[电缆]

核电厂直流系统接地故障报警值的整定

文/上海交通大学　倪 丹
上海核工程研究设计院　冯玉萍

直流系统是核电厂必不可少的系统，对于供电的可靠性要求较高。直流系统的可靠性是保证电厂安全运行的决定条件之一。对于直流系统来讲，接地故障是常见的隐患之一。简要介绍了直流系统的特点，接地故障的危害及接地故障报警值的整定原则，并以实际电厂为例，进行了接地故障报警整定值的计算及分析。

直流系统包括蓄电池组、充电器及直流配电装置，广泛用于电厂的控制回路和保护回路。在核电厂中，普遍采用不接地的直流系统，在失去厂内和厂外交流电的情况下，用于向重要的设备持续供电，是整个电厂安全停堆的可靠保障。

而直流系统接地故障报警整定值的合理设置会对直流系统的可靠运行起到重要的影响，目前核电厂中直流系统接地故障报警值（即接地电阻报警值）都设置较大，因此误报警的情况经常发生。部分电厂根据经验调小了整定值以减少误报，但只有根据直流系统下游负荷的具体情况，计算得出系统临界报警值，才能有效避免漏报，从而确保直流系统的可靠性。

接地故障报警的整定原则

对核电厂而言，安全可靠是第一位的，直流系统不仅是电厂正常运行必不可少的系统，也对电厂安全停堆起到重要的影响。因此对于直流电源，供电的可靠性是非常重要的。把直流系统设计为不接地的系统就是为了提高其供电的连续可靠性。

对于不接地系统，需要在发生单点接地故障后，快速排除故障点，以避免发生第二点接地故障造成短路或引起继电器误动及拒动，影响系统或整个电厂的正常运行。直流系统一般配备绝缘监测装置，为的就是在发生单点接地故障后，能够及时报警定位，以便发现故障点避免发生第二点接地故障。作为配电系统，直流系统支路很多，下游设备可能也比较分散，线路较多较长，系统对地的分布电容较大，监测的容抗值较小，若将报警整定值设置过高，容易发生误判。但将报警值设置过低，有时发生的为非直接接地或非金属性接地，电阻较大。由于一点高阻接地没有达到报警值，未能及时发现处理，当随着第二点，第三点又发生高阻接地，系统总的接地电阻逐步下降。当到达整定值报警值时，已出现多点接地的情况，故障点的排查就更为困难了。

对于电厂运营的人来说，最理想的是接地监测装置能及时灵敏地发现接地故障，既不漏报，也不误报。而这不仅取决于监测装置的原理与质量，更为关键的是接地电阻故障报警值的选取。

接地故障报警限值的计算方法

直流系统的负荷可分为动力和控制两类。对于动力负荷回路，接地电流会引起保护器件动作。若两点接地发生在不同的回路，那么可能将引起两个回路的保护器件都动作。若发生多点大电阻接地，会使多个回路存在跳闸断电的隐患。对于控制回路，接地故障可能导致继电器、接触

器等的误动或拒动，主要有以下几种情况。

图1a中的两点接地导致回路中的常开触点被短接，回路中的线圈异常通电，可能导致接触器误动作，接通不该运行的设备回路。图1b中的两点接地导致回路中的常闭触点被短接，回路中的线圈持续带电，将导致正常带电的设备在需要切断时无法断电。

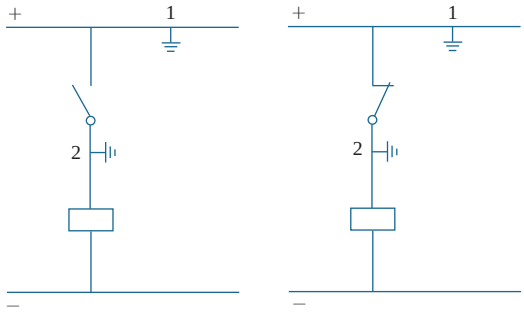

图1　接地故障情况1

图2中的接地故障可能导致驱动线圈或直流电源短路。图2a、2c中线圈被短路，若为接触器线圈，则接触器无法合闸，若为断路器脱扣线圈，则断路器无法跳闸。图2c由于正负母线短路，控制回路中的保护熔丝或断路器动作，将导致整个控制回路失电。图2b中的接地故障将使所有正常带电的设备断电。

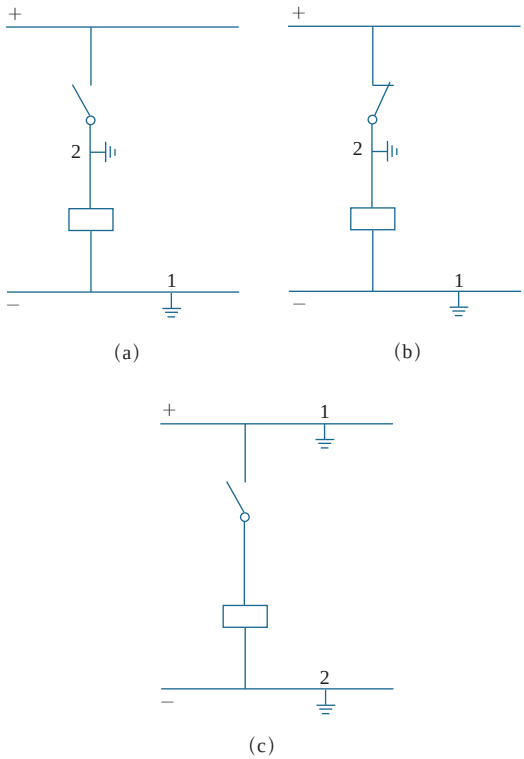

图2　接地故障情况2

图3中任意一个设备控制回路中的继电器触点动作都将导致另一回路设备受到同样的影响而动作。

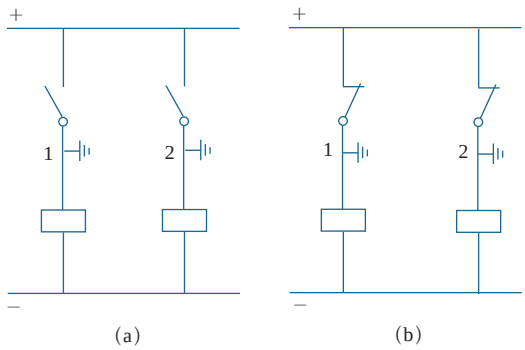

图3　接地故障情况3

对于图2中的情况，控制回路保护器件动作，通过将各回路保护器件动作的信号做成综合故障报警送主控室，当发生问题时，运行人员可及时排查检修故障。对于图1及图3中的情况，需计算出如果第二点接地有可能影响设备运行的接地故障电阻阈值，以确定系统最低的接地电阻报警限值。

接地导致动力回路跳闸的接地电阻值远小于导致继电器误动或拒动对应的电阻值，因此应根据控制回路来计算得出接地电阻限值确定绝缘装置报警整定值。下面从两点接地导致设备的误动及拒动两方面进行分析。

（1）接地故障导致设备误动

如图4所示，考虑最严酷的情况，点1发生电阻性接地，若伴随接地2发生金属性接地后，接地电阻R_1与线圈串联形成通路。对于电压型继电器，若R_1足够小，使得线圈上分得的电压U_{23}不小于最小吸合电压，则线圈带电误动。对于电流型继电器，若线圈上的电流值大于吸合电流，则线圈吸合导致误动。

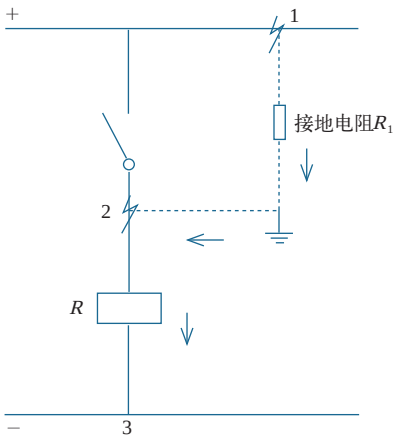

图4　接地故障示意图1

2）接地故障导致设备拒动

如图5所示，考虑最严酷的情况，点1发生电阻性接地，若伴随接地2发生金属性接地后，接地电阻R_1与线圈串联形成通路。对于电压型继电器，若R_1足够小，导致线圈上分得的电压U_{23}大于线圈释放电压，则线圈将始终处于保持状态。当常闭触点断开，需要继电器或接触器动作的时候，由于线圈带电不释放将导致接触器或继电器拒动。同理，对于电流型继电器，当线圈上的电流大于保持电流，则线圈带电，将导致拒动。

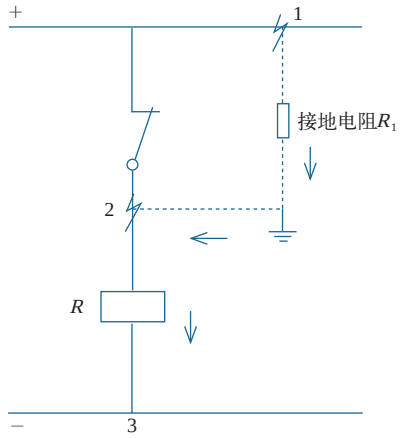

图5　接地故障示意图2

以电压型继电器为例，若吸合电压为0.85U_c，释放电压为0.1U_c。线圈电阻为R，接地电阻为R_1。

吸合阶段，线圈电压大于0.85U_c时线圈吸合。

$$U_{吸合}=U_R/(R+R_1')$$

考虑U就是额定电压U_c，根据最低吸合电压推出的接地电阻限值

$$R_1'=(15/85)R=0.18R$$

当接地电阻小于R_1'，线圈两端的电压将大于最小吸合电压，线圈动作。

保持阶段，当线圈两端电压大于0.1U_c，线圈将保持吸合。接地电阻与线圈串联，因此接地电阻上的分压小于0.9U_c时，线圈就可能在常闭触点断开需要断电释放时，保持吸合。因此导致拒动的接地故障电阻电压

$$U_2=UR_1''/(R+R_1'')\ =0.9U_c$$

考虑U就是额定电压U_c。

$$R_1''=9R$$

当接地电阻小于R''，线圈两端的电压将大于最小跌落电压，线圈拒动。

由于跌落电压总小于吸合电压，因此对于同一元件保持阶段线圈拒动所计算得出的接地电阻限值总大于线圈误动吸合所得出的接地电阻限值。同理，对于电流型继电器，保持电流对应得出的电阻限值总大于吸合电流对应得出的电阻值。

某核电厂实际案例分析

某电厂直流110 V系统既给动力负荷供电，又给开关柜控制回路供电。110 V各系统从绝缘监测装置中读出的母线绝缘情况如表1所示。

表1　各系统绝缘情况

	系统	母线对地电阻/kΩ	系统对地电容/μF
110 V	母线1	75	5.3
	母线2	86	4.6
	母线3	172	2.2

可以看到系统绝缘电阻不是很高，经分析这主要是充电器及逆变器引起的，厂家反馈设备内部的接口控制板绝缘值在200 kΩ左右。母线3上仅有一台充电器，母线1、2每个系统有2台充电器并联，因此绝缘值较低。

系统原设定的绝缘监测报警值为50 kΩ，但由于当前母线对地电阻值较低，当下游负荷接入增多后，容易引发误报，因此应根据回路情况核算，重新调整绝缘监测报警值。

按照母线下的控制负荷进行接地电阻限值计算。110 V直流系统控制回路中的继电器和接触器线圈情况如图6所示。

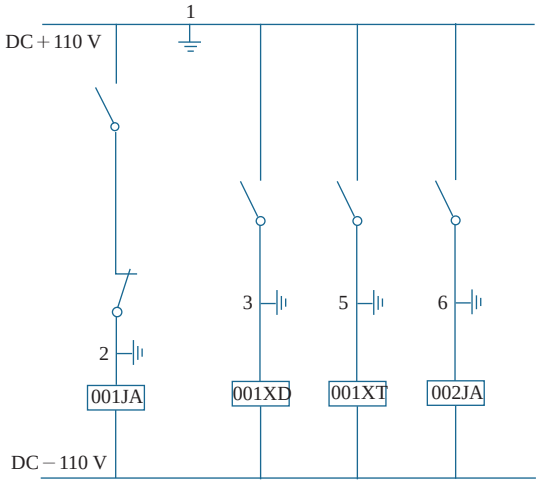

图6　低压系统控制回路

（1）在控制回路中，会出现拒动情况的为接触器001JA。

对于接触器，线圈电阻如表2所示。

表2　实测线圈电阻值

型号	AL16	AL40	AE75
线圈电阻	2.9 kΩ	2.7 kΩ	58.3 Ω/2.8 kΩ

低压接触器参数如图7所示。

接触器		BC7	AL16	AL40	AE75
额定控制电压 U_C/AC，50 Hz	V				
DC			12～250		
线圈控制电压范围 acc.to IEC60947－4－1			0.85－1.1U_C（$\theta \leqslant 55$℃）		
跌落电压范围 U_C min%			10%～30%		15%～40%
线圈功耗（平均值，DC）					
吸和阶段	W	3.5	3	3.5	200
保持阶段			3	3.5	4

图7　低压接触器参数

对于接触器回路，可能出现拒动。

根据拒动时线圈最小保持电压可得

$$UR/(R+R_1)=0.1U_C$$

式中，U_C为线圈额定电压（110 V）。

$$R_1=(U-11)/11\times R$$

式中，R为线圈电阻；R_1为接地电阻。

考虑最严酷的情况，系统处于在线均充，并忽略电缆上的压降：$U=121$ V，接地电阻限值R_1"$=10R=10\times 2.9=29$ kΩ

（2）中间继电器001XD（型号 RJ2S－CL－D100）

对于继电器回路，仅考虑误动情况。线圈电阻为：16.04 kΩ～21.7 kΩ。中间继电器参数如图8所示。

线圈参数	
额定电压	100－110 V DC
额定电流/（mA）±15%（20℃）	5.2～5.7
线圈电阻/（Ω）±15%（20℃）	18870
动作特性（在20℃时相对于额定值）： 最小启动电压（初始值） 释放电压（初始值） 最大持续外加电压	 70%以下 10%以上 160%
耗电量/W	约0.53

图7　中间继电器参数001×D参数

根据线圈最小吸合电压可得

$$UR/(R+R_1)=0.7U_C$$

式中，U_C为线圈额定电压（110 V）。

$$R_1=(U-77)R/77$$

式中，R为线圈电阻；R为接地电阻。

考虑最严酷的情况，系统处于在线均充，并忽略电缆上的压降：$U=121$ V，接地电阻限值$R_1=0.57R=0.57\times 21.7=12.4$ kΩ

综上，当系统的接地电阻大于29 kΩ时，控制回路不会发生误动或拒动。因此，对于110 V的直流系统报警整定值应大于29 kΩ。考虑一定余量，可设置为35 kΩ或40 kΩ。

结束语

直流系统绝缘监测报警值的设置原则是在第一点发生接地故障时及时检测报警，当发生第二点接地故障时，能避免引发继电器误动和拒动。因此应根据控制回路误动和拒动的阈值来设置绝缘报警值。而控制回路又主要取决于接触器或继电器的内阻和释放（跌落）电压的大小。准确的内阻值以及吸合/释放电压或电流，有助于得到更准确的接地电阻限值，从而更合理地设置报警值，避免漏报，减少误报。建议在那些需要直流控制电源的设备（中、低压柜，停堆断路器柜），在厂家试验中增加对二次回路控制线圈的内阻以及吸合、释放电压的测量。此外，在设计时还应统筹考虑，合理选用继电器，避免阈值电阻值过大，导致绝缘报警值过高，增加误报率。EA

（收稿日期：2015.09.25）

（编辑：刘群点）