继起逆弧引起的

跳闸次数则下降到每月每阀组约 0.5 次。看来还需要再过一些时间,才能确切地评价阀的工作性能。现在已经知道,由于阀组间电流分配不当而造成三次停运的原因。其中一次仅是由于接线错误。可以相信,正在采用的解决办法将可以解决困难。在温哥华岛上终端站的生水过滤器中积聚了 CaCO_3 , 结果使一个阀组失去冷却造成了停运。现已安装了一套除盐装置来除去生水补给水中的 CaCO_3 。在阿尔诺的直流线路保护装置产生误动作,由于强迫 6 脉冲运行,结果造成了可用率的损失。这些误动作的原因尚未查明,虽然已经肯定保护启动时直流线路的电压是正常的。误动作仅在下暴雨时发生,所以可以十分肯定地说问题不在于保护装置本身,而在于室外的测量装置。

阀的阻尼电容器和电缆的过电压保护电容器各造成一次停运。因一个阀的阻尼电阻漏油,导致在一个时期内强迫 6 脉冲运行,结果造成阿尔诺方面的过电压保护电容器损坏。为了更换这个电容器的外壳需要一次全部停运。

4-8-4 直流电缆故障 海底电缆的一次故障造成直流环节的完全停运。手动操作需要在几个较远的地区进行,因而大大地延长了停运时间,但凑巧的是,在这个时期内的需电量并不高。接着对电缆故障段进行了检查,发现电缆在故障之前就受到某些外伤。故障点发生在离海岸约 1 英里的地方,电缆在这里搁在浅水中的淤泥滩上。为了防止再发生这种性质的故障,已将电缆埋入约 2 呎深的淤泥中。

4-9 太平洋互联工程

4-9-1 概况 尽管有许多已报导的有待克服的问题,并且在这项工程投运时经历了各种初建期故障,但从 1970 年 5 月 21 日开始工业运行到 1971 年 4 月 9 日止的一段时期中,可用率达 87.7%,而综合使用率达 33%。

可以想象得到,在最初几个月中,相当多的小缺陷已经很快得到改正,同时有许多偶然性故障,还不能判断其确切原因。似乎没有理由可以解释,这些故障为什么不能降低到和其它工程相同的水平。

为了克服汞弧阀在起动过程中出现的缺点,正在寻找解决办法,这是因为这些汞弧阀的运行情况不如实验室全面试验结果所预期的那么好。无疑地一部分解决办法是改进控制回路,现已证明起动程序、系统动态条件下控制系统的性能以及故障时保护逻辑的改进等对于改善阀的工作性能均有一定效果。目前对输电线运行时的最小直流电流已加限制。从运行情况看,可以认为这种限制是可以接受的。

4-9-2 交流侧故障 在锡尔马因换流器变压器分接头故障造成一次停运,而另一次停运是由一台变压器的内部匝间故障造成。变压器和断路器漏油也造成一些短期停运。在本工程中没有一个变压器因继起逆弧或直流换流器使用中的其他特殊现象而造成损坏。

值得指出的唯一其它偶然性故障是,阀侧线卷的过电压保护器发生了两次故障。一次故障似乎是因制造缺陷而使垫圈泄漏而造成,但没有找到另一次故障的原因。

4-9-3 直流侧故障 早在阀的投运过程中就发生过一些特殊问题。在进行检查后发现,阀在低电流下性能不良,但这一点在实验室的全面试验中未能发现。改进控制系统和保护逻辑是在发生地震的情况下进行的。据报道,虽然在输电线被迫停运前所取得的经验是有限的,但上述的和其它的一些措施均是有希望的。象在别的工程上一样,大量的逆弧和继起逆弧现象并没有怎么影响到实际的可用率。