



远距离高压直流输电

苏联科学院通讯院士

Л. Р. НЕЙМАН 主编

中国科学技术情报研究所译

1959年12月

8261
52.J7
6464

64.

6F

远距离高压直流输电

中国科学技术情报研究所编辑出版

(北京朝内大街117号)

外文印刷厂印刷 全国各地新华书店发行

787×1092 1/16 2 1/4 印张 50,000字

1959年12月出版

科研版—00386

定 价: 0.45元

目 录

高压直流输电的优点和国民经济意义	(1)
国外在高压直流输电方面的科学技术研究情况	(4)
苏联在高压直流输电方面的科学技术研究情况	(6)
换流阀	(6)
架空输电线路	(7)
直流高压电缆	(8)
换流器接线原理图	(8)
无功功率的补偿	(9)
电力变压器	(10)
栅极控制、调节和保护装置	(10)
直流线路和变电站的切断	(10)
喀希拉-莫斯科试验性直流输电线路	(11)
苏联计划建设的斯大林格勒水电站-顿巴斯 第一个巨型工业性直流输电线路	(16)
斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路用的巨型换流阀的研究	(20)
斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路用的变压器和其他专门设备的 生产准备和研究	(22)
苏联统一动力系统中远距离高压直流输电线路的建设前景	(23)
建成斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路和以后其他巨大直流输电线路的科学技术任务	(28)
建成斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路的重要任务	(28)
苏联统一动力系统内直流输电线路发展前景中有关的技术经济研究	(28)
巨大换流阀的进一步研究	(29)
探求换流变电站降低费用和提高工作可靠性的办法	(30)
输电线路电压的提高和有关的研究工作	(31)
电缆线路的研究	(32)
直流线路上中间用电方法的研究	(32)
作为统一动力系统中一个环节的直流输电线路的研究	(32)
参考文献	(33)

完

高压直流输电的优点和国民经济意义

巨大电站的建设、动力系统的发展和联合它们成为统一的动力系统，都要求建设大量的输电线路。有系统间的联络线，也有远距离的输电线路。远距离输送大量的电能要求建设极高参数的新型输电线路。联合各地区动力系统成为国家的统一动力系统，能够在发挥社会主义计划经济优越性方面提供最大的经济效益。

解决这些巨大的任务需要使用物理和技术方面的全部新成就，以及在科学和工程上进行许多顽强的工作。只有综合的使用了在各领域内所保证最高的技术经济指标的各种设备的时候，统一动力系统工作的高度经济性和可靠性才能获得。在建设输电线路时，情况也是如此，无论建设终端变电站简单的、能够容易进行分支的交流线路也好，无论建设在远距离输送大量电能、或者作为系统间联络线而使用它们时具有显然的技术经济优点的直流线路也好。

直流输电线路的优点如下：

直流输电时不发生同输电系统有关的并列工作的稳定性问题，这就消除了有关输电距离和输送容量方面的限制。当距离和容量增长时，提高直流输电线路的输送能力不需要任何的专门措施，但交流输电却需要装设中间开闭所、縱补偿、中継同步补偿机，等等。巨大电站同远方的动力系统之间或各别动力系统之间装设联络线时，如果利用直流输电线路，便容许不同频率的非同步运行。

这种特征同能快速栅极控制的水银换流阀一起，构成了直流输电的许多运行上的优点：

不需要同步和具有栅极控制的换流阀提供了采用快速保获和自动重合闸的可能。

利用栅极控制切断直流线路的方式，比利用断路器切断交流线路能够不限制自动重合闸的次数。在交流线路上这种限制引起了在自动重合闸若干次之后，需要对断路器进行检查。

直流输电线路上的自动快速栅极调节能够限制短路电流的破坏作用，使其近似等于输电线路的额定电流。这就易于快速重复合闸，并且减少了电弧对导线和绝缘子的破坏作用。

使用栅极控制切断线路和消除输电线路运行中的故障，能够使过电压的计算倍数相当小；即使线路的长度相当大，也较使用断路器的交流线路为小。

操作换流阀的栅极，可以调节输送容量和转换其方向（不再是根据送受端系统的频率）；同时，还可以用它来调节接受系统的频率。

直流输电可以利用大地作为导线，这就能够在线路的一根导线或者换流变电站的一半损坏时，不中断输电，而仅降低输送功率。因此，它具有某种双回路输电线路的类似性能。

直流线路上的短路电流不会因交流供电系统容量的增加而加大；同时交流系统中的短路电流也不因为考虑了联结的直流输电线路而有所增加。这就消除了对电器设备的许多附加要求，而这些要求在许多情况下，当利用交流输电线路联合动力系统时常常是会产生的。

采用直流输电的重大技术经济优点主要是表现在本身的线路上。

当同三相的交流线路相比时，这些优点便显得特别的突出。

直流线路可以采用架空线的，也可以采用电缆的。

大家都知道，交流电缆线路的长度被限制在比较短的距离上——总共几十公里，然而直流电缆线路的长度是可以不受限制的——几千公里。同一个绝缘强度的电缆，可以经得住的直流电压比交流电压要大好几倍。因此，敷设高压直流电缆线路比交流要相当地容易和经济。

架空的直流输电线路比交流线路技术上要简单很多并且也便宜。在同样的绝缘水平时，直流输电线路的线间电压比交流线路的线间电压约高一倍。另外，直流线路的优点还在于它的每个回路只有两组导线，而交流要用三组才行。这就在很大程度上简化了铁塔（图1），并且也随着降低了金属的消耗量。

对斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路进行了两种线路的比较——电压800千伏的直流和电压400千伏的交流，比较结果表明：采用直流时，铁塔和基础的金属消耗量每公里可以节约11

吨，全线路470公里共节约5100吨。直流线路的两组导线代替交流线路的三组导线，可以相应地减少绝缘子的数量和金属导线；与减少导线金属消耗量的同时（导线减少 $\frac{1}{3}$ ，节约金属2500吨），还可以减少电能损耗 $\frac{1}{2}$ 。总计，直流架空线路每公里的造价（根据苏联火电设计院的研究）比交流线路降低了40%〔47〕。

直流输电线的缺点是，装有换流器的两端变电站很复杂。关于从高压直流线路上引出分支线的问题也还没有能够解决。

换流器使变电站的投资增加很多，使电能损耗和变电站运行费用也大大增加，并且使运行很复杂。由于从直流输电线路引出分支线的问题没有解决，使得从线路中间用电的可能也变得困难了。

由于直流输电变电站很复杂、建设费用高，所以它的经济合理性主要表现在输电距离很大的时候，也就是当线路上直接节约的费用超过了两端换流变电站所增加的部分的时候，当线路损耗减少而节约的经费不断增大的时候。

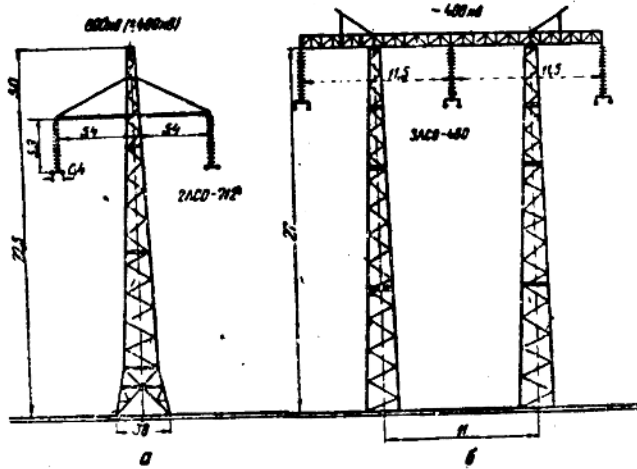


图1 斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路的铁塔简图:

- a—电压300千伏的直流输电方案（塔重5吨，档距长340米）；
- b—电压400千伏的交流输电方案（塔重9.4吨，档距长400米）。

苏联对直流输电和交流输电的费用比较表明，架空输电线路在容量75万千瓦时，采用直流的经济有利的距离是在600公里以上。

按照瑞典和英国专家们的资料〔78〕，直流架空输电线路的经济有利距离，在容量75万千瓦时是从650公里开始，容量150万千瓦时是大约从500公里开始。

随着距离和输送容量的增加，采用直流输电的经济效益会更大。如计算表明，距离1250公里、容量500万千瓦的双回路直流输电线路所需要的投资比同样容量的三回路交流输电线路要少15亿卢布，并且效率要高1.4%。最后，当年输电量为350亿度时，每年可以节约5亿度电。

在最近的10—15年内，苏联将广泛地建设许多极大的电站（利用国内的巨大燃料和水力资源）。这些电站所生产的电能，首先会用在建设于电站附近区域的工业中；但是，这些大量的电能也同时需要输送到遥远的、特别需要电能的巨大用电中心。在这种情况下，直流输电将有重大的国民经济意义。

特别有利的将会是从西伯利亚巨大电站到乌拉尔的直流输电线路。这条线路的长度大于2000公里，输送容量有数百万千瓦。此时，直流线路的电压便需要采用1200千伏。

当输电线路必须通过海峡等积水区时，既使距离比较的短，采用直流输电在技术经济上也还会是合理的。这是因为高压直流海底电缆线路相当简单并且费用低。瑞典从大陆到高特兰岛的直流海底电缆线路（电压为100千伏，长度为100公里），就是这种情况的一个例子。

根据瑞典和英国专家们的比较资料〔78〕，容量75万千瓦的水下电缆输电线路在距离超过40公里时，采用直流即比较经济。

联結某些相互間距离不大的巨大动力系統，采用直流輸电綫在技术上也很有优越的。在这种情况下，可以把苏联整个巨大的未来联合动力系統分成由直流輸电綫联結的許多区，这些区可以不要互相間同步的工作。利用此种方式建立起来的苏联統一动力系統，可以相当大地簡化交流动力系統的工作和减低設備費用（特别是开关設備）。

从上面引述的資料中，我們可以証明，在建設交流輸电綫路的同时，高压直流輸电綫的实际現在建成苏联統一动力系統的工作中将会有重大的国民經济意义。同时，也可以很清楚地看出，建設直流輸电綫所必需的高压巨型換流器的研究和創制工作将会在許多其他的技术領域中起到促进的作用。

国外在高压直流输电方面的科学技术研究情况

直流输电方面的研究工作在许多国家过去和现在都在进行。

1936年，美国建设了米开尼克斯维尔-斯开尼克捷吉直流线路，长27公里，输送容量5250瓩，电压30千伏。这条线路保证了两个不同频率（40和60赫）的交流系统的联结。1944年在比特斯布尔克所完成的换流装置也是为了同样的目的，其容量为2万瓩，它所联结的交流电网的频率是60赫和25赫。1939年，瑞士BBC公司的维青琴-秋里赫直流输电线路投入了运行，其容量为500瓩，电压30千伏。所有这些装置都是使用的水银换流阀。

德国在第二次世界大战时期在直流输电方面进行了相当巨大的工作。Siemens及AEG公司研究了巨大的水银换流器。Siemens公司还建设了萨路路金堡-莫皮特试验性直流输电线路，容量为1.5万瓩，电压100千伏。直流输电线路是使用现有的110千伏三相单回路线路的两根导线组成。但是，这条输电线路的全部设计容量并未都被利用，仅仅在很短的时期中线路功率达到4000瓩。在1945年，输电线路被拆除。

在同一个时期，德国在爱尔白（季萨乌附近）和柏林变电站之间建设了另一条试验性直流输电线路，容量为6万瓩。预定换流变电站装设两组各为3万瓩、200千伏的换流桥。当两个换流桥同时工作时，直流输电线路的线间电压会达到400千伏。同时也规定了输电线路能够经过大地返回电流而成半地分开工作。

为了查明换流阀的最好的型式和联结它们的最合理的接线，输电线路的一半是由Siemens公司安装的设备，而另一半则是由AEG公司安装的设备；这两个公司制造的换流阀是不同型式的。Siemens公司的整流桥在每个桥臂上串联联结了两个换流阀；反流端是由两个反流桥串联联结的，每个桥臂上串联联结一个换流阀。另一半输电线路的整流器和反流器是装设的另一种型式的AEG公司的换流阀，这一半线路的两端换流装置均按三相桥式接线装配，每个桥臂上串联联结了三个换流阀。

在1945年终，在两端变电站之间敷设了两根单心电缆，电缆心与包皮之间的直流工作电压按200千伏计算。这条线路没有能投入运行。

在德国，在E. Marx的领导之下还进行过高压弧阀换流装置的研究。为了能实际地试验制制的弧阀，在瓦特钦什塔特（在布拉温什维格附近）建筑了容量为1.5万瓩的试验装置。在该试验装置上试验了由三个四间隙弧阀装配成的三相换流装置。试验是在电压75千伏之下进行的。

在列尔特和米斯堡（在加恩诺维尔附近）建设了装备双间隙弧阀换流装置的试验性直流输电线路。输电线路的整流电压是80千伏，计算容量是1.6万瓩。电能是在现有的三相电缆中传输的，但只用了两根电缆心，其余的一根没有使用。在工作过程中负荷曾达到1.2万瓩，再没有增高。

使用弧阀传输电能的工作没有获得可以满意的结果并且被中断了。

瑞典的直流输电获得了最大的成就。在1945年，瑞典完成了电压90千伏、容量6500瓩的试验性直流输电线路的建设工作。输电线路是从脱罗里赫坦到密里路特，长50公里（73）。直流输电线路是使用一条50千伏的单回路交流架空线路。在这条输电线路，瑞典为建设从大陆到高特兰岛的更大输电线路做了所有必需的试验（61，77，83）。瑞典的这条高特兰岛直流输电线路是国外的第一条工业性直流输电线路。

1954年，高特兰岛输电线路投入运行。它的额定容量是2万瓩，电压是100千伏，长度是100公里；是采用单心海底电缆，并且以海水为回路。

每个换流变电站是由两个串联联结的桥组成。线路两端的变电站都是按增加容量到4万瓩建设的。因此还要敷设第二条电缆和增大工作电压到200千伏。

输电线路的换流器是双阳极的水银换流阀，阀中有许多联接到外面分压器上的中间电极，分

压器是由电阻构成的。换流阀是使用空气冷却。每个阀的计算平均电流是67安，额定电压是50千伏。换流阀静止状态时可维持电压到250千伏。阀中的许多中间电极可以保证换流阀放电间隙快速去游离，而采用分压器可以使中间电极间的电压均匀分布。

目前，高特兰岛的输电线路仍处于在运行中，它工作的可靠性并不比交流输电线路低。输电线路的这种高的工作可靠性是通过很好的考虑和研练过的自动及保护装置而得到的。因此，换流阀在工作中发生的间断并没有影响到给用户的供电。工作中脱出的换流阀在不到一秒的时间内即可自动地重新投入工作。在反流器端（在高特兰岛）的换流装置所安装的自动装置，当在接受交流电网中电压对称的或非对称的快速降低时能够防止反流器产生振荡而造成事故。

这条线路的运行经验表明，它能够使高特兰岛接受电网的交流频率保持在固定的水平。整流器和反流器端的调节装置是由无线电通道联系的。

每个换流桥都增设旁路阀，在换流阀工作破坏时（反流器振荡或反燃弧时）它们可以暂时投入工作。在变电站上有足够数量的备制好的换流阀，准备随时代替那些损坏了的。

高特兰岛输电线路的建设已提供了很显著的经济效果：早先，高特兰岛是靠从外地运输燃料发电的火电站供电，现在岛上的电能成本已降低了25—30%。

瑞典目前正在进一步增大直流输电线路使用的水银换流阀的容量的研究工作。ASEA公司正在进行最大电流200安、反电压100千伏的单阳极换流阀的研究。巨大电流的换流阀打算制造成多阳极的。假如按照这样，斯大林格勒水电站-顿巴斯的输电线路将需要5个阳极的换流阀。

在创建直流输电线路的同时，许多国家过去和现在都在研究直流输电线路可能的发展道路。瑞典为了提高现有线路的输送能力，计划改变某些220千伏交流输电线路为±250千伏的直流，同时在勘察和计算远距离的、电压为800（±400）千伏的直流输电线路。

从挪威到丹麦计划通过海峡敷设容量10万千瓦、长100公里的直流输电线路。南斯拉夫也有人在讨论通过亚得利亚海直流输电线路到意大利去。

英、法两国动力局联合委员会于不久之前决定采用直流输电线路联结两国的动力系统，计划通过英吉利海峡敷设电压为200千伏的直流单心电缆。输电线路的容量是12—15万千瓦，预计1960年底建成。可以看出，尽管换流变电站较贵，但是整个直流输电线路比采用交流还是便宜和有利，因为采用交流时需要敷设4根更复杂和更贵的、132千伏交流电缆（1根是备用的）。这条直流线路的运行优越性表现在：两个被联系系统的频率调节可以不互相发生依赖，能够精确地按照预先规定的曲线调节输送容量。

从尼罗河上的水电站（在阿斯旺附近）到开罗的架空直流输电线路已在详细计划之中（81）。在国外的杂志上曾刊载过关于从塔斯马尼亚岛到南澳大利亚敷设两根单心电缆的直流输电线路计划（75）。根据这个计划预计输电36万千瓦，电压采用600千伏，距离长550公里。

目前，加拿大正在讨论建设两条输电线路：一条长60公里，容量20万千瓦，经过许多河流；另一条长2500公里。

战后，日本在直流输电方面进行了许多工作，但规模并不很大。被许多大的海峡分割开来的日本的许多岛上，有很多额定频率不相同的交流电网。因此日本联合这许多分开的电网的任务，经济的解决办法仅仅可以是采用直流。日本已有许多电压不超过50千伏、容量比较不大的直流输电线路计划；但是还没有报导过在这个国家有任何巨大的直流输电线路计划。

如在上面已经指明了的，国外在直流输电与交流输电的技术经济比较方面也曾进行过很多工作。同时还完成了许多理论研究，象有关水银换流阀中的物理现象和换流器装置中的电磁过程（人工换向；由换流器供电的电路中的高次谐波；换流器装置中的高频振荡）的研究。几乎所有这些问题，在苏维埃科学事业中都获得了极其详尽的解决。我们在下面的几章中将详细说明这些伟大的成就。

上面所提到的这些事实可以证明，国外的许多国家对实际解决高压直流输电中存在的兴趣有很大的兴趣。

同时还应该指出，苏联由于建设远距离的巨大输电线路（特别是采用高压直流的输电线路）而提出的任务远远地超过了国外一些国家所提出的任务的许多倍。这是因为，苏联动力事业未来的发展速度非常高，动力资源和巨大用电中心分布很特殊，以及领土非常辽阔广大。这些任务对于苏联统一动力系统的建立具有特别重大的意义。

苏联在高压直流输电方面的科学技术研究情况

换 流 閘

在直流输电中对于换流閘的工作要求是非常高的。因此，对于无论是在正常运行时的或事故情况时的换流閘中的物理过程的研究便具有特别重要的意义。苏联在直流输电工作开始时对于决定换流閘工作的一般基本特性和参数均缺乏研究。例如电位分佈，电子浓度，水银气的密度。当时也没有许多的条件和足够使人满意的方法以测量相应的数量。那个时候的科学研究工作，象在以 B. И. 列宁命名的全苏电工研究所、以 M. И. 加里宁命名的列宁格勒工学院和以 M. B. 罗蒙诺索夫命名的莫斯科大学等单位的试验室内所完成的工作，还未能对于高压换流閘的构造及其工作情况提供出足够的资料。因此，在全苏电工研究所和直流研究院都进行了一系列的专门研究〔17, 54 和 32, 54〕。这些研究工作在开始时可以近似地划分为两组：换流閘工作的基本特性和参数的研究，换流閘事故过程原因的研究。

第一组的研究工作曾获得了一些关于电位分佈以及其他电气特性的资料。借助于全苏电工研究所和直流研究院所拟定的专门研究办法，一些关于换流閘中水银气密度分佈的资料，同样也获得了。从这些资料中可以看出，当游离和建立阴极斑点时水银气密度分佈的差异、放电收缩区稀薄的形成和换流閘中阳极部分凝結物形成的可能性等等。在全苏电工研究所的工作中曾对在反半周期时换流閘发生燃弧的过程给予了理论的和实验的分析，特别是对于去游离过程。这方面的工作特别注意取得在分段阳极部件上电位的分佈情况。从全苏电工研究所开始了而以后由直流科学研究所继续和发展了的这些研究工作，是为了寻找在直流研究院里创制不分段高压閘的理论根据的。按照这种原理（即不用插入的中间电极）制成的换流閘的试验，不仅证实了物理研究的结果，而且实际上也打开了高压换流閘结构的新方向。

在事故过程的研究中，反燃弧原因的研究占据了很大位置。直流研究院的工作表明，特别危险的发生反燃弧的可能是水银滴落到阳极上（在反半波电压时）。这就对高压换流閘的结构提出了应该完全除去这种可能的特别要求。在对没有“滴落”的情况下閘内发生击穿的研究表明，按其性质这些击穿近似于所谓的高真空击穿。这就强迫重新审定这些原理，那就是以这些原理为基础而选择的阳极部件的几何学相互关系。在直流研究院还进行了另外一些事故过程的研究。这些过程在试验输电线的最初运行时期曾引起了不少的麻烦，而且还有运行电弧熄灭的现象。研究不仅仅是阐明这些过程的物理现象，也计划了一些实际可行的措施，以同它们进行斗争。

以上列举的仅仅是一些直接有关于换流閘工作情况的基本物理过程的研究。除了这些以外还进行了相当数量带有辅助性质的和有关一般物理过程的问题。这些问题的研究是：在各种表面上水银气中阴极斑点的发生和存在的条件；高真空击穿的天然条件；水银离子和原子的再充电过程；以快速离子（部分原子）使各种材料雾化；不同种等离子区的某些一般特性等等。

根据这些研究工作的结果对最初换流閘所具有的结构做了改进。

喀希拉-莫斯科试验性直流输电线路安装的高压换流閘的定额数据是：

最高电压：120 千伏

最高电流：150 安

在每一个桥臂上串联了 3 个换流閘。因此閘的工作电压大约是 80 千伏。但当三个串联閘中有一个反燃弧或被击穿时可达到 120 千伏。换流閘串联联结的目的是减小在一个桥臂中三个閘同时反燃弧而使整个桥臂穿通的或然率。

全苏电工研究所和直流研究院在这种换流閘的总结中提出了许多结构上的改进。制造和采用了新的燃弧系统。为抽气管制造了新型的真空活塞——电磁的，能够采用定时的电气控制。按照总结中所提出的这些以及更多的其他改进，制造了 BP-1 型换流閘，是供在上述的电流和电压下使用的，其中一部分就用在试验输电线上〔10, 50〕。

直流科学研究院为試驗輸电綫制造了 B-108型高压換流閥。它的特殊的地方是引入了輔助电极（此电极裝于园柱筒部分的密閉室內）及电极燃弧系統的結構和簾极。

在1954年，全苏电工研究所成功地試制成了用于試驗輸电系統上的更大的 BP-3型換流閥（图 2）。这种換流閥也是預备供在每个桥臂上串联使用的。下面的額定数据是它的特征：

最大电压：130 千伏

最大电流：300 安

也就是說，它有較 BP-1型大两倍的容量。BP-3型的外廓尺寸，除了高度以外，均与 BP-1型相同〔12,55〕。

这种閥在試驗室裝置和換流变电站上的試驗表明，它比其他同样用在試驗輸电綫上的換流閥有更高的閥性和电气强度。这种閥的試制工作証明了下面的这种可能：

不用大量地增加尺寸，便可很大地增加它的容量

对試驗輸电綫換流閥所做的各种改革性的研究工作，提供了許多丰富的資料。这些資料可于900安用和130千伏的远距輸电換流閥的結構設計。这些研究結果将在計劃建設的斯大林格勒水电站-頓巴斯直流輸电綫有关換流閥裝置的一节中敘述。

苏联科学院动力研究所对使用弧閥于直流輸电綫上的可能进行了研究，并且对弧閥与水銀換流閥的換流裝置做了比較〔52,53〕。在基本的研究中提出了一些关于改进弧閥換流裝置指标的新意見。研究的結果表明，現在已能夠創制在平均电流为50安、电极工作期限为1000小时下工作的弧閥。但是在目前的制造情況下，同水銀換流閥比較起来，弧閥是不夠可靠的，运行費用也是昂貴的而且复杂的。因此，目前建設直流輸电綫應該主要依靠于水銀閥換流裝置。

架空輸电綫路

在結構方面來說，架空直流輸电綫路与架空交流輸电綫路很少有不同的地方。因此长距离交流輸电綫路的所有发展也为直流輸电綫路做了很好的准备工作。

直流架空綫路上的絕緣距离和絕緣子串的选择，以及換流变电站設備的絕緣选择，均是以广泛进行过的直流高电压下所具有的絕緣特性为根据的〔49,30,36〕。这些研究結果可簡略地綜述如下：

1. 击穿空气間隙的直流电压值与工頻交流电压击穿时的幅值相同。測量进行到电压达1350千伏时。

2. 各种型式的瓷絕緣子，当加上直流或交流工頻电压时所引起的干閃电压的关系也和空气間隙一样：直流干閃电压相等于交流干閃电压的幅值。試驗进行到电压达1200千伏。

3. 直流湿閃电压值在各种型式的瓷絕緣子上均接近于工頻交流湿閃电压的有效值。最坏的是在直流电压时边缘未扩展的支持絕緣子——对于它，湿閃电压的比例大約是0.9（ $U=0.9U$ ）。对于盘型的絕緣子串和針式支持絕緣子，这个系数等于1。試驗进行到电压达800千伏。最长的絕緣子串是由18个絕緣子組成的。

絕緣子污秽的研究和在喀希拉-莫斯科直流輸电綫上所积累的經驗都表明，不管加上直流

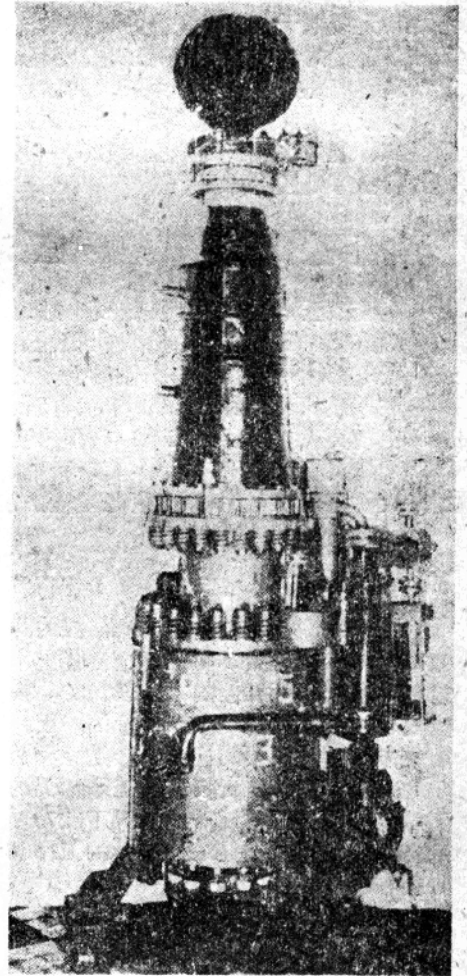


图 2 BP-3型水銀換流閥

电压或者交流电压，在电场的作用下绝缘子污秽的程度都没有什么不同；也没有观测到闪络电压明显的差别和降低的关系，即是当绝缘子在很强的污秽和湿润的情况下也是一样〔16〕。

引用的资料证明，对于直流架空线路和变电站可以采用与交流线路一样的绝缘子。

对于线路的绝缘选择，除了在直流电压下的特性之外，还必需知道可能的过电压水平。在这方面进行的研究表明〔2, 18, 19, 22〕，根据物理定律，在直流线路上不可能产生象在交流线路上那样高的内部过电压。在特别稀少的情况下，当许多的自动装置损坏了时，过电压可能超过工作电压两倍。目前根据直流研究院工作中所获得的第一批成果，已能提供出下面问题的基本计算：利用费用不大的专门阻尼装置，能成功地任何情况下限制直流线路上的内部过电压在1.5倍的数值。

按所规定的研究工作，已能作出关于大距离直流输电经济合理性的下列重要结论：当两种情况下具有同样的绝缘时（绝缘子串，绝缘距离），在直流输电线上比在交流三相输电线上导线间的电压可以容许高至1.7—2倍。这是因为，在直流输电中换流器的中点是接地的，因此在绝缘子串上的电压为线间电压的 $\frac{1}{2}$ ；而在三相交流输电中，当中性点接地时，加于绝缘子串上的相电压幅值为 $\sqrt{2} : \sqrt{3} = 0.82$ 的线间电压有效值。另外，象上面已经说过的，在直流输电中闪过电压的倍数较小。

当设计直流架空线路时还必须考虑导线上可能发生的电晕放电。因为它会引起附加的能量损耗和无电干扰，并且会妨碍使用导线作为高频通讯通路。由于在苏联对直流量现象进行了许多理论和实验的研究工作，所以在选择分裂导线、比交流容许更高的电位梯度、以及更高精确程度地对电晕能量损耗值的估计等方面，都能令人十分确信地获得了成功〔44, 56〕。

直流量和长链放电电压的研究还需要继续向更高的电压发展。而根据现有的资料也能预料到，既是建设极间电压为1200—1400千伏（±600—700千伏，对地）的架空线路，也不会遇到什么原则性的障碍。

直流高压电缆

直流高压电缆使用于换流变电站到架空输电线上的出线部分，经过河流或其他大的积水区地段的跨越，以及重要的输电线路上。斯大林格勒水电站—顿巴斯输电线大约要用7公里的直流高压电缆，是用水电站侧的换流变电站的两极出线上。

在苏联积累了许多200千伏电压直流电缆的运行经验，那是敷设在喀希拉—莫斯科间的线路。目前要进行的研究工作，有预防性试验的方法，损伤地点的测定和电缆的修理。

电缆工业科学研究所和《莫斯科电缆》厂共同设计成功了试验型的400千伏、1000安电缆，是斯大林格勒水电站—顿巴斯输电线上需要使用的。

换流器的接线原理

在苏联进行了各种换流器接线的详细研究工作，凡是可能采用的接线方式都研究到了。研究了利用串联换流桥和在每个桥臂上串联几个换流阀以提高电压的方式，以及利用并联换流阀以增大容量和可靠性的方式〔37, 8〕。换流阀和桥的各种接线方式，是以它们是否影响到提高换流变电站可靠性的观点来评价的。因为在目前不十分完美的换流阀的情况下，选择这种或那种接线方式时，主要的标准应该是可靠性高。

普遍的能够分析换流阀工作情况的方法论也在研究之中。这包括任何形式接线的换流阀，无论是在整流的或反流的情况下〔27〕。对装配成三相桥式接线的换流器的工作〔20〕和最有前途的12相串联桥式接线的换流器的工作〔66〕，都详细地进行了分析，其中尤其特别详细地分析了将要在斯大林格勒水电站—顿巴斯输电线换流变电站中使用的换流器的工作。对在设计时使用的这些换流器和整个直流输电线的计算方法也在进行研究。

当几个桥串联联结时保护作用是由称作旁路阀的装置担任的。在试验的喀希拉—莫斯科输电线上对旁路阀的工作进行了精密的研究，并且为今后输电线换流装置中设计和采用它们奠定了基础。目前已成功地解决了关于旁路隔离开关的问题。它是为了长时间抽出一个桥而必须用的装置。

在高电压和大容量时，阻尼换流装置中产生的高频振盪过程具有特殊的意义。因为这种振盪能引起危险的设备过电压以及相当大的无线电干扰。在基本的显明回路上（产生这种或那种振盪过程的）研究了而且成功地在試驗輸电綫上也采用了專門的阻尼装置。那是以电阻器和电容器及高周率空气心电抗器組成的电路。这便为将来的輸电綫多桥式換流装置奠定了阻尼装置計算的理論基础〔67, 1〕。

在多桥式的換流装置中，当某些过渡情况时能够使各别桥上出現（假如沒有采用專門的措施）相当大的过电压，这是由于不均匀的分配了所有串联換流元件的全部电压而引起的。理論和实践研究工作的結果已成功的获得了避免这种不能容忍現象的办法——利用联結保証足夠均匀分配全部电压的附加电容器和电阻器〔22〕。

在多桥式換流装置中，經濟合理地实现各种不同水平的设备絕緣依赖于相应桥对換流装置接地中点的远离性。絕緣的层次以及在低程度絕緣上产生危险过电压（在串联結綫中部分元件被击穿的情况下）的可能，都有必要装备專門的保护装置——利用閘型避雷器或空气間隙。目前已在研究能合理地选择絕緣水平和内过电压保护結綫的方法〔47, 19〕。繼續在进行确定避雷器工作情况的考察和它对过渡过程的影响。全苏电工研究所主持进行着換流装置保护所必需的閘型避雷器的研究工作。

在进行直流輸电时应该設法减少电流和电压的高次諧波，它們是任何結綫装配起来的換流装置都要产生的。为了抑制在架空輸电綫路上整流电流的脉动并且消除那些对通訊綫最有害的影响，研究了專門的低頻滤波器。它联結在換流变电站的出綫处〔14〕。滤波器的基本元件是串联于綫路上的电抗器。按其外廓尺寸和重量來說，它可与換流器的电力变压器相比。为了补偿无功功率而联結在換流装置結綫中的电容器，也能輔助性地减少在交流电网中的高次諧波。

无功功率的补偿

換流装置的无功功率补偿問題在苏联科学工作中是非常注意的。这个問題对于以反流器工作的換流变电站具有特別重要的意义。因为它交給接受的交流电网以有功功率而同时从这个电网要求相当的无功功率。

还在30年代，就提出和研究了一些称为人工整流的換流結綫。这些結綫能够在不向交流接受电网要求无功功率或者甚至还交給这个电网无功功率的情况下工作。后来，又提出过另外一些新的人工整流結綫〔63〕。但是，这些結綫是不能够采用在現在的直流輸电上的，因为它们使換流閘的工作情况非常复杂化了：在这些結綫的情况下，換流閘上的电压增长到1.5倍或者更大〔68〕。

为了在換流变电站补偿无功功率（通常是在交流电网中，情形也是一样），可以采用同步补偿机或者并联电容器組。为了反流变电站不再要求无功功率而工作，也就是使功率因数等于1，同步补偿机或并联电容器組的容量应该是0.5—0.6的变电站有功功率。

按照許多的原因，这些装置适合于联結在換流器电力变压器的第三繞組上。当采用这种联結时，特别是能提高在接受电网短路时反流器的稳定性。

目前，在进行同时利用同步补偿机和电容器的反流器工作情况的理論和試驗研究工作，以及在这种結綫下的各种过渡过程的研究。能够計算和設計帶有同步补偿机和并联电容器的反流器的方法也在研究之中〔24〕。

仅仅采用并联电容器組而放弃效率比較低的同步补偿机的問題，已接近解决阶段。按照斯大林格勒水电站-頓巴斯輸电綫的設計，在頓巴斯变电站計劃同时装設同步补偿机和并联电容器，并且前者供給2/3，而后者供給1/3的无功功率需要。

有一种換流結綫引起了巨大的兴趣：利用不是并联联結，而是串联联結于交流电路中的电容器进行无功功率的补偿。在苏联科学院动力研究所所完成的研究〔38〕表明，当适宜地选择結綫中的参数时，無論是串联，或者并联联結电容器，都可以相当大地提高反流器的稳定性。直流研究院^①提出了实现多桥結綫的另一种方式：联結換流桥到交流电网，仅仅通过串联联結的电容器，而完全不采用电力变压器。因此，可以减少投資，并且增加了效率。这种結綫在試驗

① Инж. Н. М. Мельгунов, Авторское свидетельство No. 105207, 1952, 7, 1.

室内的预先研究表明，在过渡情况下可能产生过电压。目前对这种接线方式在进行进一步的研究，并且是以消除指明了一些缺点为研究方向的。

电 力 变 压 器

在直流输电换流变电站上工作的电力变压器处在一种不同于交流输电的特殊情况之下。主要的特点在于，变压器的高压直流电压绕组对油绝缘的作用。在直流电压下油绝缘情况的研究是由全苏电工研究所同莫斯科变压器厂一起进行的。这些研究成果为设计斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路用的变压器，打下了良好的基础。这些变压器的绝缘等级要±200和±400千伏。莫斯科变压器厂已完成了这批变压器的技术设计。

现有的资料说明，完全可以寄托希望于进一步的研究和制造更高绝缘等级的（即是±600，±700千伏）电力变压器。这些变压器对于极间电压为1200—1400千伏电压的直流输电是必需的。这些变压器想必不会比目前在研究中的600千伏交流输电用电力变压器更复杂。

根据已经完成了的、用于大容量换流变电站的电力变压器的可能方案，在目前换流阀还不能有很高容量的情况下，认为每一对换流桥用一组由三个单相分裂绕组变压器组成的变压器组是比较合理的。这样的解决办法也采用在斯大林格勒水电站-顿巴斯的输电线上（见图6）。

栅极控制、调节和保护装置

在直流输电工作中占有重要地位的自动装置系统是建立在科学技术研究工作的成果上的。

能进行栅极控制的换流阀装置，被研究并且成功地运行于喀希拉-莫斯科输电线上[69]。用于斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路上的同样的装置也完成了研究工作。它不同的特点在于栅极脉冲的发生变换了形式，那便是被称作广脉冲的，这是12相换流接线所必需用的[70]。

在喀希拉-莫斯科输电线上，成功地使用了快速装置：电流调节器。它是维持电流无论在正常情况或者事故情况下都在输电线路路上保持恒定的装置，并且是能提高反流器稳定性的组合装置[48,4]。按照这个原则，同样的装置也采用在斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线上。但是，调节如此巨大输电线的更复杂的任务，引起了研究同样新的自动调节系统和许多新的调节器的必要性。

操作换流阀栅极的保护装置在喀希拉-莫斯科输电线上进行了研究并成功地在运行着[64]。在新的保护装置中，有整流器反燃弧和反流器复原时起作用的换流桥差动保护和在反流器错过燃弧时阻止它复原的继续装置[65]。栅极自动重合闸装置在提高输电线路工作可靠性方面起着很重要的作用。这种装置在栅极保护动作之后，借操作主换流阀和旁路换流阀的栅极而使各别的桥或者全部输电线路投入运行。相同原理的装置目前正为用于斯大林格勒水电站-顿巴斯输电线路而上在研究之中。

理论工作已经完成，这就为计算过渡和事故过程[40,71,21,41]和计算调节系统的稳定性[48,4]以及确定对调节和保护装置的要求等工作奠定了基础。

直流线路和变电站的切断

假如直流线路没有联结中间变电站的支线，那么无论是在正常情况下或者事故情况下，它都可以很容易地利用栅极来关闭整流变电站的换流阀而使线路切断。因此，任何专门的直流断路器都是不必要的。喀希拉-莫斯科输电线的运行经验证明了，如此快速的栅极保护具有很高的效率；利用栅极自动重合闸使输电线路很快恢复正常工作的可能也是很大的。

假如沿直流输电线路必须联结一个或者几个中间变电站时，切断的问题便相当复杂了。切断分支直流线路的各别区段和各别变电站的方法，还没有足够地进行研究。但是有建议认为，解决这个问题并不会碰到什么原则性的困难。

最简单的解决办法是，当任何事故时便关闭整个整流变电站，而随后切断不带电的这些损

坏区段，再进行柵极自动重合閘。这样根本干涉了整个直流系統的工作。这确实是很不好的。因此寻找仅仅切断綫路的损坏部分或有事故的变电站的研究工作已在进行中。

一个方法是使用柵极控制需要切断的变电站的主換流閘或旁路換流閘。因此，切断整流变电站已没有什么困难。切断反流变电站，那便需要采用振盪或其他过渡过程的办法，而使直流电流降到零。

另一个方法是研究制造专门的高压直流断路器。已經提出了这种断路器的若干方案。列宁格勒工学院、直流研究院和《电器》工厂对直流断路器都进行了研究。这种在研究中的断路器，除了是通常的交流断路器的一相之外，还装有振盪迴路。振盪迴路的电流加在要切断的直流电流上，并且使它通过零；迴路上装有电容以限制过电压水平。这种断路器的第一个試样已成功地通过了試驗(31)。

喀希拉-莫斯科試驗性直流輸电綫

伟大卫国战争之后，苏联高压直流輸电方面的科学研究工作的基本試驗基地是喀希拉-莫斯科試驗用直流輸电綫。該綫是由电站部直流研究院管理，于1950年12月投入試驗运行。其額定容量为3万瓩，电压为200千伏，电流为150安。輸电綫的两根電纜长112公里。按綫路的参数來說，喀希拉-莫斯科試驗用輸电綫超过了所有其他国外現有的直流輸电綫。

喀希拉-莫斯科試驗用直流輸电綫的原理結綫图見图3，这是它运行到1955年4月时的結綫图。两个換流变电站各有一个三相桥，每个桥臂上串联联结了3个換流閘，計算是按120千伏反电压和最大电流150安(平均电流50安)。在正常情况下，桥臂上三个串联联结換流閘的每一个是在反电压80千伏下工作；只有在一個閘反燃弧时，桥臂上其余的两个閘才在自己的額定反电压120千伏下工作。为了均匀地分佈电压于三个串联联结換流閘組成的电路上，并联合于每个閘联结了分压器。分压器是由电阻和电容器組成。这种分压器对換流閘熄灭时的声波頻率电压振盪也同时起阻尼作用。

因此，整流变电站有一个換流桥，它是由容量为3.6万千伏安的变压器組和18个換流閘組成。反流变电站也有类似的桥，但它是由22个換流閘組成的。在反流桥的一个桥臂的試驗迴路上，装了两个并联联结的換流閘迴路，即6个閘；而在另外一个桥臂迴路中，代替3个閘的是4个串联联结的、有低的电气强度的換流閘。

在喀希拉-莫斯科綫段上，还規定了有不使用電纜而使用架空綫进行直流輸电的可能；一个平行的三相110千伏綫路可定期地供給使用。

另外，也規定了輸电綫有只按一根导綫而利用地作为回路綫工作的可能(通过一个在喀希拉而另一个在舍班策沃轉換站的引外接地装置)。

喀希拉-莫斯科綫路是采用苏联国内和国外生产的電纜完成的。这些電纜的計算电压是200千伏，鋁心截面是150平方毫米。

試驗輸电綫在长时期間——从开始运转到1951年終——非常不稳定；連續不間断工作的時間不超过几小时，并且部分停电的原因，在初期調整时还弄不清楚。为了查明破坏正常工作的原因，进行了多次的人为事故試驗。

在試驗輸电綫上，在直流研究院和苏联科学院动力研究所試驗室內，研究了輸电綫上的事故和过渡过程、高压水銀換流閘的特性，并且拟就了一些提高輸电綫工作可靠性的措施(54a, 32, 14, 45, 46, 61a)。

已經查明，輸电綫不稳定的主要原因是水銀換流閘的工作被破坏，以及由于換流結綫中的高頻率振盪，在換流閘中引起了相当大的过电压和絕緣孤絡。

1952—1953年中，在阻尼高頻率振盪方面，利用在換流閘阳极迴路中联结高频电抗器和在綫路电抗器上装阻尼电阻，以及变更換流閘分压器中电阻的量和所进行的其他等等措施，都大大地促进了換流閘的工作，消除了輸电綫对无綫电和高頻通訊的不能容忍的干扰和簡化了輸电綫的接通等等

掌握和采用更完善的換流閘修理和养护技术，以及它的結構和輔助装置上缺点的查明和消除，都大大地改良了換流閘的性能和提高了輸电綫工作的稳定性。这些工作还由于柵极控制、調节和保护装置的改善，以及換流閘和輸电綫所有独一无二設備运行方法的掌握而得到了促进。

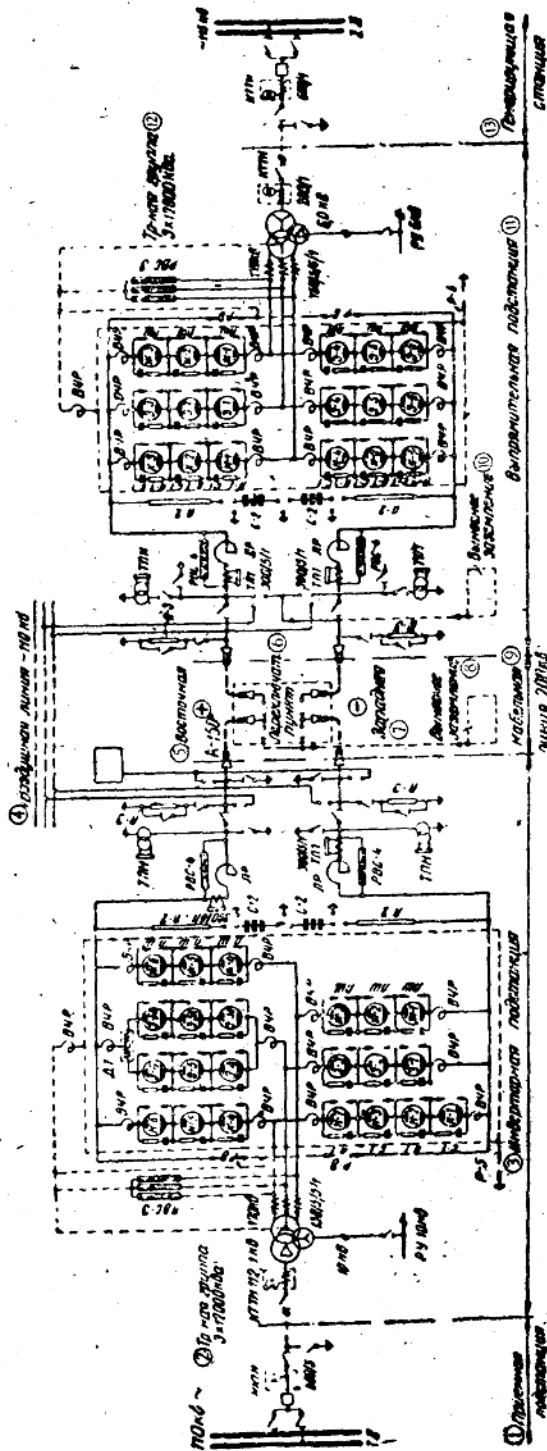


图3 喀希拉-莫斯科試驗用直流輸電綫原理結綫圖

- ЛР—綫路電抗器, 220千伏, 150安, 4亨;
- ВЧР—高頻電抗器, 85安, 6.5毫亨;
- ДТ—分流器; КТНН—110千伏電流和電壓互感器的組合裝置;
- ТПТ—220千伏直流電流互感器的;
- ТПН—220千伏直流電壓互感器的;
- РВС-3—閘型避雷器; РВС-4—閘型避雷器;
- Р-1—水銀換流閘尼迴路電阻, 1000歐;
- С-1—水銀換流閘尼迴路電容, 0.01微法, 70千伏;
- Р-2—極間阻尼迴路電阻, 10000歐;
- С-2—極間阻尼迴路電容, 3 (2.5微法, 70千伏);
- Р-3—220千伏電纜放電電阻, 160000歐;
- Р-8—同等的放電電阻;
- Р-5—電位與地間的同等放電電阻;
- ПШ—每個水銀換流閘陽極與陰極間的同等放電電阻。

- ①接受變電站; ②3×12000kva變電器組; ③反流變電站; ④~110kv架空綫路; ⑤東部的;
- ⑥轉換站; ⑦西部的;
- ⑧引外接地裝置; ⑨200kv電纜綫路; ⑩引外接地裝置; ⑪整流變電站; ⑫3×12000kva變壓器組; ⑬發送變電站。

在1954年和1955年的第一季度，試驗輸電綫是在額定参数下工作。在冬天的月份里在長時間的运行期間比較沒有大量的經驗可以總結。因为在变电站中只有一个換流橋，所以無論是在变电站中唯一的橋出毛病時或者在进行修理和改造工作以及准备試驗時，輸電綫都必須切斷。

圖4的曲線可以證明，試驗輸電綫在一橋三閘运行期間，工作是不斷改進的。

最大的長時間不間斷工作是在1954年的第一季度（485小時）和1955年的第一季度（1075小時）。後者的切斷還與直流的特性無關，而是由於交流方面的懸垂絕緣子被拉斷而引起的。

事故停歇總時間是，1954年第一季度41小時，第四季度12小時，而1955年第一季度僅1.5小時。

随着長時間运行期間對設備檢查的同時，进行了多次的人為事故試驗。最重要的是：接地電極或電纜的运行試驗，利用地作為返回回路的試驗，按架空綫方式的輸電試驗以及換流閘的熱試驗。此外，還进行了當換流閘在正向電氣击穿和錯過燃弧時發生的過程的研究，及各種阻尼高頻率振盪結綫和新型自動裝置結綫和設備的研究。也进行了在一個橋臂上并一串联結換流閘等等的研究。

所有的電力設備、变电站的絕緣和220千伏的新型電纜，在正常运行条件下和多次重大事故時，都表明是可靠的。

在長時期运行情況下，證明了輸電綫的工作能够保證所需要的穩定性。

进行中的試驗說明了，直流輸電綫可以利用地作為返回導綫，但条件是接地裝置附近地下面的金屬設備（管道、電纜等等）同接地裝置要有足够的距離。

由於需要进行許多有關斯大林格勒水电站-頓巴斯工業性直流輸電綫設計的研究工作，在1955年4月停止了試驗輸電綫長時期的运行，而开始准备研究各種新的換流結綫。

进行了輸電綫按一閘一橋結綫在各種電壓時工作的研究，這同時能够更好地研究单独換流閘的特性和對有毛病的換流閘进行淘汰性的研究。為了进行這些研究而在橋臂上只安裝了一個換流閘，這種形式的輸電綫當整流電壓為80千伏時工作得可靠；而當整流電壓為100千伏時工作得不穩定。

在單一橋式結綫時（當電壓為100千伏），還进行了帶有同步補償機的反流器工作時的研究（同步補償機結綫在換流變壓器的第三橋組上），和按架空綫工作時的過電壓及各種阻尼高頻率振盪的措施，以及同主變壓器串联結綫的飽和電抗器的效率研究等等。

在反流變電站上，在雙橋式結綫工作時，研究了橋間的電壓分佈、電壓和電流的阻尼振盪、當各別橋的工作破壞時旁路和旁路等問題，並且檢查了在這種條件下的柵極控制、調節和保護裝置的工作。另外，定期地試驗檢查了在各臂上串联結綫兩個閘時換流橋的工作（當橋的電壓為100千伏時）。此時，換流閘是處在減輕的條件下並且工作的更可靠。

研究的結果證明，當若干個換流橋串联結綫時，輸電綫的工作可靠性得到了提高，橋中各別換流閘的故障可以利用短時間的換流橋抽出（借旁路換流閘和自動裝置）而不切斷綫路，

為了繼續研究兩個橋（在橋臂上有不同數量的換流閘）串联結綫的工作情況以及各種新的裝置，在1956年5月試驗輸電綫改變為反流變電站裝有兩個換流橋（一個橋的臂上是一個閘，另一個橋的臂上是兩個閘）而工作。圖5是它改建後的原理結綫圖。在這個圖上沒有表示出為了研究試驗輸電綫可逆工作情況而按裝的裝置。這種可逆工作情況是斯大林格勒水电站-頓巴斯輸電綫所需要的。反流變電站在改建後繼續进行了在一個橋旁路時雙橋反流器結綫的研究，檢查了旁路隔離開關的工作和架空直流輸電綫對通訊綫的影響，等等。

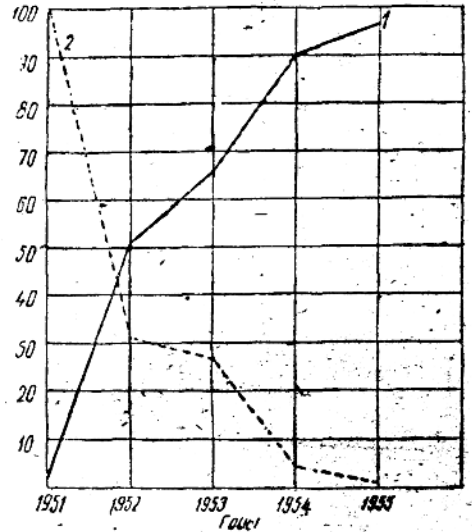


圖4 喀希拉-莫斯科試驗輸電綫工作曲綫圖。

1——該年中，額定電流工作小時數占總工作小時數的百分比；2——引起輸電綫切斷的換流閘工作破壞次數（占1951年次數的百分比）。

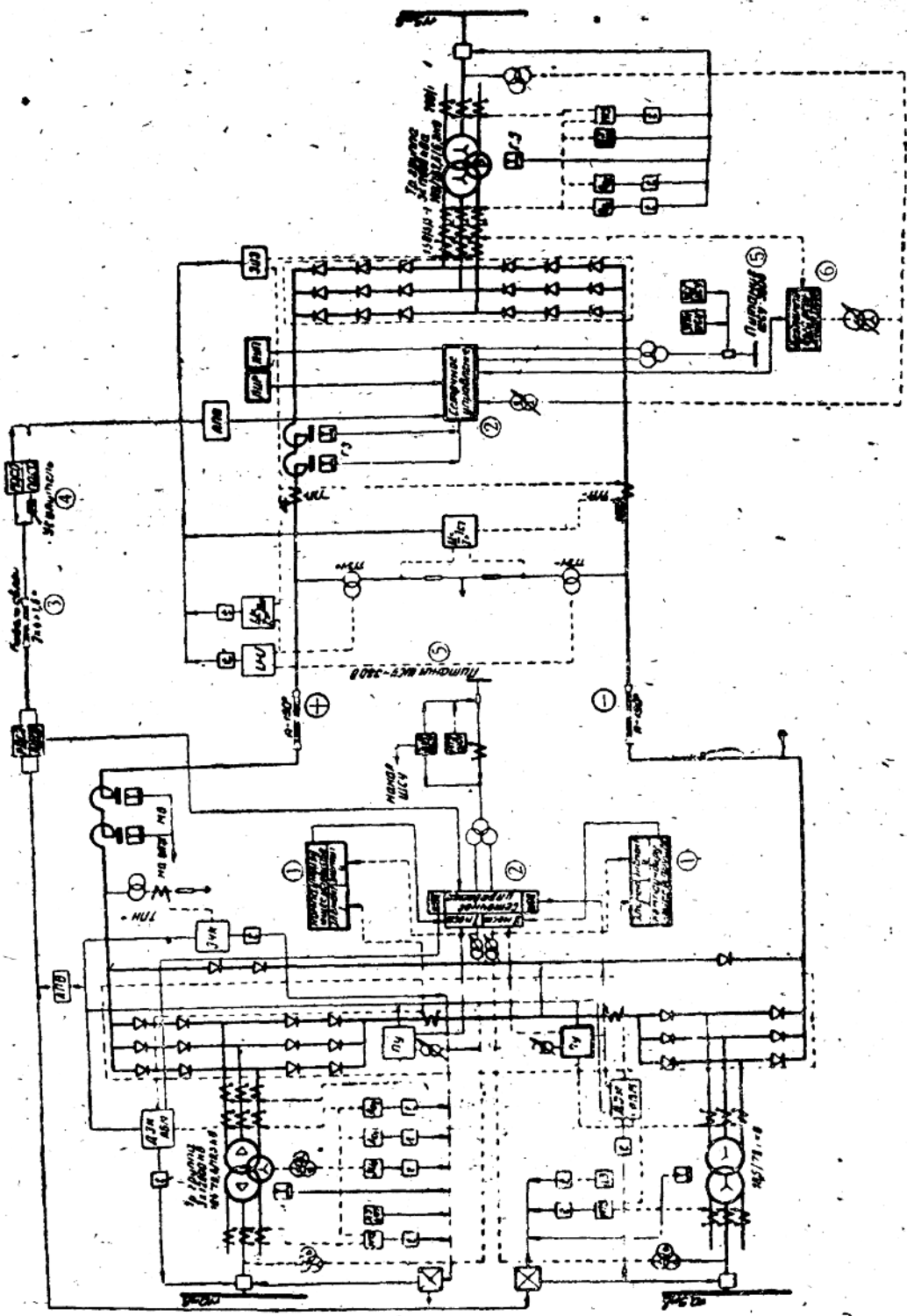


图5 喀希拉-莫斯科试验输电线的遥控控制、调节和保护的原理接线图