

基于柔性光学电流互感器的接地选线装置

石 勇,任百群,王 耀,李宇琦,刘倪宣,姜 磊
(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

摘要:针对现场无法安装常规零序互感器的的问题,提出了基于柔性全光学电流互感器的接地选线装置方案。针对当前小电流接地系统单相接地故障特征,形成了基于光学电流互感器的暂态选线方案。该方案已在现场得到应用,运行情况良好。

关键词:接地选线;光学电流互感器;暂态法

中图分类号:TM 452 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)01-0026-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220106

Grounding Line Selection Device Based on Flexible Optical Current Transformer

SHI Yong, REN Baiqun, WANG Yao, LI Yuqi, LIU Nixuan, JIANG Lei
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the conventional zero-sequence current transformer that can't be installed in the field, the scheme for grounding line selection device is proposed based on flexible optical current transformer. In view of the current characteristics of single-phase grounding fault in small current grounding system, the transient line selection scheme based on optical current transformer is formed. According to the actual application in the field, the operation condition of the proposed scheme is good.

Key words: grounding line selection; optical current transformer; transient method

0 引 言

小电流接地系统接地选线一般使用有功分量法、谐波法、注入信号法、残流增量法、中电阻法、暂态无功功率法等选线方法^[1-4]。以上方法均需使用到线路的零序电流,但是在架空线、GIS 开关柜等场合传统的穿心式零序互感器无法安装,只能使用三相电流互感器自产零序电流进行选线。小电流接地系统单相接地故障残流一般在 10 A 以内,相电流互感器一次额定值在 600 A 以上,变比太大导致二次侧变到选线装置的零序电流只有毫安级,小于装置的灵敏测量范围。自产零序电流由于三相变比不一致导致不平衡电流过大也会影响选线精度及灵敏度。此外现有常规零序互感器在现场二次电缆较长的情况下,由于带负载不足导致幅值误差及角度误差大于允许范围,影响选线灵敏度导致高阻接地时拒动。

1 柔性全光纤电流互感器

全光纤电流互感器(fiber optical current transducer, FOCT)^[5]是采用光纤作为电流传感材料的光学 CT。柔性全光纤电流互感器^[6]是 FOCT 发展的方向,它可以在现场根据导体形状不同绕制成所需形状的光纤传感环,比传统互感器更灵活,安装和维护更加方便,重量更轻,无绝缘要求。

对于 GIS 开关柜体形状不规则、架空线三相距离较远等场合,将三相电流从常规零序电流互感器穿过需要孔径很大,且形状特殊。由于铁芯材料及重量限制无法制造出适合现场安装孔径的常规互感器,柔性光互感器可以根据现场需要绕制成各种形状且重量很轻。将三相导线从零序光互感器的光纤环中穿过,全光纤式电流互感器采集单元利用传感光纤的法拉第磁光效应感应被测三相导线中电流产生

的磁场信号即零序电流磁场,计算出被测零序电流并输出,具有精度高、动态范围大、谐波特性好等特点。

2 选线系统方案

基于光学电流互感器的选线系统由接地选线装置、多个零序光学互感器及采集单元组成。每个间隔配置一台零序光学电流互感器,每套光学互感器含一个光纤环及一台采集单元,每个采集单元配置一个光路模块,三相电流都从光纤环的保偏光缆中穿过,这样在光纤环采集的就是零序电流。采集单元置于柜中,采集保偏光纤中的模拟量转换成数字量后,通过点对点通讯光纤将采集的电流数据输出至接地选线装置,无需经交换机中转。选线装置的电压由常规电压互感器接入。对于现场部分支路使用传统电磁式电流互感器、部分支路使用光学电流互感器的场合,选线装置支持常规电流互感器与光学电流互感器混合采样。整个系统如图 1 所示。

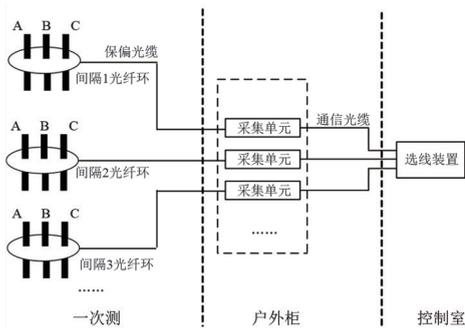


图 1 基于光学电流互感器选线系统方案

3 接地故障检测选线对光学电流互感器的要求

目前保护用光学电流互感器采样率按数字化站标准为 4000 Hz。单相接地故障的暂态电流主要为暂态电容电流,对于架空线自由振荡频率一般为 300~1500 Hz,电缆线路的电感远小于架空线路,对地电容却比架空线大很多倍,因此暂态过程振荡频率很高,一般为 1500~3000 Hz^[4],根据奈奎斯特定理采样率 $f_{s,max}$ 需要大于 2 倍信号的最高频率 f_{max} ,即 $f_{s,max} \geq 2f_{max} = 6000$ Hz 采样率。因此光 CT 采集单元的采样率不能低于 6000 Hz,所提系统中光学电流互感器采集单元的采样率与接地选线装置采样率一致,设置为 10 kHz,保证接地故障时刻暂态特征数

据能可靠采集。

为保证采样数据的实时性及可靠性,采集单元数字信号光纤与接地选线装置通过点对点连接,不经过交换机,保证各支路零序电流采样延时都是固定的。接地选线装置根据额定延时调整光 CT 信号与电磁型零序电流互感器及电压互感器信号时差,保证各信号时间的一致性。

保护用光学电流互感器的测量范围考虑到三相短路等情况,一般为额定电流的 30~40 倍,达到上千安培,远大于负荷电流。但小电流接地系统单相接地故障时零序电流很小,特别是架空线路在经高阻单相接地时,一次侧只有几安培电流。如果使用常规保护用光学电流互感器在小电流情况下无法实现准确测量。根据规程规定,选线装置用零序互感器一次额定电流宜按照系统电容电流值的 2 倍选取^[7]。因此测量小电流能力要求比常规保护用光学互感器要求高很多,需要光学互感器最小能监测的一次电流为 0.2 A,最高测量电流为 250 A,满足如下精度要求:1) 0.2~0.5 A,比值误差 $\leq 10\%$; 2) 0.5~250 A,比值误差 $\leq 1\%$ 。

4 零序光学互感器现场安装

光学电流互感器可采用如图 2 所示的 AIS 支柱式(包括与断路器集成方式)、套管式、GIS 集成式、柔性等方式安装。



图 2 光学电流互感器安装方式

以上方式前两种适用于相电流互感器的安装,后两种适合于零序电流互感器的安装。柔性

安装方式可在不改动原有系统情况下进行,避免三相电缆的拆解,减小施工难度和周期。为便于现场安装和维护,光 CT 采用柔性结构,传感光纤制成光缆型式,支持现场缠绕,因此安装及维护时无需拆解三相电缆,在传感光纤外围以两瓣式壳体进行保护和固定,如图 3 所示壳体可为圆形或跑道型等任意适合安装的形状。现场安装如图 4 所示,可在开关柜内安装,也可以在电缆室安装。因光 CT 重量很轻,在电缆室安装时不会因为互感器很重而压坏电缆。

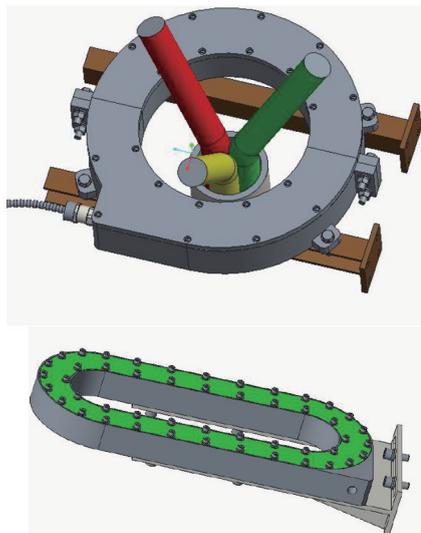


图 3 零序光学电流互感器壳体



图 4 零序光学电流互感器现场安装

行性,对基于柔性光学 CT 的接地选线装置分别进行静态试验与真型动模接地试验验证。

圆形壳体在现场已有大量应用,静态模拟测试仅验证跑道型壳体。搭建静态试验平台,将图 3 下面的“跑道型”柔性光学 CT 传感环绕制在三相电缆外,三相电缆排布方式为分散与集中两种。分散时三相电缆间距为 20 cm,集中时三相电缆间距均为 5 cm。采用博电测试仪加入由 10 A 的正常负荷电流及不同数值的零序电流合成的电流,其中正常运行负荷电流相位相差 120° ,调整电流中零序分量,记录数据如表 1 所示。

表 1 静态试验记录

实际值/A	电缆排布方式	测量值/A	幅值误差/%	角差/($^\circ$)
0.2	分散	0.201	0.50	1.1
	集中	0.198	1.00	1.1
5.0	分散	4.985	0.30	0.9
	集中	4.982	0.36	0.9
10.0	分散	9.971	0.29	0.9
	集中	9.975	0.25	0.9

从测试数据可见,不管导体分布方式如何,对光学 CT 测量精度影响不大,一次电流在 0.5 A 以下幅值误差小于等于 1%,0.5 A 以上幅值误差小于 1%,可以满足接地选线装置精度要求。

真型动模试验:配电网户外真型试验场包括 10 kV 开关站 1 座和 10 kV 试验线路 7 条,测试时用到 5 条。试验 1 线、2 线采用集中参数柜模拟真实线路的分布式参数,试验 3 线、4 线和 5 线为实际电缆线路。试验场配置预调式消弧线圈,型号为 XH-DCZ-400/10.5,额定容量为 400 kVA,电流调节范围为 20~66 A,共分为 14 挡,通过有载分接开关等差调节。母线电容电流为 25.2 A,各线路参数详见表 2。

表 2 各线路电容电流

试验线路	电容电流/A
试验 1 线	2.66
试验 2 线	11.83
试验 3 线	1.06
试验 4 线	1.60
试验 5 线	8.05

在户外试验场安装录波装置,在表 1 所示 5 条馈线的 A、B、C 相电缆出线处安装 10/1 零序电流互感器。母线处安装电压互感器接入录波装置。

5 试验及运行

为验证柔光学电流互感器在接地选线应用的可

在消弧线圈自动补偿、欠补偿、过补偿方式下,分别进行在试验1线A相经不同过渡电阻接地的持续性电弧接地试验和间歇性电弧接地试验。自动补偿时系统电容电流为25.2 A,消弧线圈补偿电流为27.1 A;欠补偿时调节系统电容电流为31.0 A,消弧线圈补偿电流为20.0 A;过补偿时调节系统电容电流为25.2 A,消弧线圈补偿电流为34.2 A。过渡电阻值分别为250 Ω 、500 Ω 、1000 Ω 、2000 Ω 、3000 Ω 和4000 Ω 。将录波装置录取的接地波形经测试仪回放,将其中电流数据放大10倍还原为一次值后接入即将在现场投运的光学电流互感器,电压信号直接接入接地选线装置的电压采集插件。选线启动零序电压设置为10 V,以上各种接地测试均能正确选出故障线路。

图5是消弧线圈过补偿系统经4000 Ω 过渡电阻高阻接地时基于光CT接地选线装置的波形。从波形中可以看出,单相高阻接地时零序电流及电压信号都很微弱。经消弧线圈补偿后各支路稳态电流方向一致,幅值基本差不多,仅靠接地瞬间故障线路与非故障线路相位及幅值特征可以判断出线路1为故障线路。

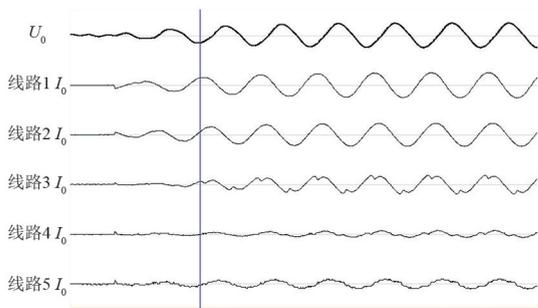


图5 过补偿经4000 Ω 过渡电阻接地波形

基于光CT的接地选线装置已在天生桥水电站、鲁布革水电站投运,现场最长运行时间超过一年,未发生拒动及误动。

6 结论

柔性光CT可以方便地在架空线及GIS等难以安装常规零序互感器的场合进行安装,因输出的为数字信号,不会因二次电缆过长而导致幅值误差及角差过大。

基于光CT的接地选线装置提高了现场单相接

地故障处理效率,降低事故处理时间,避免接地故障引发的电缆火灾导致的重大设备损失和经济损失,避免了人身伤害,提高了供电可靠性。

参考文献

- [1] 贺家李,李永丽,董新洲,等.电力系统继电保护原理(4版)[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 戴剑锋,张艳霞.基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J].中国电机工程学报,2003,23(5):44-47.
- [3] 戴剑锋,张艳霞,侯喆.小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J].电网技术,2004,28(3):43-47.
- [4] 石勇,张艳霞,沈勇环.基于数字信号处理器和小波包重构算法的配电网接地选线装置的研究[J].电网技术,2005,29(4):50-54.
- [5] 石勇,张艳霞,刘卓辉. CPLD在小电流接地选线装置中的应用[J].中国农村水利水电,2004,265(11):111-113.
- [6] 小电流接地系统单相接地故障选线装置运行规程: T/CSEE 0056—2017[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [7] 阎嫦娥,王耀,罗苏南,等.用于发电机保护的柔性全光纤电流互感器[J].电力自动化设备,2017,37(4):191-196.
- [8] GUO Weina, HUANG Wenjie. Optical Current Transformer Accuracy Problems and Solutions[C]. 2010 Asia-Pacific Conference on Power Electronics and Design, Wuhan, 2010:47-50.
- [9] 王凯,王耀,王光,等.光学电流互感器应用于发电机保护的研究及实践[J].水电与抽水蓄能,2016,2(4):28-33.
- [10] 尤向阳,葛笑寒,吴萍.基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(14):125-130.
- [11] 邱进,田野,李冠华,等.基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(6):180-187.
- [12] 王鹏,冯光,韦延方,等.10 kV配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):178-187.

作者简介:

石勇(1978),男,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护及接地技术研究;

任百群(1972),男,主要从事电力系统继电保护及自动运动专业工作。

(收稿日期:2021-10-23)