



远距离直流输电

[苏联] Ю. Г. 托尔斯托夫 著

科学普及出版社

本書提要

直流輸電是發電事業中一項重要的新技術。

電能的輸送是一項複雜的技術。過去，交流輸電被認為是最好的輸電方式；然而近30年來各國科學家在輸電方面所進行的研究工作證明，當輸電距離超過一定限度時，採用直流輸電更為有利。

目前世界各國，特別是蘇聯、美國、德國和瑞士都在大力發展直流輸電的研究工作。蘇聯已建成輸電容量為30,000瓩，輸電電壓為200千伏，輸電距離為112公里的直流輸電綫路，而且不久即將投入運行；據說德國已建成輸電容量為60,000瓩，輸電電壓為400千伏，輸電距離為112公里的直流輸電綫路。

本書介紹有關遠距離直流輸電的一些基本知識（直流輸電原理、方式以及它的主要設備和結綫等），是幫助廣大讀者了解這一世界科學技術新成就的通俗讀物，也可以作為高等工業學校和中等技術學校動力事業學生的課外讀物。

總號：462

遠距離直流輸電

ДАЛЬНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

原 著 者：Ю.Г. ТОЛСТОВ

原 編 者：ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО ПО
РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИ-
ЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

原出版者：ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
1954

譯 者：吳

校 訂 者：劉

出 版 者：科 學 普 及 出 版

（北京市西便門外郵政局）

北京市書刊出版業營業許可證出字第091號

發 行 者：新 華 書

印 刷 者：北 京 市 印 刷

（北京市西便門南大街21號）

開本：787×1092 1/32

印張：1

1957年5月第1版

字數：17,500

1957年5月第1次印刷

印數：3,700

統一書號：15051·34

定價：（9）1角4分

科学普及出版社出版

电学講話	Б. 略比庚著	0.34元
远距离輸电	А. В. 維尼克夫著	0.12元
电帶給人們的好处	安克成等著	0.11元
电子学时代	А. И. 別尔格著	0.18元
物質的一般性質	陈文熙著	0.12元
物体运动及其規律	張寿恭著	0.08元
功与能	賴中生著	0.09元
热和物态的变化	赵亮堅著	0.11元
电磁感应	葛佩琦著	0.07元
热机和它的原理	王补宣著	0.13元
靜电的一般現象	賴中生著	0.12元
从古典物理学到量子力学	朱洪元著	0.13元
土工物理学(用于水利工程的物理学)	Г. И. 波克洛夫斯基著	0.16元
超声波及其应用	Л. Д. 罗教別尔格著	0.16元
冷光(發光現象)	В. Л. 略夫辛著	0.12元
冷的光源	徐克明著	0.15元

新华書店發行

远距离輸电問題

远距离輸电的可能性有着極重大的国民經济意义。

苏联的水力資源非常丰富，广泛地掌握和利用这些水力資源，就能給国民經济各部門的进一步迅速增長和国家新工業区的發展打下巩固的基础。

根据大致的計算，在苏联無数的河流上能建立很多水电站，这些水电站每年能發出 17,000 亿度电能。这个数字比今天^①苏联所有發電站的总發電量大 10 倍。

很大一部分水力动力資源是集中于国家的东部，那里离工業中心是很远的。

苏联共产党和苏联政府一方面在現有水电站的基础上进一步提高工業的电气装备和創立新的工業区，另一方面也制訂了使农業和运输業电气化的宏偉綱領，这就要求輸送大量的电能到农業区和铁路干綫去。

不能仅仅利用当地动力資源来满足国民經济各个部門对电能的不斷增長的需要，因此在最近几年中，需要实现大容量的、長度以数千公里計的远距离輸电。

目前，輸电是采用三相交流电。現有輸电綫路的長度还未超过 300—400 公里。

到今天为止，这种輸电方式还完全能满足用电戶的需要。

① 原書是 1954 年所出版，这里所謂“今天”是指 1954 年而言，目前情况已有許多改变，請讀者注意。——譯者

因为直到最近以前，国民經济各个部門电气化的發展和居民日常生活对电能的需要，都是利用当地的动力資源或离开用电中心不超过 300—400 公里的动力資源来滿足的。把电能輸送到 300—400 公里的距离，采用电压为 220 千伏的三相交流电是完全合理的。

然而，由于工業的蓬勃發展，現在已經無法再进一步扩大利用靠近用电中心的动力資源。要进一步加强对于用户的供电和扩大現有工業中心的生产能力，就只有利用离开用电中心較远的动力資源。

所以在最近几年間，我們計劃利用离用户 1,000 公里以下的动力資源来供电，以后还要把輸电距离延長到 3,000—5,000 公里。目前已在建設世界最大的古比雪夫和斯大林格勒水电站，它們每年將把几十亿度的电能通过 400 千伏的超高压三相交流电輸送到約达 1,000 公里的远方去。

輸电距离越長，用三相交流輸送电能就越困难。这些困难首先是和交流發电站并列运行的稳定性問題有关系的。

在現代的动力系統中，各發电站一般都不是孤立运行的；大大小小的發电站通常都用輸电綫路联接在一起。这样，用户就不是由个别發电站、而是由很多發电站所組成的动力系統来供电。应用这种供电方式，当动力系統中的某一个發电站發生事故时，其他發电站就仍旧可以把电能不間断地供給用户。

动力系統的总容量一般是比个别發电站(即使是其中最大的發电站)的容量要大好几倍。

例如，古比雪夫水电站是把电能輸送到大容量的莫斯科动力系統中。尽管古比雪夫水电站的容量很大，但它才只有莫斯科

动力系统总容量的几分之一。

在这种供电方式中，联入系统中的各发电站都是并列运行，它们就好像是把所生产的电能“匯成总的能流”，然后再分配到各个用户的地方去。

发电站的并列运行需要满足一定的条件。甚至只要違反了其中的一个条件，并列运行就要遭到破坏。

并列运行最重要的条件之一，就是各发电站电流频率必须保持一致。只要某一个发电站的电流频率和系统中的电流频率有微小的偏差，并列运行就要遭到破坏，发电站就会从动力系统自行断开。

如果几个发电站以完全一致的频率运行，那末我们就說它們是同步运行的。

发电站交流电流的频率是由产生电能的发电机的轉数来决定的。因此在同步运行时，发电机的轉数就必须和系统的频率严格地保持一致。

如果没有发电机并列运行时所产生的一些特殊现象的帮助，那末现代的大型机组就完全不可能利用帶动发电机的汽轮机上的調速器来使轉数保持恒定。

原来并列运行的发电机是互相作用的。如果系统中有一个发电机有提高轉数的趋势，那末系统就会产生制动的反作用，来阻止該发电机提高轉速。

因此，并列运行的发电机具有使自己保持同步的趋向。使发电机保持同步运行的力叫做同步力，而使发电机保持同步的能力就叫做并列运行的稳定性。

把进入透平的帶动发电机的蒸汽量或水量增加，发电机的

負載就提高。但是我們不能無限制地給發電機增加負載，因為發電機有一定的臨界負載，超過它時發電機就不可能保持同步，結果并列運行就會遭到破壞。這種現象叫做發電機（或發電站）的脫步。

當發電機或整個發電站脫步時，必須立刻把它從電網中切斷。

這一臨界負載（超過時就會引起脫步的負載）叫做極限輸出功率，而極限輸出功率和額定輸出功率的比叫做靜穩定安全係數。極限輸出功率的大小和輸電綫路長度有關，它可近似地由下列公式求出：

$$P_{\text{極限}} = \frac{U^2}{X}$$

式中 $P_{\text{極限}}$ 是極限輸出功率， U 是輸電綫路的電壓， X 是綫路的感抗^①。輸電綫路越長， X 就越大，極限輸出功率和穩定安全係數就越小。當輸電綫路長度達到1,000公里左右時，穩定安全係數就很小了。要提高穩定安全係數，就得大大提高輸電綫路的電壓和採取其他措施來減小 X 。這些措施就是：

在輸電綫路中串聯電容器組（縱向補償）；

每相電流不是用單根導綫而是用幾根（2—3根）導綫來輸送，就是採用所謂相分裂導綫；

增加發電站和動力系統間輸電綫路的數目。

所有這些措施雖然可以提高穩定性，卻顯著地提高了輸電綫路的造價。

① 精確的公式較為複雜，因為在 X 值內不僅包括綫路的感抗，而且也包括輸電其他設備的感抗。——著者

隨着工作電壓的提高，絕緣的費用就大大地增加；架空綫的杆塔要造得很高，這也使它的造價大大地增高了。裝設許多電容器組、大容量斷路器，採用數目很多的導綫，使導綫和它固定裝置的構造複雜化等等，也都會使輸電費用增大。因此當輸電距離增加時，每公里輸電綫路的造價將增大得很快，而整個輸電綫路的造價將增大得更多。

只有當輸送到某地區的電能的費用比該地區發電站所生產的電能的費用（包括燃料的運輸費用）便宜時，電能的輸送才可以認為是經濟的。當發電站和用戶間的距離超過1,000公里時，用鐵路運輸燃料給地方發電站來發電，有時還會比從遙遠的發電站沿導綫輸送電能更經濟些。

因此，當輸電距離很長時，就要求輸電系統擺脫掉三相制交流輸電系統在輸電距離方面所受到的那些限制。

採用高壓直流輸電就可以解決這個問題。

指出下列事實是很有趣的：正是三相制交流電的發明者，偉大的俄國電工巨匠 M. O. 多里沃·多布羅沃里斯基（1862—1919）最先指出，將來在遠距離輸電中採用的將不是交流而是直流。他曾預見到當要求把電能輸送到幾千公里的遠方時採用交流電的困難，並且也見到，解決遠距離輸電問題的方法就在於採用超高壓的直流電。

直 流 輸 電

高壓直流輸電系統是按圖1所示的原理來建立的。

發電機 T' 發出三相交流電，電壓一般為10—15千伏。變壓器 T_1 把發電機（或發電站）所發出的三相交流電變為高壓（約

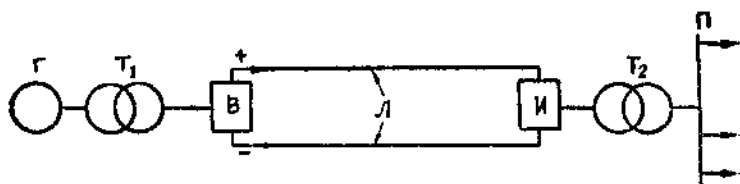


圖 1 高压直流输电系统的原理图：

P —发电机； T_1 —升压变压器； B —整流器； A —输电线路；

H —逆变器； T_2 —降压变压器； n —受电系统。

200千伏)的三相交流电。高压三相交流电经过整流器 B 就变成电压差不多和交流电相等的高压直流电。

高压直流电沿着输电线路 A 被输送到用电中心，然后就在线路的受电端用逆变器把直流电重新变为高压三相交流电。

高压三相交流电经变压器 T_2 变为电压较低的三相交流电，然后输送到受电系统 n ，再分配给各用户。

由上圖可以看出，直流电只是用来傳送电能。发电机所发出的是三相交流电，而分配到各用户的地方去的也是三相交流电。

这种输电方式保留了交流电所有的一切优点：如交流电容易由一种电压转变为另一种电压，在工业上生产和应用交流电比较方便等；同时，由于输电是利用直流电，因此交流输电的大部分缺点也被克服了。

当输电距离很大时，直流输电的优点就更突出，这些优点是由下面一些很重要的情况所决定的。

当采用直流输电时，不发生电站并列运行稳定性的问题，而在远距离交流输电中，这个稳定性的问题却有着决定性的意

义。

对于直流输电来说，输电线的传输容量不是由稳定性而是由线路损失来决定的。因此在远距离输电时，直流输电线路的过载能力就比交流输电线路大好几倍。

直流输电线路的建造费比交流输电线路低，因为当传输功率相等而线路损失也一样时，直流输电用的导线数目少，而且导线的断面积也小，因而杆塔的结构就可以较简单，并且也用不着装设纵向补偿用的电容器组。除此以外，当采用同样的线路绝缘时，直流电几乎可以采用比交流电高一倍的线间电压。

不用架空线而用电缆输电时，直流电的巨大优点就特别显著。用电缆进行远距离交流输电是不可能的。因为在这种情况下，电缆对地面形成了很大的电容，而大家都知道，交流电是可以“流过”电容的。当输电线路很长时，交变电容电流可以达到极大的数值，甚至比负载电流还大。这种电容电流会增加电缆的负载并引起线路中很大的额外损失。此外，用电缆输电时，稳定性条件比用架空线输电时还要复杂得多。高压交流电缆的结构非常复杂，价格也很贵。根据这些原因，用电缆来进行远距离交流输电是不可能的。而在直流输电中，就不发生稳定性的问题，也不会产生电容电流。此外，在同样的工作电压下，直流电缆的价格也只有交流电缆的几分之一。这是因为同样厚度的电缆绝缘，直流击穿电压约比交流击穿电压大5倍。例如，普通35千伏交流电用的具有纸绝缘和经浸透处理的电缆，可用来输送200千伏的直流电。

尤其是在城市中或者当输电线路必需跨过大江、海峡或湖泊时，应用电缆比应用架空线有更大的优点。而在采用了新式的

土方工程機械化工具以後，敷設電纜就比敷設架空綫更簡單和更經濟。

應當指出，直流輸電綫的可靠性比交流輸電綫大得多，因為當直流輸電綫路中某一根導綫發生故障時，可以用大地來代替它。在交流輸電綫路中利用大地來代替導綫的可能性是非常有限的。

大家都知道，在并聯的電路中，電阻最小的那一條綫路所通過的電流最大。在直流電路中只有一種電阻，那就是有效電阻（或歐姆電阻）。在交流電路中，除了有效電阻外，還有感抗和容抗。因此，在同一个電路中，對交流電和直流電來說，電阻最小的綫路可能是不相同的，電阻本身的大小也可能是不相同的。

當電流在架空綫中和地下流過時，情況正好和上面所說的一樣。直流電從接地點進入地里后就擴散開來，佔據了很大的斷面積，然後在第二個接地點集中起來。

直流電流的總方向符合於兩個接地裝置間的最短距離。當交流電流由大地返回時，在電路中起決定作用的已不是有效電阻而是感抗了。這時，感抗最小的綫路就是直接位於架空輸電綫下面的地段，因為輸出導綫和返回導綫間的距離越短，則感抗越小。這樣，交流電路的阻抗將比直流電路的有效電阻大上好幾倍。因此利用大地來作交流電的返回導綫就比利用大地作直流電的返回導綫不利得多。此外，電流在輸電綫下面的高度集中，在某些情況下也會在大地中造成相當大的電壓，它對於人和動物的生命是有危險的。當交流電流過地中時，會大大增加對附近電話綫和電報綫的干擾，並且也可能在導綫中引起相

当高的电压，这对电信线路维护人员是有危险的。

由此可见，利用大地作交流电的返回导线，应当认为是不允许的。

以后我们也将讲到，在直流输电时用不着设置昂贵的断路器。在正常工作或发生事故时，可以用闭锁整流器的方法把线路很快地断开。

由于直流输电不需要创造特殊的条件来保持并列运行的稳定性，所以，发电机本身就可以做得简单些和便宜些。

直流输电时，发电站和发电系统无须同步，因此各发电机的转速可以各不相同，这样就可以使水电站在洪水期间增加发电量。

最后应当指出，当交流输电线路的负载去掉时，线路自由端的电压会显著地升高。很长的输电线路中的负载如果有任何变动，整个线路中电压的分布情况就会改变，这样在某些地方就会引起绝缘的利用不足，而在另外一些地方就会发生绝缘的过电压。

在直流线路中，这些现象都不会发生。负载改变时，电压的变动不会超过线路中的电压降，而线路中的电压降只有额定电压的百分之几。

必须指出，直流输电线路两端的变电所(受电端的变电所和发电端的变电所)比交流电变电所的造价要高些，因为前者需要增加一些设备(整流器和逆变器)；因此在输电距离方面有一定的经济界限，在这个界限以内时，用交流输电较为合理，超过了这个界限时，采用直流输电就更为有利。

根据上面所讲过的可以看出，采用直流输电的主要好处在

于可以节省输电线路的建设费。因此，当输电距离不远时，输电线路的价格只占所有其他电气设备的价格的很小一部分，这时采用直流就不经济，因为这要求增添一些变流设备，于是直流输电的整个费用就会比交流输电贵。

但是，正像前面所说，随着输电距离和输送功率的增加，交流输电线路的造价也很快地增加，所以当输电线路达到一定的长度时，线路的造价就开始超过所有其他电气设备的价格。

根据H.C. 丹诺夫教授的计算，交流输电线路的经济界限是400—500公里。输电距离超过这个数字时，采用直流输电就比较经济。

还必须指出，交流输电已经有六十多年的丰富的运行经验，而直流输电却还只刚开始发展。目前，直流输电方面的工作正在逐渐超出科学研究和半工业试验的范围。

电流变换的一般原理

整流 上面我们已经说过，直流输电中的特殊设备就是整

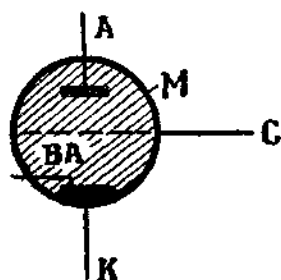


圖 2 低压力汞弧变流

器的示意图；

A—阳极；K—阴极；C—栅极；
BA—激弧阳极；M—亮体。

流器和逆变流器：前者把交流电流变为直流电流；而后者用来作相反的变换。

在上面讲的两种电流变换中所采用的主要是变流器，它只让电流朝一个方向流。

变流器有好几种类型：电子的、半导体的、低压力离子的和高压力离子（弧光式）的。现今还没有

把电子的和半导体的变流器应用在直流输电方面，因为它们的容量较小，效率较低。

圖 2 所示的变流器是用于直流输电的大型离子(汞弧)变流器。变流器有三个主要的电极：陽極 A 、陰極 K 和柵極 C 。

所有这三个电极都裝在壳体 M 内(壳体内的空气已抽净)，里面充有饱和的水銀蒸汽。当温度为 25° — 30° 时，水銀蒸汽的压力大約是 10^{-3} 毫米水銀柱高。

陽極和柵極通常是由石墨或特种牌号的鋼制成，而陰極則是应用液体水銀。

变流器的作用是由电极的特殊物理性質来保证进行。液体水銀(陰極)在电场的作用下容易發射电子。相反的，陽極却是用不容易發射电子的材料做成的。

当电流通过变流器时，在其中产生了發藍光的电弧。这时我們就說变流器“点燃”了。

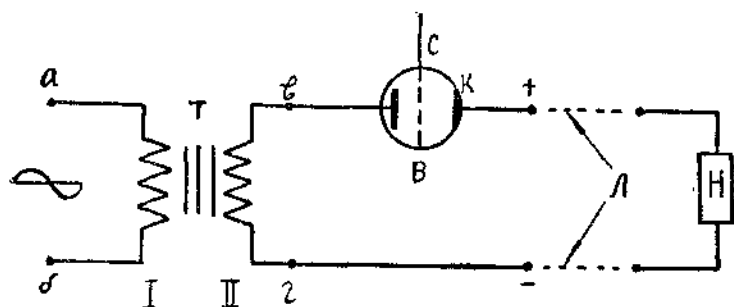


圖 3 半波整流器的結綫圖：

T —变压器； B —变流器； J —直流鏈路； H —負載。

圖 3 所示的是采用汞弧变流器的最簡單的整流器。

整流器的工作原理是这样的：在变压器 T 的兩端 a 和 b 接

上交流电压，这时在二次线圈的两端 a 和 b 也产生了按正弦波形变化的交流电压。

圖 4 表示这个电压随时间而变化的情况(見圖 4 U_T 的曲綫)。

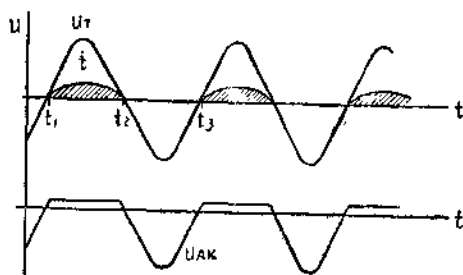


圖 4 沒有柵極控制的整流器的电压和电流曲綫：

U_T —变压器电压； i —二次綫圈电路中的电流；

U_{AK} —变流器陽極和陰極間的电压(反电压)。

在变流器沒有点燃前，二次綫圈电路中不能流过电流。这时，陽極电位和变压器二次綫圈中 a 点的电位相等，而陰極电位則和 b 点的电位相等(見圖 3)。

在 t_1 瞬間(見圖 4)，变流器陽極和陰極的电位相等；过了一个瞬間，陽極的电位和陰極电位相比就变成正值的了。当陽極的电位是正值时，陰極很容易發射出的电子，在电場的作用下就在变流器內由陰極向陽極移动。

电子在运动的路途中和水銀原子發生碰撞，便使这些原子电离，也就是說把这些原子外層的电子打出一个或几个。这样，原子就变为帶正电的离子。水銀的正离子向陰極移动，而被打出的自由电子則向陽極移动，在移动的路途中它們又使新的原子电离。因此，在陽極和陰極間有朝着一定方向运动的一

些正电荷和负电荷；换句话说，就是有电流在流动。这时，变流器就成为导电的了。正离子接近阴极时，就中和了电子云的空间负电荷，结果便使阴极容易发射出电子。

由于空间负电荷受到了中和，汞弧变流器里的电压降就很小，所以电能损失也很小。正因为离子变流器有这样一个优点，所以它们也应用在动力工程方面。阴极和阳极间充满电子和离子混合物的区域叫做等离子区。当电流流过时，等离子区不断由阴极所发出的新电子来补充，阴极上发射电子的地方叫做阴极斑点。

在 t_2 瞬间，阳极和阴极的电位又变为相等，这时电流也就中断（图4中打上斜线部分表示电流曲线）。在 t_2 瞬间后，阳极的电位相对于阴极来说就变成负值。因为阳极是由不发射电子的物质所做成的，所以就不能继续维持等离子区的存在，等离子区中的正电荷和负电荷互相中和了，电流也就不能向相反的方向（从阴极到阳极）流动。

从 t_2 瞬间开始，上面所讲的过程又重复进行。

电流能通过变流器的期间叫做导电期，变流器内不能通过电流的期间叫做闭锁期。

图4的下半部表示变流器阳极和阴极间的电压。在变流器点燃期间（从 t_1 到 t_2 ），阳极和阴极间的电压很小（约30伏），只等于电弧间的电压降。在闭锁期间（从 t_2 到 t_3 ），阳极的电位是负值，而阳极和阴极间的电压等于变压器的总电压，我们把它叫做反电压。

如果这时阳极上产生了阴极斑点，变流器就会违反自己的本性而点燃起来，并使电流向相反的方向流。这种会引起整流

器事故的現象叫做反弧。

直流輸電用的整流器应当具有特別高的可靠性。因此，這些整流器的反弧現象是完全不允許的，因為它會引起供電的中斷。

這樣，在正常工作的情況下，通過負載 H （見圖3）的是向一個方向流的脈動電流。只有在 θ 點對 ψ 點是正電位的那一半周期內，變流器中才有電流通過；而在下一半周期內，變流器中是沒有電流通過的。這也就是說，只有半个周期是用來使電流通過的。這種整流器叫做半波整流器。

應當指出，為了使陰極開始發射電子，就必須先在陰極上形成陰極斑點，而陰極斑點是不能自行產生的。因此在變流器中裝了一個附加電極 BA （見圖2），也就是所謂激弧陽極。在這個電極和陰極間經常有小容量的電弧存在；因為激弧陽極是由直流電源供電的，所以這個電弧總不熄滅。這樣，在水銀的表面就經常有陰極斑點存在。

為了第一次起動變流器，須使用一種只為起動用的專門設備。

現在來談談變流器中的第三個電極——柵極。柵極是位於陰極和陽極之間的電極。整流器也可以不用柵極，但對逆變流器來說，為了進行控制是必須裝設柵極的（這一點以後我們將會談到）。

控制的过程是这样的：如果在柵極上加上對陰極電位來說是有負的電位，那麼即使陽極的電位是正值，而陰極上又有陰極斑點，變流器也不會點燃，因為陰極和柵極間的電場的作用會阻止電子從陰極跑出。就是電子從陰極中跑出來了，當它還沒