核电厂直流系统绝缘监测技术的研究

核电厂直流系统为重要控制和保护负荷供电，对核电厂安全稳定运行起到至关重要的作用。接地故障是危害直流系统可靠供电及其负荷正确运行的主要因素之一。简要介绍了直流系统接地故障的原因和危害，对直流系统一点接地和两点接地故障模式进行深入分析。为避免一点接地引起的故障，需在直流系统设计中采取优化措施；为避免两点接地引起的故障，则应采用绝缘监测装置。对各类绝缘监测方法进行研究和评估，并对现有绝缘报警定值的设计方法进行深入分析。最后提出了绝缘监测报警定值设计的改进方案。

李明成　许本福　付明星　林　建　李　静／中广核工程有限公司

李明成／高级工程师

关键词／Keywords

核电厂·
直流·
接地·
绝缘监测·
定值·

核电厂内设计了大量的直流系统，用以直接或间接地为反应堆保护设备、DCS机柜、停堆断路器、配电盘和逆变器等重要负荷供电。当厂内、厂外动力电源全部失去时，直流系统依靠在线的铅酸蓄电池保持对重要负荷进行不间断供电，这对维持核电厂的安全性和可用性起到至关重要的作用。

图1为直流系统的示意图，该系统由充电器1、充电器2、蓄电池和直流配电柜所构成。其中，直流配电柜包含直流母线、进线和馈线单元以及系统监测单元等主要部分。系统监测单元主要对母线电压、蓄电池状态、母线和支路绝缘状况以及辅助电源状态等进行监测和报警。

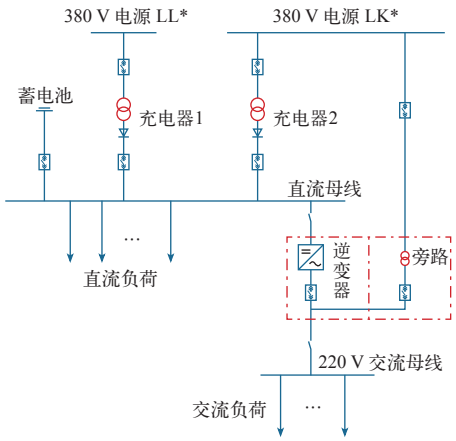

图1　直流系统示意图

核电厂直流系统均设计为不接地系统（IT系统），当系统对地绝缘电阻值低于某个设定值时，即认为出现了接地故障。当系统内出现一点接地故障时，该系统的保护装置（过电流保护或剩余电流保护）不动作，其可以继续为负荷供电。但应有绝缘监测装置对一点接地故障进行报警，提醒运行人员查找并消除故障。否则，当系统内发生第二点接地时，根据接地点位置的不同，有可能导致直流系统的保护装置动作而中断供电，或者导致负荷中某些保护或控制继电器的错误动作。

本文对直流系统的接地故障模式进行剖析，深入研究各种绝缘监测方法的原理和优缺点，然后提出绝缘定值设计的优化方法，并总结直流系统设计应注意的与绝缘相关的问题。

直流系统接地故障的原因和危害

直流系统接地是核电厂电气设备常见的故障之一。在核电厂中，直流系统的负荷众多，供电网络庞大，容易受各种因素影响而发生接地故障。造成接地故障的原因大体分为以下几个方面：

1）人为因素。由于施工或运行维修人员的失误导致故障，如在电缆沟施工中电缆绝缘结构损伤；清扫房间或设备时将直流回路淋水；在设备内工作时将

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

电源线与设备外壳或接地导体触碰。

2）自然机理。直流系统回路在运行中受自身客观因素影响而导致接地，如电气过电压、闪络；机械振动、撞击和挤压；系统绝缘性能老化；设备质量不良；蓄电池漏液等。

3）环境和气候。受设备安装使用的环境条件或气候因素影响也可能发生接地故障，如潮湿、粉尘、油污和动植物入侵等。雨雾天的空气潮湿导致设备内受潮凝露是接地故障的常见原因。

直流系统发生接地故障后，可能导致以下的危害：

1）人身伤害。当直流系统绝缘性能正常时，人体接触电源正极或负极的任何一极都不会产生持续的大电流（当系统电容过大时，存在瞬态的电容泄放电流）。若直流系统已经存在一点接地，当人体直接或间接地与另外一极接触时，直流系统电压作用在人体上，会产生持续的较大电流，有导致人身伤害的风险。

2）火灾或爆炸。当直流系统发生一点接地后，又在另外一极发生第二点接地，则系统内可产生较大的接地故障电流。如果接地电阻较大，产生的故障电流不足以使断路器或熔断器断开，故障支路无法切除，则故障电流将在设备内接地点持续发热。

3）设备运行故障。直流系统发生一点接地故障时，不会中断供电，有利于提高供电可靠性。但是如果系统设计得不合理，当发生一点接地时，有可能造成负荷中某些继电器误动作或拒动作。若发生两点接地故障，根据不同的接地情形，有可能造成直流供电中断或导致继电器的误动作或拒动作。

直流系统接地故障模式

为了便于问题的分析，需要对直流系统进行合理简化，并建立分析模型。简化处理后各种形式的接地故障均可等效为一点接地或两点接地。

1. 一点接地故障分析

在不接地直流系统中发生一点接地故障时，不会因产生很大的故障电流导致保护动作，系统可以继续供电。但是对于某些继电器而言，一点接地故障仍可能导致其误动作。以下将分两种情况进行详细分析。

（1）绝缘电阻大、对地电容大的直流网络

直流系统正极接地、负极接地和继电器负荷正极接地时的直流系统可简化成图2a～c所示的电路。图中，R_1为接地故障电阻；K为负荷支路中的一个继电器；S为控制继电器K的开关或触头；C_1、C_2和C_3为直流系统各部分的对地电容。设直流系统正、负极电压为U_O，在发生接地故障前，正极对地电动势为$U_O/2$，负极对地电动势为$-U_O/2$，继电器K两端的电压为0 V，其正极节点1的对地电动势也为$-U_O/2$。图2a中，当发生正极接地故障后，电容C_1通过接地电阻R_1开始放电，最终其两端电压逐渐由$U_O/2$变为0 V，正极对地电动势变为0 V。与此同时，电容C_2、C_3进行充电，其两端电压逐渐由$-U_O/2$变为$-U_O$。由于存在电容容量及串联阻抗的差异，C_2、C_3的充电速度不同，其电压变化并不同步。如果电容C_2充电缓慢，其电压

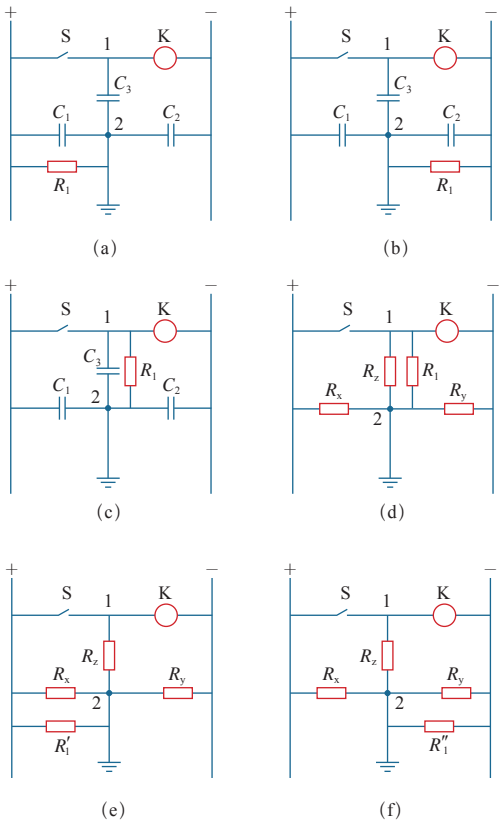

图2　直流系统接地故障形式——一点接地

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

从$-U_O/2$缓慢下降，而电容C_1充电迅速，电压迅速变为$-U_O$，则将在继电器K两端产生正向的电压，极端情况下，此电压可接近$U_O/2$。

有些情况下，由于直流系统正、负极对地绝缘电阻值差异较大，正、负极的电压并不平衡，在极端情况下，正极对地电动势可接近0 V，负极对地电动势可接近$-U_O$。那么，在出现一点接地故障时，继电器K两端的正向电压也可能接近U_O。按同理分析，图2b和图2c中的情况类似。

如果继电器两端出现的正向电压高于其起动电压（一般为70%～80%的额定电压），则易造成继电器的误动作；若该电压高于其释放电压（一般为10%左右的额定电压），则可能造成拒动作。电容充、放电速度不同而导致继电器两端出现正向电压是一个短时过程，其与操作继电器的过程时间重合的几率非常小，所以无须考虑该故障模式下继电器的拒动作风险。但是在该故障模式下，继电器误动作的风险不容忽视，其可导致控制或保护装置的故障，造成重大损失。以下因素可增加继电器误动作的风险，应尽量避免：①直流系统正、负极电压不平衡；②直流系统对地电容大；③继电器负荷的起动电压低，功率小。

（2）绝缘电阻小的直流网络

当直流网络的正常对地绝缘电阻值与继电器负荷的阻抗值相比不可忽略时，则称其为绝缘电阻小的直流网络。在这样的直流网络中，也有可能发生上文所述的故障现象，但由于此时绝缘电阻小，电路中的RC时间常数较小，暂态时间较短，所以由暂态短时正向电压导致继电器误动作的风险较低。而且这种直流网络还有另外一种一点接地故障模式，下文将进行详细分析。

在进行分析时，不考虑电容影响和暂态过程，其示意图如图2d～e所示。图中，R_x、R_y和R_z为直流系统各部分的正常对地绝缘电阻，其阻值与继电器K的阻值相当或更小；R_1、R_1'和R_1''分别为继电器K正极接地故障电阻及直流系统正、负极接地故障电阻，阻值极小，可视为短路。图2d中，继电器正极接地时，认为继电器K与R_y并联，其等效并联电阻与R_x串联。由于R_x、R_y的阻值比较小，继电器K上的分压主要取决于R_x和R_y的比值。如果R_x和R_y的阻值都比继电器K小很多，并且R_y的阻值较R_x大得多，则继电器K上的分压很大，可接近于直流母线电压U_O。此时，继电器将发生误动作或拒动作故障。按此方法分析图2e，在极端情况下，继电器K上的最大分压也可接近直流母线电压U_O，有误动作或拒动作风险。在图2f中，当发生一点接地故障时，继电器K两端电压降低，无误动作风险。

2. 两点接地故障分析

各种故障模式的简化电路如图3所示。图中，R_1、R_1'分别为两点接地故障的等效电阻，无论哪种两点接地故障模式，都是由于R_1、R_1'串联构成错误的通电回路而导致的；R_x、R_y、R_z和R_z'分别为直流系统各部分的正常对地绝缘电阻，对于“健康”的直流系统，其值都很大，可以视其为开路；K为继电器，设阻抗值为20 kΩ左右；S为控制继电器的开关或触头。

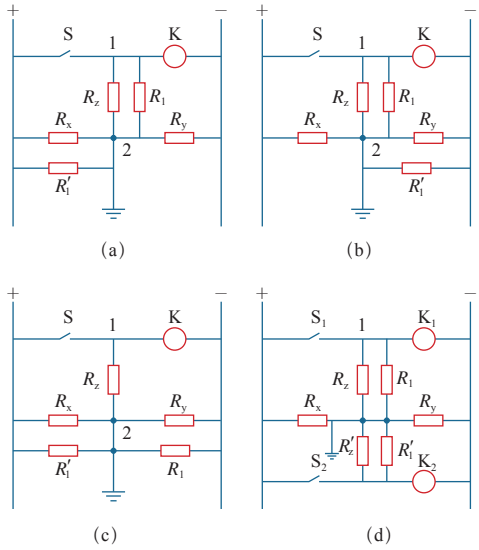

图3 直流及交流不间断电源系统接地故障形式——两点接地

图3a中，继电器K正极接地，直流系统正极接地，接地电阻R_1、R_1'串联支路将S旁路，其与继电器K形成串联后接在正、负极之间，继电器K的阻值与R_1、R_1'的阻值相比越大，其电压分压越大，导致继电器存在误动作或拒动作风险。图3b中，继电器K正极接地，直流系统负极接地，当S闭合时，R_1、R_1'形成的串联支路直接接在正、负极之

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

间，如果R_1、R_1'阻值足够小，则会产生很大的电流，同时可能导致S过负荷烧毁，甚至导致该馈线或母线的熔断器熔断或断路器跳闸。图3c中，直流系统正极和负极同时接地，该模式与图3b类似，但此时无论S是否闭合，都会产生故障电流，可导致该馈线或母线的熔断器熔断或断路器跳闸。图3d中，两个不同支路的继电器正极均有接地，接地故障电阻R_1、R_1'将这两个继电器正极短路，这样，S_1的开闭可能影响继电器K_2，而S_2的开闭也可能控制继电器K_1。

通过对以上四种直流系统两点接地故障模式的分析可知，两点接地故障可导致继电器误动作或拒动作，甚至导致直流系统短路故障，从而造成失电。两点接地的故障机理只与两点接地位置和接地电阻阻值有关，与直流系统的正常对地绝缘电阻、对地电容等因素无关。一般情况下，直流系统两点同时接地的情况很少发生，总是先发生一点接地，而后随着其他故障发生，演变成两点接地。如果在发生一点接地故障时，能够及时发现并消除，则可避免两点接地或多点接地带来的风险。为了能够及时发现和探测直流系统一点接地故障，绝缘监测仪得到了广泛应用。

绝缘监测装置对系统绝缘的影响

由于绝缘监测装置的接入，直流系统总的对地绝缘电阻值会有所变化。但是，目前市场上的绝缘监测装置的测量数据只反映原系统的绝缘电阻值，而并不考虑自身的接入导致系统绝缘电阻值的变化，所以，其显示的测量值并非直流系统实际绝缘电阻值。下文将针对各类绝缘监测方法进行详细分析。

1. 电桥法

电桥法包括平衡电桥法、切换电桥法和不平衡电桥法，这几种方法都将直流母线人为地通过电阻进行接地。平衡电桥法的正、负极接地电阻值相等，不会导致两极对地电动势产生大的偏差，但是，由于正、负极人为接地电阻的存在，使系统实际绝缘电阻降低，一般为100 kΩ左右。切换电桥法一方面会降低系统实际绝缘电阻；另一方面会使正、负极电压产生极大的偏差，导致由一点接地故障引起继电器误动作的风险升高；而且该方法在电路切换过程中还会导致正、负极电压大幅波动，即使在无接地故障情况下，也可能由电桥电阻切换导致继电器误动作。不平衡电桥法与切换电桥法类似，但是由于其两个桥臂电阻值差异没有那么大，减小了正、负极电压偏差和波动。

2. 注入法

注入法可引起母线电压波动，但一般来说，波动幅值很小，不会引起继电器误动作。当注入信号源和系统的接口是电容时，接入绝缘监测装置对直流系统绝缘电阻值的影响可以忽略不计。若该接口为电阻时，为了获得较好的性能，该电阻阻值不应过大，所以，接入绝缘监测装置会大幅降低直流母线实际对地绝缘电阻值，如某型号的绝缘监测装置的接入使直流母线对地绝缘电阻降低到了20 kΩ左右。特别是，有些产品采用电阻接口单极注入方式，导致单极母线对地绝缘电阻大幅减小，引起正、负极对地电动势不平衡，将导致系统发生单点接地故障引起继电器误动作的风险增加。

3. 漏电流探测法

漏电流探测法对直流系统的影响与切换电桥法类似，由于其人为接入的接地电阻更小，其影响更加严重，应慎重使用。

直流绝缘监测定值设计

1. 标准分析

在相关标准中，没有相关条文对运行中的直流系统正常对地绝缘值进行限制。然而，在《国家电网公司发电厂重大反事故措施》中规定，运行中的直流系统的绝缘值应大于100 kΩ，该要求对核电厂直流系统也具有一定的参考价值。

关于直流系统的绝缘报警定值，一般按相关标准的推荐值设置，而该推荐值如何得来，相关文件没有说明。

以图3a为例，设R_1为出现第一点接地时的绝缘电阻，其阻值为R_1；R_1'是出现第二点接地时的绝缘电阻，其阻值为零。设直流母线电压为U，继电器

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

K的电阻值为R_K，其分压为u_K，则有

$$R_l = \frac{U - u_K}{u_K} \cdot R_K \quad (1)$$

设继电器K的动作电压为或释放电压为u_{re}，若要避免继电器K误动作或拒动作，则$u_K < u_{re}$。所以，绝缘报警定值R_{set}应满足

$$R_{set} > \frac{U - u_{re}}{u_{re}} \cdot R_K \quad (2)$$

以核电厂常用的和泉继电器RJ2S－CD1－D100为例进行计算，其线圈额定电压为110 V，线圈电阻为18 870 Ω，最小起动电压为70%的额定电压，释放电压为10%的额定电压，直流系统正常运行电压121 V。

如要求该继电器不误动作，则需满足

$$R_{set} > \frac{121-77}{77} \times 18\,870\,\Omega = 10.78\,k\Omega \quad (3)$$

如要求该继电器既不误动作，也不拒动作，则需满足

$$R_{set} > \frac{121-11}{11} \times 18\,870\,\Omega = 188.70\,k\Omega \quad (4)$$

2. 存在的问题及解决方案

上文给出了直流系统对地绝缘电阻报警定值的计算方法，但是，按此方法得到的计算结果不能直接在绝缘监测装置上进行设置，需要进一步地处理。以下将对影响绝缘定值的相关问题进行进一步讨论。

（1）绝缘监测装置的接入对系统绝缘值的影响

通过本文对绝缘监测装置的原理分析可知，接入绝缘监测装置会导致直流系统对地绝缘电阻的降低，如电桥法和以电阻元件作为接口的注入法。然而，在目前市场上的绝缘监测装置，其输出的测量值没有考虑自身接入所带来的影响，其测量结果大于直流系统实际对地绝缘电阻值，从而存在检测盲区。为了避免此问题，在计算出直流系统绝缘报警阈值R_{set}后，应进一步计算要在绝缘监测装置上设定的报警定值$R_{set'}$。设绝缘监测装置引入的接地电阻值为R_{in}，则有

$$R_{set} = \frac{R_{in} R_{set'}}{R_{in} + R_{set'}} \quad (5)$$

进而，得到

$$R_{set'} = \frac{R_{in} R_{set}}{R_{in} - R_{set}} \quad (6)$$

（2）绝缘监测装置偏差的影响

绝缘监测装置的偏差较大，根据国际标准IEC 61557－8的要求：“系统对地电容为1 μF时，在绝缘报警设定值附近，允许偏差达±15%，随着对地电容的增大，偏差可能会更大。”所以，在最终确定报警定值时，应将$R_{set'}$乘以一个裕量系数，以确保绝缘监测装置的偏差不会导致其漏报故障，本文推荐裕量系数为1.5，若计算得到的$R_{set'}$为20 kΩ，则最终报警定值应设为30 kΩ。

（3）高阻抗继电器的影响

继电器功率越小，动作电压越低，保证其不发生误动作所允许的直流接地电阻越大，所要求的绝缘报警整定值越高。所以，应尽量避免使用小功率继电器，并且动作电压不宜过低。

如果考虑避免拒动作风险，需将继电器返回电压代入式（1）进行计算，而继电器返回电压很低，一般为10%的额定电压，这将使绝缘报警定值变得很高，使绝缘监测装置难以选择。所以，在应用继电器进行控制或保护系统设计时，应确保继电器不会拒动作，或者即使发生拒动作也不会产生不良后果。这样，在设计绝缘监测装置报警定值时无须考虑继电器拒动作风险。

结束语

核电厂直流系统对核电厂的安全稳定运行起到至关重要的作用，而绝缘监测是直流系统设计的重要课题。通过选用恰当的绝缘监测装置和进行合理的报警定值设计，一方面可确保直流系统可靠供电，另一方面可避免直流负荷的误动作。本文对核电厂直流系统接地故障的原因和危害进行了简单介绍，对一点接地及两点接地的故障模式进行了深入分析，并对各类绝缘监测方法进行了研究和评估，最后提出了直流系统绝缘监测定值设计的改进方案，提高了直流系统的可靠性。

（收稿日期：2014－08－10）EA

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