

XLPE 电缆交叉互联系统接地直流电流在线监测

叶冠豪, 郭湘奇, 王一磊, 邓鹏
(南京供电公司, 江苏南京 210019)

摘要:针对交联聚丙烯(XLPE)电缆交叉互联系统水树枝情况,采用直流分量法,对交叉互联标准单元进行分析和计算其等值电路,定量研究了两端接地电流中由于水树枝引起的微弱直流电流分量的大小相关因素。通过设计电流采样模块与低通滤波模块,实现了微弱直流电流分量的采样与滤波,实际测量结果说明说明了该方法与设计模块的合理性。

关键词:在线监测;直流分量法;水树枝;交叉互联

中图分类号:TM247;TM401.1

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)03-0039-03

近年来,交联聚乙烯(XLPE)电力电缆凭借其受自然环境影响小、安全可靠、耐热好、寿命长、不易损坏和供电能力强等优点在电力系统得到了广泛应用^[1]。电缆绝缘老化有诸多形式,其中水树枝老化是导致XLPE电力电缆绝缘击穿停电的主要原因,带来了巨大的经济损失^[2]。关于水树枝形成机理,业界一般认为,XLPE电力电缆运行时,水存在于绝缘层中,当此处场强超过一定值时,导电物质就会沿着电场慢慢进入电缆绝缘层的深处形成类似树枝或树叶的泄痕,即水树枝^[3,4]。但关于水树枝的具体形成原因仍未产生定论。针对XLPE电力电缆运行中水树枝问题,需要进行监测,以尽早发现问题,减少事故的发生。我国对电力系统中运行设备一直坚持定期进行绝缘预防性试验的制度,这对保证设备安全可靠运行、防止事故的发生起到了很好的作用^[5,6]。但是,传统的常规试验间隔时间长,不易及时发现设备绝缘缺陷。试验时必需设置临时试验线路,费工费时,且停电试验还要造成一定的经济损失。因此,对电力电缆绝缘进行在线监测势在必行。在线监测可以有效掌握电力设备的绝缘变化情况,主动改善电力设备绝缘水平,对电力系统安全、经济、高效运行非常重要。

针对电力电缆水树枝的在线监测,直流分量法是一种应用较为广泛的方法^[7]。该方法根据水树枝在交流正、负半周会表现出不同的电荷注入和中和特性,导致长时间交流工作电压下,水树枝的前端积聚了大量的负电荷,并逐渐向对方漂移,这种现象称为“整流效应”。相应的,电缆接地电流便含有微弱的直流成分,检测出这种直流成分即可进行劣化诊断^[8]。

随着我国电力电缆进程的不断推进,越来越多长度超过1 km的电缆线路得到了投运。为了解决屏蔽层中感应电压过高的问题,需要对中间接头采用交叉互联的方式接地。但因其各段流经主绝缘的电流值的特征量难以测量,给绝缘在线监测增大了难度^[9,10]。以

中间接头为代表的电缆附件往往是电缆运行时的薄弱环节,产生水树枝的可能性更大^[11]。文中通过对交叉互联箱进行等值电路分析,根据基尔霍夫定律进行电压方程推导,得出在两端对应接地线路中采样电阻阻值相同时,直流分量大小相同的结论。并通过选择合适的滤波及采样装置,设计出针对交叉互联装置接地电路中微弱直流电流的在线监测系统。

1 交叉互联 XLPE 电力电缆接地电流直流分量的模型与分析

图1为交叉互联的接地方式的一个标准单元。图中A、B、C为系统相序,a1、a2、a3、b1、b2、b3、c1、c2、c3分别为各相电缆所对应的中间接头交叉互联段,1-12为交叉互联的金属屏蔽层连接线之间以及接地线上设置的电流传感器编号。其中,将采样装置接于接地线中,并用阻容并联装置等效。

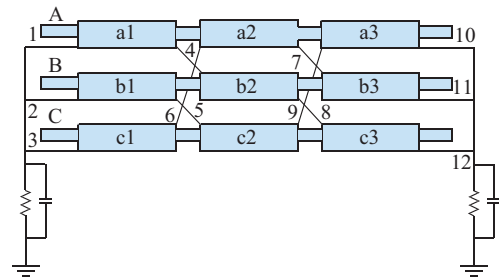


图1 交叉互联 XLPE 电缆的一个标准单元的接线

对该电路a1、b2、c3段进行戴维宁等效,得出等效电路如图2所示。

根据图2所示等值电路,分析 I_1, I_2, I_3, I_4 与绝缘阻抗及采样电阻的关系。其中,交叉互联电阻箱与电缆外护套阻值远远小于接地采样电阻及电缆本体绝缘电阻阻值,可忽略。近似处理后得出回路电压方程:

$$\begin{cases} U_a = Z_a I_{a1} + R I_1 \\ U_b = Z_b I_{b2} + R I_1 \\ U_c = Z_c I_{c3} + R I_4 \\ R I_1 - R I_4 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

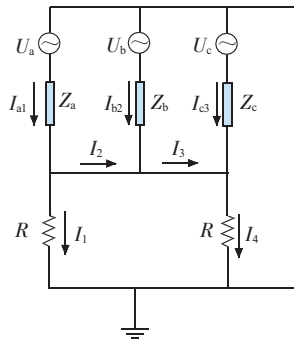


图2 交叉互联电缆标准单元接线中 a1、b2、c3 等值电路

可以看出,若 a_1 与 c_3 两端接地采样电阻阻值 R 相同,有:

$$I_1 = I_4 \quad (2)$$

这样,可以通过在两端同时设置参数相同的接地采样电路,并计算采样电流算数平均值,以减少试验误差。同时, I_1 及 I_4 同 a_1 、 b_2 、 c_3 的阻抗均存在耦合关系,即 a_1 、 b_2 、 c_3 中任意一处存在水树枝时,均可通过在线监测系统发现。

2 XLPE 电缆交叉互联在线监测系统方案设计

文中设计的监测系统包含电流采样、低通滤波以及监测装置 3 个部分。考虑到水树枝产生的直流电流非常微弱,基本上都是纳安级别,微小的干扰即会引起测量结果较大的误差^[12]。首先需要通过电流采样装置采集接地电流信号,并将信号放大。现场发现,对在线监测的主要干扰不仅有高达几十伏的工频电压噪声,还有电缆的屏蔽层和大地之间的杂散电流,此外监测系统本身也可能引入大量的干扰信号。所以将信号采样后需要通过设计合理的低通滤波模块将噪声和干扰信号等滤掉,保留水树枝产生的直流电流分量。最后,通过监测装置模块对滤波后的电流信号进行采集并分析处理。整体流程如图 3 所示。

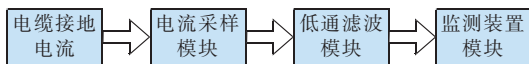


图3 在线监测系统整体流程

2.1 电流采样模块设计

由于水树枝产生的直流分量很小,需要将微弱的小信号通过采样电路放大,文中采用精密电阻采样法。该方法通过在接地回路中串入精密电阻,将直流电流转化为电压信号,再对电压信号滤波后进行采集。该方法采样结果稳定,且不会产生其他干扰源。考虑到电缆和大地之间杂散电流及真实的由水树枝引起的电流混杂在一起,会对检测结果造成很大误差,因此需要与精密电阻并联电容,将高频交流分量通过电容器进行分流,以减少对采样直流电流分量的干扰。

对比常见的阻容并联采样模块后发现,在电阻的选择上,一般采样电阻不能太小,否则不能很好放大微弱的直流电流分量,但同时需小于铠装和地之间的外护层电阻,这样对真实的测量结果影响较小^[13]。在现场进行外护层绝缘摇表试验时发现,一般外护层绝缘电阻值在正常运行时均保持在 $1 \text{ G}\Omega$ 以上,因此文中考虑采用 $500 \text{ k}\Omega$ 的精密电阻,这样可以实现微弱直流电流的有效放大,同时小于外护套阻值,造成的误差较小。在电容的选择上,目前电容种类众多,如电解电容、云母电容、聚丙烯电容、瓷片电容以及安规电容等。考虑水树枝产生的电流很微弱,应该选取耐压高、漏电流小的电容,而聚丙烯电容和安规电容这方面参数良好。综合考虑后,文中在采样模块中采用 $500 \text{ k}\Omega$ 精密电阻与一个无极性的安规电容并联,实现对微弱的直流电流采样。

2.2 低通滤波模块设计

经过采样模块后,已经将水树枝引起的直流电流信号转变为毫伏级的直流电压信号,此时仍存在由工频信号和热噪声高斯白噪声等频率为兆赫兹级高频噪声组成的干扰信号。尤其是工频干扰信号,经过采样电阻后电压高达几十伏。因此必须设计低通滤波系统,滤掉直流信号外的交流干扰信号。

常见的低通滤波器为阻容无源滤波器,以及巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器和贝塞尔滤波器等为代表的有源滤波器。为了简化滤波器模块设计,提高装置可靠性与实用性,文中利用已经成熟的低通开关电容滤波器 MAX293 电路,该电路是由美国的 MAXIM(美信)公司开发生产的 8 阶低通开关电容滤波器。MAX293 滤波器使用方便,同无源滤波器和有源滤波器相比,它具有参数匹配简单、外接元件少以及灵活简便的设计等优点。当现场信号不同时,可以根据实际需要调整滤波电路设计和调整。

封装上,MAX293 采用了 8 引脚双列插式的封装形式。内部电路设计上,该芯片属于切比雪夫型滤波器,衰减值所需过渡带小。时钟信号选择上也非常方便,既可以使用片内的振荡器来产生时钟,也可以选择外部的时钟信号。其中通过使用片内的振荡器,只需外接一个漏电小、无极性的高质量电容就可以产生时钟信号。振荡频率由该电容的容值决定,计算公式为:

$$f_{\text{osc}} \approx \frac{10^5}{3C_{\text{osc}}} \quad (3)$$

式中: f_{osc} 为振荡频率, kHz; C_{osc} 为外接电容, pF。转角频率与时钟频率也有一定的关系,两者的比率公式为:

$$f_{\text{osc}} = 100f_0 \quad (4)$$

其中, f_0 为转角频率。设计 MAX293 滤波器,首先要计算出时钟频率以及外接电容,之后便可以利用时钟频

率调节转角频率。具体滤波电路接线如图 4 所示。

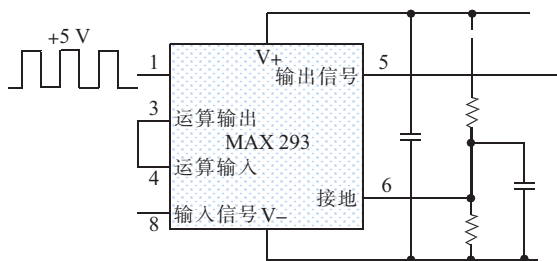


图 4 MAX293 滤波电路设计

在文中设计的在线监测系统中,需要得到直流电压,所以理论上可以将 0 Hz 以上的信号都过滤掉。首先选取 4 Hz 作为 MAX293 电路的截止频率。经过计算可知时钟频率大约为 400 Hz,此时外接电容 C 约为 $0.083 \mu\text{F}$,在实际中相应适当取 $0.1 \mu\text{F}$ 电容。

将电流采样模块、低通滤波模块以及监测装置相组合,形成完整的在线监测系统。原理如图 5 所示。

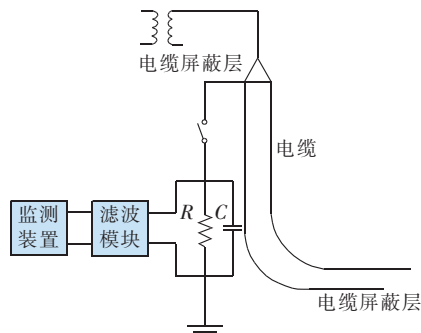


图 5 基于直流分量法的在线监测系统

3 现场试验分析

试验开始前,将交叉互联箱中保护器拆除,以减小保护器中泄漏电流对试验的干扰。将 2 个电流采样模块组装好,并分别串接进入交叉互联系统中的 a1、c3 段两侧接地线。与滤波模块接入后,将滤波模块输出接入监测装置。试验采用的监测装置为北京兴迪仪器有限公司开发的 CMDP-200 分布式电缆局部放电监测装置。该装置数据采样及分析处理能力强,相应的局放分析软件经过大量试验测试,可靠性高,是目前世界上最强大的局放分析软件之一,完全可满足在线监测需求。对某两处投运时间分别为 1 a 的电缆线路一与 11 a 的电缆线路二交叉互联系统使用直流分量法进行 3 次接地电流在线监测,结果如表 1 所示。

表 1 XLPE 电力电缆在线监测接地电流数据 nA

测量次数	线路一 a1 段	线路一 c3 段	线路二 a1 段	线路二 c3 段
1	2.9	3.0	18.1	17.9
2	2.8	2.7	19.3	19.5
3	2.6	2.8	19.1	18.7

结果表明,两段线路交叉互联箱两端的接地电流

数值相差较大,说明随着电缆投运时间变长,电缆水树枝的发展也越来越严重,需充分重视。同时,每条线路两端的接地电流直流分量数值基本相同,说明了文中推导理论的合理性。

根据日本住友公司等统计数据,直流分量为 10 nA 以下的电缆线路一健康状况良好,可继续使用^[14]。而直流分量超过 10 nA 的电缆线路二需要密切注意监测,并在条件允许情况下应及早更换。

4 结束语

通过现场实际监测,证明了文中对交叉互联系统接地电流直流分量的分析是合理的,同时设计的接地电流直流分量在线监测系统可行、便捷、实时、稳定、可靠,为与 XLPE 电力电缆交叉互联装置相配合的水树枝监测技术提供了新的可参考方法。

参考文献:

- [1] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2001:65-79.
- [2] YAMAGUCHI S, KASHIWAGI N, TOKUMARU K. Improvement of the XLPE-insulated Distribution Cables and the Development of the Hot Line Cable Monitoring Systems [C]. 10th International Conference on Electricity distribution, 1989. 1989: 284-291.
- [3] ROBERT R. Inception and Propagation Mechanisms of Water treeing [J]. IEEE Transaction of Power Delivery, 1998, 5 (5): 650-658.
- [4] 李捍平, 黄志鹏, 李忠华. 交联聚乙烯电缆热老化与电树枝化相关性研究[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(5): 54-57.
- [5] 吴云飞. XLPE 电缆主绝缘状态检测方法的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.
- [6] 王雨阳, 王永强, 王浩. 一起 110 kV 电缆终端特殊部位发热的分析处理[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 9-10.
- [7] 张卫. 在线检测 XLPE 电缆老化地直流分量法研究[D]. 西安:西安交通大学, 1995.
- [8] 江秀臣, 李锋, 傅正财. 交联电缆绝缘在线监测微小信号测量[J]. 高电压工程, 1996, 22(4): 34-36.
- [9] 刘忠杰, 关根志, 龙望成. XLPE 电缆交叉互联接线时的绝缘在线监测[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 79-84.
- [10] 陈小林, 成永红, 王贤清, 等. XLPE 电缆地线电流分析与接地改造措施一例[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 87-88.
- [11] 马宗乐. 硅橡胶中电树枝的生长机理与抑制方法研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [12] NAKAYAMA T. On-Line Cable Monitor Developed in Japan [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1991, 6 (4): 1359-1365.
- [13] 张海龙. 110~220 kV XLPE 电缆绝缘在线检测技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2009.
- [14] 严璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京:水利电力出版社, 1995: 76-95.

不大时,闭环运行是经济的;IEEE14节点配电网算例结果表明,与配电网重构相比,闭环运行降低网损和提高电压质量的效果明显。

参考文献:

- [1] 黄伟军,钱远驰,吕志来. 闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(24):123-126.
- [2] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
- [3] 张项安,张新昌,李卫星,等. 基于差动保护的配电网闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(3):102-106.
- [4] 仇志华,徐丙垠,陈青,等. 双电源故障无缝自愈配电网潮流优化控制方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):101-105.
- [5] 汪芳宗,叶婧,李燕山. 一种新的少环配电网潮流计算方法[J]. 电网技术,2008,32(1):47-50.
- [6] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):35-39.
- [7] 顾晨,乐秀璠,张晓明. 基于改进前推回代法的弱环配电网三

- 相潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):160-164.
- [8] 丁明,郭学风. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):35-40.
- [9] 车仁飞,李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):74-79.
- [10] 李红伟,张安安. 含PV型分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):128-135.
- [11] 戴晖,孙波. 新型实用合环潮流算法在配电网中的应用[J]. 江苏电机工程,2015,34(1):47-49.
- [12] 顾江,陆涟,杨江,等. 基于等值电阻和回归分析的配电网降损潜力研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(3):61-63.

作者简介:

何小栋(1989),男,安徽安庆人,硕士,从事电网技术技能培训和配电网自动化研究工作;
程瑶(1991),女,安徽六安人,硕士,从事电费管理和账务相关技术工作。

Economical Analysis of Distribution Network Closed-loop Operation

HE Xiaodong, CHENG Yao

(Anqing Power Supply Company, Anqing 246000, China)

Abstract: With the distributed generation increasingly integrating to the grid, the traditional single feeder radial distribution network becomes unsuitable. Based on the communication and power electronic technology, the feasibility of distribution network closed-loop operation is analyzed. Based on the Z-bus method, the power flow calculation method for the distribution network with distributed generation and rings is proposed. The economy of distribution network closed-loop operation is analyzed. For the hand in hand double feeder distribution network, the voltage phase angle difference has great influence on the loss of closed-loop operated distribution network. When the difference is not too big, closed-loop operation is economic and security. Compared with the reconstruction of distribution network, the closed-loop operation decreases network loss and improves voltage quality more obvious.

Key words: active distribution network; closed-loop operation; z-bus; power flow calculation

(上接第41页)

作者简介:

叶冠豪(1990),男,安徽巢湖人,助理工程师,从事电力电缆运维及在线监测工作;
郭湘奇(1973),男,河北秦皇岛人,工程师,从事电力电缆检修管理

工作:

王一磊(1983),男,江苏南京人,工程师,从事电力电缆检修工作;
邓鹏(1985),男,山西永济人,工程师,从事电力电缆试验及电力电缆施工与运维管理工作。

On-line Monitoring of Ground DC Current for Cross-linking XLPE Cable System

YE Guanhao, GUO Xiangqi, WANG Yilei, DENG Peng

(Nanjing Electric Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: This paper studies the on-line monitoring issues for water treeing of electric cable cross linking system by using DC component method. The standard cross-linking system is analyzed and its equivalent circuit is established. The factors causing faint DC current component are studied quantificationally. Current sampling and low pass filter modules are designed and the weak DC current component can be sampled and filtered. Field testing results show that the current sampling and low pass filter modules are correct.

Key words: on-line monitoring; DC current component method; water treeing; cross-linking system