一起交直流串扰引起的保护动作事故分析及探讨

从一起典型的交直流串扰引起的保护误动事件出发，较深入地分析其动作过程及原因，并搭建Matlab仿真模型，发现其动作与继电器的动作功率、动作时间、电缆对地电容以及干扰源电压有关，从这几个方面入手，并给出解决方法。

徐强超　黄晶晶　林浩明　陈宇强　江文东/广州供电局有限公司

徐强超/高级工程师

关键词/Keywords
交直流串扰·
Matlab·
动作功率·
对地电容·

近年来，由于直流系统的故障而引起保护误动发生过多起[1-3]，原因包括直流绝缘电阻下降后一点接地、平衡桥回路故障、绝缘监测装置多机并联运行和直流对地电容过大引起的误动等。这些事故分析较为透彻，并提出了一些行之有效的解决方法，但目前并没有相关文献对交直流串扰问题展开深入的研究与分析。本文针对近期一起交直流串扰引起的保护误动事故进行了分析，建立数学模型与仿真模型，并结合试验验证分析结果的正确性，最后提出了一些防范措施与解决方法。

事故经过及处理措施

2010年3月6日，220 kV某用户变电站在操作110 kV甲线22591隔离开关过程中，1#主变压器高压侧2201开关跳闸，由于该站110 kV主变压器中压侧合环运行，跳闸未导致少送电，如图1所示。

1. 跳闸前运行方式

该变电站220 kV、110 kV和10 kV系统方式正常。

1#主变压器高压侧2201开关挂在1#母线上，220 kV乙线2260开关、2#主变压器高压侧2202开关挂在2#母线上，1#、2#母线通过220 kV母联2012开关合环运行，220 kV甲线2259开关处于检修状态。

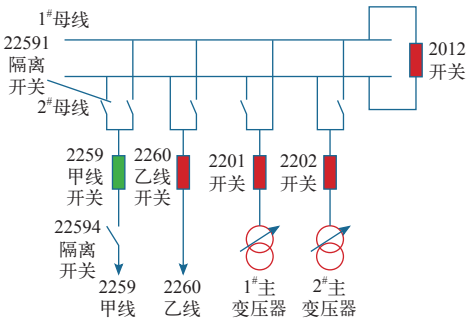

图1　220 kV某用户站电气主接线图

2. 跳闸过程

2010年3月6日9时20分，调度员下令将220 kV甲线2259开关由检修转为冷备用。2010年3月6日10时01分，中调调度员下令将220 kV甲线2259开关由冷备用转为热备用。2010年3月6日10时22分，监护人和操作人在进行甲线22591开关合闸操作时，隔离开关合闸成功。同时，监控后台发出1#主变压器高压侧开关2201跳闸信号。监护人和操作人按照值班长的安排到现场检查2201开关本体及甲线22591隔离开关本体，发现1#主变压器高压侧开关2201跳闸信号，设备外观检查均无其他异常。监控后台显示220 kV 1#、2#母线电压正常，220 kV乙线线路2260间隔、2#主变压器三侧和1#主变压器的中压侧及低压侧运行正常。在继保室检查1#主变压器高压侧保护动作情况并打印动作报告和录波图，动作报告显示没有保护动作，录波图显示没有故障

南方电网公司科技项目资助（K-GZM2013-88）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电流，继保室其他保护装置均正常，没有动作情况，检查10 kV高压室全部保护装置均正常，没有动作情况。

3. 检查处理情况

2010年3月6日15时，将1#主变压器高压侧2201开关由热备用转为冷备用。

经过技术人员的对比分析，1#主变压器高压侧开关跳闸检查工作完成，检查发现220 kV甲线22591隔离开关机构箱隔离开关位置信号接点失灵，在隔离开关合闸瞬间有交流分量窜入直流系统，同时2201开关分闸线圈动作功率偏低，导致2201开关跳闸。现暂时将22591隔离开关位置信号接点回路解开、合闸位置短接并包扎好，经多次试验合上22591隔离开关，测量2201开关跳闸回路直流电压正常。

2010年3月6日22时58分，1#主变压器高压侧2201开关由冷备用转为运行。

2010年3月7日3时21分，220 kV甲线2259开关由检修转为运行。

4. 现场检查情况及跳闸原因分析

发生跳闸后，该站立即停止甲线操作，派继保、检修专业人员到现场查找跳闸原因。

现场检查发现，1#主变压器保护（RCS－978E＋CZX－12R1，2006年3月投运）装置正常，无保护动作出口，但操作箱第一路跳闸指示灯亮，联跳1#主变压器高压侧2201开关的所有保护包括1#主变压器保护、220 kV母线差动和失灵保护均无异常，无保护动作信息。2201开关跳闸回路绝缘正常，二次回路接线正确，不存在交直流寄生回路。从以上信息可以判断，有以下几种可能：母线差动、失灵或本身保护误动作出口；操作箱的跳闸继电器TBIJ、TJR和TJQ误起动出口。

为了进一步查明跳闸原因，现场对跳闸发生时的设备状态进行了实际模拟，发现在甲线2M母线侧22591隔离开关合闸过程的末期即合闸到位的瞬间会出现2201开关跳闸现象，现场共试验10次，其中3次发生跳闸，检查母线差动、失灵、主变压器及断路器保护均无保护动作信息。在模拟过程中，测量2201开关跳闸线圈端电压，发现每次22591隔离开关合闸到位的瞬间均出现线圈端电压跳变的现象，其中3次端电压达到约62 V且指针表显示都是正偏，引起开关跳闸。进一步测量2201开关保护所在的继保室的第一路直流电源的－KM端和直流系统电压，发现在22591隔离开关合闸到位的瞬间直流系统中性点发生偏移。测量22591隔离开关机构箱的隔离开关辅助接点（信号直流回路），发现隔离开关机构箱内部的交直流回路发生瞬时串扰（现场测量直流回路中交流电压为28 V）。信号回路图如图2所示。

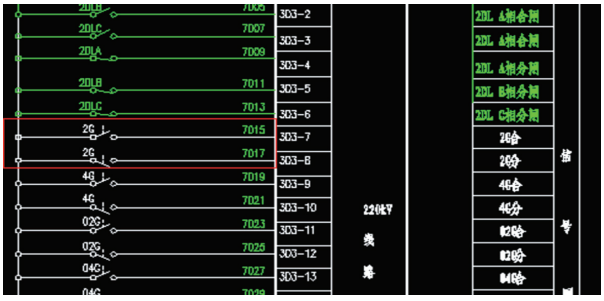

图2　信号回路图

初步分析，隔离开关机构箱电动机电源及操作回路均为交流电源，信号回路为直流电源，由于隔离开关机构运行时间较长（1998年投运，型号为法国MG公司SSP－245），在隔离开关辅助接点切换过程中发生交直流回路瞬时串扰，造成第一路直流系统的中性点发生偏移，当偏移量较大时，在跳闸回路的长电缆电容效应共同作用下，达到2#分段开关机构跳闸线圈动作的临界值（61.6 V），直流系统对地电容示意图如图3所示。该动作值为56%（额定为55%～70%），造成2#分段2201开关跳闸。

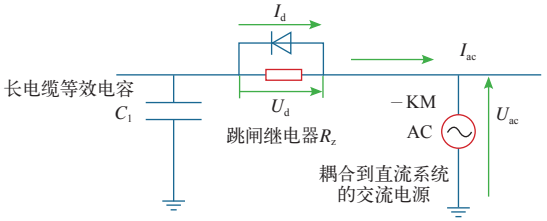

图3　直流系统对地电容示意图

仿真分析

通过Matlab搭建仿真模型，由于该变电站母线差动保护在旧厂房，主变压器保护在另外一个

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

厂房，该处并接有约数千米的电缆，每100 m有15～30 nF的电容[5]，实际电缆对地电容和电缆老化情况及天气环境有很大关系，考虑一定的裕度，以104 m计算，跳闸继电器TJR采用日本NAIS公司ST2－DC24VAR2027的快速继电器，本身等效电阻为2.4 kΩ。考虑到继电器工作电压的影响，本身有3个继电器串联后再串联2个2 kΩ电阻，实际等效电阻R_z＝9.9 kΩ，采用计算电容值$C_1=3\times10^{-7}$F，耦合电压U_{ac}＝220 V。

根据事后继电器试验，在55%的动作电压下，继电器动作时间为7～10 ms，在60%的动作电压下，继电器动作时间为5 ms。如图4、图5所示，其在66%及以上的电压维持约9 ms，足以使继电器动作。

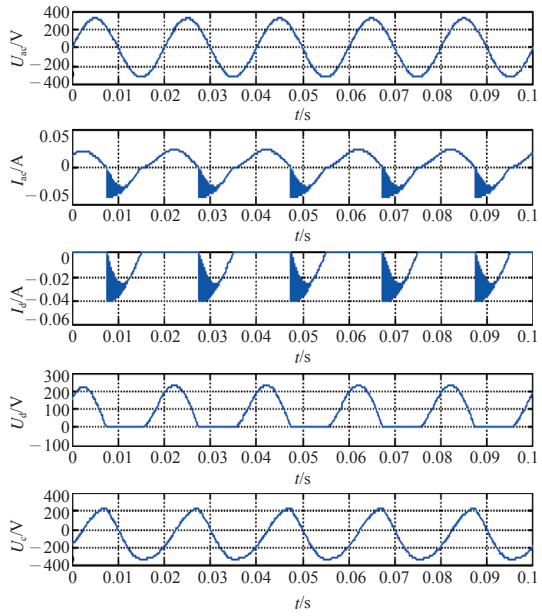

图4　仿真波形图

U_{ac}—耦合干扰电压　I_{ac}—耦合电流　I_d—续流二极管电流
U_d—跳闸线圈电压　U_c—电容电压

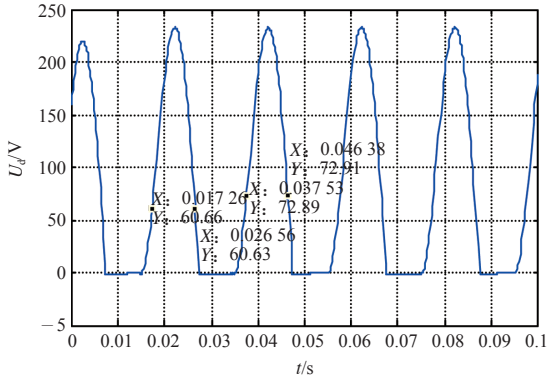

图5　跳闸线圈电压

进一步计算在不同电缆对地电容和不同继电器动作功率下，同样都是AC 220 V交流串扰的情况下进行对比，可以得到不同参数对60%以上额定电压持续时间，如下表所示。

表　不同参数对60%以上额定电压持续时间分析表

序号	额定电压/V	电缆对地电容/F	继电器动作功率/W	跳闸继电器等效电阻/kΩ	60%以上额定电压持续时间/ms
1	110	3×10^{-7}	0.44	9.9	9
2	110	3×10^{-7}	1	4.4	7
3	110	3×10^{-7}	2	2.2	0
4	110	6×10^{-7}	1	4.4	9
5	110	1×10^{-7}	1	4.4	0
6	220	3×10^{-7}	0.44	9.9	6
7	220	3×10^{-7}	1	4.4	0

从上表可以看出，在电缆对地电容不变的前提下，继电器动作功率越大，跳闸继电器等效电阻越小，60%以上额定电压持续时间越短，继电器越不容易动作，在跳闸继电器等效电阻低于一定值之后，持续时间为0 ms；在继电器动作功率不变的前提下，电缆对地电容越小，60%以上额定电压持续时间越短，其越不容易动作，在对地电容低于一定值之后，持续时间为0 ms；在继电器动作功率不变、电缆对地电容不变的前提下，220 V比110 V系统动作时间要短，抗干扰能力更强。

从以上分析可以得出：

1）通过降低电缆对地电容及提高继电器动作功率来防止继电器误动。

2）220 V系统比110 V系统的抗干扰能力更强。

由图3可以得出

$$\begin{cases} U_{ac}\leqslant 0, U_d=-U_{ac}\dfrac{R_z}{R_z-(1/\omega C_1)j} & (1) \\ U_{ac}>0, U_d=0 & (2) \end{cases}$$

式（1）中，U_d和R_z、C_1成正比，与仿真结果一致，以表中序号1的参数计算U_d，设$U_{ac}=320\times\sin(\omega t)$，$U_d\approx218.2\times\sin(\omega t+46.99°)$。当$U_d\geqslant66$ V（额定电压为110 V）时，计算出$\Delta t=8.04$ ms；当$U_d\geqslant132$ V（额定电压为220 V）时，计算出$\Delta t=5.86$ ms。

计算结果与仿真结果基本一致，实际误差时间来自于计算值，没有考虑二极管开通及关断时的影响。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

按照文献[7]、文献[8]，对于非电量等会引起多个断路器跳闸的直跳开入的情况，可以有以下防范措施。

1）经抗干扰继电器重动后开入。抗干扰继电器的起动功率应大于5 W，动作电压在额定直流电源电压的55%～70%范围内，额定直流电源电压下动作时间为20～35 ms，应具有抗220 V工频电压干扰的能力。

2）经光耦采集后开入。光耦动作电压在额定直流电源电压的55%～70%范围内，出口中增加20～30 ms延时提高抗干扰能力。不采用光耦前串接抗干扰继电器的方式。

该反措有3点：①限制动作电压；②限制动作功率；③延长动作时间。从上面的分析可以得出，措施①和②能够隔离绝大多数故障，继电器实际动作电压一般为60%，过大会在直流系统电压偏低及长电缆电压衰减的情况下导致继电器拒动，动作功率设计为5 W，若过高则相应动作电流会变大，按目前设计保护插件难以满足。认为措施③可以从根本上解决交直流串扰带来的继电器抗干扰问题，但是会导致保护动作时间人为延长，与保护的速动性不符，文献[4]希望动作时间越快越好，从数字滤波提高5 ms的动作时间已经非常不易且对系统稳定有较好的改善，此处人为的延长继电器的动作时间，有一定风险，而且TJR、TJQ等继电器一般都是母线差动或主保护动作引起的跳闸，短路功率一般较大，对系统冲击较大，希望能够尽快切除。文献[8]只是规定非电量及会引起多个断路器跳闸的中间继电器有要求，对于单个开关并没有此要求，一般电力系统都满足$n-1$要求，单个断路器跳闸不会引起电网事故，所以文献[8]的要求也合理。

综上所述，补充以下3个方面。

1）交直流串扰问题后果相对严重，发生以后，是全站的一个干扰，并不仅仅是串扰点，会从最薄弱的地方引起事故。

2）特别重要的开关，在核算过系统稳定及设备稳定的前提下，可以考虑延长继电器动作时间（20～35 ms），从而根本解决交直流串扰的负面影响。

3）定期检查直接跳闸回路的对地电容，一旦高于报警值，采取措施避免事故发生，考虑一定裕度，可以取式（1）计算出的电容值的0.6倍。

防范措施及要进一步开展的工作

1）从产品设计、工程设计、施工及维护各个环节都一再强调交直流回路隔离，以免引起干扰，因为全站二次回路复杂，实际上很难杜绝该情况的发生，一旦发生，应作为紧急缺陷处理，避免引起开关跳闸等次生事故。

2）继电器的动作电压越高、动作功率越大、动作时间越长以及电缆对地电容越小，抗干扰能力越强，对于非电量及引起多个断路器直接跳闸的中间继电器设计满足文献[8]的要求即可，但对于特别重要的开关，可以考虑按照对单个断路器的跳闸继电器设计，但要考虑继电保护装置是否满足动作功率提高而引起的动作电流增大的要求。

3）同时在新建及技改过程中，可以优先采用DC 220 V的操作电源，可以有效提升跳闸继电器的抗干扰能力。

4）可考虑设计出一款能够滤除非直流分量的继电器以解决该问题，解决由于电容对地放电及直流电压波动引起的继电器误动[5]，这是因为电容对地放电及直流电压波动波形都是衰减直流分量波形。

5）通过光纤传递代替长电缆传递跳闸信号，在新一代数字化变电站通信中利用GOOSE总线发送跳合闸快速报文已经得到较为广泛的应用[6]，也能从根本上解决该问题。

结束语

从一起典型的交直流串扰引起的开关跳闸事故出发，发现其故障隐蔽，后果严重，分析其动作过程及原因，发现其动作与继电器的动作电压、动作功率、动作时间及电缆对地电容有关，可以通过提高动作电压和动作功率、延长动作时间、减少电缆对地电容以及采用DC 220 V的操作

(下转第79页)

(上接第75页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 某市电网拓扑分析

220 kV变电站	110 kV变电站/座	35 kV变电站/座	负荷线数/条
长新变电站	37	13	134
通德桥变电站	28	7	112
东亭变电站	16	5	78
九房变电站	9	2	54
依坝变电站	17	6	63
前洲变电站	23	6	74
北新变电站	25	9	81
孟村变电站	31	11	127
梁溪变电站	12	8	55
湖东变电站	11	5	41
东园变电站	15	8	66
…	…	…	…
滨江变电站	42	17	168

析CIM/E模型文件获取网络拓扑，按拓扑进行统计，为电网第三道防线综合评估提供基础数据。电网第三道防线集中评估系统的其他应用也都对CIM/E模型进行了分析应用并起到了良好效果。

参考文献

[1] 孙光辉，吴小辰，曾勇刚．电网第三道防线存在的问题及解决对策 [J]．南方电网技术，2008，2 (3)：7-11．

[2] 罗杰，程宏波，陈赤培．基于CIM模型的电力企业应用集成系统研究与设计 [J]．电力系统保护与控制，2008，36 (13)：74-77．

[3] 陆承宇，章文立．CIM电网模型的拓扑分析方法 [J]．浙江电力，2005，24 (4)：5-8．

[4] 王嘉明，牟勇，吴文传，等．DTS中继电保护的CIM模型扩展与实现 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (2)：90-94．

[5] 全国电力系统控制及其通信标委会．DL/T 890.301—2004 能量管理系统应用程序接口（EMS-API）第301部分：公共信息模型（CIM）基础 [S]．

[6] 国家电网公司．Q/GDW 216—2008 电网运行数据交换规范 [S]．北京：中国电力出版社，2008．

[7] 国家电网公司．Q/GDW 215—2008 电力系统数据标记语言－E语言规范 [S]．北京：中国电力出版社，2008．

[8] 宋少群，朱永利，于红．基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法 [J]．电网技术，2005，29 (19)：45-49．

（收稿日期：2014－10－10）EA

电压等措施改善。指出了按目前规程规定防范措施1和措施2可以解决绝大多数问题，措施3和措施4较难满足但可以彻底解决，可以考虑仅针对重要开关进行措施3的改造，通过用光纤跳闸代替长电缆实现措施4。

参考文献

[1] 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．

[2] 王振彦．直流接地引起断路器跳闸情况分析 [J]．上海电力，2001 (1)：15-17．

[3] 何郁，漆柏林．直流接地引起断路器跳闸的原因分析及对策 [J]．继电器，2001，29 (11)：50-52．

[4] 张保会，郝治国，Zhiqian BO．智能电网继电保护研究的进展 (一) ——故障甄别新原理 [J]．电力系统自动化设备，2010，30 (1)：1-5．

[5] 沈梦甜，谢智浩，尹星光．直流绝缘监测仪现场校验结果分析 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (19)：226-230．

[6] 高翔．数字化变电站应用技术 [M]．北京：中国电力出版社，2007．

[7] 中国南方电网电力调度通信中心．中国南方电网公司继电保护反事故措施汇编 [M]．北京：中国电力出版社，2008．

[8] 中国南方电网电力调度通信中心．南方电网继电保护通用技术规范 [M]．北京：中国电力出版社，2012．

（收稿日期：2014－03－10）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net