

[发电机]

汽轮发电机定子接地故障常见原因分析及防范措施

文/李艳磊¹ 何天磊² 王晓剑² 陈 聪² 徐俊元²

1. 平顶山姚孟发电有限责任公司; 2. 国家电投中电华创电力技术研究有限公司

汽轮发电机定子接地故障直接影响机组安全运行, 严重时可能损坏发电机。介绍了发电机定子接地保护原理与故障查找方法, 详细阐述了发电机定子接地故障的常见原因与防范措施, 对相似问题的处理有着重要的借鉴意义。

大型汽轮发电机作为发电厂的关键电气设备之一, 其正常运行对保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。在造成发电机停机的各类突发性故障中, 定子绕组接地属于最为常见, 且可能对发电机造成严重损坏的典型故障。在某些特定条件下, 定子接地故障可能迅速发展为相间短路甚至三相短路故障, 使发电机遭到严重损坏。因此, 一旦发生定子接地故障, 定子接地保护装置将会迅速动作于跳闸, 将发电机从系统中解列, 避免发电机遭受更为严重的损坏。

发电机定子接地查找方法

1. 发电机定子接地保护

发电机定子接地的定义: 发电机定子绕组回路以及与定子绕组回路直接相连的一次系统发生的单相接地短路故障。

由于发电机因故障停运会造成巨大的电量损失, 尤其是在当前保供电的背景下, 因此, 一旦发电机发生定子接地故障, 发电企业会第一时间组织力量查找故障, 希望用最短的时间查明故障原因。为了确定是哪一部位的绝缘出了问题, 通常需要将发电机的电气主回路分段拆开, 用直流2 500 V (或5 000 V) 的绝缘摇表分别测量各段的绝缘电阻, 必要时还得开展交流耐压试验、直流耐压试验等, 以

确定具体的故障点。排查顺序需根据现场实际情况和故障录波图具体分析。典型的发电机电气主回路如图1所示, 图1中的红圈部分表示分段拆开时应有的分断点。

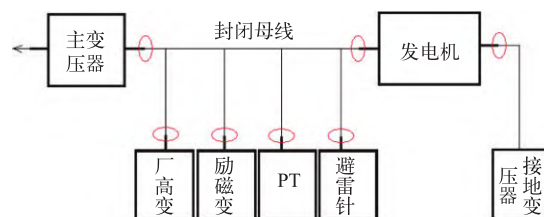


图1 典型的发电机电气主回路及分断点示意图

2. 发电机定子接地保护类型及其原理

GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》第4.2.4.3条规定: “对100 MW以下发电机, 应装设保护区不小于90%的定子接地保护; 对100 MW及以上的发电机, 应装设保护区为100%的定子接地保护”。目前发电机定子接地保护有两种方式: 双频式定子接地保护和注入式定子绕组单相接地保护。双频式定子接地保护一般由基波零序过电压保护与三次谐波电压保护共同组成。基波零序电压能够保证发电机在85%~95%的定子绕组单相接地保护, 通过判断发电机零序电压的大小来判断定子绕组是否接地。三次谐波电压保护是利用正常时机端三次谐波电压低于中性点电压, 故障时高

于中性点电压的特点。故障点越靠近中性点，机端三次谐波电压比中性点电压越高，灵敏度越高，可保护发电机中性点25%左右的定子接地。注入式定子绕组单相接地保护可以反映发电机100%的定子绕组单相接地，一般采用20 Hz和12.5 Hz两种低频注入电源，具有灵敏度高、不受故障点和工况影响及能在机组起停机过程中监视绝缘状态等特点。

发电机定子接地故障发生后，需要根据保护装置的动作情况和故障录波图的波形，综合判断故障的具体原因。

发电机定子接地常见原因及防范措施

1. 发电机本体

发电机本体故障是最严重的故障，造成的损失也是最大的。常见的故障原因有：定子线棒绝缘有缺陷导致击穿；定子端部水电接头开焊导致绝缘击穿漏水；定子线棒堵塞导致局部高温烧损绝缘；定子槽楔松动导致线棒磨损击穿；定子端部固定部件绑扎不紧振动导致定子绝缘磨损击穿；检修后有异物遗留在发电机内部等。如图2所示。



图2 定子线棒绝缘有缺陷导致击穿

为了防止发电机本体发生故障，采取以下防范措施。

1) 设计制造阶段。建设单位应选派技术能力强的专业技术人员或委托有资质的监造部门全过程参与机组选型、技术谈判和设备监造工作。加强制造过程中原材料质量和工艺的监督，从根本上杜绝设备隐患。

2) 运行阶段。按照DL/T 1164—2012《汽轮发电机运行导则》要求，加强发电机各部位温度、水压和氢压等参数的监测。当监测参数的变化趋势偏离正常值时，立即分析、查找原因。定期对参数测

点（温度、压力和氢气含量等）进行校验，保证参数测量准确。

3) 检修阶段。应严格按照DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》的要求开展预防性试验，严把试验质量关，不缺项、不漏项。试验结果异常时，立即分析、查明原因，坚持“修必修好”的原则。加强大型发电机环形引线、过渡引线、鼻部手包绝缘、引水管水接头等部位的绝缘检查，重点检查发电机内部是否有多种颜色的粉末、油泥等，端部是否有磨损、松动现象。

4) 如果发电机近区发生接地短路冲击，尽早利用机组小修或长期停/备用期间，打开汽、励两侧人孔门，进入定子膛内检查端部紧固件是否有松动迹象、磨损迹象。

5) 有条件的可加装成熟的定子绕组端部振动监测装置，并定期跟踪分析定子端部振动情况。

2. 发电机出口侧电压互感器

近几年，发电机出口侧电压互感器（PT）故障导致发电机定子接地故障，从而引起机组非计划停运的问题比较突出，引起发电企业的高度重视。电压互感器导致定子接地故障常见的原因有：PT匝间绝缘短路故障；PT连接附属部件对地绝缘不良等。如图3所示。



图3 电压互感器匝间绝缘短路

为了防止由于PT故障导致的发电机定子接地故障，采取以下防范措施。

(1) 加强设备入厂管理

1) 采购大型互感器制造企业生产的产品，并要求厂家提供相同型号产品的型式试验报告，提供本批次采购的每台产品的出厂试验报告及合格证，并认真审核。

2) 未完成订货和安装的新建机组，所有发电机机端PT均应采用全绝缘形式，电压互感器柜体应有

足够空间，不得盲目减少电压互感器绝缘材料的厚度、缩小柜体体积和减少绝缘距离。

3) 对于新购置的发电机机端PT，在订货技术协议中明确要求：一次绕组漆包线绝缘升级为F级绝缘，绕组层间绝缘材料性能不低于复合绝缘纸（PMP）材料。优化绕组端部电场设计（如采用倒角设计），提升一次绕组耐软化击穿温度、耐刮性、绝缘强度和机械强度，降低绕组端部电场强度，并在生产制造过程中，加强对原料检测报告的检查。

4) 严格按照GB 50150—2016《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》的要求逐台进行全部的交接试验项目，重点是交流耐压、局部放电及励磁特性等试验。电压互感器局部放电水平满足：全绝缘型为 $1.2U_m$ 测量电压下，局部放电量不超过20 pC；半绝缘型为 $1.2U_m$ 测量电压下，局部放电量不超过50 pC， $1.2U_m/\sqrt{3}$ 测量电压下，局部放电量不超过20 pC。

(2) 加强设备运维管理

1) 发电机出口侧PT应“逢修必查”，检查外观有无裂纹，检查螺栓等附件是否紧固，检查小车间动静头接触是否良好，检查一次熔断器与其底座接触是否良好，检查二次接线是否松动等。测量熔断器电阻值，并与历史数据对比是否正常。

2) 将绝缘电阻、直流电阻试验列入“逢修必试”项目。

3) 每5年对PT进行一次交流耐压试验和局部放电试验。在耐压试验前后各进行一次励磁特性试验，两次试验结果应无明显差别。超期未做的，尽快在机组检修时补做。

4) 由于GB 1207—1997《电压互感器》的要求较低，执行此标准或更早版本的产品，工艺及材料相对落后，存在较大安全隐患，各企业制定计划，尽快进行更换。

5) 对低于F级绝缘等级的发电机出口侧PT，各企业制定计划，利用机组检修机会尽快进行更换。

6) 发电企业根据需要购置一定数量的备件，必要时进行更换。

3. 封闭母线

发电机出线的大电流离相封闭母线因使用方便、运行维护工作量小、可靠性高、不受环境和外界影响等诸多优点被广泛采用。如果离相封闭母

线微正压装置故障导致内部受潮或者设备附属部件（如支撑绝缘子）损坏，可能造成封闭母线绝缘下降，从而导致定子接地故障。如图4所示。



图4 封闭母线支撑绝缘子损坏

为了防止封闭母线导致的发电机定子接地故障，采取以下防范措施。

1) 做好微正压装置的设计选型。微正压装置主气源宜使用厂内仪用压缩空气，并选用无水、无油型空气压缩机作为备用气源。过滤装置应具备微尘过滤、空气干燥的功能，使用仪用压缩气源时，特别安装油气分离装置。储气罐宜具备自动排水装置，实现定期自动排水功能。对于沿海潮湿地区，建议将微正压装置改造为热风循环微正压装置。

2) 做好微正压装置的运行与维护。每日查看离相封闭母线的微正压装置的运行状况，除检查直观运行情况外，还应记录各类运行数据，并进行纵向及横向比较便于及早发现异常。定期对封闭母线最低处（如变压器、厂变升高座法兰处）的积水进行排污。

3) 利用大小修或停机机会，对封闭母线的绝缘状况，尤其是盘式绝缘子结露情况进行检查，消除结露或积水隐患。对发变组封闭母线的密封垫进行定期检查或更换，防止雨水或湿气窜入封闭母线。

4. 励磁变压器

励磁变压器高压侧或低压侧绕组接地将引起发电机定子接地故障。为了防止由于励磁变压器导致的发电机定子接地故障，采取以下防范措施。

1) 励磁变压器引线各部件装配尺寸应符合设计要求。低压绕组引出线裸露铜排（尤其是靠近铁心拉板的铜排），喷绝缘涂料或加装绝缘带、绝缘热缩套，防止短路故障。

2) 励磁变压器外罩应能有效防止异物落入、小动物进入及进水短路等，做好预防措施。

（下转第84页）

维护策略

1. 测试策略

基于蓄电池使用年限、历史故障数据、质保期（合同质保期5年）等综合因素制定维护策略。

1) 使用4年以内，且没有历史批次问题记录的蓄电池。执行核对性放电，每半年度一次或半年度执行在线15 min放电、年度核对性放电两种维护方式。

2) 使用4年内，有历史批次问题记录的蓄电池，执行1) 中策略的同时，相关型号批次的蓄电池组，按5%的抽查比例取样进行深度放电测试。

3) 使用4年以上，且没有历史批次问题的蓄电池，考虑阀控铅酸蓄电池的实际使用寿命，执行1) 中策略的同时，按5%~10%的抽查比例取样进行深度放电测试。

2. 蓄电池的在线监测

阀控铅酸蓄电池须配置在线监测装置，监测数据需包含单节电池的温度、内阻和电压，并将数据送至BMS系统；BMS中设置的阈值与运维技术标准要求一致。根据故障案例得出的经验，阀控铅酸蓄电池必须配置在线监测装置。

2021年，某制造企业对应急电源（EPS）做蓄电池放电测试，测试时发现有多颗落后蓄电池（12 V 电池，放电时有 10 多节电池电压都降到了 2 V），因缺乏备件，未及时更换。维护人员判断立刻均充可能存在风险，第二天白天开启均充模式

（24 h）。第三天上午，维护人员赴现场检查，发现其中一组蓄电池，1~36节均出现明显高温，最高温度超过 100℃，且电池上空出现白色酸雾。检查发现电池的安全阀正在冒气体。整个事故的直接原因是，在出现多颗落后蓄电池的情况下，未及时更换，带病充电。另外，该蓄电池组未配置电池监控装置，不能早期发现蓄电池温度异常，给蓄电池异常处置带来风险。

2021年，某早期建设项目的弱电用UPS 配套蓄电池，蓄电池采用某型号阀控铅酸蓄电池，使用年限约6年，没有配置蓄电池在线监控装置。在专项检查中发现该组蓄电池壳体温度整组均异常，最高约50℃，蓄电池壳体有明显的鼓包现象。

结束语

阀控铅酸蓄电池作为备电安全的基础，其全生命周期的维护管理对于供电可靠性至关重要。近年尝试联合蓄电池生产厂商的研究院，产学研合作，专业评估蓄电池健康状态，科学合理推进蓄电池的老化更换工作，产生经济、社会效益。EA

（收稿日期：2023-07-01）

参考文献

- [1] 许昌盛. 通信机房蓄电池放电测试方法对比与容量落后蓄电池的处理[J]. 通信电源技术, 2022(5): 150-152.

（上接第 54 页）

3) 在日常运行过程中，关注励磁变压器的铁心温度和绕组温度的变化趋势，并做好设备的防潮、防尘管理，利用检修或停机做好励磁变压器内部的清洁。

4) 机组检修时，对励磁变压器铁心和线圈的固定夹件、绝缘垫块以及连接螺栓等进行检查紧固，防止铁心线圈松动位移或零部件脱落引起短路故障。

结束语

汽轮发电机定子接地故障的影响因素比较多，除了定子绕组本体，还包括发电机出口回路的很多设备，如封闭母线和电压互感器等，一旦发生故障，故障点的查找过程比较繁琐。因此，必须要吸

取经验教训，提前采取防范措施。本文针对可能引起发电机定子接地故障的常见原因进行了分析，针对每种可能的原因提出了有针对性的防范措施，对相似问题的处理有着重要的借鉴意义。EA

（收稿日期：2023-07-19）

参考文献

- [1] 王晓剑，石颀，徐俊元，等. 汽轮发电机定子线棒F级绝缘的寿命评估方法研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(7): 43-49.
- [2] 张征平，涂小涛，胡卫，等. 发电机定子绕组接地故障的快速查找新方法[J]. 大电机技术, 2016(4): 10-14, 18.