

[发电机]

汽轮发电机转子接地保护原理分析与配置建议

文/何天磊¹ 梁辰¹ 王晓剑²

1. 中电华创电力技术研究有限公司; 2. 中电华创(苏州)电力技术研究有限公司

从保护发电机和安全生产的双重角度出发, 发电机必须配置转子接地保护。介绍了几种常见转子接地保护的原理, 阐述了可能会导致保护误动作的干扰因素, 总结出发电机转子接地保护动作后的排查重点, 提出转子接地保护配置的原则, 以指导同类型发电机运行检修工作。

随着发电机单机容量的不断增大, 百万机组已经逐渐成为现在的主力机组。在载荷能力不断增强、发电能效不断提高的同时, 对发电机的保护功能也提出了更高的要求。近年来, 在火电机组频繁参与深度调峰的大背景下, 发电机转子电流和温度在短时间内大幅波动, 槽内导体的低周胀缩加剧, 绕组易发生永久性形变或短路, 发电机转子的故障率大大增加。如果在转子绕组故障时不能及时发出警报或切除负荷, 将对发电机本体造成不可逆的损伤, 严重时可能影响整个电力系统的安全稳定运行, 造成巨大的经济损失和恶劣的社会影响。

接地故障是发电机转子绕组故障的主要表现形式之一, 如图1所示。按接地的严重程度可以分为金属性接地和非金属性接地, 按转子绝缘故障性质可以分为稳定接地和不稳定接地, 按故障点的形式可以分为一点接地和两点接地。在发电机转子接地故障中最为常见的是一点接地故障, 由于发电机转子绕组一点接地时并未形成闭合回路, 且励磁电源部位存在的大电阻对接地泄漏电流有一定的限制作用, 因此一点接地故障一般不会对运行机组造成直接伤害, 但一定要引起充分重视, 及时查找转子接地保护动作原因, 避免转子两点接地故障的发生。一旦发生两点接地故障, 闭合回路的形成导致电流

急剧增大, 发电机将面临转子烧毁的重大风险, 同时发电机气隙磁通失去平衡, 引起发电机剧烈振动, 发电机和汽轮机轴系磁化, 严重威胁发电厂主设备的安全。

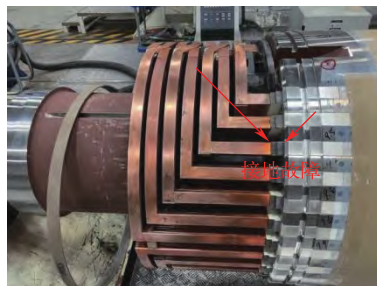


图1 发电机转子接地故障示意图

发电机转子接地保护简介

在实际的工程应用中, 发电机组一般都会配置转子绕组一点接地保护, 实现转子接地故障的分析与诊断。转子绕组一点接地保护从原理上一般可以分为非注入式和注入式两种。

非注入式转子一点接地保护的原理是利用励磁绕组自身的电流或电压作为判据, 在此方式下主要有电桥平衡式和乒乓式两类, 其中乒乓式又称作切换采样式, 在许多大型火力发电厂得到了应用。注

入式转子一点接地保护的主要特征是外加辅助电源，通过装置将用作保护判据计算的电流或电压注入转子绕组。南瑞、南自、许继和四方等厂家的注入式转子接地保护装置已经比较成熟，目前已广泛投入运行。

下面对近年来常用的几种发电机转子一点接地保护作简要介绍。

1. 电桥平衡式

利用电桥平衡原理的转子一点接地保护在ABB UNS3020型保护装置中运用最为广泛。在正常情况下，转子绕组电阻、对地绝缘电阻 R_g 、外接电阻 R_1 和 R_2 、电流继电器J等部件形成一个处于平衡状态下的电桥，如图2所示。当转子绕组上发生接地故障时，电桥失去平衡，此时流过继电器的电流大于动作电流，继电器动作。在这种原理下，转子绕组的正极或负极附近发生接地时，该装置的灵敏度很高；但转子绕组的中性点附近发生接地故障时，即使接地故障是金属性接地，继电器也不会动作，因为此时电桥仍处于平衡状态。同时该原理的保护被汽侧接地电刷状态影响，导致保护误动作，因此对于大型发电机组而言，电桥平衡式转子一点接地保护不够完善，很少被采用。

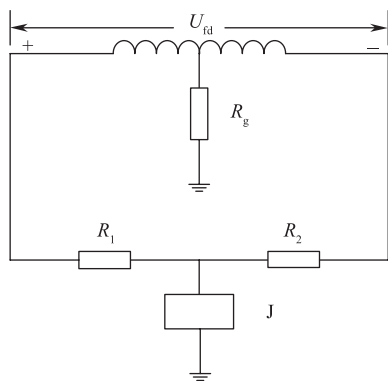


图2 电桥式转子接地保护等效电路图

2. 乒乓式

乒乓式转子一点接地保护采用变电桥的原理，通过改变电子开关的通断来改变电桥臂电阻值，从而使电桥没有固定的平衡点，克服了电桥原理在转子绕组中性点附近出现保护死区的情况。

乒乓式转子一点接地保护电路如图3所示，电子开关 S_1 、 S_2 由微机进行通断切换控制，在 S_1 闭合、 S_2 断开和 S_1 断开、 S_2 闭合两种状态之间不停地切

换。当发电机转子绕组在K位置处发生一点接地故障时，通过两种状态下测量电阻上电压值的变化，能得到短路大致的位置。

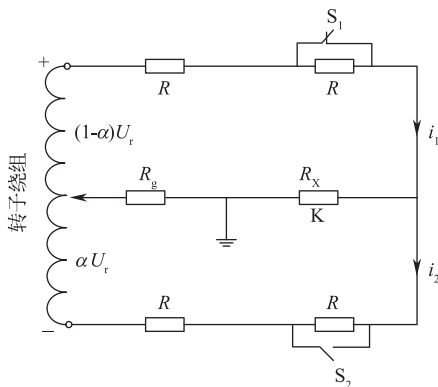


图3 乒乓式转子接地保护等效电路图

非注入式转子一点接地保护的原理是建立在发电机存在励磁电压且为一定数值的基础上，所以在机组启动或停机的过程中，在励磁电压较小时就无法对转子绕组回路进行有效的接地故障监测，那么保护装置将无法准确地反映实际故障。

3. 注入式

注入式转子一点接地保护按照外加电源的性质不同，主要分为直流、交流和方波三种方案。直流电压注入式受到励磁电压的影响，接地位置不同，保护的灵敏度也不同。交流电压注入式受转子绕组对地电容影响较大，而大型机组的转子绕组对地电容影响较大，相对来说，此原理可靠性不高。方波电压注入式可调高注入方波的周期，且保护装置采用稳态数据，具有较高的精度，目前应用较为广泛。

方波注入式转子接地保护主要根据现场转子绕组的引出方式，一般选择在转子绕组的正负两端或其中一端和转子大轴之间的位置注入方波电压，双端注入式和单端注入式转子接地保护的原理图如图4、图5所示，注入方波式转子接地保护采取正负半波相减的方式进行计算，在这种方式下，接地位置不会影响接地电阻值的计算。同时注入式保护原理克服了非注入式保护原理在启动、停机过程中无法准确测量转子对地电阻的不足。当励磁电压波动较快时，仍然会造成每个周期计算出的电阻不同，反映到测量值就是测量值波动，严重时可能造成保护装置误动作。

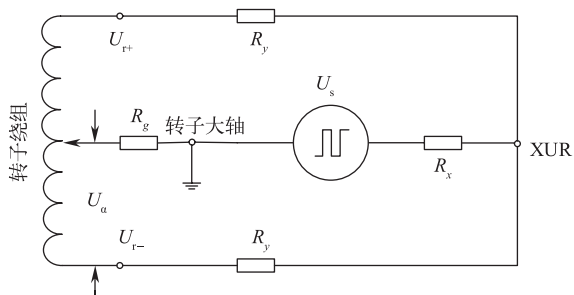


图4 双端注入式转子接地保护原理图

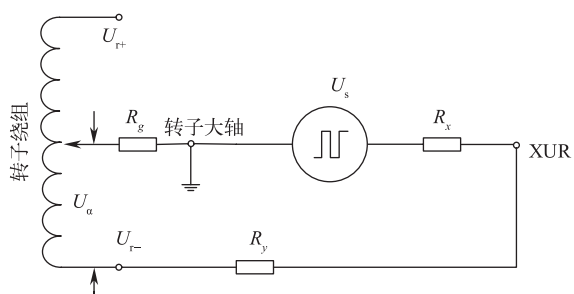


图5 单端注入式转子接地保护原理图

干扰因素分析

发电机在运行中受到多种因素的干扰，导致转子接地保护误动作，所以在保护动作后首先应考虑是否为误动作，下面介绍几种可能导致保护误动作的情况。

(1) 接地不可靠引起保护误动作

大轴接地电刷在运行中容易受油污的影响，导致大轴接地不可靠，在这种情况下，测量回路上相当于增加了一个不稳定的过渡电阻，影响转子对大轴绝缘电阻的计算，从而影响转子接地保护的正常工作。

(2) 励磁电压变化引起的误动作

在机组启动停机或者机组强励磁时，励磁电压将不再是一个定值，计算出的转子绕组对大轴绝缘电阻值与实际值有误差。根据接地点位置，若在励磁绕组中性点，误差为零；若在两端，误差最大。尤其是对于注入式原理，一个方波周期内励磁电压变化越大，引入的误差也越大。

(3) 转子对地电容引起的误判断

发电机转子绕组本体与大轴（地）之间存在着一一定的分布电容，由于转子绕组对地电容的存在，注入电源对转子对地电容进行充放电，泄漏电流与注入电压存在衰减关系，在泄漏电流未进入稳定状

态时进行接地电阻值计算，会造成测量误差，导致保护误动作。

(4) 保护范围扩大引起的误判断

励磁变压器通常采用Y/D11接线，低压侧为不接地系统。励磁系统等效回路如图6所示。励磁回路B相接地，在1个工频周期内，励磁绕组的正端和负端各有1/3的时间接地。在这种励磁变压器低压侧单相接地时不会引起故障电流的增加，故励磁变压器差动保护及速断过电流保护均不会动作，但在机组空载运行时，整流模块导通，转子接地保护范围扩大至励磁变压器低压侧，故转子接地保护也有可能动作。

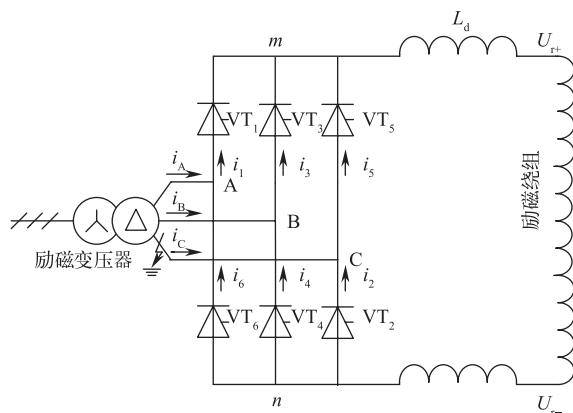


图6 励磁系统等效回路图

故障位置查找

根据转子接地保护的原理，保护范围有：转子本体、转子到保护装置的电缆、转子绕组到励磁调节器之间连接的铜排、励磁调节器内整流元器件、电刷和集电环等，在机组空载时，保护范围可扩大至励磁变压器低压侧。

引起转子接地保护动作的原因多种多样，主要有以下几点：①制作工艺不良导致的局部绝缘瑕疵，如转子端部转角处绝缘损坏、转子引线绝缘损坏等；②检修时异物进入转子本体，如槽楔与转子绕组间有金属拉丝；③二次回路绝缘不良，如阻容吸收回路电缆破皮接地；④集电环、刷架引起的绝缘降低，如碳粉吸附在集电环两极，底板接地螺栓与刷架导流板短接；⑤转子接地保护装置误动作或装置损坏。

转子接地保护动作后，除了判断保护是否正确动作以外，还应对转子本体进行检查。重复脉冲法

(RSO)不仅能灵敏反映转子匝间绝缘情况,也能一定程度上识别出转子金属性接地故障,转子接地保护动作后可利用重复脉冲法(RSO)对转子状态进行评估。如果转子接地保护动作不是由转子本身引起,还可根据转子接地报警的状态(稳定发信、间歇性发信、转速高时发信等)着重检查某些部位,大致可以参考的排查思路如下。

- 1) 检查汽侧接地碳电是否接触不良或有脏污。
- 2) 检查发电机转子本体及内部绝缘情况,重点关注集电环、导电螺钉、刷架和电刷有无异物,以及碳粉、油污污染情况。
- 3) 检查励磁调节器输出直流母线绝缘子及相关电缆绝缘情况。
- 4) 检查励磁调节器柜内主回路及检测回路情况,检查励磁装置电容滤波回路。
- 5) 检查保护测量回路是否断线,保护装置功能是否异常。
- 6) 检查励磁变压器低压侧一次回路是否存在接地。

保护配置建议

在GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》第4.2.11条、DL/T 684—2012《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》4.4条和《防止电力生产事故的二十五项重点要求》第10.11条要求中,均提出了发电机保护中需配置有转子一点接地保护,且当转子一点接地保护动作后,应立即查明故障点与性质,若发生稳定的金属性接地,应第一时间减负荷并平稳停机。

上述标准并未明确转子一点接地保护是否投跳闸,但偏向于投入信号。对于保护出口方式,目前现场整定方式不一,部分电厂保护动作于信号,部分电厂保护动作于跳闸。

结合各电厂转子接地保护实际投入情况以及标准要求,提出以下建议:大型发电机保护中宜配置两套独立的转子接地保护装置,原则上应安装于励磁系统柜。这也是为实现保护的双重化配置,一套采用注入式转子接地保护原理,另一套采用乒乓式转子接地保护原理,不同原理的保护之间可以相互验证,正常运行时只投入其中一套,否则会互相产生干扰影响,导致两套转子接地保护测得的接地

电阻值都不准确。当投入运行的转子接地保护动作报警时,可切换到另一套保护,验证第一套保护的動作行为,提高绝缘检测的可信度。转子绕组一点接地保护宜投入信号,若转子绕组一点接地保护动作,应立即判断故障类型以及危害程度,同时在发生转子一点接地保护动作后宜投入转子绕组两点接地保护,出口方式为跳闸。

值得注意的是,一部分汽轮发电机组采用了无刷励磁方式,转子电流由交流励磁机经整流二极管提供,但由于继电保护等多方面的因素,仍需安装电刷以引出转子电压。GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》中第4.2.11条规定,对旋转励磁的发电机宜装设一点接地故障定期检测装置。根据标准要求,对于旋转无刷励磁机组,宜采用转子自动举刷装置,进行转子对地绝缘定期检测。若转子采样电刷长期与集电环接触,由于集电环与电刷压力不够大或者振动等因素可能会导致两者接触不良,影响转子接地保护的性能。因此,若不采用转子自动举刷方式,为了确保转子接地保护正常工作,应加强对电环和电刷的日常维护清扫,确保集电环与电刷接触良好。EA

(收稿日期:2023-05-23)

参考文献

- [1] 杨国龙,陈文学,令红兵.燃煤机组新运行方式对在役汽轮发电机的影响[J].大电机技术,2018(5):48-53.
- [2] 许震,饶春林.1 000 MW机组两种转子接地保护异常分析与预防措施[J].电力安全技术,2020,22(1):64-67.
- [3] 金泱,王展宏,吕嘉琛,等.重复脉冲法在发电机转子绕组一点接地故障中的应用[J].浙江电力,2018,37(8):102-106.
- [4] 俞卫新,王晓剑,何天磊,等.重复脉冲法在发电机转子一点接地故障诊断中的研究与应用[J].大电机技术,2021,No.279(6):22-27.
- [5] 黄建礼,王加军.一起发电机转子接地保护误动事件的分析与解决方法[J].河南电力,2020(S1):109-111.
- [6] 黄康.同步发电机励磁控制研究综述[J].电气应用,2022,41(9):9-15.