

[开关设备]

超特高压气体绝缘开关母线单相短路壳体环流理论研究与分析

文/河南平高电气股份有限公司 卢 鹏 杨向龙 刘恩歌 许建春

针对超特高压气体绝缘开关装置(GIS)母线的三相分箱布置形式,对三相分箱母线单相内部短路故障理论进行了研究分析,并以某800 kV GIS为研究对象,利用EMTP搭建变电站级电磁暂态等效电路模型,选择三处典型位置模拟单相母线内部短路故障,并对其进行仿真分析。

引言

在特高压系统中,连续型母线外壳在电气上连通。当母线通电流时,母线外壳在母线电流的电磁感应和静电感应作用下引起感应电压,这种感应电压会使外壳产生纵向电流,从而产生外壳环流。而通过分析可以得知,环流主要存在于相与相之间以及外壳与地之间的回路中,其中绝大部分为后者。

目前,对于三相分箱GIS的壳体环流的研究主要集中于暂态电压引起的壳体环流或稳态运行工况下系统的壳体环流,对因内部单相短路故障引起的壳体环流的研究较少。但在供电系统中,对电力系统危害最大的就是短路,其中尤以单相短路占比最大,因此,有必要对内部单相短路壳体环流变化进行研究。

本文依据电磁感应和静电感应基本原理,分析了三相分箱GIS内部短路故障理论,阐述了三相分箱GIS出现内部故障时壳体环流分布规律,并以某800 kV GIS变电站为例计算出典型内部故障工况下的壳体环流。

GIS三相分箱母线单相内部短路故障理论研究

当三相分箱GIS稳态运行时,可以将其看作母

线,如图1所示。外壳沿着特定长度在两端通过短接排连接成闭合回路,外壳回路和母线回路同轴,形成一对互感线圈,存在磁耦合。

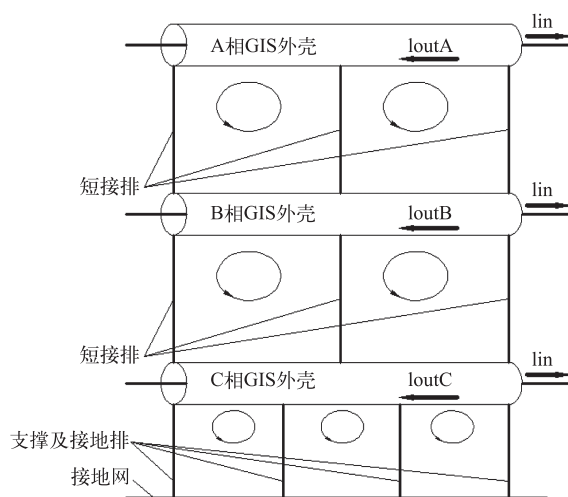


图1 三相分箱GIS母线外部环流示意图

三相分箱GIS等效电路图如图2所示,图2中, R_A 、 R_B 、 R_C 为GIS导电杆电阻值; L_A 、 L_B 、 L_C 为GIS导电杆电感值; R_a 、 R_b 、 R_c 为外壳电阻值; L_a 、 L_b 、 L_c 为外壳电感值; L_{djp} 和 R_{djp} 分别是短接排电感和电阻; L_{jdp} 和 R_{jdp} 分别是接地排电感和电阻; R_d 为接地电阻。

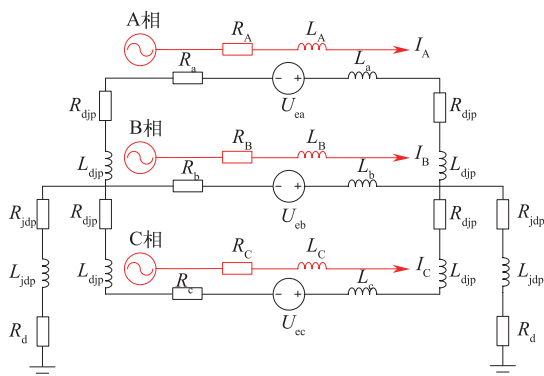


图2 三相分箱GIS等效电路图

图2中， U_{ea} 、 U_{eb} 、 U_{ec} 为外壳因三相导电杆电流产生的磁场感应出的电压，由于外壳上的电流相比导电杆上的电流较小，且电流方向相反，故可以认为某一相外壳感应电压主要由导电杆电流产生的磁场导致，因此可以得出感应电压计算公式为

$$\begin{aligned} U_{ea} &= j\omega (L_{Aa}I_A + L_{Ba}I_B + L_{Ca}I_C) \\ U_{eb} &= j\omega (L_{Ab}I_A + L_{Bb}I_B + L_{Cb}I_C) = j\omega \begin{pmatrix} L_{Aa} & L_{Ba} & L_{Ca} \\ L_{Ab} & L_{Bb} & L_{Cb} \\ L_{Ac} & L_{Bc} & L_{Cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} \\ U_{ec} &= j\omega (L_{Ac}I_A + L_{Bc}I_B + L_{Cc}I_C) \end{aligned} \quad (1)$$

三相分箱GIS内部单相闪络故障等效电路图如图3所示。

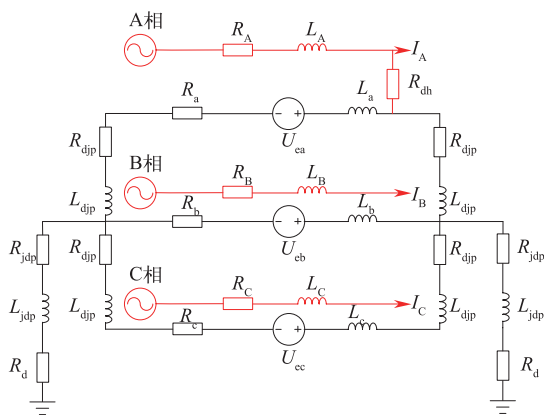


图3 三相分箱GIS内部故障等效电路图

由图3可知，GIS母线发生内部故障时，故障相导体杆和外壳之间存在电路的联系，计算环流时不能将外壳和接地系统独立出来进行计算，而应将故障相导体杆电路与外壳电路联系起来进行求解。

当单相短路故障进入稳态后，故障相的电流远远大于正常运行相，三相电流在相位上依旧互差

120° ，此时三相电流含有幅值较大的零序分量，假设正常运行相的电流幅值为 I ，故障相电流幅值为 $10I$ 。使用对称分量法计算正、负、零序分量为

$$\begin{pmatrix} I_{A1} \\ I_{A2} \\ I_{A0} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 10I \\ a^2 I \\ aI \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4I \\ 3I \\ 3I \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中，旋转因数 $a=e^{j120^\circ}$ 。

由式（2）求解出A相正负零序电流后，可以根据相位关系推算得到其他两相的正负零序电流，则外壳感应电压计算公式改写为

$$\begin{pmatrix} U_{ea1} \\ U_{eb1} \\ U_{ec1} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} L_{Aa} & L_{Ba} & L_{Ca} \\ L_{Ab} & L_{Bb} & L_{Cb} \\ L_{Ac} & L_{Bc} & L_{Cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4I \\ 4a^2 I \\ 4aI \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} U_{ea2} \\ U_{eb2} \\ U_{ec2} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} L_{Aa} & L_{Ba} & L_{Ca} \\ L_{Ab} & L_{Bb} & L_{Cb} \\ L_{Ac} & L_{Bc} & L_{Cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3I \\ 3aI \\ 3a^2 I \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} U_{ea0} \\ U_{eb0} \\ U_{ec0} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} L_{Aa} & L_{Ba} & L_{Ca} \\ L_{Ab} & L_{Bb} & L_{Cb} \\ L_{Ac} & L_{Bc} & L_{Cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3I \\ 3I \\ 3I \end{pmatrix} \quad (5)$$

由式（3）~式（5）可以看出，外壳感应电压的正、负序分量与稳态时的计算方法类似，由于电流互差 120° 且外壳之间的互感值相差不大，叠加得到的正序及零序感应电压分量很小，并满足 $|U_{ea}| = |U_{ec}| > |U_{eb}|$ 表征的关系。然而，由于三相零序上电流方向完全相同，计算得到的零序感应电压值相当大，感应电压几乎全部由零序分量构成，故可以推导出三相感应电压相位相同。

为了进一步探讨三相感应电压的幅值大小关系，将外壳感应电压计算公式改写为

$$\begin{pmatrix} U_{ea} \\ U_{eb} \\ U_{ec} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} L_{Aa} & L_{Ba} & L_{Ca} \\ L_{Ab} & L_{Bb} & L_{Cb} \\ L_{Ac} & L_{Bc} & L_{Cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ a^2 I \\ aI \end{pmatrix} + j\omega \begin{pmatrix} L_{Aa} & L_{Ba} & L_{Ca} \\ L_{Ab} & L_{Bb} & L_{Cb} \\ L_{Ac} & L_{Bc} & L_{Cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 9I \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式(6)第一部分为稳态感应电压分量,其幅值相位均与稳态时相同,第二部分为短路分量,由于稳态感应电压分量幅值与第二部分相比极小,可以忽略不计,故有

$$\begin{pmatrix} U_{ea} \\ U_{eb} \\ U_{ec} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} 9I L_{Aa} \\ 9I L_{Ab} \\ 9I L_{Ac} \end{pmatrix} \quad (7)$$

由几何关系可以得知 $L_{Aa} > L_{Ab} > L_{Ac}$,故A相外壳感应电压幅值最大,B相次之,C相最小。

工程实例验证

以某800 kV变电站为例,其主接线图如图4所示。

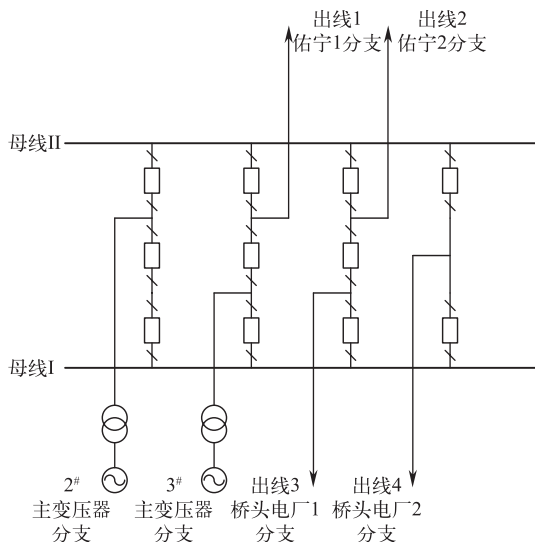


图4 某800kV GIS变电站电气主接线图

该变电站采用母线集中外置方式,共采用了六种不同类型的相间短接排:连接到设备GIS外壳上的短接排为类型一;连接到母线GIS外壳上的短接排为类型二;2#主变压器与3#主变压器入口处的短接排规格相同,为类型三;佑宁1分支与佑宁2分支出口处的短接排规格相同,为类型四;桥头电厂1分支出口处的短接排为类型五;桥头电厂2分支出口处的短接排为类型六。

1. 变电站级EMTP仿真模型的建立

由上文可知,该800 kV GIS变电站采用一台半断路器接线,共有两个发电机-变压器组作为进线,四条分支作为出线。依据GIS母线模型以

及变电站内部元件模型的建立方法,根据本站电气主接线图,搭建了某800 kV GIS变电站的仿真模型。其中,母线和GIS元件的连接处均使用了LCC模型,长度根据实际尺寸进行设置,且外壳互联。

2. 内部故障

进出线、GIS设备以及GIS母线的任一位置均可能发生内部闪络故障,发生闪络故障时,外壳和导电杆之间形成了导电回路并直接与大地连通,使得导电杆和外壳上产生极大的短路电流。由于可能出现故障的位置过多,故本部分只取三个典型位置进行分析,并只考虑可能性最大的单相闪络故障。

(1) 主变压器分支与GIS设备连接点单相闪络

假设2#主变压器分支与GIS设备连接点位置出现导电杆和外壳间的A相闪络故障,故障位置如图5所示。

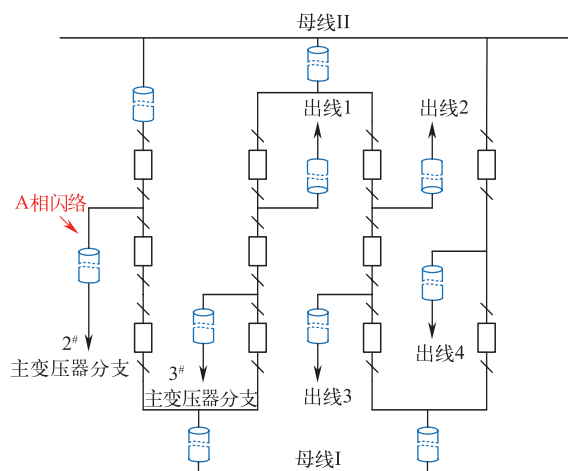


图5 主变压器分支与GIS设备连接点位置A相闪络故障

经仿真可知,由于外壳和导杆存在电气通路,系统中每个短接接地点的外壳感应电压均大幅增加且三相几乎相等,同样地,入地电流也大幅增加,感应电压和入地电流均大于外部单相短路时的数值。

为了直观显示仿真结果,并体现一定的规律性,本部分以两个主变压器分支以及桥头电厂1分支的计算结果为例进行对比分析。主变压器分支与GIS设备连接点位置A相闪络故障时,仿真结果见表1。

表1 主变压器分支与GIS设备连接点位置A相闪络故障计算结果

位置	外壳感应电压幅值/ V			外壳环流幅值/A			入地 电流 幅值 /A
	A相	B相	C相	A相	B相	C相	
2#主变压器 套管	4 111	4 052	4 001	29 009	8 006	14 822	8 104
2#主变压器 套管与设备 连接点	3 437	3 436	3 434	15 105	4 199	4 872	6 871
3#主变压器 套管	3 378	3 362	3 341	18 266	4 164	8 576	6 724
3#主变压器 套管与设备 连接点	3 224	3 222	3 220	23 753	8 427	9 697	6 444
桥头电厂1 分支套管	2 881	2 879	2 884	648	3 145	4 083	5 758
桥头电厂1 分支套管与 设备连接点	2 914	2 914	2 914	1 551	1 098	3 479	582

由表1可知，内部故障时外壳感应电压和入地电流均远远大于外部单相短路的数值，感应电压、环流及入地电流的最大值出现在2#主变压器分支套管处。对于主变压器分支，无论是套管处的短接地点还是连接点的短接地点，都是A相的外壳环流最大，对于负载分支则是C相的外壳环流最大。

(2) 母线位置单相闪络

假设2#母线位置出现导电杆和外壳间的B相闪络故障，如图6所示。

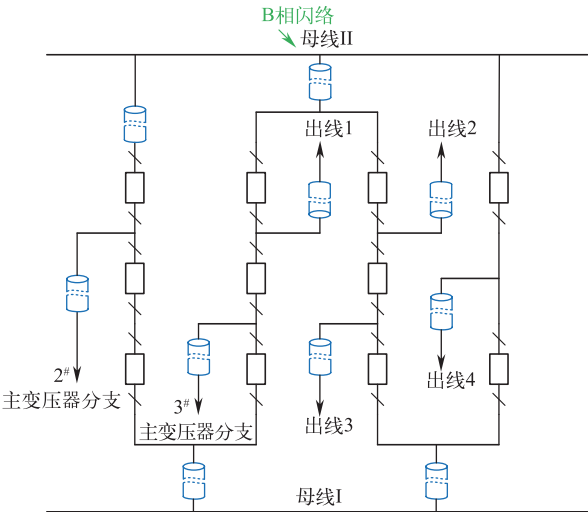


图6 2#母线位置B相闪络故障

以两个主变压器分支以及桥头电厂1分支的计算结果为例进行对比分析。2#母线位置B相闪络故障时，仿真结果见表2。

表2 #2母线位置B相闪络故障计算结果

位置	外壳感应电压幅值/ V			外壳环流幅值/A			入地 电流 幅值 /A
	A相	B相	C相	A相	B相	C相	
2#主变压器 套管	4 026	4 082	4 059	18 237	41 407	16 475	8 164
2#主变压器 套管与设备 连接点	3 433	3 435	3 435	3 349	10 831	1 841	6 870
3#主变压器 套管	3 348	3 370	3 369	12 273	29 905	11 377	6 740
3#主变压器 套管与设备 连接点	3 224	3 222	3 220	8 331	20 736	6 858	6 444
桥头电厂1分 支套管	2 886	2 882	2 877	4 131	544	2 669	5 764
桥头电厂1分 支套管与设 备连接点	2 914	2 914	2 914	3 336	464		5 827

内部闪络故障发生在母线上时，感应电压、环流和入地电流的分布与故障发生在主变压器分支连接点时无异，依然是主变压器分支大于负载分支，且2#主变压器分支数值最大。由于闪络相变为B相，对于主变压器分支，短接地点B相外壳环流最大，对于负载分支则是B相的外壳环流最小。

(3) 负载分支与GIS设备连接点单相闪络

假设桥头电厂1分支与GIS设备连接点位置出现导电杆和外壳间的C相闪络故障，故障位置如图7所示。

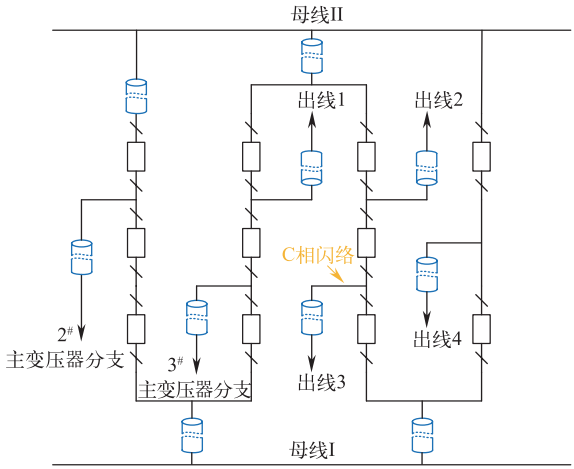


图7 桥头电厂1分支与GIS设备连接点位置C相闪络故障

以两个主变压器分支以及桥头电厂1分支的计算结果为例进行对比分析。桥头电厂1分支与GIS设备连接点位置C相闪络故障，仿真结果见表3。

表3 桥头电厂1分支与GIS设备连接点位置C相闪络故障计算结果

位置	外壳感应电压幅值/V			外壳环流幅值/A			入地电流幅值/A
	A相	B相	C相	A相	B相	C相	
2#主变压器套管	4 017	4 031	4 089	12 576	10 770		8 061
2#主变压器套管与设备连接点	3 432	3 432	3 433	3 886	4 622	29 153	6 864
3#主变压器套管	3 354	3 351	3 370	7 312	5 822	15 098	6 702
3#主变压器套管与设备连接点	3 221	3 220	3 222	8 512	9 236	18 458	6 441
桥头电厂1分支套管	2 880	2 885	2 886	2 949	4 389	23 719	5 770
桥头电厂1分支套管与设备连接点	2 915	2 916	2 916	2 965	2 089	5 311 348	5 831

即使内部故障发生在负载出线位置，外壳感应电压、环流和入地电流幅值依然呈现主变压器位置大、负载出线位置小的规律，且各项数值和故障发生在其他地点时相差不大。由于此时单相闪络故障发生在C相，因此主变压器位置C相的外壳环流最大，相应地，负载位置C相的外壳环流最小，此规律与之前一致。

(上接第75页)

改进措施

为防止电动操动机构因材质与安装工艺存在质量问题而导致隔离开关不能正常投入使用，本文提出以下几点改进措施。

- 1) 严把电动操动机构的选材。对电动机、减速箱、机械限位装置、定位件及主轴等零部件材质和机械尺寸的选择严格按照产品技术要求进行，提高设备的可靠性。
- 2) 加强电动操动机构的安装工艺。安装必须牢固，使同一条轴线上的电动操动机构的安装位置应保持一致；传动部位润滑良好、传动平稳，操动机构各转动部件灵活、无卡涩现象；手动、电动操作无异常；手动操作闭锁电动操作正确；机构组装完毕，检查连接螺栓紧固，转矩值符合产品技术要求。
- 3) 加强设备的巡检。加强设备的巡视检查，对

结束语

对比所有位置的计算结果，可以得出以下结论：

- 1) 当GIS变电站出现内部闪络故障时，每个短接地点的外壳感应电压和入地电流均大大增加。
- 2) 无论故障发生在何位置，均是主变压器分支感应电压、环流和入地电流较高，最大值出现在2#主变压器套管处。
- 3) 外壳环流与故障相的位置有明显联系，对于主变压器分支，故障相的外壳环流为三相中的最大值；对于负载分支，故障相的外壳环流为三相中的最小值。[EA](#)

(收稿日期：2022-02-12)

参考文献

[1] 罗学琛. SF₆气体绝缘全封闭组合电气(GIS)[M]. 北京：中国电力出版社，1998.

[2] 宋东波. 几起GIS外部导流排异常发热的分析[J]. 高压电器，2019，55(1)：248-252.

[3] 公多虎，陈文涛，吴天博，等. 振动测试技术在GIS耐压试验故障定位中的应用分析[J]. 电气应用，2020，39(7)：64-66，73.

存在异常的隔离开关及时进行维护与检修，严防家族性缺陷的产生。

结束语

本文针对一起110 kV隔离开关电动操动机构故障进行了分析，并从选材、安装及运行维护等方面提出了改进措施，对日后预防和处理类似故障具有重要意义。[EA](#)

(收稿日期：2021-11-11)

参考文献

[1] 电力行业职业技能鉴定指导中心. 变电检修[M]. 2版. 北京：中国电力出版社，2019.

[2] 史浩鹏，马凡琳，杨轲. 基于人工智能识别技术的运维检修监测系统设计[J]. 电气应用，2020，40(8)：86-91.