

DOI: 10.7667/PSPC170899

二次电缆对地分布电容对强电开入回路的影响研究

乔中伟, 钱敏, 郭松伟, 丁庆, 王世祥, 袁志军

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 通过对光耦开入回路原理的研究, 发现了开关量变位时光耦开入电压的变化特征。通过对开入电压变化特征的影响因素分析, 借助于二次电缆对地分布电容的测试数据及定量分析计算, 发现了二次电缆对地分布电容会引起开关量的延迟变位。由于断路器分闸时间比较短, 因此在断路器分闸时, 故障录波等装置记录到的断路器分、合位会出现交叉现象。通过对延迟时间的影响因素分析, 提出了减缓电缆分布电容对强电开入回路影响的有效措施, 即减小光耦开入回路限流电阻阻值和提高光耦开入回路的返回电压。

关键词: 光耦; 分布电容; 延迟变位; 交叉; 电阻; 返回电压

Research on influence of secondary cable distributed capacitance on high voltage input circuit

QIAO Zhongwei, QIAN Min, GUO Songwei, DING Qing, WANG Shixiang, YUAN Zhijun

(Shenzhen Power Supply Bureau Ltd, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Based on the research about the principle of input circuit of optocoupler, the switching characteristic of input voltage of optocoupler is found. Through the analysis of the influence factors of input voltage of optocoupler, based on the test data of the distributed capacitance of the cable and quantitative analysis, it is found that the distributed capacitance of the cable can cause the switching delay of the switch. Because of the switching time is shorter, when the breaker is switched off, the breaker position recorded by the fault recorder and other devices will intersect. By analyzing the influence factors of the delay time, the effective measures to reduce the influence of the distribution capacitance of the cable on the high voltage input circuit are put forward, that is, reducing the resistance and raising the return voltage of input circuit of optocoupler.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA052001).

Key words: optocoupler; distributed capacitance; switching delay; intersect; resistance; return voltage

0 引言

近两年, 在基建变电站验收、故障录波器加装等工作中, 现场工作人员多次发现采用强电开入回路接入到故障录波器、测控装置等的断路器位置的变位逻辑与实际变位逻辑不一致, 如断路器由合到分时, 故障录波器或测控装置记录到的变位逻辑应该是合位先由1变0, 分位后由0变1, 但现场实际中常出现分位先由0变1, 合位后由1变0, 分、合位交叉的现象, 此现象在武汉中元华电故障录波器中比较多见。接入故障录波器或测控装置的断路器位置的变位异常后, 故障录波器或监控后台记录到的断路器变位信息将不能正确地反映断路器的实际

变位情况, 这将严重影响保护动作行为分析, 特别是复杂故障的分析, 而且由于不能正确反映一次设备的实际状态, 出现与正常现象相悖的“假象”, 将会误导运维人员对设备工况的判断。

在深圳电网某500 kV变电站的验收工作中, 多个间隔均出现了接入故障录波器的断路器变位逻辑异常的现象, 而且全站不同厂家的多台故障录波器均出现此现象, 在以往运维工作中很少遇到此现象, 验收工作组通过多次试验排除了故障录波装置及断路器辅助触点异常的原因, 怀疑长电缆开入回路受电缆对地分布电容的影响, 在断路器位置变化时, 强电开入的开关量将不能准确、及时地变位, 此分析仅为定性分析, 未能充分说明问题的具体原因, 而相关文献的研究也主要集中在电缆对地分布电容对继电保护的影响^[1-10]。为探究电缆对地分布电容对强电开入回路的影响, 本文将从光耦开入回路的原

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目资助(863计划)
(2014AA052001)

理^[11-13]及保护装置的开关量采集原理^[14-18]出发,通过分析长电缆强电开入回路开关量变位时等效回路的电压变化及近似计算,从原理上解释了电缆分布电容对强电开入回路的具体影响,并提出了减缓电缆分布电容影响的多项有效措施。

1 强电开入回路原理

强电开入回路一般采用光电耦合器件来实现对开关量的采集,单个开关量的强电开入回路原理见图 1,其中虚线框内的部分为光电耦合器件, R 为限流电阻(50 kΩ 以上),直流系统的电压为 220 V, $L1$ 为由装置至高压场地的正电电缆线芯, C_1 为 $L1$ 线芯的对地分布电容, $L2$ 为由装置至高压场地的负电电缆线芯, C_2 为 $L2$ 线芯的对地分布电容, $K1$ 为开关量接点。当 $K1$ 由断开变为闭合后,光电耦合器件的发光二极管导通,通过光电耦合使三极管导通,装置内部通过弱电开入回路的电位变化,完成对开关量由分位变为合位的变位识别;相反当 $K1$ 由闭合变为断开,光电耦合器件的发光二极管截止,使三极管也截止,装置实现开关量由合位变为分位的变位识别。

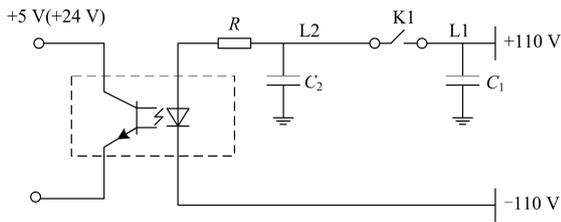


图 1 强电开入回路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high voltage input circuit

2 开关量变位时光耦开入正电端电压的特征分析

由发光二极管的工作原理^[19]可知,其正向工作电压约为 1~2.5 V,当正向压降达到工作电压时发光二极管导通,当正向电流达到 1 mA 左右时开始发光,工作电流越大发光强度越高,达到一定数值后,发光强度趋于饱和,而工作电流的大小取决于发光二极管两端的正向电压,即图 1 中电容 C_2 上的电压与负电端的压差。

由电容器充放电原理可知,当开关量 $K1$ 由分变合时,电容 C_2 正电端电压 U_{11} 满足

$$U_{11} = U_0 + (U - U_0) \times [1 - e^{(-t/RC)}]$$

其中: U_0 为电容 C_2 的起始电压, $U_0 = 0$ V; U 为电容 C_2 充电后的最终电压,直流系统电压为 220 V 时, $U = 110$ V。当开关量 $K1$ 由合变分时,电容

C_2 正电端的电压 U_{12} 满足

$$U_{12} = U_0 \times e^{(-t/RC)}$$

其中, U_0 为电容 C_2 的起始电压,直流系统电压为 220 V 时, $U_0 = 110$ V。

3 电缆分布电容的测试方法

文献[20]提供了不同参数二次电缆对地分布电容的测试数据,但并未给出具体的测试方法,工程验收工作中常采用耐压测试仪来检验二次电缆的绝缘水平,同时可以测量二次电缆的漏电流,漏电流的大小可以用于计算二次电缆的对地分布电容,其原理见图 2。

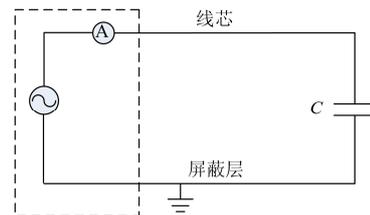


图 2 电缆分布电容的测试原理

Fig. 2 Measurement principle of distributed capacitance of cable

耐压测试仪原理如图 2 虚线部分,可输出用于绝缘测试的交流高电压,视其为交流电压源,其一端接地,另一端接至待测二次电缆(屏蔽层接地),回路中串有电流表,可以读取不同测试电压(绝缘测试时一般采用 1 000 V,测试 1 min)下的漏电流。由于 $I_{漏} = \frac{1000}{X_c}$,则可导出 $C = \frac{I_{漏}}{\pi} \times 10^{-5}$ 。据此计算出

来的二次电缆对地分布电容与文献[20]提供的测试数据一致,也验证了该方法的可行性。

4 电缆分布电容对光耦开入回路的影响分析

以武汉中元华电故障录波器为例,其光耦开入的动作电压为 $75\% U_n$,返回电压为 $50\% U_n < U_{返回} < 55\% U_n$ (厂家提供的数据为 $50\% U_n$,从理论模型分析,不够合理,本文取 $51\% U_n$),限流电阻为 100 kΩ。以深圳电网某 500 kV 变电站 2205 断路器位置录波回路为例,直流系统电压 U_n 为 220 V,电缆长 255 m(电缆清册中的数据,非实测值),现场测试线芯漏电流约为 15 mA,则可计算出 C_2 为 0.048 μF。

当断路器常闭辅助触点(分位)由分变合时, $U_{11} = 110 \times [1 - e^{(-t/0.0048)}]$,电容 C_2 的正向电压为 $U_{C2} = U_1 - (-110)$,若 $U_{C2} = 75\% U_n$ (165),则 $t = 3.3$ ms,即当断路器常闭辅助触点(分位)由分变合

后, 经 3.3 ms 后, C_2 正电端电压才达到光耦开入的动作电压, 录波器延迟 3.3 ms 记录到断路器常闭辅助触点(分位)的变位。

当断路器常开辅助触点(合位)由合变分时, $U_{c2} = U_0 \times e^{(-t/0.0048)}$, 电容 C_2 的正向电压为 $U_{c2} = U_{c2} - (-110)$, 若 $U_{c2} = 51\%U_n$ (112), 则 $t=18.8$ ms, 即当断路器常开辅助触点由分变合后, 经 18.8 ms 后, C_2 正电端电压才达到光耦开入的返回电压, 录波器延迟 18.8 ms 记录到断路器常开辅助触点(合位)的变位。

现场实测断路器分闸时, 常开辅助触点(合位)与常闭辅助触点(分位)的变位时间差为 10 ms 左右, 则断路器分闸时, 理论变位录波见图 3, 计及电缆分布电容延迟效应的影响, 实际的变位录波见图 4。从图 4 可知, 2205 断路器 A 相分闸时, 断路器 A 相分位先变位, 合位后变位, 分、合位同时为 1 的状态持续 5.5 ms 左右, 这与现场实际记录到的现象一致。由于断路器的合闸时间较分闸时间长, 合闸时辅助触点的变位时间差也较长, 因此受电缆分布电容延迟效应的影响后, 也很少出现分、合位交叉的现象。

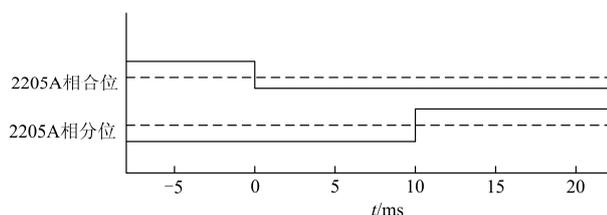


图 3 断路器分闸时的理想录波图

Fig. 3 Ideal oscillograph of breaker when it's switched off

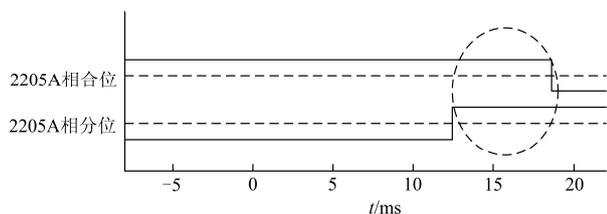


图 4 断路器分闸时的实际录波图

Fig. 4 Actual oscillograph of breaker when it's switched off

5 减缓电缆分布电容影响的措施

5.1 减小限流电阻的阻值

以第 4 节的分析为基础, 将限流电阻的阻值减小为 50 kΩ, 当断路器常闭辅助触点(分位)由分变合时, $U_{c1} = 110 \times [1 - e^{(-t/0.0024)}]$, 当 $U_{c2} = 75\%U_n$ (165), 则 $t=1.7$ ms; 当断路器常开辅助触点(合位)由合变分时, $U_{c2} = 110 \times e^{(-t/0.0024)}$, 当 $U_{c2} = 51\%U_n$ (112),

则 $t=9.4$ ms, 那么录波器记录到的断路器的实际变位见图 5, 从 5 图中可以看出, 断路器常开辅助触点(合位)、常闭辅助触点(分位)变位逻辑正常, 且无交叉现象。

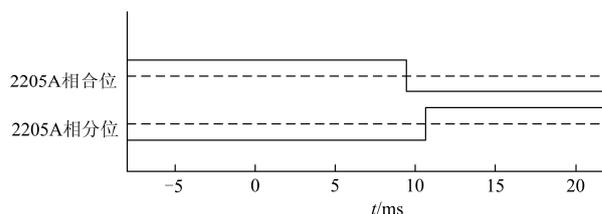


图 5 减小限流电阻后的断路器的变位录波图

Fig. 5 Oscillograph of breaker after the current-limiting resistance is reduced

5.2 适当提高光耦开入的返回电压

以第 4 节的分析为基础, 将返回电压提高为 $55\%U_n$, 当断路器常开辅助触点(合位)由合变分时, $U_{c2} = U_0 \times e^{(-t/0.0048)}$, 电容 C_2 的正向电压为 $U_{c2} = U_{c2} - (-110)$, 当 $U_{c2} = 55\%U_n$ (121), 则 $t=11$ ms, 那么录波器记录到的断路器的实际变位见图 6, 从图 6 中可以看出, 断路器常开辅助触点(合位)、常闭辅助触点(分位)变位逻辑正常, 且无交叉现象。

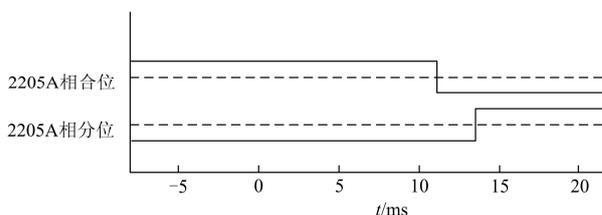


图 6 提高返回电压后的断路器的变位录波图

Fig. 6 Oscillograph of breaker after the return voltage is increased

5.3 同时减小限流电阻和适当提高光耦开入的返回电压

以第 4 节的分析为基础, 将限流电阻的阻值减小为 50 kΩ, 将返回电压提高为 $55\%U_n$, 当断路器常闭辅助触点(分位)由分变合时, $U_{c1} = 110 \times [1 - e^{(-t/0.0024)}]$, 当 $U_{c2} = 75\%U_n$ (165), 则 $t=1.7$ ms; 当断路器常开辅助触点(合位)由合变分时, $U_{c2} = 110 \times e^{(-t/0.0024)}$, 当 $U_{c2} = 55\%U_n$ (121), 则 $t=5.5$ ms, 那么录波器记录到的断路器的实际变位见图 7, 从图 7 中可以看出, 断路器常开辅助触点(合位)、常闭辅助触点(分位)变位逻辑正常, 且无交叉现象, 同时减小限流电阻和提高返回电压后, 电缆对地分布电容的延迟效应已经得到有效减缓。

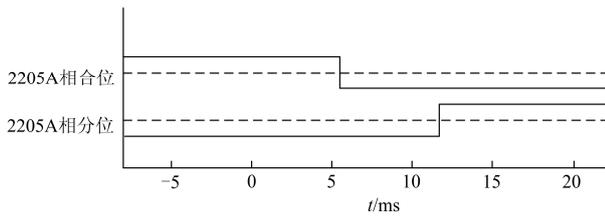


图 7 同时减小限流电阻和提高返回电压后的断路器的变位录波图

Fig. 7 Oscillograph of breaker after the current-limiting resistance is reduced and the return voltage is increased

5.4 运行装置减缓电缆分布电容影响的临时措施

对于已经投入运行的装置，光耦开入的动作电压无法更改，可通过等效减小限流电阻来实现，现场工作中给断路器常开辅助触点(合位)开入点并接备用光耦开入点后，电缆分布电容的影响得到有效减缓，其原理见图 8，由等效原理图可知，并接备用光耦开入点后，等效为限流电阻为 $R/2$ 的单个光耦开入通道，其由合变分的延迟时间将缩短一半，分布电容的影响得到有效的减缓。

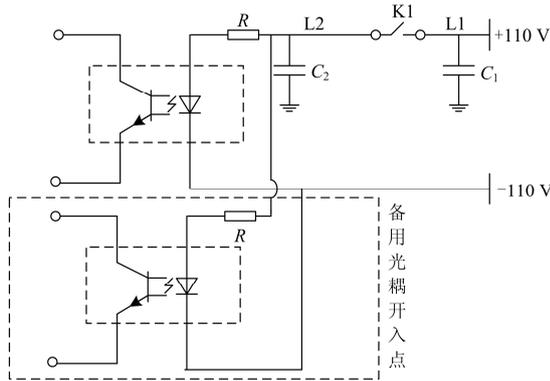


图 8 并接备用光耦开入点后的原理图

Fig. 8 Schematic diagram of double photocoupler input circuit

6 结论

受电缆分布电容的影响，光耦开入回路在开关量变位时将会出现“延迟变位”的现象，开光量由合位变为分位时“延迟变位”的现象较为明显，电缆对地分布电容越大(对地漏电流越大)，延迟时间越长(可达到 15 ms 以上)；开光量由分位变为合位时受电缆分布电容的影响较小，延迟时间一般 3 ms 左右，因此在断路器分闸时会出现分位先由 0 变 1，合位后由 1 变 0，分、合位交叉的现象。通过减小光耦开入回路的限流电阻、适当地提高光耦开入回路的返回电压，可以明显地缩短开关量变位的延迟时间，有效减缓电缆对地分布电容对强电开入回路的影响。对于已经投入运行的故障录波器等装置，

可以采用并接备用光耦开入通道做为减缓电缆对地分布电容影响的临时措施。

参考文献

[1] 吴剑鸣, 严正. 控制电缆的分布电容对继电保护的影响及防范措施[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 115-118.
WU Jianming, YAN Zheng. Influence of control cable distributing capacitance on protection and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 115-118.

[2] 雷兴, 潘学萍, 孙彬, 等. 电缆分布电容对出口继电器动作的影响分析及应对措施[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 170-175.
LEI Xing, PAN Xueping, SUN Bin, et al. Analysis on influence of distributed capacitance of cables on export relay and relevant measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 170-175.

[3] 杜建华, 王长水. 控制电缆分布电容对控制回路的影响分析及处理[J]. 自动化技术与应用, 2010(9): 120-122.
DU Jianhua, WANG Changshui. Effect analysis and processing of the distributed capacitance for control cable on control loop[J]. Techniques of Automation and Applications, 2010(9): 120-122.

[4] 高旭, 胥桂仙, 孙集伟, 等. 一起典型的 500 kV 失灵保护误动分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 104-106.
GAO Xu, XU Guixian, SUN Jiwei, et al. Mal-function analysis of a typical 500 kV breaker failure protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 104-106.

[5] 杨广羽, 马玉新, 傅亚光, 等. 光电耦合 MOS 栅固态继电器回路研究与误触发改进措施[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 135-141.
YANG Guangyu, MA Yuxin, FU Yaguang, et al. Research of photoelectric MOS gate solid state relay circuit and spurious triggering improvement[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 135-141.

[6] 赵康伟. 继电保护装置采用光隔离开入引起误动的思考[J]. 华北电力技术, 2005(8): 38-39.
ZHAO Kangwei. Analysis on malfunction of relay protection using photoelectric isolation digital input[J]. North China Electric Power, 2005(8): 38-39.

[7] 吴文传, 吕颖, 张伯明. 继电保护隐患的运行风险在线评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 78-83.
WU Wenchuan, LÜ Ying, ZHANG Boming. On-line operating risk assessment of hidden failures in protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 78-83.

- [8] 王翀, 宋巍, 李侔莹, 等. 一起直流系统接地引起的 220 kV 开关跳闸事故分析[J]. 华北电力技术, 2013(2): 47-49.
WANG Chong, SONG Wei, LI Mouying, et al. Analysis of 220 kV breaker trip fault caused by DC system grounding[J]. North China Electric Power, 2013(2): 47-49.
- [9] 程利军, 尹项根, 张哲. 微机保护装置的抗浪涌骚扰研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 51-55.
CHENG Lijun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Research on surge immunity for numerical protection devices[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 51-55.
- [10] 王树春, 丁建中. 微机保护开关量误动原因分析及改进措施[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 78-80.
WANG Shuchun, DING Jianzhong. Maloperation of numerical relay caused by external binary input and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 78-80.
- [11] 谢子青. 光电隔离抗干扰技术及应用[J]. 现代电子技术, 2003(13): 33-34, 37.
XIE Ziqing. Technique & Application of Optical-electrical isolation resisting disturbance[J]. Modern Electronics Technique, 2003(13): 33-34, 37.
- [12] 宋小舟, 王柳, 智全中. 继电保护装置光隔开入测试方法的研究[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 44-47.
SONG Xiaozhou, WANG Liu, ZHI Quanzhong. Research on testing method for photoelectric-isolated digital input in protective relays[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 44-47.
- [13] 宋小欣, 彭淑明, 戴斌. 光耦误动原因分析及解决办法[J]. 江西电力, 2008, 32(6): 10-12.
SONG Xiaoxin, PENG Shuming, DAI Bin. Cause and treatment of optical coupler maloperation[J]. Jiangxi Electric Power, 2008, 32(6): 10-12.
- [14] 常风然, 高艳萍. 微机保护开入量回路的有关问题分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 113-115.
CHANG Fengran, GAO Yanping. Problem analysis about binary input circuit of microprocessor-based protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 113-115.
- [15] 石建, 徐丽青, 岳峰. 继电保护用开入回路仿真计算与改进[J]. 电器与能效管理技术, 2017(12): 55-57.
SHI Jian, XU Liqing, YUE Feng. Simulation and improvement of binary input circuit in relay protection[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(12): 55-57.
- [16] 黄继东, 肖锋, 王智勇, 等. 母线保护刀闸位置异常时的自适应校正[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 122-127.
HUANG Jidong, XIAO Feng, WANG Zhiyong, et al. Adaptive correction scheme of switch position abnormality of busbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 122-127.
- [17] 叶远波, 陈晓东, 项忠华, 等. 继电保护在线状态检修的应用和探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 132-138.
YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Application and discussion on online condition-based maintenance of relay protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 132-138.
- [18] 惠杰, 刘妮娜, 冯迎春. 500 kV 失灵保护误动分析与反措[J]. 工程建设与设计, 2017(2): 64-65.
HUI Jie, LIU Nina, FENG Yingchun. Analysis of 500 kV failure protection misoperation and its anti accident measures[J]. Construction & Design for Engineering, 2017(2): 64-65.
- [19] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 122-162.
- [20] 孟恒信, 张悦, 朱良肆, 等. 保护用控制电缆分布电容参数测试方法研究[J]. 山西电力, 2008(4): 16-19.
MENG Hengxin, ZHANG Yue, ZHU Liangyi, et al. Research on distributed capacitance parameter testing method of relay control cable[J]. Shanxi Electric Power, 2008(4): 16-19.

收稿日期: 2017-06-15; 修回日期: 2018-02-25

作者简介:

乔中伟(1988—), 男, 本科, 工程师, 从事继电保护运维工作。E-mail: qzw262@163.com

(编辑 周金梅)