

基于地电位行波监测的故障定位技术研究

刘国威¹,王琛¹,李成信¹,陈芳百¹,韦凯誉¹,玉聪¹,万山明²

(1.广西电网有限责任公司河池供电局,广西 河池 547000;2.华中科技大学
强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:提出利用地电位行波进行输电线路双端定位的方法,将行波监测终端安装于地电位端,安装维护不需要配合停电计划,可有效解决分布式故障诊断系统维护不便的难题。通常,110 kV及以上架空输电线路根据防雷需要,安装了地线,如果架空输电线路出现雷击或接地故障,导线上形成故障行波,由于电磁感应的作用,杆塔上形成了地电位端行波电流,当故障行波监测装置能够识别地电位行波电流,采集相应的行波波头,便能够进行故障位置的双端定位。通过实际挂网运行表明,杆塔及地线上安装分布式监测系统,能够快速准确地实现故障位置的确定。

关键词:地电位;行波;双端定位;分布式监测系统

中图分类号:TM743 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22383

Research on Fault Location Technology Based on Ground Potential Traveling Wave Monitoring

LIU Guowei¹, WANG Chen¹, LI Chengxin¹, CHEN Fangbai¹, WEI Kaiyu¹, YU Cong¹, WAN Shanming²

(1. Hechi Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Hechi 547000, Guangxi, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: A method of using ground potential traveling wave to locate the two ends of transmission lines was proposed. The traveling wave monitoring terminal was installed at the ground potential end. Installation and maintenance did not need to cooperate with the power outage plan, which could effectively solve the problem of inconvenient maintenance of the distributed fault diagnosis system. Overhead transmission lines of 110 kV and above generally have a ground wire. In the event of a lightning strike or ground fault, not only a fault traveling wave will be generated on the wire, but also a fault traveling wave will be generated at the ground potential end and propagate along the tower. If the ground potential can be effectively detected, the propagating traveling wave current can realize the double-ended positioning of the ground potential end. The actual network operation shows that the installation of a distributed monitoring system on the pole tower and the ground line can quickly and accurately determine the fault location.

Key words: ground potential; traveling wave; dual-ended positioning; distributed monitoring system

目前,随着电网规模的不断扩大,面临的风险也越来越大,为了及时发现故障位置,通常在架空输电线路安装分布式故障监测及定位系统,该系统基于双端行波定位技术实现故障精确定位,其行波采集终端通常安装在高压输电导线上,每间隔20~30 km安装一套,采用耦合取能的供电方式,利用无线网络进行通信,终端之间依靠全球定位系统(global positioning system, GPS)同步对时技术实现双端行波精确定位^[1-2]。然而,

该技术需将故障行波采集终端安装于高压导线上,安装、维护需要结合线路停电计划,存在一定的不便;另外,由于行波采集装置位于高电位端,为达到长时间免维护的目的,需要较高绝缘和电磁防护水平,增加了设备的成本^[3-4]。

理论研究表明,输电线路发生故障时,通过输电杆塔入地的故障暂态电流,同样可作为监测和诊断线路故障的行波信号,因此可通过采集输电线路杆塔地电位端的暂态行波信号,结合GPS同

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20190061)

作者简介:刘国威(1988—),男,本科,工程师,Email:liu_gw.hcg@gx.csg.cn

步对时技术来实现双端行波定位。同时,由于行波采集终端安装于输电线路杆塔地电位端,使装置带电安装与维护成为可能,减少运维人员的工作量^[5-6]。

综上所述,本文基于地电位端暂态信息感知的分布式输电线路故障精确定位技术,开发安装于输电杆塔地电位端的行波监测终端,在保障输电线路故障定位精度的前提下,实现装置在地电位端的安装与维护。

1 分布式行波采集装置设计

本文提出一种基于地电位端暂态电流监测的双端行波故障定位方法,将监测终端装设于输电线路铁塔构架上或地线上,监测流过杆塔或地线地电位的暂态电流,每隔20~30 km安装一套监测终端。输电线路发生故障时,导线中的故障电流向线路两端传播,同时也会在各杆塔地电位端感应暂态行波电流,通过故障点两端监测到的行波电流,配合GPS或北斗系统进行精准对时,实现地电位端的双端行波定位。

架空输电线路发生故障时,故障点必然会产生行波电流,以接近光速向故障点两边传播^[7-8]。由于导线与地线之间存在电磁耦合,发生故障时导线上的行波电流会通过空间电磁感应在地线中也激发行波电流,因此导线故障行波在沿线传播的过程中会在各基杆塔地线产生暂态行波电流,地线中的行波电流通过输电铁塔入地时,可通过装设在铁塔构架上的地电位行波监测终端获取,如果故障点两侧均装设有监测终端且终端间各杆塔档距已知,结合终端之间的精确对时,则可通过双端定位原理进行精确定位,如图1所示。

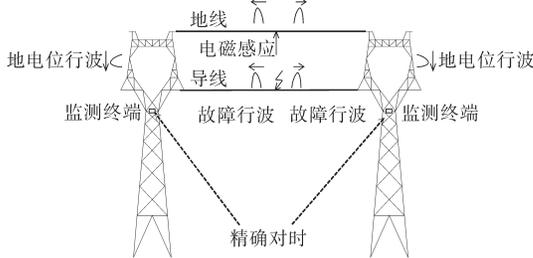


图1 地电位行波双端定位示意图

Fig.1 Schematic diagram of double-ended positioning of ground potential traveling wave

监测终端包含电流传感器、电源系统数据采集及存储系统、通信系统等。监测终端采用太阳能电池供电,装置之间通过GPS或北斗系统对时,通过无线通信系统将监测数据上传到系统后台。

地电位行波电流的幅值主要取决于监测点

与故障点的距离,这是因为故障点位置的地电位电流有时超过1 000 A,可是沿线路发送20 km以上可能会衰减到几A,甚至更小;地电位行波电流幅值还受故障类型影响较大,雷击时故障点行波幅值可达几kA,线路经高阻接地时仅为几十A。因此,地电位行波电流幅值变化范围较大,其要求行波传感器具有较大的幅值和频率范围^[9]。

电流传感器可选用罗柯夫斯基线圈测量,可以很好地反映地电位行波电流的暂态过程。设计时,应考虑传感器对1 A以上的暂态电流有效触发,这样可保证地电位行波传播较远距离后(30 km内)仍能被检测,而对kA级的大电流,无需监测完整波形,只需提取准确的波头时间即可。

2 仿真模拟

2.1 输电线路铁塔动态参数仿真建模

图2为一典型的110 kV 1A-ZM1猫头塔及其多波阻抗模型,该模型采用电磁暂态分析程序(electro-magnetic transient program, EMT)中的J.Marti建立,其中, h_i 为杆塔各段对地高度; Z_{Li} 为杆塔支架波阻抗, Z_{Ai} 为横担波阻抗, Z_{Ti} 为杆塔塔基波阻抗, Z_{Li}, Z_{Ai}, Z_{Ti} 与杆塔实际几何参数相关, $i=1, 2, 3, \dots$; R_g 为杆塔工频接地电阻。

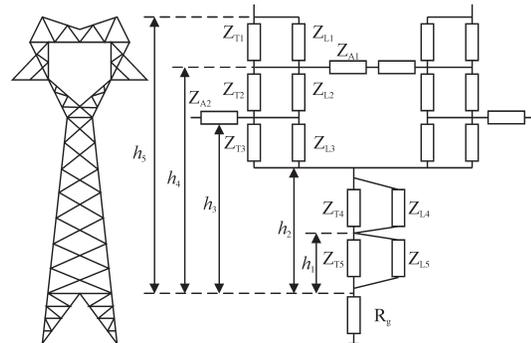


图2 110 kV猫头塔及其多波阻抗模型

Fig.2 110 kV tower and its multi-wave impedance model

本文采用2.6/50 μ s雷电流作为激励源,在杆塔地电位端安装行波信号采集装置,在线路发生故障时,故障入地电流的幅值与杆塔冲击接地电阻紧密相关,因此,为研究杆塔地电位端的行波信号,需要建立杆塔冲击接地电阻的模型。利用EMTP中的逻辑元件,搭建杆塔冲击接地电阻的仿真模型。

输电线路为110 kV单回线,导线采用LGJ-300,假设弧垂为3 m/100 m;地线采用JLB-70,弧垂按照2 m/100 m设置;线路档距为400 m,结合图2中1A2-ZM2型猫头塔结构参数,本文研究的地电位暂态信息监测装置预期每20~30 km安装

1套,因此模型中共设置75基杆塔。

2.2 不同故障下铁塔地电位端的响应特性研究

本节通过研究不同故障下铁塔地电位端的响应特性,分析地电位端行波监测与定位的可行性。

2.2.1 雷击故障响应特性

1)反击闪络。仿真模型中,设置幅值为80 kA的雷电流注入第6基杆塔,图3为第5~10基杆塔地电位暂态电流波形图,通过图3可以知道,第6基杆塔地电位暂态电流为67 kA,该行波电流传播到相邻两基杆塔的地电位暂态电流约为5 kA,第8~10基杆塔地电位暂态电流分别是856 A,216 A,92 A。因此,当架空输电线路发生反击闪络时,行波仅仅传播1基杆塔便降低了0.9倍,离反击闪络位置越远的杆塔,行波降低的越多,可使趋势变得平缓。图4为第20~70基杆塔入地暂态电流波形图,通过图4可以知道,和图3相比,流过第20基杆塔入地电流远远小于第10基杆塔入地电流,当入地电流通过第70基杆塔时,入地电流仅仅为28 A,该杆塔距雷击位置26 km,尽管该电流远远小于雷击位置的入地电流,然而,通过现有的监测装置,能够采集行波电流波形。同时,从图4可以得到,随着杆塔距雷击位置越远,入地电流不断降低,其波头上升趋势变缓。

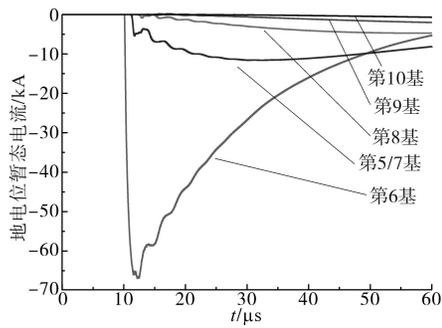


图3 雷电流80 kA时第5~10基杆塔地电位暂态电流
Fig.3 Transient current of ground potential of the 5th to 10th base towers when the lightning current is 80 kA

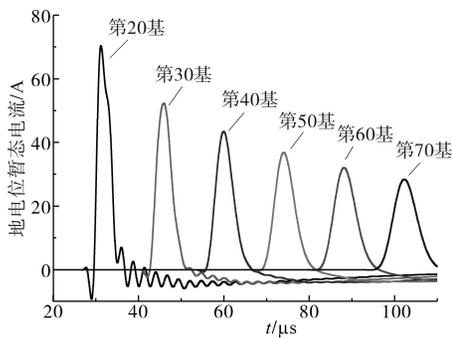


图4 雷电流80 kA时第20~70基杆塔地电位暂态电流
Fig.4 Transient current of ground potential of the 20th to 70th base towers when the lightning current is 80 kA

2)反击未闪络。当杆塔遭受雷击,绝缘子没有出现闪络现象时,可以把雷电流降低至40 kA,雷击杆塔为第6基杆塔,其他条件不变。图5和图6依次模拟了第5~10基杆塔和第20~70基杆塔入地暂态电流波形。和图3一样,图5中雷电流主要在雷击位置的杆塔入地,峰值为34 kA,其前后两基杆塔入地电流仅仅为2.7 kA,不仅峰值大大降低,峰值上升速度也变慢。图6和图4的区别是入地电流峰值非常小,当雷电流传送到第70基杆塔,幅值急速降低,小于1 A,通过第20基杆塔的行波电流幅值为4.7 A,而通过第30基杆塔的行波电流幅值为2.2 A,降低了50%多,同时,行波电流最大值极性相反,这是由于架空输电线路发生雷击闪络现象,雷电流经由绝缘子传送到导线,那么杆塔地电位暂态电流存在导线的感应分量,经过杆塔的接地网释放,所以通过导线的雷电流降低变慢,由于入地分量在每基杆塔接地网泄放,导线中雷电流的衰减速度明显较慢。于是,图4中的行波电流峰值为正;可是图6中雷电流没有传输到导线,使得入地电流不存在感应电流,流经每基杆塔的行波电流峰值为负,并且降低的趋势非常明显。通过实验模拟,可以知道,当雷电流传送到一定距离后,最大值将小

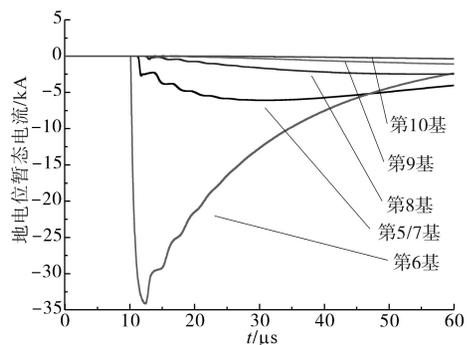


图5 雷电流40 kA时第5~10基杆塔地电位暂态电流
Fig.5 Transient current of ground potential of the 5th to 10th base towers when the lightning current is 40 kA

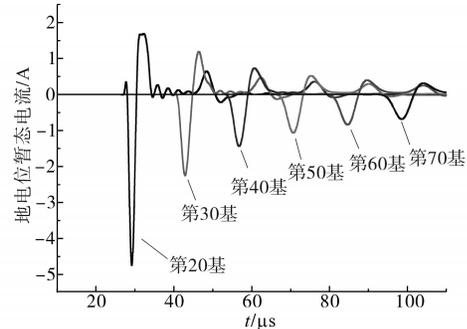


图6 雷电流40 kA时第20~70基杆塔地电位暂态电流
Fig.6 Transient current of ground potential of the 20th to 70th base towers when the lightning current is 40 kA

于1 A。对于实际投运的架空输电线路,由于运行环境非常复杂,存在非常多的外部干扰,行波电流衰减及畸变的情况将非常明显,从而增加了行波波头的采集难度,需要暂态电流监测系统的性能更高。

3)绕击闪络。模拟实验中,雷击位置选择第6基杆塔,采用10 kA的负极性雷电流,如图7所示,当第10 μs时,雷电流注入A相。在图7中,线路出现绕击闪络情况下,第6~10基杆塔的地电位暂态电流会产生明显的入地电流,通过前面的分析可以知道,入地电流通常在故障位置的附近几基杆塔快速下降,于是,第7~10基杆塔地电位暂态电流里导线的电流感应分量比例越来越大,当电流传送至第10基杆塔时,负极性波峰大大降低。通过图8可以知道,当线路出现绕击闪络情况下,因为导线电流中,主要成分是感应分量,其波头呈现正极性,由第20基发送至第70基的趋势变缓,第70基杆塔的行波电流是10 A,能够被监测装置采集。

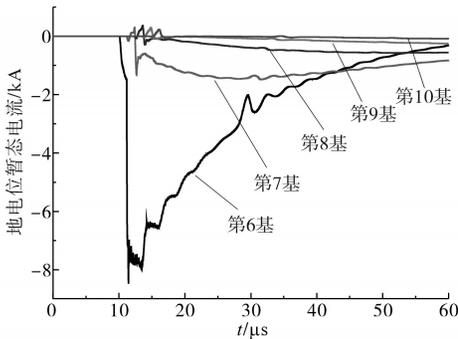


图7 雷电流10 kA绕击时第6~10基杆塔地电位暂态电流
Fig.7 Transient current of ground potential of the 6th to 10th base towers when the lightning current is 10 kA shielding strike

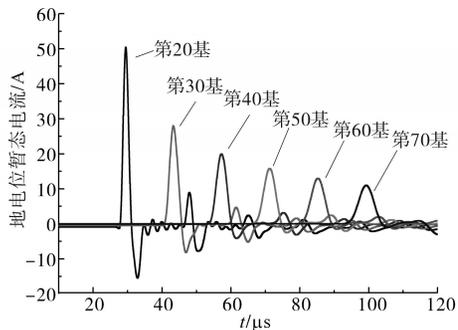


图8 雷电流10 kA绕击时第20~70基杆塔地电位暂态电流
Fig.8 Transient current of ground potential of the 20th to 70th base towers when the lightning current is 10 kA shielding strike

4)绕击未闪络。取雷电流幅值为4 kA,绕击线路第6基杆塔A相,如图9所示。因为线路没有出现雷击闪络的现象,于是通过第6基杆塔的人

地电流比例非常少,其幅值小于雷电流的20%,从图9中可以知道,第7~10基杆塔的地电位端电流导线的电流感应分量比例越来越大。当线路出现绕击未闪络现象,于是雷电流通过导线进行发展,经由第20基至第70基杆塔的地电位暂态电流逐渐降低,然而降低的幅度依然高于入地电流,末端感应电流峰值接近19 A,如图10所示。

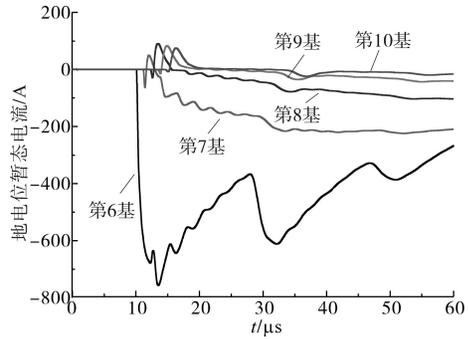


图9 雷电流4 kA绕击时第6~10基杆塔地电位暂态电流
Fig.9 Transient current of ground potential of the 6th to 10th base towers when the lightning current is 4 kA shielding strike

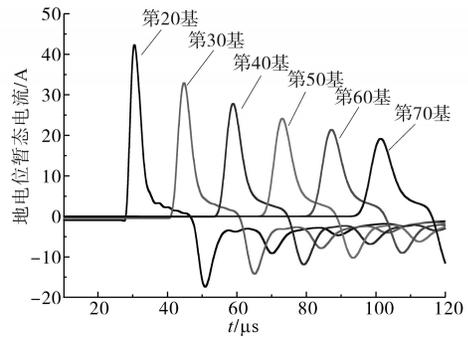


图10 雷电流4 kA绕击时第20~70基杆塔地电位暂态电流
Fig.10 Transient current ground potential of the 20th to 70th base towers when the lightning current is 4 kA shielding strike

2.2.2 接地故障响应特性

1)单相接地故障。设置第10基杆A相发生接地故障,故障时刻A相电压为89.8 kV,故障接地电阻为1 Ω,故障发生时刻为20 μs。故障后线路三相电流如图11所示。在图12中,实验模拟了第10~20基杆塔地电位暂态电流 $I_{10} \sim I_{20}$ 的波形,通过图12可以知道,因为故障位置设置在第10基杆塔,具有非常大的地电位暂态电流,该电流快速降低。这种地电位行波电流含有两个部分,即故障杆塔入地传播的入地分量和导线里故障电流的感应分量。从第13基杆塔后,负极性波峰几乎不存在,表示入地分量所占比例不断降低,可是感应分量降低的速度相对较小, I_{11} 的正极性波峰为33.1 A, I_{20} 的正极性波峰为9.9 A,大概降低了70%,降低的趋势变缓。同时,波头上升所

需时间增加,其中第20基杆塔的波头上升所需时间大概是 $2.54\ \mu\text{s}$ 。在图13中,模拟了通过第30~70基杆塔的地电位行波电流 $I_{30}\sim I_{70}$ 。通过图13可以知道,电流波形中几乎没有负极性电流,代表入地分量大大降低,主要成分为导线的感应分量,降低趋势变缓,波峰增长趋势也在相应地变缓。尽管第70基杆塔和故障位置是24 km, I_{70} 接近3.6 A,通过现有监测方法,能够容易得到监测波头,然而所需上升时间是 $6.78\ \mu\text{s}$,远远超过 I_{20} 的波头上升时间,容易导致监测装置的定位误差,上升时间增加 $1\ \mu\text{s}$,相应的定位误差增加300 m,于是,采用地电位行波定位技术,必须分析行波衰减的影响。

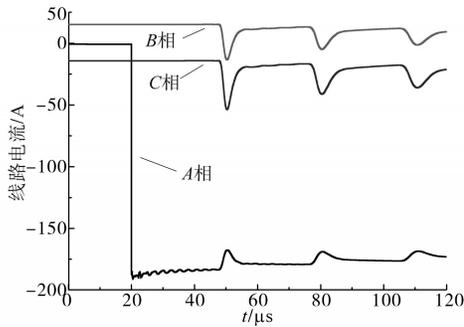


图11 单相接地故障时线路电流

Fig.11 Line current when a single-phase ground fault occurs

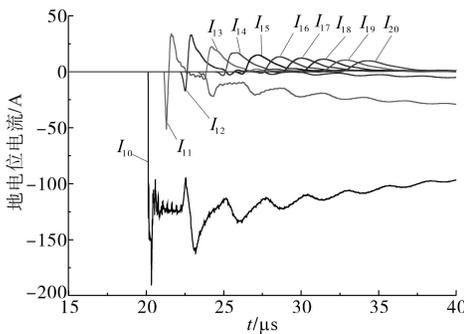


图12 单相接地故障时第10~20基杆塔地电位电流
Fig.12 Ground potential current of the 10th to 20th base towers when a single-phase ground fault occurs

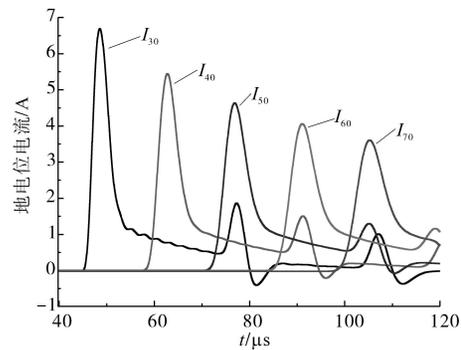


图13 单相接地故障时第30~70基杆塔地电位电流
Fig.13 Ground potential current of the 30th to 70th base towers when a single-phase ground fault occurs

2)故障接地电阻的影响。通过设置不同的接地电阻,模拟故障情况下地电位电流,设置的故障点接地电阻 R_f 依次为 $1\ \Omega$, $10\ \Omega$, $100\ \Omega$, $1\ 000\ \Omega$,如图14所示。因为第70基杆塔的地电位行波电流主要成分是感应分量,当接地电阻小于 $10\ \Omega$,地电位电流波形比较接近,当接地电阻提高至 $100\ \Omega$,电流衰减的幅度非常大。当接地电阻设置为 $1\ 000\ \Omega$,地电位电流小于1 A,此时,监测装置难以进行行波波头的识别。

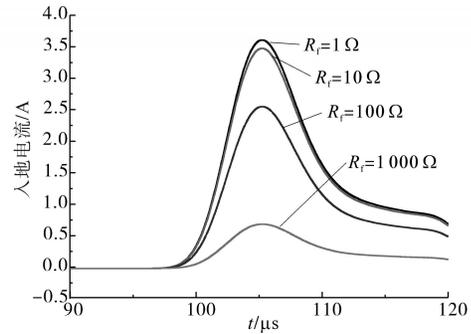


图14 不同故障对地电阻时第70基杆塔地电位电流
Fig.14 Ground potential current of the 70th base tower under different faults to ground resistance

3)两相接地短路。当输电线路出现两相接地故障,接地电阻选择 $1\ \Omega$,故障时刻为第20 μs 。图15和图16依次模拟了第10~20基杆塔和第

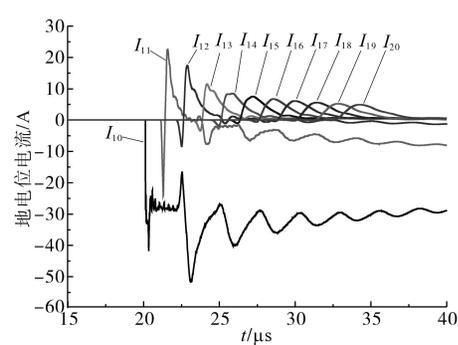


图15 两相接地故障时第10~20基杆塔地电位电流
Fig.15 Ground potential current of the 10th to 20th base towers when a two-phase ground fault occurs

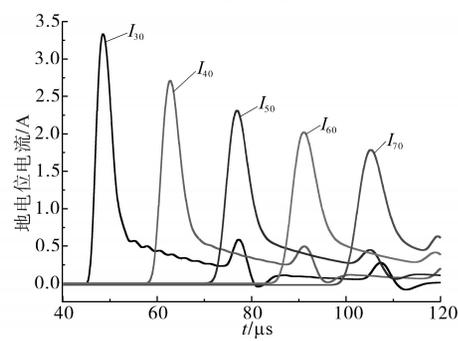


图16 两相接地故障时第30~70基杆塔地电位电流
Fig.16 Ground potential current of the 30th to 70th base towers when a two-phase ground fault occurs

30~70基杆塔的地电位行波电流。这种情况下,当杆塔逐渐远离故障位置,地电位电流越来越小,三相导线叠加感应电流所占比例逐渐增加,因为A,B相故障电流方向相反,降低了入地电流, I_{70} 的入地电流仅仅是1.78 A。

4)三相接地短路。当输电线路出现三相接地短路,选择的接地电阻是1 Ω,故障时刻为第20 μs。图17和图18依次模拟了第11~20基杆塔和第30~70基杆塔的地电位行波电流。这种情况下,感应电流叠加在一起,产生的行波电流不大,这一点与铁塔电压分布相对应。图17中地电位电流峰值为正值,在故障相邻杆塔地电位电流峰值就在10 A以内,而图18中, I_{30} 的入地电流小于1 A,此时,监测装置难以进行行波波头的识别。

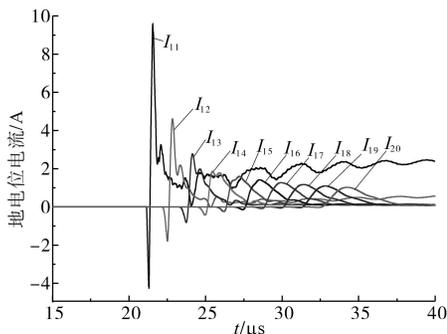


图17 三相接地故障时第11~20基杆塔地电位电流
Fig.17 Ground potential current of the 11th to 20th base towers when a three-phase ground fault occurs

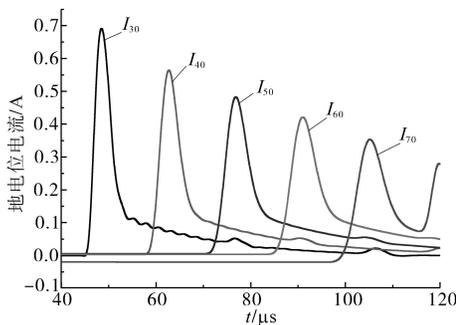
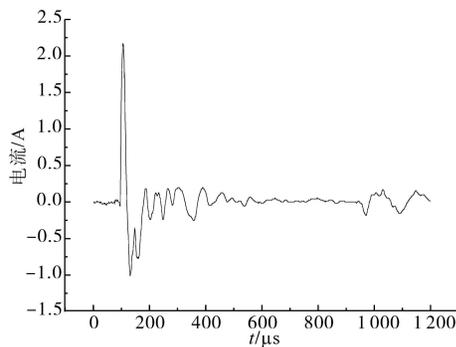


图18 三相接地故障时第30~70基杆塔地电位电流
Fig.18 Ground potential current of the 30th to 70th base towers when a three-phase ground fault occurs

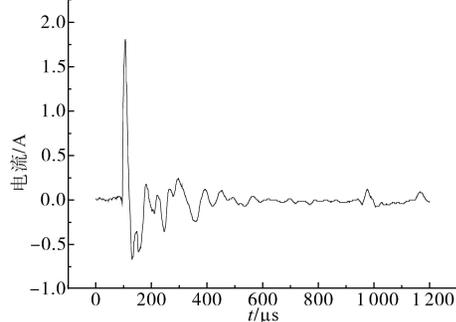
3 现场应用情况分析

通过在某110 kV线路杆塔及地线上安装分布式监测系统,分别安装在5#杆塔和50#杆塔上,两套装置之间的距离是12.9 km。2020年7月15日18:20:10 851时刻该线路跳闸,监测系统成功进行了故障信息的采集。5#杆塔和50#杆塔对应的监测装置获得的跳闸电流数据如图19所示。在图19中,感应行波电流数据首先被50#杆塔监

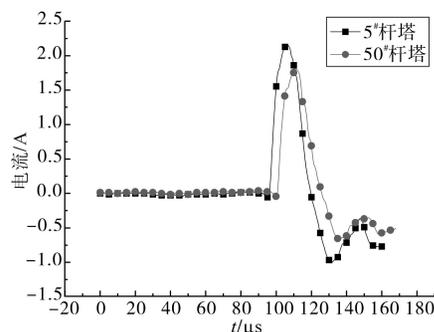
测装置采集,50#杆塔和5#杆塔行波到达时间相差4.9 μs,依照双端定位法可以得到,跳闸位置距离50#杆塔大号侧7 160.5 m处,距离5#杆塔小号侧5 739.5 m处。依照分布式监测系统采集的数据,查找故障位置,实际故障位置在5#杆塔小号侧5 780 m处,误差为0.7%,那么通过该技术,能够快速有效地实现故障定位。



(a)5#杆塔分布式监测系统采集行波数据波形



(b)50#杆塔分布式监测系统采集行波数据波形



(c)5#杆塔和50#杆塔采集波形局部对比图

图19 分布式监测系统采集数据波形

Fig.19 Data waveforms collected by distributed monitoring system

4 结论

本文采用110 kV典型单回线路的杆塔和线路参数,分别对雷电反击闪络、雷电反击未闪络、雷电绕击闪络、雷电绕击未闪络、单相接地短路、两相接地短路和三相接地短路共7种故障类型进行了仿真计算,根据仿真结果总结了不同故障类型下铁塔的暂态电压分布、地电位端暂态电流的响应波形及衰减规律,得到结论如下:

1)各杆塔地电位端暂态电流幅值变化较大,在传播过程中沿线衰减且波头上升时间逐渐变长,故障杆塔地电位电流幅值可达数十kA,而在远离故障杆30 km后可能下降到A级,甚至更低;同一基铁塔电压分布呈现自上而下微弱衰减的趋势,杆塔不同段电压波形基本相同。

2)对于雷击故障,雷击闪络时,雷击杆塔地电位暂态电流幅值超过雷电流的80%,闪络位置附近的几基杆塔,地电位暂态电流降低非常明显,随着杆塔逐渐远离闪络位置,相应的电流幅值降低,波头增长趋势随之变缓;除反击未闪络时,地电位行波电流含有两个部分,为故障杆塔入地传播的入地分量和导线里故障电流的感应分量,杆塔距离故障位置越远,感应分量所占比例不断提高。

3)对于接地故障,在故障点附近几基杆塔,地电位行波电流含有两个部分,即故障入地电流分量与三相导线故障电流的感应分量。随着杆塔逐渐远离故障位置,故障入地电流分量不断降低,地电位行波电流中感应电流所占比例逐渐提高。单相接地短路时,地电位行波电流主要受接地电阻的影响;两相接地短路时,地电位行波电流主要受两相电流相角的影响;三相接地短路时,地电位行波电流受三相故障合成电流影响,此时,故障行波电流最小。

4)通过实际挂网运行表明,杆塔及地线上安装分布式监测系统,能够快速准确地实现故障位置的确定。

参考文献

- [1] Zhou C, Yi H, Dong X. Review of recent research towards power cable life cycle management[J]. IET High Voltage, 2017, 2(3): 179-187.
- [2] 黄福高,玉聪,莫小向,等. 基于PSCAD的110 kV架空线路接地故障下地电位行波仿真研究[J]. 电工技术, 2020(9): 38-41.
- [3] Huang F G, Yu C, Mo X X, *et al.* Study on ground potential traveling wave simulation of 110 kV overhead line grounding fault based on PSCAD [J]. Electric Engineering, 2020(9): 38-41.
- [4] Tang Z, Zhou C, Jiang W, *et al.* Analysis of significant factors on cable failure using the cox proportional hazard model [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 951-957.
- [5] 周宇,韦建城,陈芳百,等. 雷击故障下架空线路地电位行波特征仿真研究[J]. 电气技术与经济, 2019(6): 20-24.
- [6] Zhou Y, Wei J C, Chen F B, *et al.* Simulation study on characteristics of ground potential traveling wave of overhead line under lightning fault [J]. Electrical Equipment and Economy, 2019(6): 20-24.
- [7] Jiao X, Liao Y. Accurate fault location for untransposed transposed transmission lines using sparse wide-area measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 1(4): 1797-1805.
- [8] 李成信,刘国威,王琛,等. 基于地电位端暂态电流的双端行波故障定位方法及系统:中国, CN110954781A[P]. 2020-04-03.
- [9] Li C X, Liu G W, Wang C, *et al.* Double-terminal traveling wave fault location method and system based on ground potential terminal transient current: China, CN110954781A[P]. 2020-04-03.
- [10] Benato R, Sessa S D, Poli M, *et al.* An on-line travelling wave fault location method for unearthed-operated high voltage overhead line grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2776-2785.
- [11] 彭向阳,钱冠军,李鑫,等. 架空输电线路跳闸故障智能诊断[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1965-1972.
- [12] Peng X Y, Qian G J, Li X, *et al.* Intelligent diagnosis of overhead transmission line trip fault[J]. High Voltage Technology, 2012, 38(8): 1965-1972.
- [13] 金增杰,卫永琴,张琦,等. 电缆故障测距的模型仿真与系统设计[J]. 电气传动, 2021, 51(14): 68-72.
- [14] Jin Z J, Wei Y Q, Zhang Q, *et al.* Design and simulation of cable fault location system [J]. Electric Drive, 2021, 51(14): 68-72.

收稿日期:2020-09-03

修改稿日期:2020-09-21