

电力电缆故障测距综述

朱云华¹, 艾芊¹, 陆锋^{1,2}

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200030; 2. 上海市东供电公司电缆分公司, 上海 200122)

摘要: 随着大量电力电缆的投运, 相应的电缆故障率也随着使用年限等上升, 造成停电事故和巨大的经济损失, 为此快速修复故障成为迫切需要。但是由于电缆的敷设特性决定了需要对电缆故障性质进行了解。该文从多方面分析了造成电缆故障的原因, 然后按电缆材料、故障发生部位和基于行波理论测距方法分类做进一步深入研究, 并依故障测距的步骤着重介绍了当前电缆精确测距的方法和当前比较新颖的电缆故障在线检测及其相关讨论, 突出介绍了基于小波变换电缆故障测距。还介绍当前在电力系统中的电缆故障检测应用设备情况, 概括了当前国内设备同国外公司的差别, 对电缆故障测距的发展趋势做了一定程度的展望。

关键词: 电力电缆; 故障测距; 在线检测; 小波变换

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)14-0081-08

0 引言

伴随着我国城市化建设的脚步, 城市用地的紧张以及架空线的安全性问题促成了电力电缆在城市供电网中 110 kV 及其以下系统中应用日益广泛, 随着系统扩容等因素的冲击, 运行时间越久, 故障会越来越频繁。为了提高供电可靠性就必须以最短时间修复这些日益增多的电缆故障, 然而电力电缆是埋设于地下的特殊输电线路, 不便于直接观察发现故障点。如果不能及时查找出故障点的位置, 就没法修复, 造成长时间停电、停产, 带来巨大的经济损失, 同时也给人们生活带来不便。因而如何迅速准确的判定电力电缆故障点位置是及时修复电力电缆, 提高供电可靠性的前提保证。而如何选择故障测距方法是有待继续深入研究的课题。

1 造成电缆故障的原因

1) 电缆生产质量问题: 在我国, 常用的中低压电缆其生产技术是非常成熟的, 因此电缆的产品质量问题不存在设计及工艺问题, 主要是生产管理和市场管理问题。由于市场竞争激烈, 出现一些生产的成品电缆竟没有半导体层, 导体芯线易扭断等难以想象的质量问题。如果使用的电缆产品质量不符合标准, 存在有严重的偏心、气隙、杂质或损伤等缺陷, 那么这些先天性存在缺陷或不足的电缆, 一旦敷设使用后将造成致命的事故。这类问题在 80 年代中期国内制造的电缆产品上比较突出。

2) 电缆施工质量问题^[1]: 电缆在安装施工过程中, 没有严格按照有关电缆的安装要求施工, 主要是电缆外护套破损; 在环境潮气、湿度偏大的情况下, 没有采取必要的防范措施进行制作电缆头; 中间接头密封不良, 投入运行后使绝缘内部受到潮气、水份的侵蚀, 引起中间接头绝缘受潮劣化; 电缆中间接头导体连接管压接不良, 打磨不平整, 特别是在压接管口边缘处, 局部有尖角、毛刺; 中间接头设置不合理。

3) 电缆的管理问题^[2]: 一些单位让电缆长期过负荷运行, 电缆路径与热力管道交叉, 长期工作在有腐蚀性的环境中等, 这些都容易造成电缆的绝缘老化, 形成各种故障。

4) 外力破坏问题, 突出表现在三类: 一、机械开挖、人工打桩施工未经确认核对, 随意作业, 损坏电缆, 造成接地短路故障, 这类事故较为普遍, 占电缆故障的 40%; 二、安装、固定不牢固, 造成电缆错位、扯拉、摩擦、变形, 导致绝缘故障发生, 这类事故在移动设备上经常发生; 三、车辆碾压, 地面沉降, 造成电缆错位、扯拉、变形, 导致故障发生, 这类问题在直埋电缆上比较突出。

2 电缆故障的分类

由于电力电缆的种类较多, 结构组成不尽一致, 加上人们的工作属性和目的要求不同等原因, 使得电缆故障的分类方法较多, 这里简单归纳如下:

2.1 按电缆的组成材料分类^[3]

电缆主要由两大部分组成: 金属导体和绝缘体, 因此电缆故障可以分为两大类:

1) 导体故障(开路故障): 主要指芯线导体(铜

线、铝线)和金属屏蔽层(如铅包、铜带)所出现的故障。包括断线故障:电缆的芯线或金属屏蔽层在某一处或多处断开,在实际中,电缆被人为挖断、电缆被烧断、在电缆接头处的芯线或金属屏蔽层根本没有连接上、XLPE 电缆在生产过程中屏蔽层不连续等;还包括电缆的芯线或金属屏蔽层某处连接不当、接头芯线或屏蔽线处理不当所引发的故障。

2)绝缘故障:电缆的绝大多数故障都是由绝缘损伤或缺陷引起的,主要是泄漏性故障和闪络性故障。在电力电缆中,如规定电缆的额定电压为 U_m , 电缆绝缘介质的击穿电压为 U_s , 当给电缆加电压时,当电压加到某一数值 U_s 时,在 $U_m \leq U_s$ 条件下,电缆绝缘击穿,说明电缆存在故障,当降压后绝缘自行恢复,这种故障即为闪络性故障。而降压后绝缘性能不可恢复的则是泄漏性故障,包括泄漏性高阻故障和泄漏性低阻故障。

2.2 按电缆故障发生的部位分类

1)主绝缘故障:电缆的导体芯线与地或金属屏蔽层之间绝缘受损形成各种性质故障。一般来讲,35 kV 及以下等级电缆,其绝大多数故障属于此类故障。

2)护套故障:一般指电缆的金属护套层或绝缘护套受损形成的故障,实际中能够发现的是金属护套对大地之间绝缘护套的故障。此类故障以泄漏性故障居多。护套故障只在 66 kV 及以上高电压等级电缆才涉及到。

3)本体故障:完整的输电电缆由电缆本体和电缆接头两部分组成。因此电缆的故障肯定发生在电缆本体和电缆接头。电缆本体可以出现不同性质的故障,通常是由产品质量和外因损坏所引起。

4)接头故障:供电电缆必然包括终端接头,在故障修复后必然会有中间接头。通常电缆故障的相当一部分为接头故障,其表现性质各不相同。但多数是泄漏性高阻故障。

2.3 按基于行波反射理论故障测距分类^[2]

1)接地故障——电缆线芯单相接地故障或多相接地故障。

一般接地电阻在 100 kΩ 以下为低阻接地故障,100 kΩ 以上为高阻接地故障。

2)短路故障——电缆线芯两相短路故障或三相短路故障。

一般电阻在 100 kΩ 以下为低阻短路故障,100 kΩ 以上为高阻短路故障。

3)断线故障——电缆线芯一相断开或多相断

开。

4)闪络故障——在做高压直流试验时电缆接头内绝缘被击穿,然后绝缘强度又回复,总之电缆在一些特殊条件下,绝缘被击穿后又恢复正常的这一类电缆故障。

3 电缆故障测距的方法

一般电力电缆的故障测寻步骤主要分为以下四部分:(1)识别故障性质(类型);(2)选定测距仪器(方法);(3)故障点粗定位;(4)核对原始电缆资料故障点精确定位。本文以下部分主要介绍故障点粗测方法和故障点精确定位方法。

3.1 粗测距方法

1)经典电桥法^[2]:将被测电缆故障相与非故障相短接,电桥两臂分别接故障相与非故障相,调节电桥两臂上的一个可调电阻器,使电桥平衡,利用比例关系和已知的电缆长度就能得出故障距离。用低压电桥测电缆低阻击穿,用电容电桥测电缆开路断线。电桥法测量结果精确,但需要完好芯线做回路,电源电压不能加得太高。

2)驻波法:根据微法传输原理,利用传输线路的驻波谐振现象,对故障电缆进行测距,本法适用于测低阻及开路故障。

3)高压脉冲法:利用传输线的特性阻抗发生变化时的回波现象,在电缆芯线中加上一定电压,使其不烧穿而产生放电。放电脉冲在电缆中传播及反射,用数字示波器(或手提笔记本电脑虚拟示波器)测出反射脉冲的位置比例,算出故障点的位置。本法适用于高阻击穿。本法适用于各种故障,但操作人员的安全受威胁,波形较难辨别。

4)低压脉冲法:对低阻击穿、短路、开路故障,可在电缆芯线上施加脉冲讯号。讯号在电缆传播及反射,用数字示波器或手提笔记本电脑虚拟示波器等测出脉冲波形而算出故障点的位置。低压脉冲反射法的优点是简单、直观,不需要详细的电缆原始资料,还可以根据反射脉冲的极性分辨故障类型。缺点是不能用于测量高阻与闪络故障。

5)故障点烧穿法:故障点烧穿法应用于高阻故障,设备通过输入直流负高压,对高阻故障点进行处理,使故障点产生电弧放电并碳化绝缘介质,碳化连接点是低电阻的,使高阻故障变成低阻故障。再应用低压脉冲法就可以测出。故障点烧穿法主要用于油纸绝缘电缆。

6)闪络法^[2]:利用故障点瞬间放电产生多次反

射波。故障点的放电是在高电压作用下进行的。其中包括直流高压闪络测量法(直闪法),主要用于测量电缆的闪络性高阻故障;还包括冲击高压闪络测量法(冲闪法),主要用于测量电缆的泄漏性故障。相比之下,直闪法的波形简单、容易理解,准确度高;冲闪法的波形比较复杂,辨别难度较大,准确度较低,但是适用范围要更广一些。

7) 二次脉冲法^[4]:是一种较新的测距方法,其原理:对故障电缆释放一个低压脉冲(不大于20~160 V),只要故障点的接地电阻大于电缆波阻抗5倍,可以认为此时故障电缆相对于低压脉冲是开路,那么在脉冲释放端接收到的反射波形相当于一个芯线绝缘良好电缆的波形;对故障电缆释放一个足以使芯线绝缘故障点发生闪络的高压脉冲,同时触发释放第二个低压脉冲,在故障点的电弧未熄灭时,故障点相对于低压脉冲是完全短路,那么在脉冲释放端接收到的低压脉冲反射波形相当于一个线芯对地完全短路的波形;将前后两次接收到的低压脉冲反射波形进行叠加,两个波形将会有有一个明显的发散点,这个发散点就是故障点的反射波形点。其特点是易操作、多功能,回波图形解释简易。

综合上面所介绍的关于各种粗测距的方法,可以得出如下表1所列出的测距方法适应故障性质。

表1 故障测距方法一览

Tab.1 Faults localization

故障测距方法		故障性质
经典电桥法	低压电桥	低阻故障
	电容电桥	断线故障
驻波法		低阻及开路故障
脉冲法	低压脉冲法	低阻击穿、短路、开路故障
	高压脉冲法	高阻击穿故障
闪络法	直闪法	闪络性高阻故障
	冲闪法	泄漏性高阻及低阻故障
故障点烧穿法		高阻故障
二次脉冲法		各类故障

3.2 精确测距

在粗测距离的基础上,精确地确定故障点所在实际位置,以便立即进行检修。目前精确定位的方法包括冲击放电声测法、音频法及声磁传播时间测量法。

1) 声测法(含声磁同步法)

冲击放电声测法目前在国内是最常用的定点方法,实践证明它是十分有效的。在故障测寻过程中,给故障电缆加上一个幅度足够高的冲击电压,故障

点发生闪络放电的同时,还会产生相当大的放电声,这种声音可传至地表面,利用这种现象来定点可以准确地找出故障点。定位仪的原理是采用高灵敏度的声电转换器将地面微弱的地振波变成电信号,然后用晶体管放大器将此电信号进行足够的放大,再用耳机还原成声音^[5,6]。在实际测距中,往往由于环境噪声的干扰而增加辨别的困难。故障点放电时,除产生声波外,还会产生高频电磁波向地面辐射。声磁同步法是声测法的改进,就是利用电磁波和声波的接收能否同步来判断故障放电。如听到地振波的同时,又显示出故障点放电电磁波的存在,证明放电声波正在工作,只要地振波信号和电磁波能同步起来,则说明听到的地振波是可信的,故障点就在附近。

2) 音频法

当电缆发生相-相短路、相-地短路及三相-地短路时,由于电缆故障点电阻值等于零,放电间隙被短路,采用冲击放电声测法是往往因故障点短路,在故障点听不到放电声,无法定点。此时使用音频法可收到预期的效果。音频法是基于电缆两芯线里流动的电流产生的磁通的相位差和故障点前后磁通变化的规律性而发展起来的。用音频法确定电缆各种类型的短路故障时,必须具备音频信号发生器、匹配变压器、探测线圈、高灵敏度的音频接收机和耳机(或指示仪)。这种方法对于低于100 Ω的故障电阻,一般能成功测定故障点。然而在现场应用音频法感应接收定点也不容易,因为合成电磁场的幅度、相角与故障电阻的大小有关,与故障点前后的电缆长度有关,也与所用的信号频率有关,而且电缆实际出现两芯线间纯短路的机会很小。

前面介绍的两种方法都是依靠判别声波或电磁波信号是否最强来判断故障点,但在实际测量中,究竟哪一点的信号最强并不是很明显的,特别是有时电缆的外护套未完全击穿,声波在整条电缆的介质中漫发射,于是很大范围内接收到的信号强度差别不大。遇到电缆故障在穿管中时,接收到声音信号最强的地方是管道端头,而非故障点。

3) 声磁传播时间测量法

所谓声磁传播时间测量法^[5,6],就是在冲击脉冲放电的同时,沿电缆敷设路径的地面,取某一测量点,根据声波在介质的传播速度及声波从故障点传到测量点的时间计算出该点到故障点的距离。因为声波的传播时间无法单独测量,而电磁波的波速等于光速,电磁波的传播时间接近于零,所以实际应用

声波和电磁波的传播实际差代替声波的传播时间。接收仪器在接收到电磁波时启动计时,在接收到声波时停止计时,得到的时间即为声磁传播时间差,然后根据式(1)可计算出该点距故障点的距离。

$$S = V_{\text{声}} \cdot T_{\text{声}} \approx V_{\text{声}} \cdot (T_{\text{声}} - T_{\text{电磁}}) \quad (1)$$

声磁传播时间测量法是目前最理想的精确定位方法。就算不用耳机,仅凭仪器上的信号灯及指针的工作就可以得到所需的数据,免除听觉判断上的误差,特别对于在环境噪声很大及电缆故障点恰好在穿管内部的情况,传播时间测量法有着无可比拟的优点。在传播时间测量法中应注意的问题^[6]是:

(1) 为保证收到真正的放电声波,拾音频率应调至 100 ~ 400 Hz, 否则如果频率调节不当,大量的噪声波会被接收到。同时要将音频增益尽量调小,过滤环境噪声。

(2) 为配合传播时间测量法,必须有合适强度和稳定频率的冲击放电脉冲。

4 当前发展的在线监测(小波变换,神经网络,专家系统)

4.1 小波变换在电力电缆故障测距中的应用

小波变换在时域、频域同时具有良好的局部化特性,对信号的奇异点非常敏感,适用于时变的非平稳信号的检测与分析^[7-9]。电力电缆故障测距关键是暂态故障特征的提取。

文献[10]提出了小波变换在电力系统故障暂态分析以故障定位方面的应用,体现在其提出了两种在当前对端线路的通讯流程基础上解决故障测距的方法:双端同步检测和单端检测。文中提出的方法不受故障阻抗限制,且适用于象串联补偿电路一样的双端耦合塔式结构。该方法的测距误差和记录故障暂态的采样时间有关。以下部分是根据文献[10]提出的双端同步检测和单端检测进行分类讨论。

4.1.1 双端同步检测^[10-13]

故障信号在线路两端通过参考 GPS 同步校时的两个独立通道记录。所记录的波形将被转换为模式信号,随后用相应的小波变换来分析这些模式信号。设 t_A 和 t_B 分别对应于在尺度 1 中这些模式信号小波变换系数下的时间,即在 A、B 两端分别记录的信号第一波峰到达的时间。假设在两端记录的信号是完全同步的,取故障诊断期间信号抵达两端的时差 $\Delta t = t_B - t_A$,那么故障点距离 A 端的距离可用式(2)计算, l 表示电缆线路长度, x 表示故障点距离 A

端的长度, v 表示电缆中的行波速度。

$$x = \frac{l - v \cdot \Delta t}{2} \quad (2)$$

文献[14]提出了一种改进的电缆故障测距方法,该方法主要是基于同步采样技术、小波变换分析和行波理论,并对一个 400 kV 的地下电缆系统进行仿真和评估。定位系统分成同步采样、小波分析、故障行波到达时间检测和故障距离计算四部分。同步采样得来的数据经过两个小波分析过程,从而更容易识别故障行波的到达时间。仿真研究表明,除了在故障离电缆两端非常接近的情况外,故障误差沿电缆呈对称分布,而且与故障类型无关。故障点离电缆两端越远,测距结果越准确。缺点是,在距离电缆两端很近的单相接地故障中,测距误差较大。

文献[15]提出行波到达时间由行波中被分析频带信号强度最大的位置所确定,而行波传播速度由被分析频带的中心频率及线路结构参数所决定。由行波到达线路两端的时间差即可确定出故障位置。由此,提出利用小波变换实现行波故障测距的 2 种可行方案:

方案(1) 选择一个受故障距离等因素影响较小的频带范围作为合适的分析频带,而分析这个频带所用小波的尺度认为是合适尺度。不论故障位置如何,仅在所选尺度下分析行波信号,然后由所选尺度确定的行波中相应线模频带信号到达线路两端的时间及相应速度,利用双端测距式(3)来实现测距。

$$l_1 = \frac{l - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (3)$$

式中: l 为线路长度; l_1 和 $l_2 (= l - l_1)$ 分别为故障点到两端的距离; t_1 和 t_2 分别为行波到达线路两端时间; v 为行波传播速度。

方案(2) 故障行波中的主频分量(能量占主要部分的频率分量)范围反比于故障位置且和故障类型有关。故障距离近时,行波传播高频分量衰减小,相应主频分量较高,应选择小尺度下的小波变换结果作为行波到达时间判据,同时选择小尺度对应的速度;故障距离远时,行波传播高频分量衰减大,相应主频分量降低,选择大尺度下的小波变换结果作为行波到达时间判据,并选取大尺度对应的速度。这样若故障行波到达线路两端母线的传播距离相差较大,可选择各自的合适尺度与相应的速度用式(4)来测距。

设行波线模某一频段信号以速度 v_1 传播距离 l_1 后到达母线端时间为 t_1 ,行波中另一频段信号以

速度 v_2 传播 $l_2 (=l-l_1)$ 距离后到达另一端母线时间为 t_2 , 其中 l 为线路长度, 则有

$$l_1 = \frac{v_1 v_2 (t_1 - t_2) + v_1 l}{v_1 + v_2} \quad (4)$$

方案(1) 实施起来相对容易, 若对同一类线路结构, 选择 1 个合适分析尺度, 精度能保证, 效果会较好。方案(2) 实施起来较复杂, 但其适用范围广, 精度相对高一些。

文献[16] 提出了将小波分析用于电缆故障测距的算法, 此法是在脉冲电流测距法的基础上, 引入小波分析, 把录波数据进行 3 尺度小波分解与重构, 再对重构信号进行 5 尺度小波分解, 利用小波变换的边缘信号检测分析, 小波变换的模极大值与信号的突变点是一一对应的。一般来讲, 函数在某一点的 Lipschitz 指数 α 表征了该点的奇异性大小。 α 越大, 该点的光滑度越高; α 越小, 该点的奇异性越大。如果 α 是正的, 当尺度增加时, 小波变换模极大值也相应增加; 当 α 为负时, 小波变换模极大值随尺度的增加应当减小; 当 α 为 0 时, 小波变换模极大值不随尺度变化。利用小波变换模极大值在小波分解各尺度之间的传播特性, 可以精确定位信号波形的奇异点或突变点。这样在各分解尺度上检测模极大值, 以确定放电脉冲和反射脉冲的起始点 K_1 和 K_2 , 然后利用下式(5) 来确定故障距离, 式中 K_1 和 K_2 离散采样点, F_s 指采样频率, v 是脉冲传播速度

$$l_f = \frac{v(K_2 - K_1)}{2F_s} \quad (5)$$

4.1.2 单端测距^[10-13]

不需要远端同步, 仅依靠故障检测时在一端记录的信号, 所有的时间测量都是基于故障被发现的瞬间: 因此, 故障测距计算将基于行波从故障点的反射时间。然而对接地性故障, 不仅有来自故障点的反射波, 在测量端还可以观察到远端来的反射波。因此需要合适的方法来区分是近端故障还是远端故障, 特别是那些有可能产生相似类型反射的接地故障。以下按非接地性故障和接地性故障进行讨论。

(1) 非接地性故障: 通过长期观察, 发现两相短路和非接地三相故障等在故障暂态期间并没有在远端母线处引起明显的发射波。因此, 通过测量所记录信号在尺度 1 下的小波变换系数的两个连续波峰间的时差, 可以通过下式计算出故障距离:

$$l_f = \frac{v\Delta t}{2} \quad (6)$$

式中: l_f 表示故障距离, v 行波速度, Δt 表示相应小波变换系数最初两个连续波峰之间的时差。

(2) 接地故障: 针对这类故障, 测量端接收到的信号不仅包含来自故障点的反射波, 还包括对端母线处明显的反射波。如果故障点离测量端近, 那来自对端母线处的反射波将比来自故障点的晚, 反之如果故障点离对端近, 则来自对端母线处的反射波将比来自故障点的早。前面一种情况在接地模式的 1 尺度小波变换系数有明显的峰值, 后者在设定阈值下没有明显峰值。因此, 首先需要通过接地模式信号在 2 尺度小波变换系统确定故障是否为接地故障。如果相应的小波系数是显著的, 那么就是接地故障。接下来通过观察接地模式信号 1 尺度小波变换系数, 如果系数不显著, 则表示故障点离对端近, 反之则离测量端近。如果确定故障在近端线路, 式(6) 中的 Δt 表示架空模式信号在 1 尺度小波变换系数最初两个峰值之间的时间间隔。如果确定故障点在对端线路, 式(6) 中的 Δt 相应为

$$\Delta t = 2\tau - t_x$$

式中: τ 表示行波在整个线路长度传播的时间, t_x 表示架空模式信号在 1 尺度小波变换系数最初两个峰值之间的时间间隔。

文献[17] 提出利用小波变换的单端行波测距的新方法, 可有效提取输电线路故障行波特征并消除行波色散对定位精度的影响, 同时解决了如何定义行波到达时间和选取行波传播速度的问题, 并通过大量测距结果证实, 采用小波变换技术的单端行波测距的测距结果在可靠性和测距精度上都有很大提高, 在单端行波测距法能够使用的条件下, 测距精度能够满足现场对精确故障定位的要求。文献[18] 提出了仅从暂态电流估计故障点的单端行波故障定位方法, 是基于在高压输电线上传播的行波特性, 这些行波是由故障、开关动作或雷击产生的。这种方法的唯一性在于可通过暂态电流推算出叠加的暂态电压, 而不需要借助电压传感器的测量。当确定了暂态电流和电压就可以计算故障与变电站的反射波, 从二者的互相关性中确定故障位置。这种方法是可确定 500 米范围内的故障点, 但有时也不能得到确切的故障点, 基于此, 文献[19] 提出了对上述单端行波故障定位方法的改进, 将故障暂态转换为不同尺度解的小波, 通过比较这些小波尺度下结果可以清晰发现故障点。

4.2 人工神经网络系统

人工神经网络(ANN) 是以计算机网络系统模

拟生物神经网络的智能计算系统。网络上的每个结点相当于一个神经元,经可以记忆(存储)、处理一定的信息,并与其它结点并行工作。求解一个问题是向人工神经网络的某些结点输入信息,各结点处理后向其它结点输出,其它结点接受并处理后再输出,直到整个神经网络工作完毕,输出最后结果。文献[20]提出一种新的基于人工神经网络的地下电缆线路的故障定位技术。在系统故障期间,输电线路各种不同地点的一系列的测量电压电流作为样本用到专门训练的神经网络(NN)中。这个样本被拿来同训练样本(案例)库相比较以识别故障位置。该神经网络的输出是以简单的三维图形显示的,这可以就故障位置给操作员一个即时的指示,并讨论了两类典型的配电系统的采样结果和人工神经网络分析的敏感度。

4.3 实时专家系统

专家系统就是一个具有智能特点的计算机程序,它的智能化主要表现为能够在特定的领域内模仿人类专家思维来求解复杂问题。因此,专家系统必须包含领域专家的大量知识,拥有类似人类专家思维的推理能力,并能用这些知识来解决实际问题。文献[21,22]均提出电缆故障测距专家系统将专家知识库作为电脑的基本数据库,用一套规则来维护和更新该数据库。知识库可以从以往的故障事件中提取,并可以在实际应用中修改。文献[23]提出基于继电保护的专家系统,并且不需要中断电缆的供电。这套系统带有专门的C语言集成诊断以确定故障类型,母线上的双向行波传播有助于通过电流的有效值以进行故障定位。文献都采用的是电流脉冲法。

5 当前针对相应故障的硬件设备的情况介绍

当前国内不少供电部门所使用的电缆故障测距设备是分散式的,这些分散式测距设备主要存在以下问题:(1)设备接线既不方便又花时间;(2)对冲击电压无法准确调整;(3)安全性不好掌握;(4)操作现场设备噪音大;(5)波形复杂,难于分析。造成以上问题的主要原因设备本身不够紧凑,操作现场不够科学化,而且最重要的是传统的定位方法不够先进,这样就难以做到快速、简便、准确地对电缆进行抢修。

除因外力破坏因素引起的故障有迹可寻外,其它的故障所在无从知道,只有靠仪器测寻,如果测寻方法应用不当,引起故障点误判或迟迟找不到故障点,直接带来的经济损失及社会影响都会很大,精确定点是否准确尤为重要,在经济条件允许的情况下尽量配置能应用原理先进的探测方法的进口设备。目前在高压电缆故障定位方面比较突出的德国的Seba公司,奥地利的Baur公司等的产品已经赢得国内不少供电部门的青睐。如Baur公司的回波测量仪IRG90、IRG300,电缆故障定点仪UL8^[5],电缆识别系统KSG80,故障定位测量桥DMB5等以及将这些设备集成的便携式电缆故障定位系统SYSCOMPACT-S90/S300是采用Windows2000操作系统下的,操作数据可以传输、存储以及打印,且软件设计比较人性化,设备小巧、方便、数字化,并且精确定点的距离直接在仪器上数值显示。国外提供仪器设备,国内配IVECO车组成电缆测距车,已在国内最早引进这套系统的宝钢和广州供电局成功应用。当然,目前国产设备的预定位技术在脉冲法及闪络法方面也比较成熟,由有经验的探测人员操作亦可有较高的效率。

6 结束语

本文对电力电缆的故障测距方法进行综述、分析,得出电力电缆的离线故障测距已经发展相当成熟,对低阻故障和金属短路故障,采用电桥法和脉冲法可以找到故障点;对高阻故障和闪络性故障采用闪络法和二次脉冲法探测效果较好,但闪络法和二次脉冲法预定位主要靠电子仪器测量得到的波形来分析判断,而测量结果的准确度与故障性质、电缆资料、测距方法及波形分析、实地丈量等因素有很大关系,必定有一定误差,有时误差还会很大。但这些毕竟是离线测距,必然导致供电中断和花费较长的故障抢修时间。就目前发展的在线监测分析,主要包含小波变换分析、神经网络和专家系统等,能够满足精度要求,但是在电缆故障测距方面的应用目前还不成熟,且非实时动态的!因此在线监测及全自动测距是电缆故障测距的发展趋势,这包括对电缆状态及运行时出故障的自动定位测距将电缆的地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)联合应用,实现实时、动态的监测测距。

参考文献:

- [1] 戴静旭. 高压电缆故障原因分析及对策措施[A]. 全国第七次电力电缆运行经验交流会论文集. 2004.
DAI Jing-xu. High Voltage Power Cable Fault Cause Analysis and Its Resolution[A]. Proceedings the Seventh National Power Cable Operation Experience Communication Conference. 2004.
- [2] 刘明生. 电力电缆故障的测寻[M]. 北京:冶金工业出版社,1985.
LIU Ming-sheng. Test and Location of Power Cable Fault[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,1985.
- [3] 韩伯锋. 电力电缆故障性质分析[A]. 全国第七次电力电缆运行经验交流会论文集. 2004.
HAN Bo-feng. Analysis of Power Cable Fault Property[A]. Proceedings of the Seventh National Power Cable Operation Experience Communication Conference. 2004.
- [4] Reiman I G. BAUR 故障定位技术讲稿[Z].
Reiman I G. BAUR Fault Location Technology[Z].
- [5] 奥地利 BAUR 公司 UL8 精确定点系统操作手册[Z].
BAUR Co. Operation Manual of UL8 Accurate Fault-point Location System[Z].
- [6] 潘华. 电力电缆故障点精确定位方法及其应用[A]. 全国第六次电力电缆运行经验交流会论文集. 2000
PAN Hua. Power Cable Fault Point Location Precision and Application[A]. Proceedings of the Sixth National Power Cable Operation Experience Communication Conference. 2000.
- [7] Boggess A, Narcowich F J. A First Course in Wavelet with Fourier Analysis[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2004.
- [8] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [9] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10):45-48.
HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. Mother Wavelet Option Method in the Transient Signal Analysis of Electric Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10):45-48.
- [10] Magnago F H, Abur A. Fault Location Using Wavelets[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4).
- [11] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.
GE Yao-zhong. Theory and Techniques of New Type of Relay Protection and Fault Location[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [12] 徐丙垠, 李京, 陈平. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23):62-65.
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping. Modern Fault Location Techniques Based on Fault Generated Traveling Wave and Their Applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [13] 林湘宁, 刘沛, 李世明. 基于故障电流暂态分量的测距研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23):45-50.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LI Shi-ming. Studies on Fault Location of Fault-induced Transient Component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23):45-50.
- [14] Zhao W, Song W, Chen R. Improved GPS Travelling Wave Fault Locator for Power Cables by Using Wavelet Analysis[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001.
- [15] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8):6-10.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. A New Double Terminal of Travelling Wave Fault Location Using Wavelet Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8):6-10.
- [16] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1):49-52.
ZHANG Zheng-tuan, WEN Feng, XU Bing-yin. Wavelet Analysis Based Power Cable Fault Location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1):49-52.
- [17] 覃剑, 彭莉萍, 王和春. 基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19):62-65.
QIN Jian, PENG Li-ping, WANG He-chun. Single Terminal Methods of Traveling Wave Fault Location in Transmission Line Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19):62-65.
- [18] Thomas D W P, Christopoulos C, Tang Y, et al. Validation of a Novel Unit Protection Scheme Based on Superimposed Fault Currents[A]. IEE 7th International Conference on Developments in Power Systems Protection. 2001.
- [19] Thomas D W P, Christopoulos C, Tang Y, et al. Single Ended Travelling Wave Fault Location Scheme Based on Wavelet Analysis[A]. Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. 2004. 196-199.
- [20] Glinkowski M T, Wang N C. A New Fault Location Technique for Underground Distribution Circuits Using Arti-

- cial Neural Network [A]. Proceedings of the American Power Conference on Illinois Institute of Technology. 1995. 716-719.
- [21] Kuan K K. Real-time Expert System for Fault Location on High Voltage Underground Distribution Cables [J]. IEE Proceedings - C, 1992, 139(3):235-240.
- [22] Steiner J P, Weeks W L, Ng H W. An Automated Fault Location System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(2):967-978.
- [23] Kim C H, Chung W G, Shin M C. A Study on the Expert System for Fault Location Estimation in Underground Cable [J]. IEEE Energy Management and Power Delivery,

1995, 1(23):67-72.

收稿日期: 2006-01-09; 修回日期: 2006-02-27

作者简介:

朱云华(1981-),男,硕士研究生,从事电力系统电能质量与故障定位研究;E-mail:yunlai19810633@sjtu.edu.cn

艾 芊(1969-),男,副教授,主要从事电力系统辨识、电能质量和故障定位等研究;

陆 锋(1975-),男,工程师,主要从事电力电缆故障检测与定位研究。

Survey of power cable fault location

ZHU Yun-hua¹, AI Qian¹, LU Feng^{1,2}

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Cable Branch, Shanghai City-east Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: As a great number of power cables are in operation, corresponding fault ratio about these cables increases along with the time they serve and other reasons, which inevitably bring about power outage and tremendous economic loss. Consequently, it is urgent to eliminate the faults as quick as possible. However, it needs to comprehend the property of cables' faults because of the lay-out characteristics of cables. The causes of cables' faults are analyzed from different aspects, and a further study is also introduced about the types of faults depending on cable materials, the location where the fault occurs and measurements based on the traveling wave theory. Meanwhile, some up-to-date on-line detection techniques and the precise methods according to location processes of cable fault localization are mainly discussed, especially the location methods based on the wavelet transform. Equipments applied in power cable fault location as well as the difference between civil apparatus and foreign counterparts are discussed. At last, this paper presents its prospect about the tendency of the power cable fault location.

This project is supported by Grand Project National Natural Science Foundation of China(No. G50595412).

Key words: power cable; fault location; on-line detection; wavelet transform

(上接第 74 页 continued from page 74)

Neural network control of AC/DC switching converters

MENG Xin-yuan¹, YAO Yong-gang¹, LI Xiao-yuan²

(1. Dep of Automatic Control, Henan Electrical and Mechanical College, Xinxiang 453002, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: AC/DC switching converters are highly nonlinearized. Therefore, a non-sinusoidal current is drawn with a very low power factor. To correct the power factor, this paper researches the controlling effects of neural network controller (NNC). And comparisons are made between the simulation results of the NNC and those of the traditionally used current mode controller (CMC). The results demonstrate that using NNC could achieve high power factor. The NNC performs better with parameter variations compared to the CMC. The fault tolerance capability of the NNC shows excellent results.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Henan Province(No. 0511011900)

Key words: neural network controller (NNC); AC/DC switching converter; power factor corrections; fault tolerance capability