

对长距离电力电缆的电缆故障定位

使用海底电缆方面的知识和经验进行长距离故障测寻



电缆室前的测量控制柜

来源：Baur/Manfred Bawart

几年后，数百公里长的高压电缆将穿越德国，成为关键基础设施的一部分。为了最大限度地提高其可用性，必须快速可靠地定位可能的电缆故障并维修电缆。传统的电缆故障定位技术在这里达到了极限 - 针对超长电缆，有特殊的解决方案。其技术部分源自长距离电缆常见的应用领域：海底电缆。



Ralf Dunker, 董事长, Press'n'Relations II GmbH, 慕尼黑

几年后，德国电网中将出现高压电缆，其规模将使之前的一切相形见绌。从北到南的超长线路设计为 525kv 直流输电，以便将损失最小化。例如，Südklink 将在地下铺设约 700km。至于 Südost-link，全长 560 km 中约有 500 km 计划为地下线路。A-Nord 连接计划主要采用地下铺设，长度为 300km，在未来也将作为德国输电网的主动脉之一发挥作用。除了内陆线路，还有将电力从海上风电场输送到陆地的电缆。

应急预案：第一次电缆故障前的应急准备

电网运营商不仅在电缆线路的建设上面临巨大挑战，为了确保电源支柱的可用性，他们还必须能够对可能的电缆故障作出快速反应。这意味着不仅要保持较短的维修时间，而且要通过快速的电缆故障定位来缩短停电时间。因此，通常值得在电缆开始运行前投资一个电缆故障定位系统，并使其在电缆末端随时可用，以便能够立即定位故障位置。

由于节省了时间，对电缆故障定位技术的投资一般在第一次电缆故障时就能收回成本。对于与系统相关的长距离输电电缆，测量控制柜中有电缆故障定位系统，在电缆室中立即可用，其技术已经久经考验，而且可以用于长度为数百公里的海底电缆。

地下电缆结构比海底电缆更复杂

对于地下电缆，这项投资甚至更加物有所值。它们不会受到锚和拖网的机械影响，但有许多其他潜在的故障源。因为海底电缆尽管距离很长，但几乎没有任何接头，而地下电缆由于运输原因，通常由 1 至 2 km 长的分段组成。这就导致有大量电缆接头。

“据统计，故障频率随着电缆长度和电缆接头数量的增加而提高。这增加了电网运营商对电缆故障的担忧。”Manfred Bawart 说。他是 BAUR GmbH (Sulz/奥地利) 超长电缆故障定位的专家。



在令人眩晕的高度的测量电缆连接
来源：BAUR/Manfred Bawart



将电力从海上风电场输送到陆地的电缆如今必须输送大量能源。在这里，也值得为电缆故障定位准备合适的设备，以备不时之需
来源：Adobe Stock/Shutter81

排除对人员和材料的危险

Bawart 说，用于长距离的技术有些特别。“最常用的电缆故障定位测量方法不适用于计划的电缆长

度。长电缆系统的设备和测量方法都有根本的不同。”他指出，还需要特殊的放电系统来安全释放能量，他粗略计算，在直流测试后，数百公里长的高压电缆中存

储了数千千焦耳的能量。“如此高的能量释放超出了大多数设备和测量系统的负荷。标准设备也无高能瞬态波防护。这必定导致设备损坏和操作人员的风险。”



用于陆上风力涡轮机高压电缆的电缆管道

来源：Adobe Stock / Kruwt



高压测量电桥“shirla”使 Murray 电桥测量能够定位长输电电缆上的电缆故障和电缆护套故障。

来源：BAUR GmbH

Bawart 解释说，BAUR 长电缆故障定位系统如今已被许多客户用于海底长电缆，因此安全方案已得到大量改进，特别是在用于安全释放高电缆电容的大尺寸装置方面。在测量方法上也有差异。“大多数适用于短距离地下电缆并因其操作简便而备受青睐的预定位方法在长距离电缆系统中都失败了。因此需要使用特殊测量方法和优化的测量技术。”

在两侧定位电缆故障并提高精确度

此外，为了在故障距离较大时提高测量精度，经常在长距离电缆的两侧使用测量系统。适用于相应使用情况的设备以及精确的两侧预定位测量是快速高效精确定位的基础，从而节省时间。“根据测量方法的不同，在预定位时可以实现高达电缆总长度 0.5% 的精确度。”Bawart 指出。“如果同时考虑已知参考点的位置，如接头，通常可以提高预定位的精确度。”

特殊测量方法

铺设电缆后的基本测量也适合作为参考。因此，许多标准推荐使用 TDR 指纹 (Time Domain Reflectometry = 脉冲反射法)。“为此，将一个具有高能发射脉冲的

特别强大的系统用于长距离电缆，因为其衰减很高。”Bawart 说。

发生故障时，TDR 测量适用于定位发生低阻电缆故障的损坏位置，例如在存在短路时。该测量方法显示出沿电缆系统的阻抗随时间的变化。测量灵敏度随着电缆长度和屏蔽层断裂接头数量的增加而降低。用脉冲反射法无法定位高阻电缆故障，除非用性能强大的烧穿仪将高阻电缆故障“燃烧”成低阻电缆故障。

老方法对最新电缆也有效

“在特别长的电缆系统中电缆故障定位也需要回归到电缆测量技术的基本概念上。”Bawart 说，因为出现高阻电缆故障时也使用 Murray 电桥方法。它可用于低阻和高阻电缆故障以及电缆护套故障，适用于除了故障相位外还有另外一个正常相位的情况。测量时，故障相位与电缆远端的正常相位相连。与基于脉冲的测量方法相比，Murray 电桥测量在长度相关的精确度方面具有特殊的特性。因此，无论测量长度如何，都能以最高精确度测量电缆故障 - 无论是在起始区域、电缆中间还是在电缆末端。即使出现高阻电缆故障，在高压下执行的电桥测量也能提供精确的结果。

使用测量电桥进行电缆故障定位已经在数百公里长的电缆上得到证明，例如在挪威和荷兰之间的 450 kV 直流连接上。在这个 580 km 长的电缆系统上，借助 BAUR 技术和 Murray 电桥测量，可以成功地以最高精确度定位电缆故障。

另一个例子是澳大利亚东南部和塔斯马尼亚之间 300 km 长的 400 kV 海底电缆。由于塔斯马尼亚所需电能的大约 40% 流经这里，因此它的故障引发了持续数月的能源危机。在这里，经过数周高成本的故障查找后，他们也请这位奥地利专家提供支持，他能够使用 TDR 测量和 Murray 测量电桥快速定位电缆故障，而且精确度很高。

定位击穿故障和间歇性电缆故障

然而，大多数情况下，海底电缆和地下电缆会出现不同类型的电缆故障，Bawart 说。“根据我的经验，地下铺设的特高压电缆系统更有可能在主绝缘上出现击穿故障或间歇性电缆故障。”电缆护套故障定位也越来越重要。它可以用来检测和修理由外部影响（例如道路建设）造成的损坏，但也可以在主绝缘发生电缆故障之前，提前检测和修理铺设故障。

在很长的电缆系统上，用于定位击穿故障或间歇性电缆故障的测量方法选择非常有限。另一个技术限制是大量的屏蔽层断裂接头。Bawart 说，所有基于脉冲反射的测量方法都应该得到严肃看待。“在这些困难的前提条件下，差动衰变法 [Differential Decay Method] 具有成功进行电缆故障定位的最佳条件。”该测量方法可用于高达 110 kV 的测试电压。

差动衰变法需要健康的参考电缆，它始终存在于双极系统中。两个电缆系统同时用高压源充电，点燃电缆故障，测量图表自动记录。然后用另一张图表（其中有一个从后方进入的瞬态波）来确定故障距离。

其优点是，长度相关的电缆衰减和大量环形屏蔽层断裂接头对测量结果的影响都要小得多。测量图表易于评估，即使在特别长的电缆系统上也能实现高度准确的距离测量。

使用便携式和固定式解决方案防止高昂的损失

对长距离电缆的电缆故障定位，BAUR GmbH 提供多种方式。Bawart：“范围从便携式设备（例如我们的设备 shirla [Murray 和 Glaser 高压测量电桥] 与脉冲反射测试仪 IRG 4000 的组合）到专门配备的电缆测试车，再到保留在多处电缆室、因此无需进一步运输即可使用的移动测量控制柜。”Bawart 推荐后者作为电网的支柱，因为 Südlink、Südostlink 或 A-Nord 等电缆的故障不仅会削弱输电网的稳定性，还会限制电力运输，从而带来巨大的经济损失。



电缆室前的测量控制柜（左图）
控制柜操作室（右图）

来源：BAUR GmbH/Manfred Bawart

这位 BAUR 专家还建议连接到大型风电场的海底电缆运营商准备好快速可用的电缆故障定位解决方案，因为在电缆发生故障时，向风电场运营商支付的赔偿金是巨大的，所以电缆故障会变得非常昂贵。无论是地下还是海底电缆 - 在这两种情况下，Bawart 都建议进行精确的风险评估：“我们对电能的依赖正在增加，例如，由于电动汽车的增加，特别是由于能源转型的措施和影响。因此，对于与系统相关的输电线路，必须重新评估电缆故障带来的风险，而且比过去更加严格。”