

灯泡贯流式机组多机并行接地故障预警与定子绝缘分析 技术研究

谢梅兰 1 陈骞 2 沈成林 3 苏美夙 3

1 江西省港航局界牌航电枢纽管理处, 江西鹰潭, 335000; 2 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东广州, 510000; 3 辽宁科技大学, 辽宁鞍山, 114000;

摘要: 本文针对多机运行中定子单相接地故障定位难题,提出基于信号注入的定子绝缘监测技术。以井冈山航电枢纽为例,通过仿真实验验证:传统基波零序电压保护存在中性点检测盲区,三次谐波保护易受工况干扰,而注入式保护可实现定子绕组 100%覆盖监测,多机场景下能精准识别故障机组与相别。数据显示,中性点附近故障时,注入式保护灵敏度达传统方案的 10 倍(故障相谐波电压异常增幅显著)。该技术突破为机组智能维护提供新方案,有效提升水电站安全性和能效水平。

关键词: 灯泡贯流式机组; 定子绝缘分析; 多机并行接地故障; 注入式保护; 三次谐波电压 **DOI:** 10.69979/3060-8767.25.03.001

1 绪论

1.1 研究背景和意义

在"双碳"战略驱动下,西南低水头水电站普遍采用 紧凑型灯泡贯流式机组。该机型因电磁特性特殊,定子 单相接地故障率居高不下,2020-2022年数据显示全国 37%的此类故障引发铁芯烧损(平均修复47天)。故障 本质源于机组分布电容与接地装置形成的LC谐振回路, 易产生3倍过电压,而传统零序电压保护在公用接地变 系统中存在定位盲区,2021年长洲电站事故即因此导致 9小时停电。

尽管现有保护方案采用信号注入与谐波闭锁技术,仍面临三大技术瓶颈:转子谐波干扰引发误动作、黑启动时保护失效、多机组信号串扰(实测显示相邻机组特征量偏移达65%)。本文聚焦多机场景下的故障定位难题,通过优化注入式保护的灵敏度和抗干扰能力,提出基于谐波特征的精准识别方法,有效解决传统方案在中性点死区和工况干扰方面的缺陷。

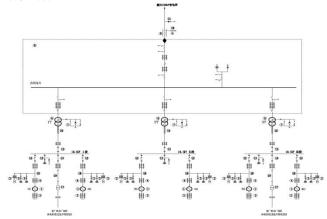
2 实际概况与仿真模型构建

2.1 实际概况

井冈山航电枢纽位于江西赣江中游万安-泰和交界段,是以航运发电为核心的大型水利工程。电站总装机133MW,配置6台22.17MW灯泡贯流式机组,单机额定电压10.5kV,年发电量5.077亿千瓦时。电力通过220

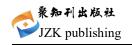
kV 线路接入电网, 经 30km 输电线路连接澄江变电站。

机组采用"两机一变"扩大单元接线,6台机组分为3个独立发电单元,每两台机组经一台主变接入220kV 母线。发电机出口设断路器,主变高压侧采用5间隔G IS气体绝缘配电装置,在简化系统结构的同时增强了运行灵活性。

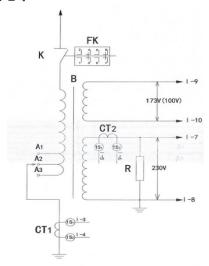


电气主接线示意图

每台发电机中性点通过单相接地变压器高阻接地(下图所示),接地电阻折算至一次侧的阻值为 $400\,\Omega$ ($25\,^\circ$ C)。接地变压器参数为:一次侧额定电压 $10.5\,\mathrm{k}$ V,二次侧电压 $0.23\,\mathrm{k}$ V,容量 $20\,\mathrm{k}$ V, 短路阻抗 4.94%。二次侧并联电阻为 $0.57\,\Omega$,用于限制故障电流并提升保护灵敏度。保护装置采用国电南京自动化股份有限公司的 SDG801E 系列,主保护功能包括纵差保护、横差保护及 $31\,\mathrm{o}$ 定子接地保护,后备保护涵盖过电压、失磁、转



·点接地等。



发电机中性点接地示意图

SDG801E-GM 保护装置功能配置

序号	保护功能	序号	保护功能
1	发电机纵差保护	2	发电机横差保护
3	发电机 310 定子接地保护	4	励磁变速断保护
5	励磁变过流保护		

SDG801E-GB 保护装置功能配置

序号	保护功能	序号	保护功能
1	3U0 定子接地保护	2	3ω定子接地保护
3	过电压保护	4	失磁保护
5	转子一点接地保护	6	复合电压记忆过流
7	对称过负荷(定时 限、反时限)	8	负序过负荷(定时 限、反时限)
9	逆功率保护	10	程跳逆功率保护
11	发电机频率保护 (低频、高频)	12	

发电机 310 定子接地保护定值

序号	定值名称	整定范围	定值	备注
1	动作电流 lg1	0.1—60A		现场实测整定
2	延时 t11	0.1—5000s	7.5s	

注:发电机 310 定子接地保护动作于告警

发电机 3ω定子接地保护定值

序号	定值名称	整定范围	定值	备注
1	幅值系数 K1	-5.0-5.0		现场实测整定
2	相位系数 K2	-5.0-5.0		现场实测整定
3	制动系数 K3	-5.0-5.0		现场实测整定
4	动作延时 t1	0.1—100s	7.5s	

注: 发电机 3ω定子接地保护动作于告警

发电机 3U0 定子接地保护定值

序号	定值名称	整定范围	定值	备注
1	动作电压 3U0g1	0.1—100.0 V	4.33V	现场实测后修正
2	延时 t11	0.1—5000s	0.5s	
注:发电机 300 定子接地保护动作于全停				

2.2 仿真模型构建

为验证注入式保护在多机并联系统中的性能,本研 究基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了井冈山航电枢纽 6 台机组的精细化仿真模型。仿真目标包括:

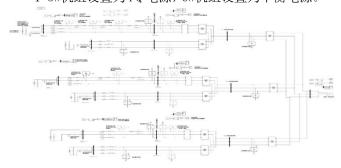
- (1) 模拟不同位置(中性点附近、绕组中部、机 端)的单相接地故障:
- (2) 对比传统零序电压保护与注入式保护的灵敏 度及选择性差异;
- (3)分析多机场景下谐波电压的幅值与相位特征, 验证故障定位能力。

仿真参数设置方面

1#一6#发电机均采用高阻接地,折算到 10kV 的接 地电阻为400欧姆。

50Hz 零序电压测量点位于发电机端, 20Hz 谐波电 压测量点位于中性点。

1-5#机组设置为 PQ 电源, 6#机组设置为平衡电源。



水电厂 1#-6#机组单相接地故障仿真系统模型

3 仿真结果与分析

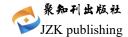
对发电厂正常运行方式下的电流电压参数进行仿 真验证。在此基础上,对不同故障点发生单相接地时零 序电压保护和 20Hz 谐波电压保护原理下的保护特征量 对比分析。

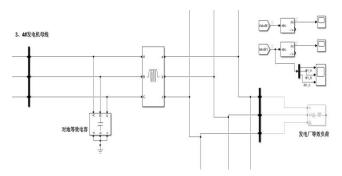
3.1 发电厂正常运行状态仿真分析

为验证仿真模型的准确性, 进行下列正常运行方式 的仿真分析。

3.1.1 发电厂空载运行状态仿真分析

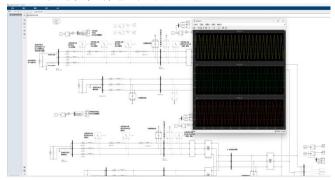
此时,发电厂 220kV 侧等值负荷模块,已被"注释 掉",如下图所示。发电厂所有发电机处于空载状态。



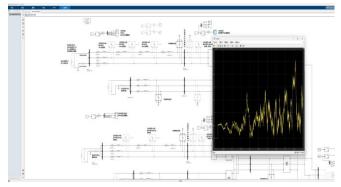


发电厂空载状态仿真条件设置情况

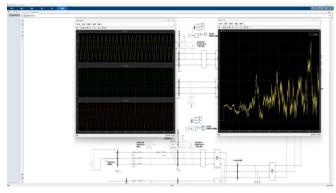
1#发电机机端电压如下图所示:



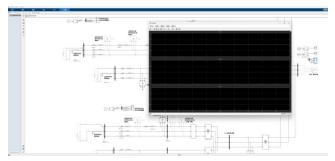
1#发电机端零序电压为 0。测量值如下图所示,数量级为 10-12。



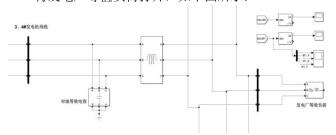
5#机组出口处三相电压和零序电压测量值如下图 所示:



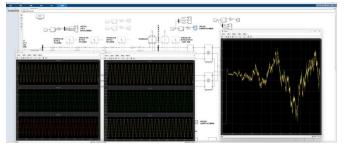
由上图可见,5#机端与1#机端情况完全相同。等值 负荷处负荷电流为0。



3.1.2 发电厂 220kV 侧带负荷的正常运行状态仿真分析 将发电厂等值负荷打开,如下图所示:

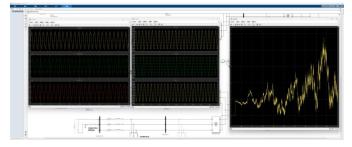


此时,1#发电机机端电压、电流和零序电压仿真结 果如下图所示:



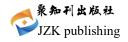
由上图可见,发电机输出电压有效值仍为 6.062kV,由于有负荷接入,此时发电机负荷电流有效值约为 1.3 4kA。零序电流仍为零,测量值如上图最右侧仿真结果图所示,数量级为 10-14。

5#发电机电压电流情况与 1#机组相同, 仿真结果如下图:



通过上述空载、负载情况仿真分析可知,本模型拓 扑和参数设置完全反应了实际的水电厂参数和运行情 况。仿真模型有效性得到了验证。

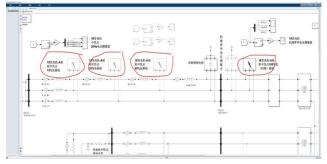
3.2 发电机组不同故障点仿真结果分析



3.2.1 发电机组机端(100%处)发生 A 相接地故障

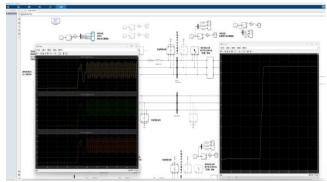
根据仿真模型参数设置原则,此时为 A 相绕组 100% 处发生接地。

首先, 使能 1#发电机组机端 A 相接地模块, 如下图 所示:



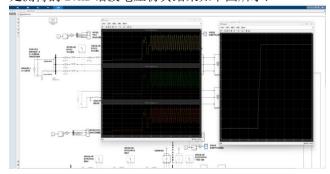
如上图所示,除机端 A 相接地模块点亮外,其他接地模块均为灰色状态(即"注释掉"状态)。

(1) 1#发电机组机端零序电压仿真结果和中性点 处测得的 20Hz 谐波电压仿真结果如下图所示:



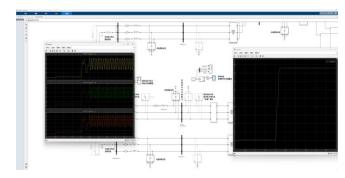
从上图可见,机端测得的零序电压约为 85V,零序电压保护能够可靠动作。中性点处的谐波注入式保护测得的 A 相谐波电压约为 80V, B、C 相谐波电压约为 50V。

(2) 3#发电机组机端零序电压仿真结果和中性点 处测得的 20Hz 谐波电压仿真结果如下图所示:



由上图可见,3#发电机端零序电压约为85V,中性点谐波电压A相为20V,B、C相约为10V。

(3)5#发电机组机端零序电压仿真结果和中性点 处测得的20Hz 谐波电压仿真结果如下图所示:



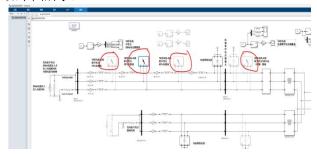
有上图的仿真结果可见,5#发电机组机端零序电压、 中性点谐波电压,与3#机组完全相同。

(4)1#发电机组机端发生 A 相接地故障仿真分析 由上述仿真结果可知,谐波注入式保护,能够有效 判别故障,且能够精准定位故障机组编号和故障相。

3.2.2 发电机组机端(30%处)发生 A 相接地故障

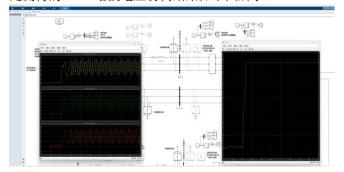
根据仿真模型参数设置原则,此时为 A 相绕组 30% 处发生接地。

首先, 使能 1#发电机组绕组 30%处 A 相接地模块, 如下图所示:



如上图所示,除 30%处相接地模块点亮外,其他接地模块均为灰色状态。

(1) 1#发电机组机端零序电压仿真结果和中性点 处测得的 20Hz 谐波电压仿真结果如下图所示:



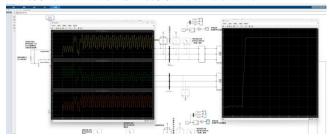
从上图可见,机端测得的零序电压约为 32V 左右,零序电压保护灵敏度下降严重。中性点处的谐波注入式保护测得的 A 相谐波电压约为 60V, B、C 相谐波电压相等,目约为 6V。

(2) 3#发电机组机端零序电压仿真结果和中性点

2025年2卷3期

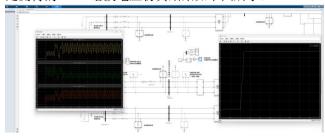
聚知刊出版社 JZK publishing

处测得的 20Hz 谐波电压仿真结果如下图所示:



由上图可见,3#发电机端零序电压约为32V,中性点谐波电压三相相同,约为3V。

(3) 5#发电机组机端零序电压仿真结果和中性点 处测得的 20Hz 谐波电压仿真结果如下图所示:



有上图的仿真结果可见,5#发电机组机端零序电压、中性点谐波电压,与3#机组完全相同。

(4)1#发电机组 30%处发生 A 相接地故障仿真分析由上述仿真结果可知,当 1#机组 30%处发生 A 相接地时,零序电压无法反应具体机组编号和接地相。而 2 0Hz 谐波注入后,发生接地点 1#机组谐波电压与未发生接地点其他机组谐波电压具有明显区别。且,在 1#机组中性点测得的接地相 A 相谐波电压,约为非故障相测得的谐波电压的 10 倍。

因此,谐波注入式保护,当故障点接近中性点时能 够精准定位故障机组编号和故障相。

3.3 仿真结论

根据上述仿真结果及其分析可知,谐波注入式定子单相接地保护能够有效保护中性点到机端的全部,没有死区。同时,谐波注入式保护能够有效定位故障机组和故障相。因此,谐波注入式定子单相接地保护,能够有效保护100%范围的定子绕组单相接地故障,且具有精准的故障机组和故障相定位性能。

4 总结

4.1 总结

本文以井冈山航电枢纽灯泡贯流式机组为研究对 象,针对多机并行场景下定子单相接地故障难以精准定 位与绝缘状态监测不足的问题,提出了一种基于 20Hz 注入式保护的定子绝缘分析技术。通过 MATLAB/Simuli nk 搭建精细化仿真模型,验证了注入式保护在多机系统中的性能优势

参考文献

[1]王维俭, 刘俊宏. 大型发电机中性点接地方式的抉择[J]. 华东电力, 1995, 8(2): 1-5.

[2] 李汝良,李义翔,王祥珩.大型发电机定予中性点接地暂态研究[J].电力自动化设备,1999,19(4):1-5.

[3]王维俭,刘俊宏,汤连湘,等.从三峡发电机组安全的观点分析机组中性点接地方式[J].电力自动化设备,1995(4):2-7.

[4]李毅军.三峡左岸电站发电机中性点接地方式的选型与计算[J].水力发电,1999(4):48-50.

[5] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 大型水轮发电机中性点接地方式的若干问题分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 7-12.

[6]王维俭,王祥珩,王赞基.大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M].北京:中国电力出版社,2006

[7]Brown P G. Johnson I B, Stevenson J R. Gene rator neutral grounding some Aspects of applic ation for distribution transformer with second ary resitor and resonant type[J]. IEEE Trans on PAS, 1978, 99(3): 683-694.

[8]K. J. S. Khunkhun, J. L. Koepfiger, M. V. Ha dad. Resnat grounding of a unit connected gener ator[J]. IEEE Trans. on PAS, 1997, 96(2): 550-559.

[9]王昕,李乃永,苏欣,等. 消弧线圈接地机组的定子基波零序电压保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(7):140-144.

[10] 贾文超, 黄少锋, 焦利霞. 双频注入式定子单相接地保护方案[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 158-161.

作者简介:谢梅兰(1976年-),女,汉族,江西省吉安人, 大专学历,助理工程师,一直从事航电枢纽管理工作。 工作单位:江西省港航局界牌航电枢纽管理处