

直流系统交流串扰故障对继电器的影响及防范措施研究

李书瀚¹, 王 岩², 高 扬², 乔 建²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 138000;

2. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司, 吉林 吉林 138000)

摘要: 变电站直流系统发生交流串扰故障后, 会造成继电器误动作, 危害系统正常运行。首先介绍了继电器动作特性及其工作原理; 其次建立了直流系统等效模型, 并根据故障发生位置推导出直流系统交流串扰故障解析方程, 分析了发生交流串扰故障时系统中各参数变化对继电器两端电压的影响; 然后在 Multisim 中建立交流串扰故障仿真模型, 通过仿真验证了理论分析的正确性; 最后提出减小电缆对地分布电容、提高继电器动作功率和避免外界因素造成交流串扰故障的措施。

关键词: 直流系统; 交流串扰故障; 继电器; 防范措施

Research on the influence of AC crosstalk fault in DC system on relay and its preventive measures

LI Shuhan¹, WANG Yan², GAO Yang², QIAO Jian²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Company Jilin Power Supply Company, Jilin 132000, China)

Abstract: After the AC crosstalk fault occurs in the DC system of the substation, it will cause the relay to malfunction and endanger the normal operation of the system. In this paper, the action characteristics and working principle of the relay are firstly introduced; secondly, the equivalent model of the DC system is established, and according to the fault location, the analytical equation of the AC crosstalk fault of the DC system is deduced, and the change of each parameter in the system when the AC crosstalk fault occurs is analyzed. The influence of the voltage at both ends of the relay; then the simulation model of AC crosstalk fault is established in Multisim, and the correctness of the theoretical analysis is verified by simulation; finally, it is proposed to reduce the distributed capacitance of the cable to the ground, improve the operating power of the relay, and avoid the AC crosstalk fault caused by external factors measures.

Key words: DC system; AC crosstalk fault; relay; precautions

0 引言

在变电站中, 直流系统为蓄电池充电的同时, 也可以为继电保护装置、直流监测系统等重

要二次设备提供安全稳定的工作电源^[1]。直流系统中的电缆芯线与屏蔽层之间存在一定的分布电容且屏蔽层接地, 当系统中发生接地故障或串入

吉林省科技厅科技计划重点研发项目 (20180201010GX)

交流电时,会通过这种对地分布电容形成回路,引起部分动作值较低的继电器误动作^[2-4]。根据直流系统交流串扰故障发生的位置不同,可将其分为正极交流串扰、负极交流串扰和继电器正侧交流串扰^[5]。

文献[6]对一起500 kV变电站保护误跳闸事故进行分析,指出故障原因是施工人员将交流电碰到直流电源负极导致线路开关跳闸。文献[7]通过一起变电站直流系统交流串扰故障案例,分析了故障产生原因及故障对直流系统和跳闸出口继电器的危害,并提出故障预防措施。文献[8]通过对500 kV聊城站开关误跳导致全站停电事故的调查分析,指出当直流系统发生交流串扰故障时,交流电通过继电器、系统分布电容构成回路,若继电器分压达到动作条件,便会引起误动作事故。文献[9]对直流系统发生交流串扰故障时电缆分布电容与继电器功率的关系进行了分析,并设计了一种在线监测直流系统分布电容装置,通过计算分布电容值并与报警阈值进行比较,判断直流系统是否处于安全运行状态。上述文献通过分析直流系统发生交流串扰故障时的事故现象,得出引起故障发生的相关因素,同时提出了故障监测及防范措施,但是并未从故障原理出发分析导致继电器误动作的相关因素及其变化规律。

本文以某变电站直流系统交流串扰故障引起绝缘监测装置报警、继电器跳闸事故为原型,首先介绍了继电器动作特性及其工作原理;其次建立了直流系统等效模型,基于电路理论对直流系统发生交流串扰故障时的各种情况进行分析并推导出解析方程,从理论上分析故障特征及变化规律;然后基于Multisim仿真软件建立仿真模型,将仿真结果与理论计算结果进行对比验证;最后以文中对直流系统交流串扰故障的分析为理论依据,提出直流系统交流串扰故障的防范措施。

1 继电器动作特性

在继电保护中,为了提高继电器携带负载能力、增加触点数量,通常使用中间继电器作为控

制开关,用于在控制电路中传递中间信号。中间继电器的动作特性曲线如图1所示。

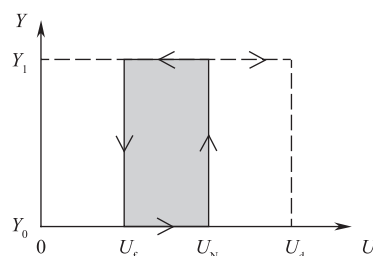


图1 继电器动作特性曲线

Fig. 1 Relay action characteristic curve

中间继电器实质是一种电压型继电器,在工作时具有阶跃式的输入、输出特点。当继电器接收到一个输入电压信号 U 时,若信号值小于动作值 U_1 ,则继电器不动作,继电器输出信号为0;当输入电压信号达到 U_1 时,继电器动作,继电器输出信号从0立即跳跃到 Y_1 。此后,若继续增大输入电压信号至 U_d 或减小输入电压信号介于 (U_r, U_N) 之间,则继电器输出信号仍为 Y_1 不变;当输入电压信号减小到 U_r 时,继电器输出信号从 Y_1 跳跃到0,继电器复位。

图2为继电器跳闸回路。图2中,CKJ为连接在直流母线正极(+KM)、负极(-KM)间的跳闸回路中间继电器; C_1 、 C_2 分别为正极、负极母线对地等效分布电容; C_3 为跳闸回路电缆对地等效分布电容。正常工况下变电站直流系统额定电压为220 V,由直流绝缘监测装置接地,A点对地电压为+110 V,B点对地电压为-110 V^[10]。当网控跳闸触点闭合,继电器两端电压升高至额定动作电压,即直流系统额定电压的55%~70%时,跳闸继电器动作,发出跳闸命令。

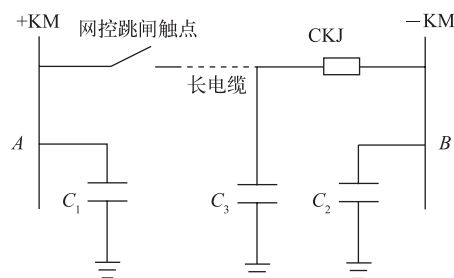


图2 继电器跳闸回路

Fig. 2 Relay trip circuit

2 直流系统交流串扰故障分析

2.1 直流系统等效电路

直流系统等效电路如图3所示， U 为由蓄电池组成的直流电压源； C_+ 为正极对地电容； C_- 为负极对地电容； R_+ 为正极对地绝缘电阻； R_- 为负极对地绝缘电阻； R_1 、 R_2 为直流绝缘检测装置中用于检测接地故障的平衡桥电阻； K 为跳闸保护触点； R_J 为继电器等效内阻； C 为继电器所带回路电缆对地电容。

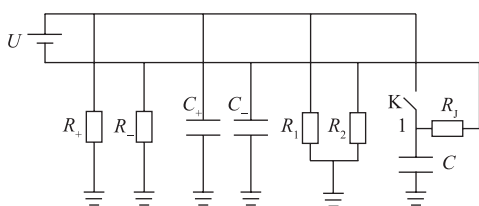


图3 直流系统等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of DC system

图3中，点1为继电器所带控制回路的集合点，通常会接入一些较长的电缆。电缆的芯线与屏蔽层之间存在对地分布电容，且分布电容随着电缆长度的增加而增大。若直流系统受到交流信号影响，由于长电缆的对地电容较大，交流信号将会通过电缆的分布电容与继电器构成回路，从而导致继电器误动作。

2.2 正极交流串扰故障

直流系统正常工作时，通过绝缘监察装置内部的平衡桥电阻接地保持母线对地电压平衡。但是当发生交流串扰故障时，由于交流电是接地系统，对于直流回路来说就相当于发生了一点接地故障。以某变电站交流串扰故障事故为原型，建立直流系统正极交流串扰故障等效电路如图4所示， U_s 为串入的交流电源。

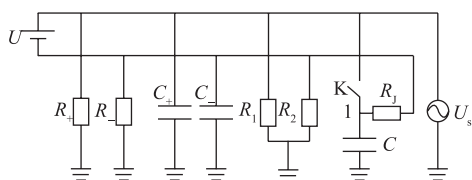


图4 正极交流串扰故障等效电路

Fig. 4 Positive AC crosstalk fault equivalent circuit

采用叠加定理分别分析直流电源和交流电源对继电器的影响。当只考虑直流电源单独作用时，在交流电接入的瞬间，此时发生的直流正极一点接地故障为直流励磁下的零状态响应，KVL方程为

$$U = R_J C \frac{du_c}{dt} + u_c \quad (1)$$

由式(1)可得继电器两端直流电压 U_{J1} 为

$$U_{J1} = \frac{U}{2} e^{-\frac{t}{R_J C}} \quad (2)$$

当只考虑交流电源作用时，直流电源相当于短路，继电器两端交流电压 U_{J2} 为

$$U_{J2} = \frac{U_s R_J}{R_J + \frac{1}{j\omega C}} \quad (3)$$

将式(1)与式(2)相加，得到继电器两端电压 U_J 为

$$U_J = U_{J1} + U_{J2} \quad (4)$$

由式(2)可以看出，直流系统达到稳态后，直流电源对继电器两端电压的影响完全消失，只剩下交流电源作用。因此，当发生正极交流串扰故障时，决定继电器两端电压的因素为继电器等效电阻 R_J 、控制回路电缆的分布电容 C 及交流电压 U_s 。直流系统负极发生交流串扰故障时，对故障的分析方法与上述分析类似，因此不再赘述。

由继电器动作特性可知，当继电器两端电压达到额定电压时，继电器动作。因此，由式(3)可以看出，当发生正极交流串扰故障时，若继电器两端电压在交变过程中高于继电器动作电压且超过继电器延时时间，则继电器会误动作。

2.3 继电器一侧交流串扰故障

由于继电器所带支路为并联运行，一旦回路中某一长电缆串入交流信号，交、直流电压叠加，就会导致动作功率较低的继电器误动作。直流系统继电器正极侧发生交流串扰故障时等效电路如图5所示。

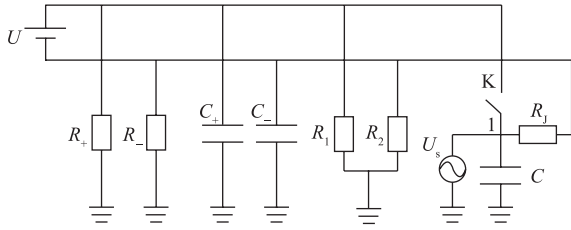


图5 继电器正极侧交流串扰故障等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of AC crosstalk fault on positive side of relay

当交流电通过继电器正极侧串入时，与继电器电阻、直流系统对地分布电容及平衡桥电阻构成回路。直流电源单独作用下，回路KCL方程为

$$\frac{U_J}{R_2 // R_- // R_s} + C_- \frac{dU_J}{dt} = \frac{U - U_J}{R_1 // R_+} - C_+ \frac{dU_J}{dt} \quad (5)$$

由式(5)可得继电器两端直流电压 U_{J1} 为

$$U_{J1} = U_J(\infty) + U_J(0_+) - U_J(\infty)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

其中

$$U_J(\infty) = \frac{R_2 // R_- // R_J}{R_1 // R_+ + R_2 // R_- // R_J} U \quad (7)$$

$$U_J(0_+) = \frac{R_2 // R_-}{R_1 // R_+ + R_2 // R_-} U \quad (8)$$

$$\tau = (R_1 // R_+ // R_2 // R_- // R_J) (C_+ + C_-) \quad (9)$$

交流电源单独作用下继电器两端电压 U_{J2} 为

$$U_{J2} = \frac{U_s R_J}{R_J + \left(\frac{1}{j\omega 2C_-} // \frac{1}{2} R_2 // R_+ // R_- \right)} \quad (10)$$

继电器两端电压 U_J 为

$$U_J = U_{J1} + U_{J2} \quad (11)$$

当发生继电器正极侧交流串扰故障时，影响继电器两端电压的因素为交流电压 U_s 、平衡桥电阻和直流系统分布电容。若继电器两端电压在交、直流叠加变化过程中高于继电器动作电压的时间，超过继电器的延时启动时间，则会导致继电器误动作。

3 仿真结果分析

3.1 正极交流串扰故障仿真

由理论分析可知，当发生正极、负极交流串扰故障时，影响继电器两端电压变化的因素为交

流电压 U_s 、电缆等效分布电容 C 和继电器等效电阻 R_J 。由于继电器的型号在变电站建设时已经确定，因此文中重点针对上述影响因素中 U_s 、 C 的变化对继电器两端电压 U_J 的影响进行仿真分析。所有仿真均基于Windows7操作系统，软件为Multisim14。

基于Multisim14建立直流系统交流串扰故障仿真电路。电路参数为： $R_+ = R_- = 1 \text{ M}\Omega$ ， $R_1 = R_2 = 30 \text{ k}\Omega$ ， $C_+ = C_- = 10 \text{ }\mu\text{F}$ ， $R_J = 22.4 \text{ k}\Omega$ ， $U = 220 \text{ V}$ 。当发生正极交流串扰故障时，根据仿真结果绘制曲线，如图6所示。

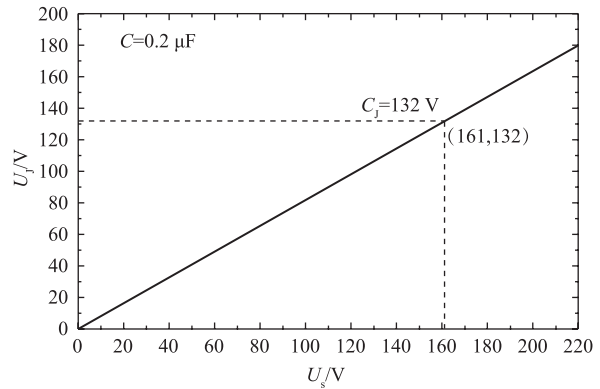
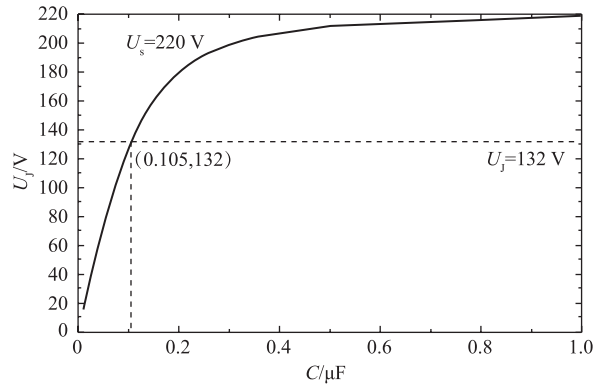
(a) $U_s - U_J$ 变化曲线(b) $C - U_J$ 变化曲线

图6 正极故障时继电器两端电压变化曲线

Fig. 6 The voltage change curve of both ends of the relay when the positive pole is faulty

由图6a可知，当直流系统发生正极交流串扰故障，且电缆等效分布电容为定值，即 $C = 0.2 \text{ }\mu\text{F}$ 时，交流串扰电压与继电器两端电压大体呈线性关系，随着交流电压 U_s 的增加，继电器两端电压

U_j 随之增加。当交流电压低于161 V时,交流电压增加不会引起继电器动作;当交流电压超过161 V时,继电器两端电压达到其动作电压132 V,则会引起继电器误动作。

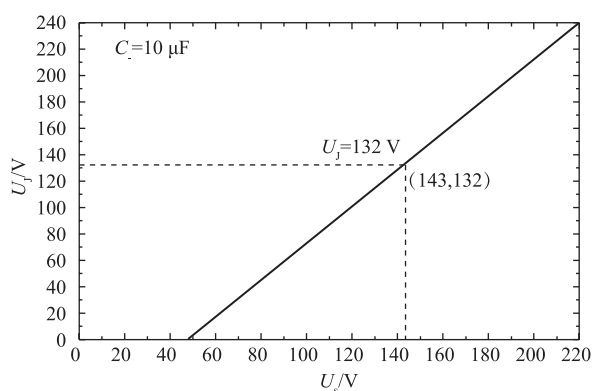
由图6b可知,当交流串扰电压为定值,即 $U_s=220$ V时,电缆等效分布电容与继电器两端电压呈非线性关系,随着电缆等效分布电容 C 增加,等效分布电容两端交流分压减小,继电器两端电压 U_j 随之增加。但是在电容值增大到 $0.6 \mu\text{F}$ 后,容抗远小于继电器等效电阻,电容的增加已经不能对继电器两端电压产生影响,曲线趋于平缓。当电缆等效分布电容低于 $0.105 \mu\text{F}$ 时,不会引起继电器动作;若电缆分布电容高于 $0.105 \mu\text{F}$,则会在发生工频220 V交流串扰故障时,继电器两端电压达到其动作电压132 V,造成继电器误动作。

3.2 继电器一侧交流串扰故障仿真

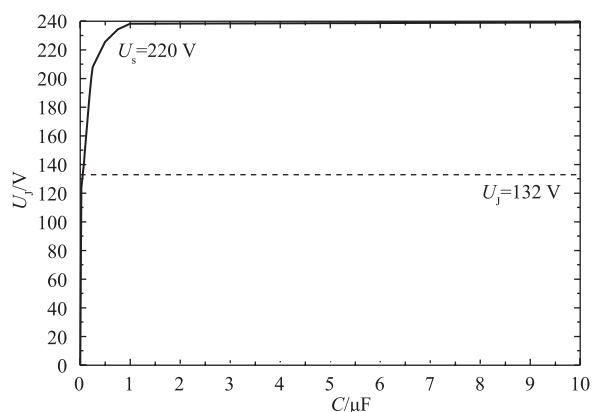
对继电器正极侧交流串扰故障进行仿真分析时,由于变电站在选定绝缘监测装置后,平衡桥电阻不再改变,因此重点针对 U_s 及 C 的变化对继电器两端电压的影响进行仿真分析。根据仿真结果绘制曲线,如图7所示。

由图7a可知,当发生继电器正极侧交流串扰故障,且直流系统等效分布电容为定值,即 $C=10 \mu\text{F}$ 时,交流串扰电压与继电器两端电压大体呈线性关系,随着交流电压 U_s 的增加,继电器两端电压 U_j 随之增加。当交流电压低于143 V时,交流电压增加不会引起继电器动作;当交流电压超过143 V时,继电器两端电压达到其动作电压132 V,则会引起继电器误动作。

由图7b可知,当交流串扰电压为定值,即 $U_s=220$ V时,直流系统等效分布电容与继电器两端电压呈非线性关系。随着直流系统等效分布电容 C 的增加,继电器两端电压随之增加,当继电器两端电压达到其动作电压132 V时,则会引起继电器误动作。同时,对比图7a可以发现,由于直流系统等效分布电容较大,在发生继电器正极侧交流串扰故障时,交流电压对继电器两端电压的影响更明显。



(a) U_s - U_j 变化曲线



(b) C - U_j 变化曲线

图7 继电器正极侧故障时继电器两端电压变化曲线

Fig. 7 Variation curve of the voltage across the relay when the positive side of the relay fails

此外,仿真结果与理论分析计算结果基本相同,从而验证了模型理论分析的正确性。

4 防范措施

目前对于交流串扰故障防范措施,重点放在故障治理方面。常见的交流串扰故障治理技术及其特点见下表。

表 交流串扰故障治理技术及其特点

Tab. AC crosstalk fault control technology and its characteristics

技术	原理	特点
二极管钳制技术	在直流母线与大地之间安装钳位二极管,令故障支路短路脱离直流系统,同时使直流母线对地电压偏移范围控制在标准范围内	利用二极管钳制母线对地电压,从而释放交流电压
交流迫跳技术	将故障支路短接到地,形成短路电流,迫使故障支路开关跳开	通过迫使故障支路断路器跳闸,切除交流电源

(续)

技术	原理	特点
全控型直流故障主动隔离技术	在直流母线与负荷之间串联DC/DC隔离型电压变换器,直流负荷运行在变压器的二次线圈侧,其他直流系统运行在高频变压器的一次线圈侧	发生故障时,交流电源不与直流负荷构成回路,直流系统不受影响

基于本文的分析,当直流系统发生交流串扰故障时,工频交流电频率为50 Hz,继电器两端电压与电缆等效分布电容 C 、继电器等效电阻 R_J 及交流电源 U_s 相关。因此,在实际工程中,可以采取下列措施避免由于交流串扰故障导致的继电器误动作事故。

4.1 减小电缆对地分布电容

交流串扰故障发生后,继电器误动作与电缆对地分布电容有关,而分布电容的大小很大程度上取决于外接电缆的长度。外接电缆较长时,电缆分布电容较大,若此时发生交流串扰故障,导致继电器两端分压较大,增加了发生继电器误动作事故的风险。

由图4可得,电流与分布电容的关系式为^[11]

$$I = U / (R_J + jX_C) \quad (12)$$

式中, U 为干扰电压; R_J 为继电器回路电阻; X_C 为等效分布电容容抗。

由此可得在选定继电器动作功率下,电缆等效阻抗为

$$Z_C = U / I \quad (13)$$

分布电容为

$$C = \lambda L = 1 / 2\pi f \sqrt{Z_C^2 - R_J^2} \quad (14)$$

式中, λ 为单位长度电缆分布电容系数; L 为电缆长度; f 为工频50 Hz。

在进行变电站设计时,为了避免发生交流串扰故障导致继电保护装置误动作事故,应计算出继电保护装置所能接入电缆的长度。

4.2 提高继电器动作功率

图8为中间继电器等效电路,由一个24 V继电器和一个分压电阻 R_3 串联而成^[12]。回路动作电压为132 V,动作电流为5.89 mA,动作功率为0.78 W。动作电流及动作功率很小,易受到外部

干扰的影响。

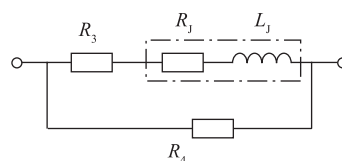


图8 继电器等效电路

Fig. 8 Relay equivalent circuit

在电路中并联一个电阻,使得图8中继电器等效电阻减小。当 $R_4=15 \text{ k}\Omega$ 时,回路动作电流提高为14.67 mA,动作功率提高为1.936 W,中间继电器的动作值明显提高。由于在继电器两端并联了电阻,继电器等效电阻减小,在发生交流串扰故障时,继电器两端分压减小,提高了继电器的可靠性。因此,提高继电器动作功率是消除或减少继电器误动作的有效方法之一。

4.3 避免外界因素造成交流串扰故障

在进行直流系统的设计和运行管理时,要避免交、直流回路所用电缆层放。检修时重点检查户外端子箱至隔离开关、断路器机构箱的回路电缆,对存在交、直流合用问题的年限较长电缆应进行更换^[13]。端子排排列设计时,可以考虑集中布置的方式,将交流回路的端子排布置为一列,直流回路的端子排为另一列,并采用不同颜色加以区分。

5 结束语

针对直流系统发生交流串扰故障对继电器的影响,文中根据故障发生位置建立了等效模型,通过对等效模型进行分析,得出结论。

1) 直流系统发生交流串扰故障时,影响继电器两端电压的因素为电缆等效分布电容、继电器等效电阻及交流电源。

2) 当发生正极交流串扰故障时,随着交流电压和分布电容的增加,继电器两端电压随之增加。当电缆分布电容 $C=0.2 \mu\text{F}$ 时,若交流电压超过161 V,则会使继电器两端电压达到其动作电压132 V,造成继电器误动作。当交流串扰电压 $U_s=220 \text{ V}$ 时,若电缆分布电容高于 $0.105 \mu\text{F}$,则

使继电器两端电压达到其动作电压132 V,造成继电器误动作。

3) 当发生继电器正极侧交流串扰故障时,交流电压对继电器两端电压的影响更明显。当直流系统等效分布电容 $C_{\Sigma}=10\ \mu\text{F}$ 时,若交流电压超过143 V,则使继电器两端电压达到其动作电压132 V,造成继电器误动作。

4) 基于本文直流系统交流串扰故障对继电器影响的分析,提出可以采用减小电缆分布电容、提高继电器动作功率和避免外界因素造成交流串扰故障的防范措施。

参考文献

- [1] 陈金木,陈冠,蒋斯琪,等.变电站直流电源系统便携式电能质量检测仪研制[J].仪表技术与传感器,2019(3):49-54.
- [2] 刘追,刘振兴,王琦.直流系统继电误动作半实物仿真平台设计与分析[J].电测与仪表,2017,54(18):118-124.
- [3] 赵兵.二次直流系统一点接地故障理论分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(21):138-141,146.
- [4] 徐强超,黄晶晶,林浩明,等.一起交直流串扰引起的保护动作事故分析及探讨[J].电气应用,2015,34(5):72-75,79.
- [5] 黄晶晶,徐强超.交流串入直流电源系统正极或负极对继电器的动作影响分析[J].南方能源建

设,2017,4(1):71-74.

- [6] 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(11):115-118,121.
- [7] 李洪涛,牛元泰,李文文,等.变电站交流电串入直流回路故障分析与对策[J].内蒙古电力技术,2018,36(2):75-78.
- [8] 汤磊,高厚磊,苏文博,等.杂散电容对二次回路的影响及防范措施[J].电力系统保护与控制,2010,38(22):206-209,213.
- [9] 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.
- [10] 王德志.一起330 kV断路器偷跳事件的分析及改进[J].电力系统保护与控制,2010,38(5):119-120.
- [11] 孟恒信.出口继电器安全动作功率分析[J].电力系统自动化,2009,33(6):104-107.
- [12] 尉候.交流窜入直流系统故障的试验与研究[J].电力科学与工程,2013,29(3):29-32.
- [13] 吴良方.直流系统防交流侵入方案研究[D].北京:华北电力大学,2017.

作者简介

李书瀚(1996—),男,硕士研究生,研究方向为直流系统绝缘故障监测。

(收稿日期:2022-01-15)