

国际大电网会议论文选译

高压绝缘电缆

1972

水利电力部科学技术情报室

论文(21-01)主要介绍了外冷钢管充油电缆和局部外冷自容式充油电缆在日本的试验情况。电缆的电压为500千伏,容量为150万千伏安。试验结果证明500千伏充油电缆是实际可用的。

合成绝缘电缆的发展、绝缘老化试验和击穿机理——合成绝缘电缆多年来一直受到各方面的重视,并在应用上得到迅速发展。除了一般的低密度聚乙烯之外,在高压范围内出现了高密度聚乙烯和交链聚乙烯两种新的绝缘。论文(21-07)介绍了在法国的研究和发展情况,225千伏、20万千伏安高密度聚乙烯绝缘电缆已于1971年在法国投入运行,这些电缆的工作场强为9千伏/毫米,比在1963年投入运行的63千伏电缆的工作场强大一倍左右。此外,这些电缆似乎更适合于采用循环水外冷,从而可增加输送容量。

论文(21-05)介绍了荷兰在研究聚乙烯绝缘电缆的击穿现象中所采用的试验方法。这个方法排除了靠近内屏蔽层和外屏蔽层处可能产生的击穿,可以明确地确定绝缘内部发生击穿的原因。此外,这种方法还可减少由于击穿造成的损坏程度,可以得到一条狭窄的击穿途径便于研究击穿的物理原因。瑞典的论文(21-09)介绍应用威布尔统计方法进行耐压寿命计算的问题,并根据试验现象推出了描述击穿机理的关系式。

出 版 说 明

第24届国际大电网会议是在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，有水利电力部“五七”干校的同志。

译文中有错误或不当之处，请批评指正。

1972年国际大电网会议论文翻译小组

1973年9月

前 言

1972年国际大电网会议第21专业小组（高压绝缘电缆）共有10篇论文。讨论的主题可以概括为下列几个方面：

1. 超高压充油电缆在大落差情况下的安装和敷设；
2. 电缆热性能的计算和载流量的规定；
3. 合成绝缘电缆的发展、绝缘老化试验和击穿机理；
4. 高压直流电缆绝缘中的应力分析；
5. 水底电缆的一些机械特性。

我们共选译了8篇，其中（21-06）和（21-10）属于第1主题；（21-01）、（21-02）和（21-04）属于第2主题；（21-05）、（21-07）和（21-09）属于第3主题。关于直流电缆的一篇论文，因与直流输电有关，已列入直流输电译文专辑中。

超高压充油电缆在大落差情况下的安装和敷设——在高落差情况下敷设超高压自容式充油电缆有它的特殊问题，这个问题与电缆内部液体静压力有关。高落差的电缆装置虽然到现在还不是很普遍，但由于大型水电厂的发展，对这种装置的要求逐渐增加。目前最大的落差已达到500米左右。论文（21-06）介绍了赞比亚的电缆装置，其主要特点在于电缆能保持在全部内压力约30个大气压下进行弯曲不会造成电缆包皮的损伤。这是通过采用新的加强带结构而达到的。为了分隔电缆的静液压，在大落差情况下一般仍采用传统的塞止接头。论文（21-10）介绍了用环氧树脂做塞止接头和变压器终端头的设计和制作方法，并说明了用石英粉或玻璃纤维作填充料的特点。塞止接头的结构比较复杂，仍是充油电缆线路中的薄弱环节，今后尚须进行研究。

电缆热性能的计算和载流量的规定——论文（21-04）介绍了使用数字计算程序对电缆的热性能进行比较准确的分析计算。这个程序的主要特点在于可以对不同类型的负荷周期作暂态的计算，并能确定整个周期中电缆温度和时间的关系曲线。电缆周围附近的其它热源都可以包括在计算模拟内。试验证明，电缆导体温度计算值同实测数据之间相差 2°C 左右；在工程上这样的准确度是可以的。

论文（21-01）和（21-02）都涉及了超高压电缆输送容量的问题。论文（21-02）总结了英国十年来低压力自容式充油电缆的运行经验并介绍了规定载流量的办法。经验证明，尽管导体截面和运行场强都不断加大，电气事故仍然很少。根据这个经验和强力冷却经验，预计能把电压引伸到750千伏，输送容量可达400万千伏安。但对这样的电压和容量，也有可能采用六氟化硫或液体绝缘的电缆。六氟化硫绝缘的电缆从1963年起已在日本开始进行试验。

关于电缆载流量，传统的方法是规定冬季和夏季运行条件下连续负荷的要求，以最高导体温度作为电缆设计的基础。论文（21-02）中提出了新办法，其主要特点是使电缆线路能更紧密地配合实际负荷的需要，从而更经济地利用电缆，特别是关于利用暂态载流量的特性来满足短期的过负荷紧急情况。

目 录

前 言

超高压充油电缆在大落差情况下的安装和敷设

- 敷设在竖井中的超高压充油电缆(300到400千伏)(21-06).....(1)
- 采用环氧树脂解决400千伏电缆中的高压力问题(21-10).....(9)

电缆热性能的计算和载流量的规定

- 日本500千伏大容量地下电力电缆的研制(21-01).....(19)
- 英国自容式充油电缆系统的运行经验和发展趋势(21-02).....(38)
- 地下输电系统热性能的计算技术(21-04).....(54)

合成绝缘电缆的发展,绝缘老化试验和击穿机理

- 聚乙烯绝缘电缆中的击穿现象(21-05).....(63)
- 法国挤压聚乙烯绝缘高压电缆的研究和发展(21-07).....(70)
- 交链聚乙烯绝缘电缆的加速电气老化(21-09).....(91)

附 录

- 第21专业小组(高压绝缘电缆)讨论纪要(21-00)附件.....(99)
- 高压直流电缆中的绝缘配合(21-03)提要.....(101)
- 水底电缆的若干机械问题(21-08)提要.....(102)

敷设在竖井中的超高压充油电缆(300到400千伏)

(21-06)*

提 要

大约在二十年前就已开始在竖井中安装超高压电缆。那时,在200千伏的蒙托里奥水电厂,电缆敷设在深度超过200米的竖井中。

近二十年来,在电压、输送容量和井深方面都有很大的进展。

这篇论文报导了设计、制造和敷设的标准。据此,研制了赞比亚卡富埃峡330千伏电缆,并成功敷设在深度约500米的竖井中。

1. 引 言

在垂直竖井中敷设超高压电缆是一种专门的技术,虽然到现在还不是很普遍,但约在20年前就开始了。

据称,第一次安装是在蒙托里奥水电厂(意大利)于1955年完成的[1]。垂直竖井的深度为235米,内装有9根220千伏充油电缆,总的传输容量为13.8万千伏安。每根电缆的铜导体截面为220毫米²。在竖井底部使用了塞止接头以解除对油浸式终端头的压力。

第二次安装可能是在加里巴水电厂(罗得西亚),1958年在那里安装了12根330千伏充油电缆[2]。竖井的深度为180米,输送容量为60万千伏安。电缆导体的截面为550毫米²。

随后在不同国家安装了几根垂直电缆。

在沃尔德达维拉水电厂(西班牙),于1963年安装了18根220千伏充油电缆[3],总的输送容量为76.2万千伏安。竖井的深度为285米。电缆导体的截面为220毫米²。

在克鲁阿产发电厂(苏格兰),于1965年安装了7根275千伏充油电缆,总输送容量40万千伏安。竖井的深度为320米。电缆导体的截面为320毫米²[4]、[5]。

1970年在维拉林诺水电厂(西班牙)安装了12根220千伏充油电缆(220毫米²)总输送容量60万千伏安[6]。竖井的深度为360米。除了在竖井底部进入变压器前以外,没有使用中间塞止接头以减轻液体压力。

1971年在德里奥湖发电厂(意大利)120米深的垂直竖井中安装了12根400千伏充油电缆。总的输送容量为100万千伏安。没有使用塞止接头,电缆是经过高压力油浸式终端头进入变压器的。

* 作者N.PALMIERI和G.M.LANFRANCONI(意大利)。

这只是一些主要的例子，在欧洲和别的地方还有其它例子，就不一一列举了。

2. 主要技术问题

在垂直竖井中安装超高压充油电缆，除了那些在常规装置中常存在的问题以外，还提出很多问题，这些问题与内部液体静压力特别有关。

这些问题主要关系到：

- a) 电缆引入竖井并在油压力下向下敷设，因此，可能在高的内部压力下对电缆进行弯曲；
- b) 当电缆内部压力超过 4 到 5 大气压时，低端电缆头的装配实际上是不可能的；
- c) 控制电缆在压力下运行时，由于热膨胀所引起的机械应力和应变，这些应力和应变随墙上固定电缆夹的型式不同而不同；
- d) 采取防火措施以控制由于可能漏油和最后导致竖井中流油引起的损害。

2-1 关于敷设和装配方法

为了克服有关 a) 和 b) 两项的困难，已考虑过各种方法，首先是在蒙托里奥、沃尔德达维拉和维拉林诺实验过的方法。这个方法是在敷设开始之前放出电缆内部的油并充以惰性气体（例如二氧化碳或氮气）。

这个方法牵涉到在完成敷设工作之后长时间的真空处理以排除电缆内的气体，因为当油槽直径为 12 到 16 毫米时，沿油槽的真空进展得非常慢。在这个过程中，由于沿电缆长度（200 到 300 米）不可避免有压力降，留有气泡的危险性很大。这些气泡以后由于溶解作用或电场作用要被油所吸收（物理的）。

上述现象不易控制，特别是当绝缘比较厚和电缆导体处电位梯度高的情况下（14 到 16 千伏/毫米），一旦游离开始就会有逐渐形成气体的危险，而不象在电位梯度低的时候（即 9 到 12 千伏/毫米）那样会吸收气体。

另外一个可能解决的办法是在电缆盘上装配好（或最少装配一部分）低端的终端头，以后将这一端引入竖井向下敷设。

实际上这个方法不能普遍使用，因为由于弯曲以及电缆导体，绝缘和铅包（它们与终端头的各组成部分都有相连）之间的相对移动，会引起困难。

此外在敷设电缆时可利用的地方也大大地减小了，在很多情况下竖井墙壁和检修用的升降梯或电梯之间的空隙只有几十厘米。另外，在敷设结束前，在竖井下部对电缆在高的内部油压下进行弯曲的问题仍未解决。

还已知一些其它方法：例如将电缆的低端弯成 U 形，让油从低端流出并保持电缆的末端向上，而靠近竖井上端的大部分电缆则保持真空，如资料[4]、[7]中所叙述的。但是，使用这个方法就要使电缆绝缘暴露在大气压条件下来装配低端的终端头，所以没有浸渍流体（油或气）流出。这样，电缆纸绝缘有可能吸收潮气并在以后的处理中不易去掉。

这个缺点特别严重，因为在隧道中的空气湿度一般都比较高的，而绝缘处于高的电位梯度时，必须有低的潮气水平。

为了消除上述各种困难，研究了一个新的敷设方法并且已经用于赞比亚卡富埃峡 330

千伏电缆的安装。应用这个方法时，电缆的大部分始终保持真空状态。这个方法将在后面几节加以叙述。

2-2 由于运行中热膨胀引起的应力和应变

现在考虑c)项问题。所有电力电缆在输送功率时都发热，因此，当负荷变化时受到热胀冷缩的作用。

一根自由膨胀的电缆的金属包皮承受着周期性的应变，它必须限制在一定范围内务使不致危及电缆的寿命。

对于敷设在水平隧道中的电缆，为了控制上述应变，电缆基本上按正弦形曲线敷设并用电缆夹子支撑。每次热膨胀时在每两个夹子的跨距中心测得的弧垂都不相同[8]。

夹子之间的距离一般采用4到5米。正弦形曲线的布置应使热胀力限制在一定水平内以保证电缆包皮的寿命超过30到40年。

在垂直竖井中如果采用可旋转的电缆夹子也可以使用同样的布置。此时，夹子应装在正弦形曲线的拐折点上。

安装这些夹子时应使它能围绕水平轴线旋转并且每个夹子支撑2到3米长的电缆。

由于要获得正确计算的弯曲形状，增加了结构的复杂性并引起了敷设的困难。此外，电缆在整个寿命中每次热循环都要经受由于很高的内压力所产生的相当大和持续的弯曲变形。

如果没有特殊的理由，宁可用直线固定的夹子。夹子间的距离务使由于热胀冷缩引起的机械应力不致因轴向推力而破坏系统的稳定性。当夹子之间的距离约为1米并对中心线作仔细的调整后一般可达到上述要求。

多用一些夹子当然可以降低卡住电缆的压力，防止电缆各部分的变形，但可能不经济。

从机械的观点来看，用固定型夹子支撑的电缆，好象直埋电缆一样沿它的整个长度有连续的约束力。

在这种情况下必须检查由电缆铜导体所产生的末端推力（特别是作用在同它相连的附件上的推力）[9]。

当导体的截面譬如在500毫米²及以下时，末端推力可以很容易地加以控制。但是在垂直安装的情况下一定要避免使用过大的导体和过高的温度。

2-3 防止火灾危险的措施

对于d)项所说的关于在垂直竖井中的装置要采取防火措施的问题是很重要的。它的后果可能会特别严重，因为在某些情况下，一个地方漏油可成为火上添油，直至油箱中和电缆中的油全部漏完为止。所以应该采取一切措施以排除或至少尽量减轻这些后果。

一般的方法可以举例如下：必要时截断竖井通风的空气、安装烟气探测器等等。使用可以防止漏出的油和周围空气接触的排油系统也极为有用。

为此，在电缆外皮上沿竖井每隔一定距离装置一个漏斗并接有排油管道，以便油能流到竖井底部一个密闭的装有卵石的油池中去。

此外，还需特别注意使包皮对地绝缘保持良好。为了防止感应电流循环，有很多安装

是按金属包皮只在一端接地设计的。

这样，如果铅包外面的保护层绝缘受到损坏，则电缆金属包皮与大地回路之间将有循环电流，而且如果故障点的电阻大，就有可能产生局部过热使铅包烧穿。采用铅包回路电流的自动控制或报警系统，可以立刻发出故障信号并防止严重的损坏。

3. 卡富埃峡的装置和所用的高压电缆

在赞比亚的卡富埃江上开发了一个400米高的瀑布，水电厂的容量达60万瓩。

电压由6台单相变压器（另1台备用）升至330千伏。竖井深度达485米。使用了6根高压电缆（另1根备用）将电力输送到外面的变电所去。

由于竖井的深度相当大，每根电缆（总长度为650米）用两个塞止接头来分隔液压，一个在竖井的底部，另一个在竖井深度约一半处。每根电缆经过隧道后用一个油浸式终端头直接接到变压器。压力系统的布置示于图1。原则上在低端完全不用塞止接头而用高压力的油浸式终端头，这种做法被认为是既慎重又方便。

设计了铜导体截面为450毫米²的单芯充油电缆，每相可持续输送电流575安。

电缆的包皮只在高端接地以防感应电流。

电缆的主要特性如下：

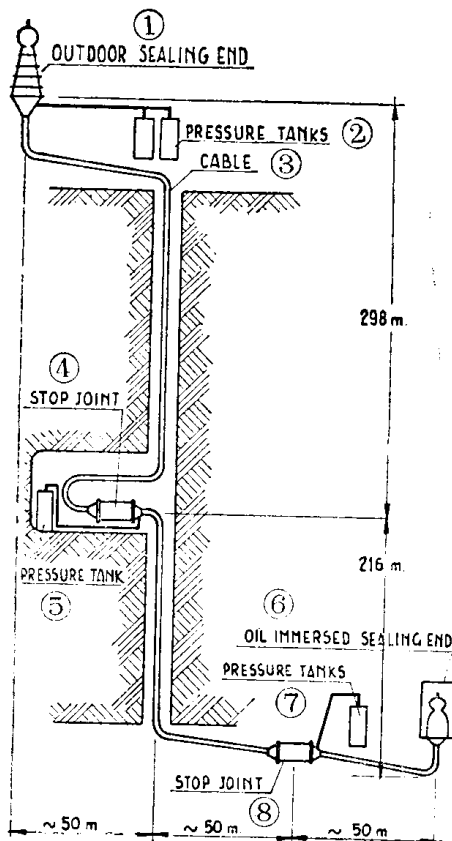


图 1

1—户外终端头；2—压力箱；3—电缆；
4—塞止接头；5—压力箱；6—油浸
式终端头；7—压力箱；8—塞止接头

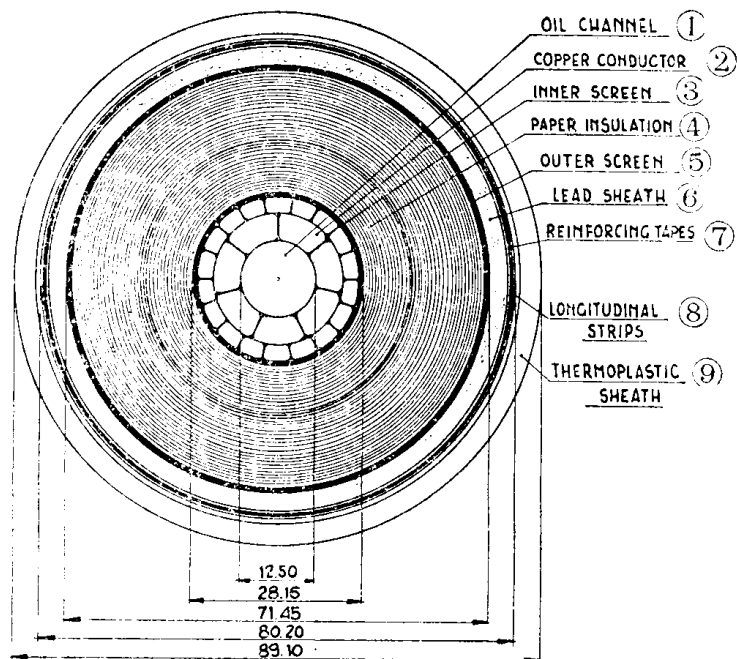


图 2

1—油槽；2—铜导体；3—内屏蔽层；4—纸绝缘；5—外屏蔽
层；6—铅包皮；7—加强铠带；8—纵向硬铜条；9—热塑包皮

额定电压	345千伏；
最高电压	362千伏；
基准冲击水平	1,240千伏；
频率	50赫；
最大介损正切	0.3%；

当电压为 $330/\sqrt{3}$ 千伏时，导体处的工作电位梯度等于14.8千伏/毫米。

电缆的主要尺寸如下（见图2）：

油槽直径	12.5毫米；
铜导体屏蔽层直径	28.1毫米；
绝缘厚度	21.3毫米；
铅合金包皮外直径	77.5毫米；

径向加强铠带：上半段电缆用4层，可以承受28.5大气压；下半段电缆用3层，可以承受22.5大气压。

一层长节距包绕的纵向硬铜条。热塑的包皮（聚氯乙烯）。

外直径	约90毫米；
重量	约20公斤/米。

4. 电缆的敷设在压力下的弯曲

在卡富埃峡的安装中最重要的是关于电缆在内压力几乎达30大气压下进行弯曲的问题。

开始时曾提出将每根电缆向下穿入垂井直至不能保持直线为止，此时将剩余电缆（约几十米）从电缆盘上松下并接上真空泵。然后让油从低端一头流出使那里的压力只有几个大气压并继续进行敷设，同时，接有真空泵的一端则任其自由向前移动。但是经过对电缆在压力下弯曲的现象作了精细的检查后，认为可以对上述工作方法加以简化。

事实上，当电缆在承受内压力的情况下被弯曲时，电缆的包皮有向弯曲的外侧伸张的趋向，结果，由于金属包皮和加强带之间的摩擦力，在第一层加强带两个相邻绕圈的间隙处会出现集中的变形。

同时在弯曲的内侧产生集中压缩的效应。结果，在加强带绕圈的间隙处会出现铅痕；因此在这些地方可能发生裂开。

另一方面，如果第一层加强带采用非常薄的带和适当的绕距并减小包皮和加强带之间的摩擦系数，则上述效应可以减轻到微不足道的比例。

试验证明具有这样结构的电缆当内压力为30个大气压时，能够承受25到30次半径为3米的弯曲以后才会发生危险变形。

因此，决定按照上述设计制造电缆并保持全部内压力对电缆进行弯曲。

现在只叙述一段电缆的敷设和随后的端部装配。

电缆向下穿入竖井，每隔一定距离用夹子夹紧在由一个10吨绞车松放的运载钢丝绳上。绞车放在竖井的顶部，它的正常敷设速度为100米/小时，小调节时的速度为10米/小时。

为了防止由于电缆的重量和内部油压引起电缆低端一头的旋转，电缆用夹子临时固定在横杆上。这些横杆可以在与电缆线路平行的两根钢丝绳上滑动。当电缆到达最后位置时，它从运载钢丝绳上松下并用非磁性的夹子固定在墙上。夹子间的距离在直线部分为1米，在弯曲部分为0.5米。夹子的安装是从竖井的最高点开始并逐步向下进行。

在这一阶段中，当每次从运载钢丝绳卸下电缆重量后，由于钢丝绳的弹性收缩，必须相应地松放一些钢丝绳。

5. 低端电缆端部的装配（和塞止接头连接）

第一步是压接电缆导体的连接管。因为这一步骤往往要损失大量的油而不太可能由下面所说的供油系统来补充，所以它是在电缆敷设之前，当电缆仍在线盘上保持低的油压时进行的。这样，以后就可以在敷设完成后通过上述压接好的连接管插入适当的供油箱。连接管带有一个蘑菇阀门，油可以通过它流到一个端头小室并保持压力。小室端部接有一个压力表并装有一个高压力手动阀门（图3）。整个装置是防震的并且用一个坚固的圆筒型的罩罩住。罩的直径比电缆稍大一些，长度小于50厘米。电缆在竖井中放到最后位置以后，对竖井外面的电缆段作好临时安排使不至形成虹吸作用，然后将电缆的上端接到真空泵和供油系统，以便抽真空并一直保持真空，同时按控制的量供给去气的油（图4）。

在紧急情况下如果有必要将电缆的油全部放出，也可以通过上述同一设备对电缆供给干燥氮气。

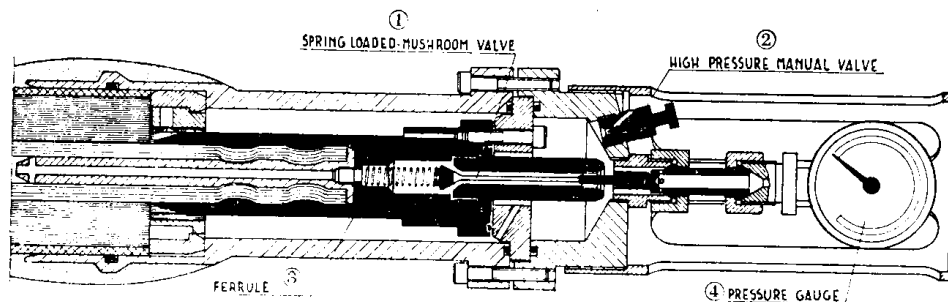


图 3

1—弹簧压紧的蘑菇阀门；2—高压手动阀门；3—导体连接管；4—压力表

完成上述敷设工作后，从底部放出电缆的油，使电缆本身上部保持真空，直至电缆内部剩余油柱约为4个大气压为止（根据接在低端的压力表指示）。此时，迅速将导体连接管露出并将电缆端头的环形金属部件套在电缆上，然后将带有储油箱并保持约2个压力的供油系统接到连接管上。采用上述的“蘑菇阀门”来连接是很方便的（图5）。

电缆的端头按传统方法施工，端头本身内始终保持正的电缆内压力。

在这一阶段内，随时可以通过对管道的快速操作，检查电缆内部的油柱高度，并从一个压力表上读出它的相应压力。然后，拆离供油系统，将电缆端头插到塞止接头中，并通过塞止接头中心板再次与供油系统连接（图6）。这个阶段大约持续半个小时，此时，从底部流失的油，在采取适当措施后，可以从接在电缆上端的供油系统得到补充。这些工作終了时检查低端的油压证明压力仍高于2个大气压。此时，可以对电缆端头进行正常的真空和浸渍处理。最后，在电缆低端切断低压力油路并对塞止接头的中心板进行密封。导体

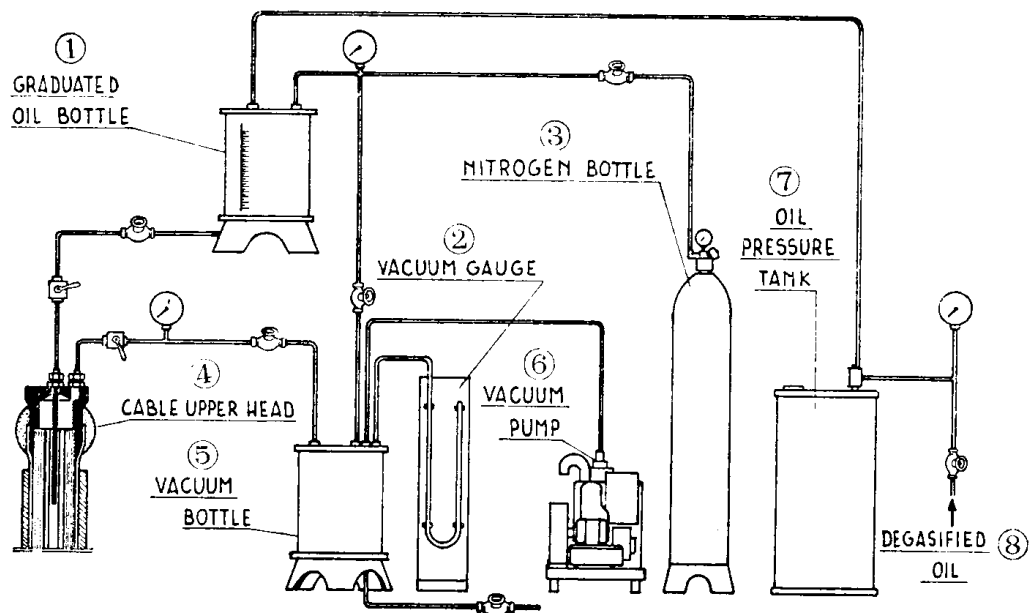


图 4

1—有刻度的油瓶；2—真空表；3—氮气瓶；4—电缆头上部；5—真空罐；6—真空泵；7—油压力箱；8—去气的油

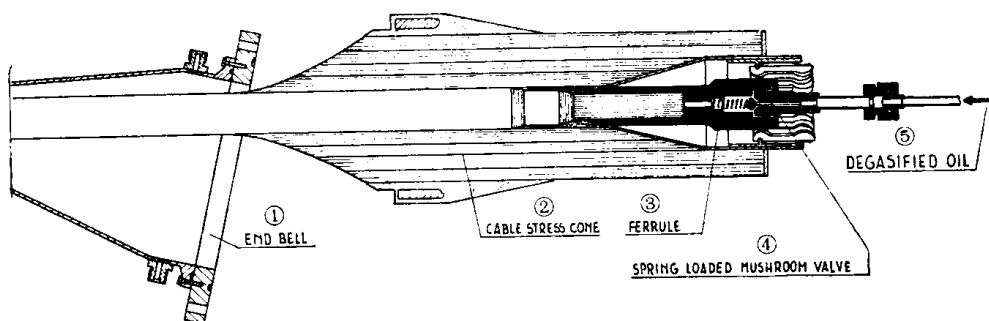


图 5

1—喇叭管；2—电缆均压锥；3—导体连接管；4—弹簧压紧的蘑菇阀门；5—去气的油

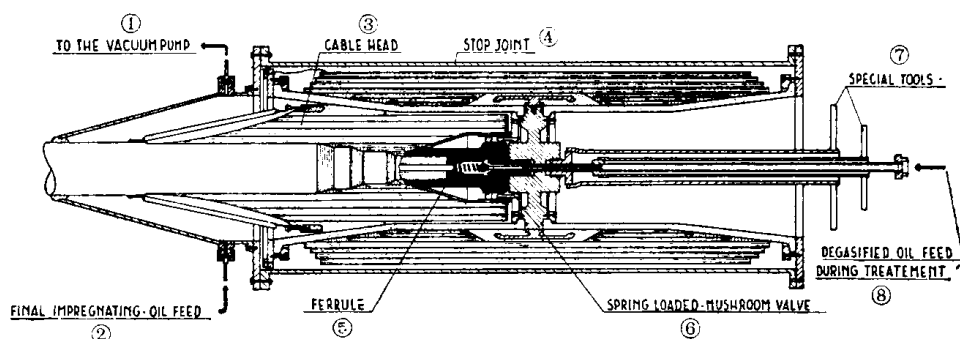


图 6

1—到真空泵；2—最后充入的浸渍油；3—电缆端头；4—塞止接头；5—导体连接管；6—弹簧压紧的蘑菇阀门；7—特殊工具；8—在施工时充入的去气的油

的电气连接可以从中心板通过。然后通过一根从竖井顶部敷设下来的供油管对电缆作重新浸渍处理。这样可以抵消在电缆油槽中的油的静压力。

在电缆浸渍处理以后检查电缆上端的油，可以肯定它的残余表压力不会超过几百毫米汞柱。

随后其余附件都是用一般的方法装配的，因为工作条件与正常做法比较，没有任何不同之处。

6. 结 论

使用于困难敷设条件下的超高压电缆的设计、制造和安装技术已经取得了不少经验，如果采取适当措施，设计、制造和安装等工作都是可靠的。

最重要的措施是采用较理想的敷设技术并使用简单、坚固和电气性能可靠的附件，特别是塞止接头和油浸式终端头。

现有的装置大部分是自容式充油电缆，这种型式的电缆对竖井敷设看来是最合适的。但是，如果在安装这种电缆时不是按正确的方案进行，就有引起火灾的危险。现有的经验已完全可以解决这些问题。

参 考 资 料

- [1] PIERAZZUOLI MARIO - Impianto di cavi O.F. posati verticalmente (L'Elettrotecnica - Vol. XLIII - No 3 - 1956).
- [2] HERBERT R. S. - Installation problems of 330 kV cables at Kariba (British Power Engineering - June 1960).
- [3] Energia para el desarrollo (Iberduero 1964).
- [4] ARKELL C. A., BLAKE W. E. - Installation of E. H. V. oil filled cables in deep shafts (IEE Conference Publication No 44 - 1968 - Progress on overhead lines and cable for 220 kV and above - pages 213-217).
- [5] PALMIERI N., BALL E.H. - Some recent developments on oil filled cables accessory design (I. E. E. Conference Publication No 44 - 1968 - Progress on overhead lines and cables for 220 kV and above - pages 153-157).
- [6] Iberduero 1944-1969 (Iberduero 1970).
- [7] English Patent No 886.643 - Improvements in or relating to the Installation of Oil-filled Electric Cables - (1960).
- [8] HOLTUM W. - The installation of metal-sheathed cables on spaced supports. (The proceedings of the I. E. E. - Vol. 102 - 1955 - part A - pages 729-742).
- [9] HOLDUP W., OCCHINI E., SKIPPER D. J. - Thermo-mechanical behaviour of large conductor cables. (Transaction paper of IEEE No 31 TP 67-478 - 1967).

采用环氧树脂解决 400 千伏电缆中的高压力问题

(21-10)*

提 要

用电的不断增长要求经济地供给大量的功率并尽量维持系统的电压水平。抽水蓄能电厂对于解决这个问题起了重要的作用。当这种水电厂建设在地下并使用充油电缆来联结地下的变压器和地面上的架空线时,敷设在很陡的竖井中的电缆及其附件,都将承受极大的流体压力。由于电缆高差而产生的油压较大,所以必须采用铝包或铠装铅包的电缆。在电缆的终端,可采用耐高压力的变压器终端头,或采用分隔液体的塞止接头。终端头绝缘子采用玻璃纤维环氧树脂,塞止接头的绝缘子采用石英粉环氧树脂,这样做对技术和经济设计有利。这些绝缘子选用环氧树脂时,应考虑的一个重要问题是电气和机械耐久性。如果以适应于电缆的运行寿命作为基础,那么长期的电气和机械应力不得超过相应的短期值的20%,对于石英粉环氧树脂和玻璃纤维环氧树脂都是如此。因为石英粉环氧树脂在电气上优于玻璃纤维环氧树脂,它特别适用于塞止接头。另一方面,玻璃纤维环氧树脂的机械强度比石英粉环氧树脂的好,把它用于承受高压力的终端头绝缘子则更有利,因为这样就不需再用塞止接头来分隔充油电缆的油。

1. 引 言

用电的不断增长,要求经济地供给大量的功率并尽量维持系统电压水平。解决这个问题的重要办法是采用抽水蓄能电厂。当这种水电厂建设在地下时,在地面下的变压器和地面上的架空线之间是靠充油电缆来传输功率。当这些电缆安装在很陡的竖井中时,电缆及其附件都要承受极大的液压。由于电缆高差引起的油压较大,电缆必须有铝包皮或铠装保护的铅包皮,而电缆的终端则安装能承受高压力的变压器终端头或用塞止接头来分隔液压。用玻璃纤维加强的环氧树脂制造终端头绝缘子和用石英粉填充的环氧树脂制造塞止接头的绝缘子[1],对技术和经济设计是有利的。下面介绍的塞止接头采用了浇有屏蔽电极的环氧树脂绝缘子,这样,在导体连接时不仅可以采用插头和插座,而且也可采用夹头或焊接。

* 作者K.H.SÜTTERLIN & H.P.ISRAEL, 费尔顿-几罗姆电缆厂(西德)。

2. 额定压力为50巴的400千伏变压器终端头

2-1 结构和要求

图 1 示出了最近研制的400千伏变压器终端头的结构。

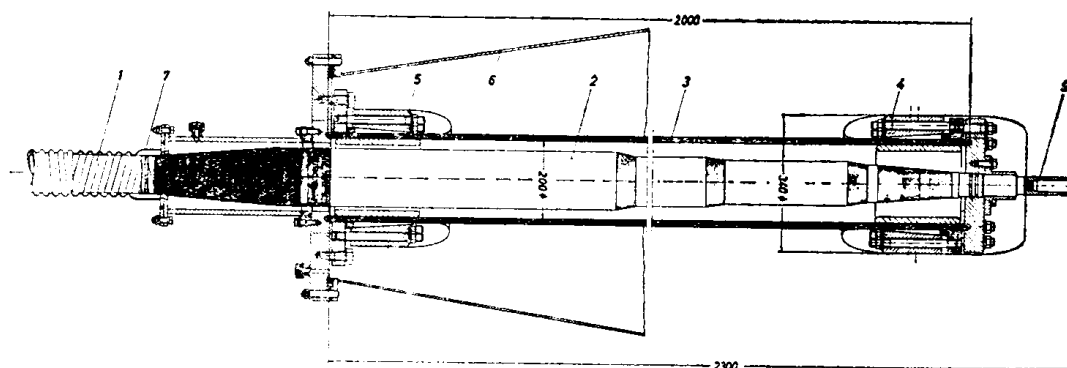


图 1 用于400千伏充油电缆的高压力变压器终端头

1—电缆；2—包绕的绝缘；3—绝缘子；4—顶部配件；5—底座配件；6—试验用容器；7—焊接处；9—连接螺栓

终端头的尺寸是按下面规定的电气和机械要求而定的。

冲击耐压：1675千伏（国际电工协会-71号文件）

交流耐压：740千伏（国际电工协会-71号文件）

压力试验：100巴（国际电工协会-141-1号文件）

2-2 绝缘子材料的选择和结构

鉴于高的电气和机械的要求以及充油电缆导体的最高运行温度达85°C，使用环氧树脂可以提供有利的绝缘子形式。表 1 指出了用玻璃纤维加强的和用石英粉填充的环氧树脂绝缘子作破坏性强度试验所得的结果。

用石英粉填充的和用玻璃纤维加强的环氧树脂绝缘子的破坏性强度试验

表 1

绝 缘 子 材 料		最大应力处的 内直径(毫米)	壁 厚 (毫 米)	破 坏 压 力 (巴)	强 度 ($10^7 \times$ 牛顿/米 ²)
石 英 粉 填 充 的 环 氧 树 脂	1 号	116	20	100	2.9
	2 号	116	8	100	7.25
	3 号	116	18	200	6.4
玻 璃 纤 维 加 强 的 环 氧 树 脂	1 号	131	7	290	27.0
	2 号	131	7	240	22.3
	3 号	131	7	280	26.0

试验证实了用玻璃纤维加强的环氧树脂的机械强度比石英粉填充的要高。其抗张强度高达 27×10^7 牛顿/米²（ ≈ 27 公斤/毫米²），相当于碳钢的强度。而用石英粉填充的环氧树脂的最大抗张强度只有 6.5×10^7 牛顿/米²（ ≈ 6.5 公斤/毫米²）。能得到这样高的机械

强度,说明所采用的工程技术方法是可行的,用这种方法,就能在超过环氧树脂的弹性极限以前,充分发挥玻璃纤维的高强度作用。把玻璃纤维加强的绝缘子选制成圆筒形是因为它有利于制造。为了要得到小直径的绝缘子,使机械应力最小,所以终端头采用电容式包绕绝缘。处于高油压的电容屏蔽层数目比较少,因此,和通常的均压锥相比,包绕绝缘的直径就较小。

考虑了上述这些问题后,得出绝缘子的尺寸如下:

内直径	200毫米;
长 度	2000毫米。

绝缘子的壁厚根据上述短时试验所确定的抗张强度而定。但是,由于玻璃纤维加强的环氧树脂的长期性能与短期的有差异,所以只能利用短期强度约20%的数值[2]。

因此,当运行压力为50巴和绝缘子的内直径为200毫米时,绝缘子的壁厚应为14毫米。

绝缘子具有好几个圆筒层,采用型管(玻璃纤维的角度为0弧度)和交叉缠绕式(玻璃纤维的角度约为0.8弧度 $\approx$ 45度)两种形式,这样做的必要性是由于不同的纵向和径向应力的缘故。绝缘子材料固有的高的机械强度只能通过顶部配件和底座配件才能全部发挥作用,在设计这些配件时对材料的特性留有余地。一系列试验表明,绝缘子顶部和底部的套环改变了力的作用情况,因此材料的真正机械强度始终不能达到。只有使用锥形配件(图1)才能使均匀光滑的绝缘子不需套环固定,这样就能得到玻璃纤维加强的环氧树脂的真正强度极限。这些锥形配件还有其它优点,因为它是在制造厂安装的,所以在现场装配时只要拧上绝缘子与终端头底座接合的螺丝。绝缘子的外表面与终端头的金属部件之间用O-形环加以密封。这些O-形环用于上述配件时需稍加予拉伸,使绝缘子表面的压力得以减轻,所以只承受很小的表面压力。

绝缘子顶部和底座配件的棱角和边缘靠屏蔽极来实现电屏蔽。设计屏蔽极时务使它在圆弧部分的电场强度不超过沿轴向对称部分的电场强度。

图2示出了绝缘子顶部配件处的等位线。屏蔽极采用合适的形状,可以使顶部配件不需要再另加绝缘。

2-3 试验

2-3-1 超高压绝缘子的液压和耐热试验 对400千伏超高压绝缘子做了短时的和长期的试验以证明其机械强度和耐热强度。为了确定机械强度极限,对几个绝缘子做了下列内部液压试验:

300巴($\approx$ 300大气压)一分钟,

压力增减率,100巴/分($\approx$ 100大气压/分)。

长时期的机械试验采用压力-温度循环试验。对两个绝缘子做了下列试验:

700次热循环,温度在30°C和75°C之间,压力在150巴和50巴之间;

300次热循环,温度在30°C和90°C之间,压力在150巴和50巴之间。

经过上述1000次压力-温度热循环以后,长时期的试验即停止。试验装置如图3所示。

为了确定耐热强度极限,对已经承受过1000次热循环的绝缘子在恒定的压力(150巴)

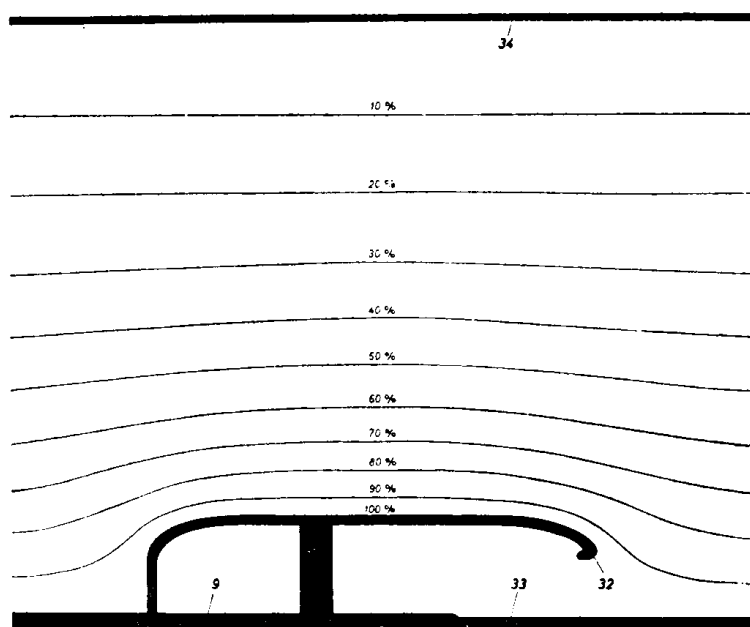


图 2 绝缘子顶部配件处的等电位线

9—连接螺栓；32—屏蔽极；33—电缆导体；34—试验用容器的壁。

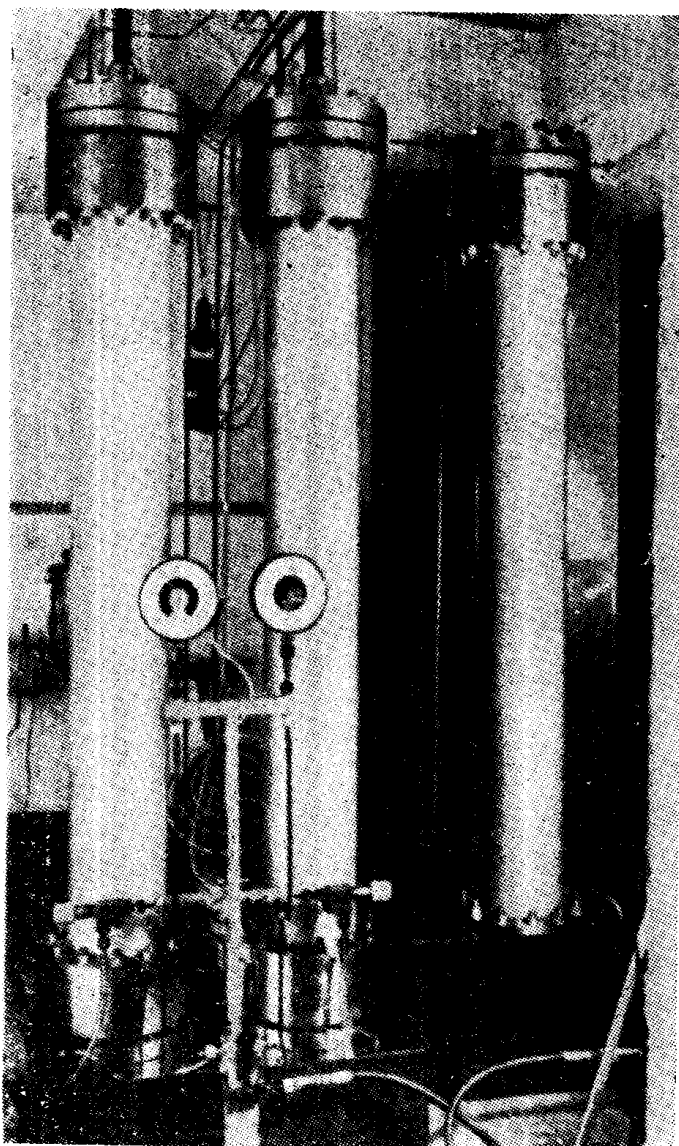


图 3 绝缘子的液压试验