

扩大单元接线方式下水轮发电机组定子接地故障原因分析及应对措施

黄乐 唐鲲鹏 刘晖 廖传林 黄刚威

江西省港航建设投资集团有限公司井冈山航电枢纽分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6341

[摘要] 定子接地故障是发电机故障中出现频次较多的故障类型之一,直接影响着发电机组的安全稳定运行。扩大单元接线方式是中小型水电机组中常见的接线形式,由于其机端共母线的特征,其中一台发电机出现定子接地故障可能会引起同一母线上的其他发电机定子保护同时动作,导致接地故障的影响范围扩大。本文分析了扩大单元接线方式下水轮发电机组定子接地故障的常见原因,并从定子的安装、检修、保护方案设计及在线监测等方面提出了针对性措施,为应对水轮发电机组定子接地故障提供一些思路。

[关键词] 扩大单元接线; 水轮发电机组; 定子接地; 接地故障

中图分类号: U264.7+4 **文献标识码:** A

Analysis of the Causes of Stator Ground Faults in Hydro-Power Generating Units under Expanded Unit Wiring Methods and Corresponding Countermeasures

Le Huang Kunpeng Tang Hui Liu Chuanlin Liao Gangwei Huang

Jinggangshan Hydropower Hub Branch of Jiangxi Port and Shipping Construction Investment Group Co., LTD

[Abstract] Stator grounding fault is one of the most frequent types of generator faults, which directly affects the safe and stable operation of generator sets. Due to the characteristics of the common bus at the end of the machine, the stator grounding fault of one generator may cause the stator protection of other generators on the same bus to act at the same time, resulting in the expansion of the influence range of the grounding fault. This paper analyzes the common causes of stator grounding faults of hydro-generator sets under the enlarged unit wiring mode, and puts forward targeted measures from the aspects of stator installation, maintenance, protection scheme design and online monitoring, so as to provide some ideas for coping with stator grounding faults of hydro-generator sets.

[Key words] enlarged unit wiring; hydro-generator sets; stator grounding; Ground fault

引言

定子绕组接地故障是发电机常见的故障类型之一,会直接对水电机组运行的稳定性和可靠性造成影响,从而造成一定的经济损失。扩大单元接线在中小型水电机组中是常用的一种接线形式,由于扩大单元接线具有机端共母线的特点,当其中一台发电机出现定子接地故障,可能会引发连接在同一母线上的其他发电机定子接地保护也发生动作,出现接地故障影响扩大化的现象。因此本文选择采用扩大单元接线的水电机组作为研究对象,对水电机组常见的定子接地故障原因进行分析,并根据故障原因提出相关应对措施。

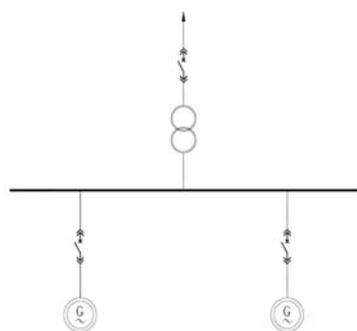
1 扩大单元接线方式

扩大单元是指多台发电机与同一台变压器相连接组成的单元,其接线方式也称为多机一变接线方式,在中小型水电站的发电机组中获得了广泛的应用。在实际的场景中,采用扩大单元接线方式,一方面能有效整合发电设备资源,减少变压器等设备的投入数量,降低电站的建设成本与设备运维成本;另一方面,相较于其他接线形式,该方式有助于简化电站内部复杂的电气线路布局,提升电力传输与分配的效率,为中小型水电站稳定、高效地输出电能提供支撑。

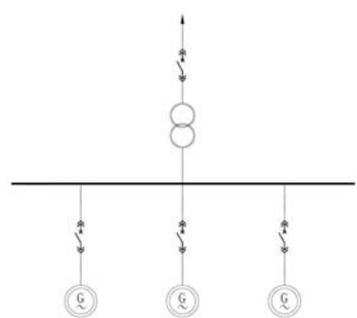
在扩大单元接线方式里,最常见的两种形式是两机一变和三机一变。两机一变,即两台发电机共同连接到一台变压器上,通过将两台发电机的电能整合到同一台变压器进行升压或降压

处理,实现电能的高效传输与分配,不仅能有效降低设备成本,还能简化电站的电气系统布局,减少占地面积。这种组合形式在装机容量适中、电力负荷相对稳定的中小型水电站中较为普遍。两机一变接线方式示意图如图1的(a)所示。

三机一变是三台发电机连接至一台变压器,当其中一台发电机出现故障需要检修时,另外两台发电机仍能够继续运行,保障电站的基本电力供应,降低因设备故障导致的停电风险。相较于两机一变,三机一变能够提升发电单元的整体功率输出,同时增强系统的稳定性与适应性。这种组合形式适用于对电力输出需求更大,且发电机单机容量相对较小的水电站。三机一变接线方式示意图如图1的(b)所示。



(a) 两机一变接线方式



(b) 三机一变接线方式

图1 机组扩大单元接线方式示意图

2 定子接地故障常见原因

2.1 定子线棒自身存在绝缘缺陷导致击穿

定子线棒如果在生产制造或安装过程中由于工艺水平不达标,例如线棒表面存在尖角、毛刺等尖端部位,将直接导致自身绝缘性能存在缺陷。当机组投入运行后,其产生的电场会使得电荷向尖端区域聚集,引发尖端放电的现象。这种放电现象会逐步发展为电晕,对绝缘层进行腐蚀,致使绝缘性能持续下降,最终造成击穿事故。

以某水电机组为例,在定子线棒安装过程中,对线棒表面开展的涂绝缘漆、绕防晕带等操作不满足工艺要求,导致线棒表面的漆在凝固后形成细小的尖角、毛刺,从而对绕组表面的平整性造成破坏。不平整的线棒表面会出现电场强度分布不均匀的情况,从而引起该处出现局部放电现象,导致绝缘层在放电作用下

逐渐被腐蚀破坏,最终发生绝缘击穿引起定子接地故障^[1]。

2.2 定子线棒绝缘磨损导致击穿

定子铁芯紧固件若存在设计缺陷、质量缺陷或是安装过程中存在绑扎不紧的情况,均会导致机组运行过程中定子铁芯齿部发生松动,从而引起定子铁芯齿部与定子线棒间隙增大。随着机组运行过程中产生的电磁振动和机械振动,铁芯齿部会与定子线棒相互摩擦从而引发挤压、刮擦现象。这会导致定子线棒摩擦处的地绝缘逐渐减薄,绝缘性能持续下降,最终发生绝缘击穿^[2]。

根据实际发生过的故障案例,某水电机组定子铁芯端部紧固螺母的绝缘垫圈由于强度未达到要求,在紧固螺母挤压下逐渐变薄,最终导致断裂。这使得两侧齿压板和铁芯之间的间距增大,从而引发铁芯松动,最终造成定子线棒绝缘磨损,发生绝缘击穿。另外,止压块压指设计长度不足也引发过定子线棒绝缘击穿事故。其主要原因在于止压块压指长度不够,无法压紧稳固铁芯端部硅钢片,致使定子铁芯端部齿松动,从而对定子线棒发生冲击的现象,使得定子线棒绝缘磨损变薄,最终造成定子线棒绝缘击穿^[3]。

2.3 定子线棒存在磁性金属异物附着导致击穿

当定子线棒上有磁性金属异物附着时,机组运行过程中由于交变磁场的存在,异物附着处会出现电磁感应现象,使得该处电场分布不均匀,在内部发生持续性的闪络放电,电子受强电场作用高速移动,不断与周围介质分子碰撞,从而引发异物附着处发热升温的情况。伴随着机组持续运行,附着的磁性金属异物会在电磁力作用下产生电磁振动进而与定子线棒发生摩擦。因此,在金属异物附着处会承受高温和振动摩擦的双重作用,从而对定子线圈表面绝缘造成破坏,使得材料的绝缘性能退化。当绝缘性能下降到无法满足正常工作电压要求时,定子线棒便会发生绝缘击穿,最终造成接地故障,严重影响机组正常运行。

在机组运行过程中,定子绕组端部连接件松动致使金属部件脱落,是定子线棒出现磁性金属异物附着的常见原因之一。机组长期运转时,连接件受机械应力、热应力及振动等多种因素综合作用易出现松动情况。当连接件发生松动后,金属部件就可能脱落并附着在定子线棒上。此外,安装、检修过程中,工作人员疏忽遗留焊料、铁丝、螺钉等磁性金属异物的情况也是定子线棒出现磁性金属异物附着的常见原因。例如,焊接工作结束后未仔细清理残留焊料,安装零部件时遗落铁丝、螺钉等^[4]。

3 定子接地故障的应对措施

(1) 在安装过程中,强化定子线棒安装质量管控。针对所有涉及定子线棒绝缘的施工流程,均需进行严格把关,尤其是涂绝缘漆、绑扎防晕带等关键施工环节,必须严格遵循既定的工艺标准及规范要求执行操作,确保缝隙间填充密实防止松动,同时避免出现安装操作不当导致线棒表面出现尖角、毛刺。

在施工检查阶段,若发现端部表面存在尖角、毛刺,应采取打磨、清理等措施,保持绕组表面的平整性,保障其电气性能。施工期间,要加强安全监督工作,严禁野蛮施工行为。在线棒运输

及安装过程中,禁止出现蛮力踩踏、撞击等违规操作,防止出现损伤绝缘面的情况发生。线棒下线后严格检查槽部、端部是否留有异物,确保表面无硅橡胶颗粒等附着。施工过程中留下的异物必须清理干净,确保没有遗留磁性异物附着在端部表面。注意检查定子绕组上方螺栓等连接件是否松动,以免脱落至端部表面形成附着金属异物。

(2) 机组开展检修工作时,加强技术监督管理。确保检修项目无漏项缺项,将铁芯的松紧程度作为重点检查项目。着重加强对于铁芯紧固部件松紧程度以及硅钢片位移情况的检查,重点检查铁芯拉紧螺杆、紧固螺母、垫圈垫块等紧固件的拉紧力情况。如果发现铁芯端部存在较为明显的松动现象或硅钢片齿部出现断裂情况,应及时采取夹紧与加固措施。例如利用不锈钢斜楔填充至端部齿和齿压板之间的间隙,并采取压紧、焊牢的方式进行紧固处理。对于轻微松动的情况,可通过嵌入云母片、涂刷环氧树脂胶等手段进行加固处理。此外,还需全面检查出槽口、绑绳、端箍、垫条等与线棒接触部位,若发现存在电腐蚀痕迹应根据线棒损伤状态采取相应的修复措施。

(3) 针对扩大单元接线方式,选择合适的定子接地保护方案。对于采用扩大单元接线方式的发电机组,所配置的定子接地保护是否具备选择性直接影响到发生定子接地故障时,能否准确区分出故障机组和正常机组。否则缺乏选择性会导致连接在同一母线上的正常运行机组配置的定子接地保护也发生动作,从而引起不必要的事范围扩大^[5]。

在定子接地保护方案中考虑选用先进的电流互感器,如柔性光学电流互感器,提高对于故障电流的测量精度^[6]。目前采用多机一变接线形式的水电站通常选用以零序方向判别来作为基本判据的定子接地保护方案,该方案具有原理成熟的优点以此得到了广泛应用,但是在某些水电站也出现过误动作的情况。经过分析发现原因在于零序电流互感器的测量精度不足,难以准确判别出正常运行时出现的不平衡电流与发生定子接地故障后的故障电流。柔性光学电流互感器区别于传统的电磁型电流互感器,采用基于法拉第磁光效应的测量原理,不仅能够实现更高的测量精度,且具有绕制灵活的优势。应用柔性光学电流互感器的定子接地保护方案,有助于提高多机一变水电机组对于定子接地故障选择性判别的准确性。目前在瀑布沟水电站、犍为水电站等采用多机一变接线形式的水电机组定子接地保护中得到了应用,因此为保护方案的优化、改造提供一种解决思路。

(4) 针对定子绕组,搭建局部放电在线监测系统。局部放电是造成定子绝缘损伤的关键因素之一,因此针对局部放电现象进行在线监测是评估定子绕组绝缘状态的有效手段。通过在线监测系统检测局部放电情况是否存在异常,能够为评估定子绕组绝缘状态的劣化程度提供判断依据。不同种类的局部放电对

定子绝缘的破坏程度不同,其放电特征也存在显著差异。轻微的局部放电可能在初期仅对绝缘材料造成细微损伤,但长期积累也会逐渐削弱绝缘性能;而严重的局部放电则可能在短时间内对绝缘造成大面积破坏,直接威胁电机的安全运行。

局部放电在线监测系统通常具备智能诊断功能,通过机器学习算法对不同种类的局部放电特征进行归类和学习,从而实现局放模式的智能识别,可为运维人员推断局部放电的类型及产生原因提供参考依据。当监测到局部放电量超过设定标准时,系统可进行故障诊断并发出报警信号,及时提醒运维人员处理,防止事故进一步扩大,降低生产损失和维护成本,保障电机系统的稳定、高效运行。

4 结语

发电机定子作为水轮发电机组的关键电气设备,其安全运转直接关系到机组的稳定与可靠。定子接地故障是导致发电机损坏甚至机组停机的常见原因之一,因此,分析定子接地故障原因并研究相应的应对策略,成为水电站保障机组安全稳定运行的重要技术课题。本文对引发定子接地故障的常见原因进行了归类和分析,并从设计、安装、检修、运行等各阶段提出了针对性的应对措施。严格控制安装质量,加强检修工作的技术监督,对于降低定子接地故障风险具有重要作用。尤其针对采用扩大单元接线方式的水电机组,由于其存在机端共母线的特征,设计具有选择性的定子接地保护方案,防止定子接地故障事故的扩大化起着重要作用。此外,通过建立完善的监测系统,实时监测定子绝缘状态,及时发现潜在的绝缘问题,提前采取措施,避免故障的发生与恶化,对定子接地故障的预警与诊断具有重要意义。

[参考文献]

- [1] 卢云江,王云飞.水轮发电机定子线棒端部电晕原因分析及处理[J].水电站机电技术,2023,46(09):111-112+131.
- [2] 马志忠,刘凯兵.大型水轮发电机定子接地故障分析及处理[J].水电与新能源,2020,34(06):67-70.
- [3] 刘建峰,叶美红,武继超.灯泡贯流式水轮发电机定子接地故障分析及处理[J].水电站机电技术,2016,39(02):64-66.
- [4] 杨桂周,李声宝.水轮发电机定子绕组单相接地故障位置查找及原因分析[J].水电站机电技术,2019,42(06):43-45+48.
- [5] 刘思思,田朋云,杨海,等.大型水轮发电机定子接地故障定位分析方法[J].水电站机电技术,2021,44(11):10-12.
- [6] 刘灏,魏玉芳,李华忠.基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护[J].水电站机电技术,2022,45(01):41-44.

作者简介:

黄乐(1980—),男,汉族,江西吉安人,本科,部门长,工程师;研究方向:电力系统及自动化。