



怎样把电力输送到远方去

楊 津 基

科学普及出版社

怎样把电力输送到远方去

楊 津 基

科学普及出版社

1957年·北京

522.42

556

本書提要

我国第二个五年计划，要求1962年的发电能量达140—150万千瓦，来适应国家建设的需要，并逐步实现工农业的自动化和机械化。我国工业的公布地区是适合于国家资源和国防条件的，而工业所需的价廉又便利的大量电力可能远在另一地区，因此必须采用高压电压远距离输电。例如，三门峡水电站将来建成后，发电能量为100万千瓦，可以供应周围广大地区所需的电力。为了实现远距离输电，一方面要用很高的电压，另一方面要保证安全，所以输电系统中的变电站和输电线显得更加重要而复杂了。这本通俗读物主要介绍了高压输电知识。

总号：576

怎样把电力输送到远方去

著者：楊 津 基
責任編輯：黃 友 恭
出版者：科 学 普 及 出 版 社

(北京市西直門外郵家溝)

北京市書刊出版業營業許可證出字第091号

發行者：新 華 書 店
印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

(北京市西便門大街乙1号)

开本：787 × 1092 毫米
1957年12月第1版
1957年12月第1次印刷
印張：16
字数：13,500
印数：3,150

統一書号：15051·81

定 价：(9) 1角5分

目 次

高压输电的发展过程	3
提高输电功率的方法	5
高压输电是怎样进行的	8
我国电力输电的展望	25

早在1882年，当人們第一次成功地把电力輸送57公里，也就是从米斯巴赫矿把电力輸送到慕尼黑世界博覽会的时候，馬克思和恩格斯就指出了电力輸送的重大意义。馬克思指出：远距离輸电的成功，使得巨大水力資源的利用才有可能。恩格斯指出：这个發明（指远距离輸电）使得工業和农業差不多从任何地域条件的限制中解放出来……它将成为消灭城乡对立的槓杆。

我們知道，机器的运行必須依靠力量来推动，这叫做动力。在利用电力作动力之前，蒸汽机是主要的动力。但是产生蒸汽的鍋爐和蒸汽机不能相隔很远，因为蒸汽管不能很長；在缺煤地区还要从外地运煤来，困难就更多。所以蒸汽供应的范围受到很大的限制。在利用水力作动力的时候也如此，虽然人們很早就直接利用水流来推动机械工作（我国古代就曾用水流推动石磨），但是水源和石磨也不能离开太远。自从远距离輸电成功后，动力的發生地和应用动力的工作地之間的距离不再受到限制，不必考虑用电区是否有煤或水源可以利用，因为輸电綫可以把动力送到需要的地点。第二，在有巨大水力資源的地方，可以建立水力發电厂，然后通过輸电綫把电力送到远方去，供給工業和农業生产的需要，这样才能充分利用这些水力資源。象黄河和長江就有巨大的水力資源，可以建立巨大水力發电厂，供給广大地区的电力，供应范围不再局限在一个城市內，而扩大到几个省。如果没有輸电綫这是不可能實現的。例如，第一个五年計劃就要开始修建的三門峽和刘家峽两个巨大水力發电厂，連同其它將建的黄河上的發电厂，將要供給甘肃、陝西、山西等很多省的电力，这主要是依靠輸电綫路来实

現的。第三，通过輸电綫，可以把水力發电厂和火力發电厂联合起来，使动力資源得到合理的利用。在苏联亞洲部分，西伯利亞的巨大水力資源所产生的电力，供应当地还有余，而这些多余的电力可以輸送到相隔約兩千公里的苏联欧洲部分应用。这样，不但节约了建立火电厂所需要的煤，还可以把这些煤用到別的工業方面，也就是更合理地利用国家資源。第四，近代电力輸送的发展，常把几个發电厂用高压輸电綫連接成一个高压电力網，这可以使电力的供应更可靠、調剂更方便、而且更經濟。例如，把北京、天津、唐山、下花园、官厅等地的發电厂用高压輸电綫連接成網后，如果天津發电厂的發电机發生障碍，天津的电力供应不会中断，因为北京和唐山發电厂的發电机仍在照常运行，可以把电力轉送到天津来。这說明，电力網中任何一个發电厂的發电机發生障碍，都不致影响电力供应、在沒有連接成电力網的各發电厂，差不多每个發电厂都多裝一部發电机备用。当某一發电机需要修理或是發生障碍的时候，就把备用發电机投入运行。但是連接成網的各發电厂，只要其中一个發电厂裝有备用發电机就够了，这样能节约很多資金。

把各發电厂和用电区連接成电力網，还有另一个优点。电力的需要是随时变更的，在需要电力很多的时候，电厂要多开几部發电机；在相反情况下，又要停一些發电机。但是起动力發电厂的發电机，需要較長的时间；而起动水力發电厂的發电机，只要几分鐘就可以了。所以把水电厂和火电厂配合使用是有利的，讓火电厂供給一定的負荷，把水电厂用来适应負荷的变更。还有，可以把水儲藏在水庫里，等到負荷大的时候应用。

輸电工程对于电力的供应有重大的意义，因为它把發电厂

产生的电力輸送到用电区，并保証不間断地輸送电力。所以有人把發电厂比作心臟，輸电綫比作血管。一些主要的輸电干綫是大血管，連接到个别工厂的电綫是支血管，而連接到工厂里个别机器的电綫是毛細血管。如果輸电綫發生障碍，那么某地区工厂的生产就会停止而引起很大的損失。一个汽車工厂每4分鐘出產一輛汽車，如果停电1分鐘，就要少生产1/4輛汽車。但是一个地区有很多工厂，如果停电的話，損失就更大了。

为了保証不断地輸送电力和滿足其它技术上的要求，可以采用不同的方式。一种方式是用兩条輸电綫供給某地区的电力，如果其中一条輸电綫發生障碍，还有另一条輸电綫供应电力。另一种方式是把几个地区的供电，連接成一个高压电力網，来保証不断地供应电力。究竟采用哪一种方式呢？这要根据技术条件和經濟核算的比較，选取最經濟、最安全、运行最方便的方式。例如，一年来我国根据这种要求，設計了本国的标准鋼筋混凝土輸电綫杆塔，为国家節約了很多木材和鋼材。

高压輸电的發展过程

从电力事業的过去和今后發展来看，要把巨大的电力輸送到远方去，必須采用高电压。高压輸电，最初是由直流电开始的。1882年建立的第一条直流輸电綫的电压是1,500—2,200伏，長約57公里，輸送功率約2馬力。1906年，塞雷利用串联直流电机的方法，把电压提高到57千伏，輸送距离增加到180公里，輸送功率是6,300馬力。1927年，这条輸电綫的电压更提高到125千伏，輸送功率达19,000瓩。后来由于工業發達而需要建立大型發电机，如果把直流發电机做成很大功率的話，还有很多困难不能解决，但是交流發电机却能做到，所以直流

輸電就被交流輸電代替了。這條串聯電機的直流輸電綫，已在1937年拆除。

交流電，在1876年俄國亞勃羅契可夫提出用變壓器作為提高或降低電壓的器械之後，採用了把發電機的電壓通過變壓器來升高電壓的方法，現代的高壓輸電也就是根據這個原理實現的。以後，俄國工程師多利沃——多勃羅爾斯基發明了三相交流制，實現了三相交流輸電。什麼叫做三相交流電呢？原來交流電不同於直流電，交流電在導綫中不象直流電永遠朝一個方向運動，而是每分鐘改變一百次運動方向，至於電流的數值，更是時刻變動着，從小到大，再從大到小；然後掉一個方向，再由小到大，由大到小；然後再掉向，就這樣循環變化着。因此交流電的變化可以比擬為波形的曲綫，完成一個變化循環所需的時間叫做周期。普通交流電的周期為0.02秒，也就是每分鐘的頻率為50。所謂三相交流制就是用三根導綫，其中通過三個不同時變化的交流電：第二根導綫中的電流，滯後於第一根導綫中的電流三分之一周期；第三根導綫中的電流，滯後於第二根導綫中的電流三分之一周期。1891年建成的第一條三相交流輸電綫，長175公里，電壓1,500伏，輸送功率約130瓩。1909年，輸電電壓增加到11萬伏。1923年，輸電電壓達到23萬伏。由於交流電的電壓可以用變壓器來提高或降低，三相電機又比較便宜，維護也方便，所以交流電的應用就慢慢代替了直流電。1955年，蘇聯建立了40萬伏電壓，900公里長的輸電綫，輸送功率可達115萬瓩。這說明，由於電力需要的增加和輸送距離的增長，輸電綫路的電壓也隨着升高了。

近代電力事業的發展，需要把巨大的電力送到遠方去，用交流輸電遇到了一些困難，其中最主要的是穩定問題。因為近代的電力系統是把很多發電廠聯在一起的，在輸電綫的兩端都

有發电厂。而兩端的發电机要很好地配合工作是有一定条件的，輸送功率愈大，輸电綫距离愈長，这样协作也愈困难。好象兩匹馬拖一輛車子，一匹馬跑得很快，一匹馬跑得很慢，就很难协作。只有兩匹馬的步調一致，才能把車子拉得很快。兩匹馬之間的韁繩愈短，它們就容易齐步。如果繩子太長，可能一匹馬往东，一匹馬往西，協調就更困难了。这只是形象的比喻，帮助我們了解这个問題。但是，如果用直流的話，就沒有这种失調的問題。因为在直流輸电中，發电厂不是直接联在一起的，中間經過閘的裝置（也就是整流裝置）把交流变成直流，然后通过高压輸电綫送到用电区，再通过閘裝置把直流轉換成交流而供給用戶。目前，直流輸电还没有广泛应用，有些問題还在研究中，象如何增加閘的容量和提高它的电压等等。苏联和瑞典都已建立了200千伏的直流高电压試驗綫路进行研究，我国也在开始研究这方面的問題。

提高輸送功率的方法

电力都要通过电綫才能送到用戶那里。当电流經過电綫的时候，电綫对于电流是有阻力的，这叫电阻。在电綫首端的电压愈高，电綫的电阻愈小（电綫愈粗愈短），通过的电流愈大，电綫末端的电压也愈高。这类似水泵經過水管送水一样，水泵压力愈大，或是水管愈粗愈短，送水愈多，水管末端的水压力也愈大。但是水管末端的水压力总沒有水泵压力那么大，电綫末端的电压也同样地沒有首端那么高，在电綫上引起的电压降落是和电流及电阻成比例。电流愈大或电阻愈大，降落也就愈大；如果电流和电阻都加大，降落就和它們的乘积成比例，也就是电压降落等于电流和电阻的乘积。

我們知道，电流通过电綫的时候，电綫周圍有磁力綫产生

(可以用指南針看出来)。此外，磁力綫强弱在綫圈里变动的時候，在綫圈上会产生电压。当直流电通过电綫的時候，所产生的磁力綫是不变的，所以电綫对直流电只有电阻的效应。如果通过电綫的是交流电，它就产生变动的磁力綫，这磁力綫在电綫上会引起反电压，来抵抗电流的通过。这种作用叫电感效应。所以对于交流电来講，輸送电力时要考虑电阻之外，还要考虑电感的作用。

我們設想有一个發电机通过一条綫路，象馬路上的电綫，把电供給工厂或家庭(圖 1)。当我們把电动机或电灯开起来的時候，由于負荷加大，輸电綫里的电流就逐步增加，輸送的电力也多了。但是，如果不断地增开电动机或电灯的話，电灯光就会暗起来，电动机甚至轉不动。这是因为綫路的电流太大，引起綫路上的电压过度地降低，以致电灯或电动机上的电压不够。当負荷不断增加的时候，虽然电流大了，但是受电端的电压却低了，这时受电端所获得的功率会反而降低，輸电綫的輸送功率又小了。

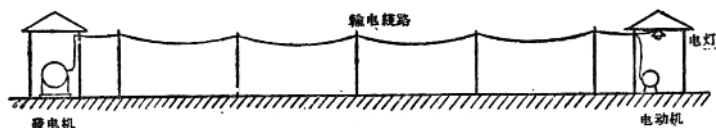


圖 1 發电机产生的电，通过輸电綫路供給工厂或家庭。

这里举一个簡單例子，可以了解得更清楚些。設想發电厂通过一条直流輸电綫供应用户。輸电綫長80公里；輸电綫电阻每公里0.21欧，全綫电阻是 $r = 80 \times 0.21 = 16.8$ 欧；發电厂端的电压是 110,000 伏。按照下面所列的步驟，可以算出受电端的功率，也就是輸电綫的輸送功率。用 R 表示用电端的負荷电阻， I 表示通过的电流， U 表示負荷上的电压。

1	假設負荷改變 R	$=$	25 歐	17 歐	10 歐
2	線路和負荷的總電阻 $R+16.8$	$=$	41.8 歐	33.8 歐	26.8 歐
3	通過的電流 $I = \frac{110,000}{R+16.8}$	$=$	2,630 安	3,260 安	4,100 安
4	輸電綫上的電壓降落 $I \times 16.8$	$=$	44,200 伏	54,800 伏	69,000 伏
5	在負荷上的電壓 $U = 110,000 - (I \times 16.8)$	$=$	65,800 伏	55,200 伏	42,000 伏
6	輸電綫的輸送功率 $U \times I$	$=$	173 千瓦	180 千瓦	172 千瓦

从上表可以看出，負荷電阻在17歐左右時，輸送的功率最大；在比17歐更大或更小的值時，輸送的功率反而小了。这样就得到結論：一條輸電綫在一定的電壓下只能輸送一定的最大功率，也就是說一條固定電壓的輸電綫不能輸送任意大的電力。如果用這條110,000伏電壓的直流輸電綫來輸送185千瓦的電力，將是不可能的。

那麼，怎樣提高輸電綫的輸送功率，把巨大電力送到遠方去呢？提高輸電綫的輸送功率，有兩種方法。一種方法是提高電壓：如果把110,000伏電壓升高到154,000伏，最大輸送功率將增加到348千瓦。也就是電壓增加40%，而輸送功率增加約90%。這說明輸送功率不是和電壓同等比例地增加，而更快些。另一種方法是減小線路的電阻：如果換用更粗的導綫，例如換用電阻為每公里0.13歐的導綫，那麼最大輸送功率會增加到290千瓦。相反地，如果把輸電綫加長，由於輸電綫總電阻的增加，於是輸送功率就降低。這是直流電輸送的情形。

交流電輸送的情形比較複雜，輸電綫的電感起主要作用，

电阻的作用可以不計，但是一些基本的关系还是和直流电相似。为了提高交流輸电綫路的輸送功率，同样可以采用提高电压的方法，还可以采用减小綫路中电感的方法。我国所采用的35,000伏以上的电压等級是：35,000伏、110,000伏、154,000伏、220,000伏。目前，为了提高已有輸电綫的輸送功率，苏联拟采用提高綫路电压的方法，我国也正在考虑中。从下表可以看出，提高輸电綫的电压之后所增加的輸送功率情况。

原来的綫路电压	原来的輸送功率	提高电压后的电压	提高电压后的輸送功率
3.5 万伏	1,300—8,200瓩	6 万伏	2,300—14,000 瓩
11 万伏	20,600—41,200瓩	15 万伏	28,000—56,000 瓩
22 万伏	103,000—165,000瓩	300 万伏	140,000—224,000瓩

在减小綫路的电感来提高輸送功率方面，可以采取不同的方法。例如，40万伏綫路的每相导綫，不用一根而是用二、三根导綫合併組成，叫做分裂导綫，这样减小电感之后，輸送功率就能由350千瓩增加到500千瓩。此外，可以用綫路中串接电容器的方法，来抵消綫路电感的作用，使40万伏綫路的輸送功率提高約66%。

輸送电力既然需用高电压，但是提高电压以后，絕緣方面的困难必須解决，否則高电压輸电將是不可能实现的。

高压輸电是怎样进行的

現在談談从發电厂通过高电压輸电綫，把巨大电力輸送到远方去的过程。

發電机的电压一般并不高，只1万伏左右。如果要把电力

輸送到遠方去，就必須用更高的電壓，所以先通過變電站把發電機的電壓升高到 11 萬伏或 22 萬伏等等，然後通過輸電綫把電力送到用電區。對於用電的器械來講，如工具機上的電動機等，這樣的電壓太高了，而且在保證設備和人身的安全方面也比較困難，因此又要通過變電站把電壓降低後才供給廠礦。圖 2 是簡單的示意圖，實際綫路當然比它複雜得多。因為發電廠里有很多發電機，從發電廠到用戶之間，不只是經過一條輸電綫和兩個變電所，可能經過一個電力網和幾次的降低電壓。

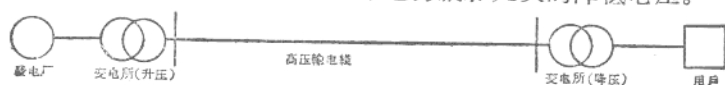


圖 2 高压輸電的簡單示意圖。

電力輸送系統是由兩大部分組成的：變電站和輸電綫。下面分別說明各部分的結構和功用。

(一)變電站 在變電站里，主要的設備有變壓器、斷路器、隔離開關、儀表用的互感器、放電器(一般叫避雷器)、用於直流輸電的閘裝置。

變壓器 它是變電站里最重要的元件，一類是把發電機的電壓升高，叫做升壓變壓器；另一類是把輸電綫的電壓降低，叫做降壓變壓器。城市中杆塔上的小變壓器，也是減壓變壓器的一種。在變電站里的變壓器，一般都比較大。變壓器主要是由高压綫圈、低压綫圈和鐵芯組成的。圖 3 (見封二) 是 7,000 千伏安變壓器的鐵芯裝置，高压繞組和低压繞組就裝在這三個垂直的鐵芯上。圖 4 (見封二) 是 60,000 千伏安變壓器的繞組情況，三個綫圈的電壓是 22 萬伏，11 萬伏，1 萬伏，它們安排在左中右三個鐵芯上。圖 5 (見封二) 是 5,000 千伏安變壓器內部裝置的全部。圖 6 (見封二) 是兩種不同形式的變壓器外部。由於設計不同，變壓器雖有各種各樣的形

式，但原理是一样的，如圖 7。当变压器的初級綫圈連接到电源电压后，綫圈中就有电流通过，它在鉄芯里产生磁力綫，象圖中虛綫示意地表示的。这些磁力綫企圖在初級和次級綫圈里感应电压。在初級綫圈里，感应电压正好和外加的电源电压成平衡状态；而在次級綫圈里感应的电压，就可以加到負荷上去。磁力綫的多少，决定于电源的电压和初級綫圈的圈数。当电源电压和初級綫圈圈数都在固定的情况下，鉄芯中的磁力綫是不变的，这时次級綫圈的电压随着圈数多少而改变。当次級綫圈的圈数比初級的大十倍的时候，次級电压也就比初級的大十倍。例如，初級綫圈的电源电压是 1 万伏，如果我們使次級綫圈的圈数比初級的大十倍，那么在負荷这边就得到 10 万伏电压。要把电压降低的时候，就把次級綫圈的圈数按比例地减得比初級綫圈的圈数更少就可以了。所以無論要升高或降低电压都是不困难的，只要使初級和次級的圈数比和电压成正比就可以了。

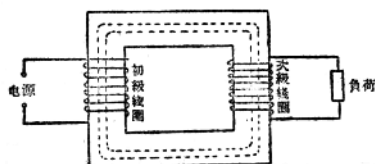


圖 7 变压器的原理圖。

变压器的容量范围是很大的。裝在电綫杆上的变压器容量，一般是几个到几十个千伏安。变电站里的大型变压器容量可达 250,000 千伏安左右，重量約 200 吨左右。有一个 11 万千伏安的單相变压器，長 14 公尺，高 9 公尺，它可以把电压从 38 万伏变为 22 万伏。今后的变压器还在向大容量發展，象制造 750,000 千伏安左右的变压器，由三个單相变压器組成，每个的容量是 250,000 千伏安。

断路器和隔离开关 断路器在变电站里具有重大的意义，它的作用象家庭中或机器上裝的“电門”一样。不过家庭或机器所用的电压低，电流小，例如 220 伏电压几个安的电流；而用

于大电力輸送的断路器的电压很高，电流很大。圖 8 (甲) 是苏联的 40 万伏电压，2,000 安电流的空气断路器。圖 8 (乙) 是空气断路器的側面，其中左边下面兩根長柱是絕緣柱，可以使上面帶高电压的部分和地絕緣起来。在左边上面的絕緣柱里有熄弧室，当它分开的时候就

把电流切断了。右边兩根支持絕緣子是支持另一个接綫头——隔离器的不动接触器。如果右边的接触器和电源連接，絕緣柱在上端連接輸电綫，于是由接触器通过隔离开关和絕緣的柱內的接触，就把輸电綫和电源連接起来了。为了檢查或修理左边的部分，可以讓隔离开关和接触器分开，象圖中的样子，这样左边的部分不帶电了，可以進行檢查修理，这就是隔离开关的作用。

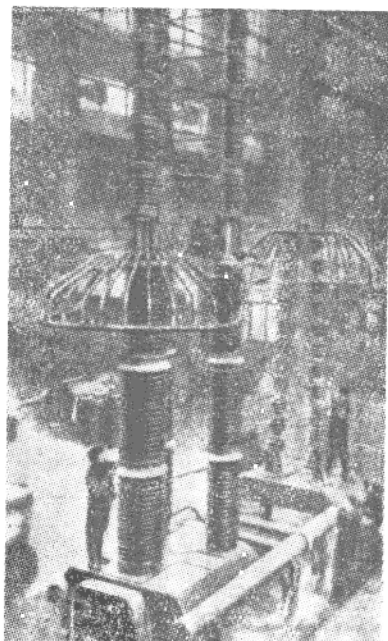


圖 8 (甲) 40 万伏电压，2,000 安
电流的空气断路器。

大功率断路器的基本困难之一是，如何把接触离开的时候所产生的电弧熄灭。

当我们拉开一般的开关或者保險絲燒断的时候，可以看到有电弧發生。在电压比較低，电流比較小的时候，电弧自己就消灭了。但是在电压高、电流大的情况下，要熄灭这种电弧是不容易的。圖 9 (見插頁) 是拉开隔离开关时，接触点之間發生的电弧。在交流大功率开关中，熄弧的基本原理是，当开关接触点逐渐离开，

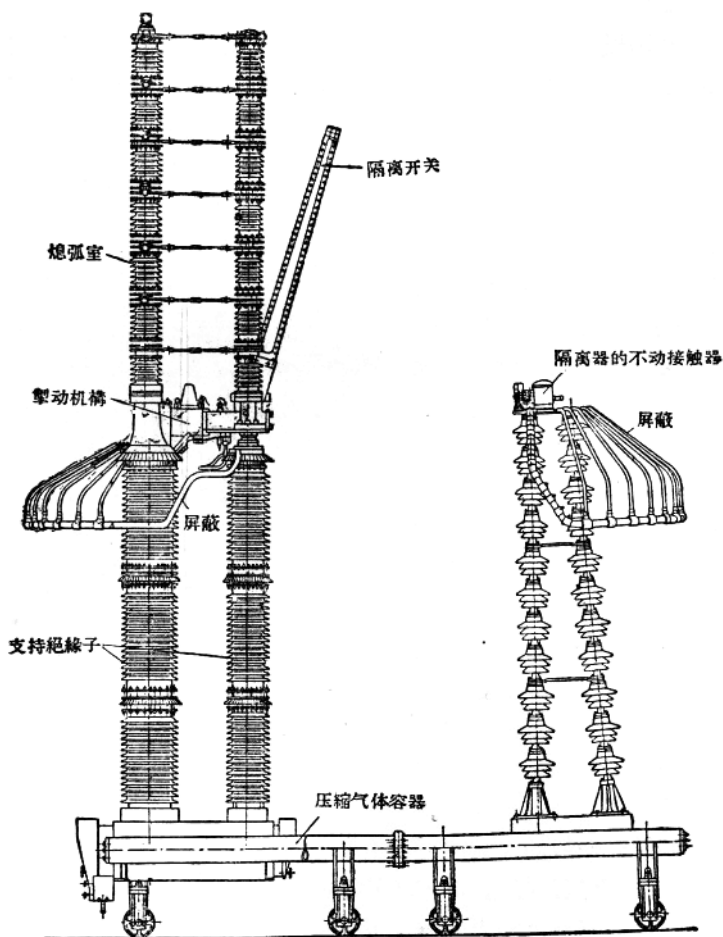


图 8 (乙) 空气断路器的截面。

电流等于零的时候，讓接触点之間的气体恢复絕緣强度，不讓高的电压再在接触点之間破坏气体的絕緣能力而重新引起电弧。为了达到这个目的，有的用压缩空气来吹，也有用油的。圖8中表示裝有貯存压缩气体的容器。圖10(見插頁)是另一种38万伏，1,000安的空气断路器，裝在变电所的情况。圖11(見插頁)(甲)是33万伏，15,000安的油开关的外形；(乙)是油开关的剖面：其中套管把引到油箱內的高电压导綫对地絕緣起来。熄弧室中有接触器。利用拉杆把横担提上来，就可以使熄弧室中的接触閉合。想断开綫路的时候，利用拉杆把横担拉下去，使熄室中的接触分开。熄弧室中的接触是利用油来熄灭电弧的。油开关的很大缺点是重量大，需用很多的油。例如，11万伏电压的油开关(MKП型)总重量是22.9吨，其中油占11.7吨；而11万伏电压的空气断路器重量只有4.5吨。又如，22万伏电压的断路器需用51吨油，总重量是99吨；而22万伏电压的空气断路器重量只有12吨。

隔离开关有时是和断路器合在一起的(圖8)，但是也常常不合在一起，因为断路器有时不一定和隔离开关合起来用。圖12(見插頁)是40万伏的隔离开关，長約8公尺，高5.2公尺。因为負載的断开和接連是用断路器来执行的，隔离开关只是在沒有負荷(沒有电流或很小电流通过)时才允許操作，所以隔离开关不需要熄弧裝置，結構上就簡單得多。

以上只介紹了40万伏的断路器和隔离开关的情况。虽然随着电压的不同、各制造厂的經驗和观点的不同，出現了很多不同的形式和設計，但是基本的原理和作用是一样的。

仪表用的互感器 一般测量电压和电流的仪表，只能用于低电压，如200—500伏电压的場所。在更高电压的裝置上就不能直接用电压表或是电流表，因为高电压对人有危險，同时高