

某水电站发电机组内部故障主保护配置方案分析

吴艳春

(四川大渡河双江口水电开发有限公司, 四川 马尔康 624000)

摘要:在对某水电站发电机可能发生的内部故障进行仿真计算的基础上,综合考虑纵差保护、完全裂相横差保护、零序电流型横差保护特性形成4种保护配置方案,通过对比保护死区、双重化性能、保护配置繁简程度,确定发电机组内部故障主保护配置方案。

关键词:发电机;内部故障;同槽故障;端部故障

中图分类号: TM772

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2024.S1.051

0 引言

某电站安装4台单机额定容量为500 MW的立轴混流式水轮发电机组,总装机容量2 000 MW,多年平均发电量约为77亿kW·h。该发电机定子绕组采用双层条式波绕组结构,绕组电磁线采用涤纶玻璃丝包烧结铜扁线,绕组绝缘为F级。定子绕组使用6支路星形连接,绕组节距为1#-12#-25#,磁极对数为18,定子槽总数设计为432槽。定子线棒在槽口采用成对斜槽楔和弹性波纹垫条在槽口压紧工艺,能够使发电机在各种运行工况下对线棒施加并保证较大的径向力,避免线棒松动。定子上层、下层线棒端头采用对接银焊的结构,能够在保证焊接质量的同时减小铜线焊接处的弯曲应力,保护端部绝缘,降低端部损耗。绕组的连接线(包括极间连接线和引线铜管等)均采用银铜焊接,保证机械强度和导电性能。定子线棒的端部和连接线等均采取牢固的支撑和固定,防止在极端短路故障时发生形变。

1 发电机内部故障数量和类型

1.1 同槽故障数量和类型

对定子绕组发生同槽故障的各种可能性和概率进行分析,定子槽内上、下层线棒间可能发生匝间短路的情况有432种,其中可能发生相同相别同一分支的匝间短路的情况有18种,占总数的4.17%,短路匝数均为12匝;可能发生相同相别不同分支的匝间短路的情况有306种,占总数的70.83%;可能发生相间短路的情况有108种,占总数的25%。

1.2 端部故障数量和类型

对定子绕组端部交叉处发生短路的各种可能性和概率进行分析,可能发生短路的情况有9 468种,见表1。可能发生相同相别同一分支的匝间短路的情况有288种,占总数的3.0%,其中短路匝数为1匝、2匝、3匝、4匝的匝间短路情况均有18种;短路匝

数为5匝及以上的匝间短路情况有216种,且最大短路匝数为17匝,有18种。可能发生相同相别不同分支的匝间短路的情况有2 376种,占总数的25.1%;可能发生相间短路的情况有6 804种,占71.9%。

2 发电机组内部故障主保护配置方案对比

2.1 配置方案

2.1.1 发电机内部故障主保护类型

发电机内部故障一般配置纵差保护和横差保护^[1]。纵差保护分为两种,一种是完全纵差保护,能够反映定子绕组相间短路故障;一种是不完全纵差保护,该保护不仅可以反映定子绕组相间短路故障,还能在定子绕组匝间短路和分支开焊等故障时起到保护作用。横差保护也分为两种,一种是裂相横差保护,可以像不完全纵差保护一样反映发电机的各类内部故障,但是在响应相间短路故障方面灵敏度要劣于完全纵差保护,本机组每相分支为6支,适合选用完全裂相横差保护;一种是零序电流型横差保护,通过采集发电机两中性点连接处的电流,反映发电机的各类内部故障。

2.1.2 发电机中性点分支分组引出方式和电流互感器配置

该发电机中性点分支分组引出方式设计有两种。第一种引出方式(代号01)如图1所示,将每相编号为1、2、3的分支并联为一组引出,并装设电流互感器TA1、TA3、TA5,汇集到一点,构成第一个中性点o1;再将每相编号为4、5、6的分支并联为一组引出,并装设电流互感器TA2、TA4、TA6,汇集到一点,构成中性点o2;将中性点o1、o2并行联接并装设电流互感器TA0;在发电机机端装设电流互感器TA7、TA8、TA9,TA0-TA9相互配合,构成发电机内部短路保护。第二种引出方式(代号02)如图2所示,将每相编号为1、3、5的分支并联为一组引出,并装设电流互感器TA1、TA3、TA5,汇集到一点,构成第一个中性点o1;再将每相编号为2、4、6的分支并联为一组引出,并装设电流互感器TA2、TA4、TA6,汇集到一点,构成中性点o2;将中性点o1、o2并行联接并装设电流互感器TA0;在发电机机端装设电流互感器TA7、TA8、TA9,TA0-TA9相互配合,构成发电机内部短路保护。

表1 端部故障统计

故障类型	短路匝数	故障数
相同相别同一分支的匝间短路	1匝	18
	2匝	18
	3匝	18
	4匝	18
	≥5匝	216
相同相别不同分支的匝间短路		2 376
相间短路	分支编号相同	1 326
	分支编号不同	5 478

收稿日期:2024-03-28

作者简介:吴艳春(1986—),男,河北沧州人,工程师,主要从事水电站电气设备运行、维护、检修相关工作

E-mail:739706721@qq.com

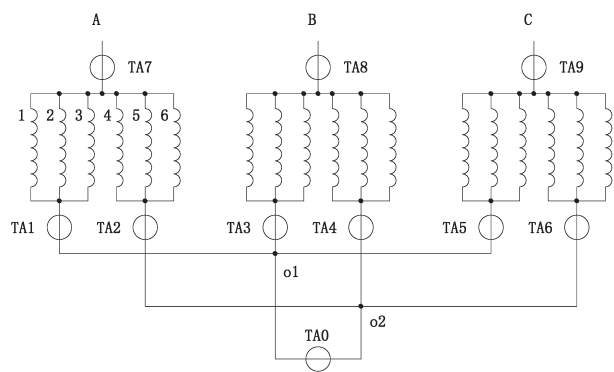


图1 发电机中性点引出方式和电流互感器配置方式一

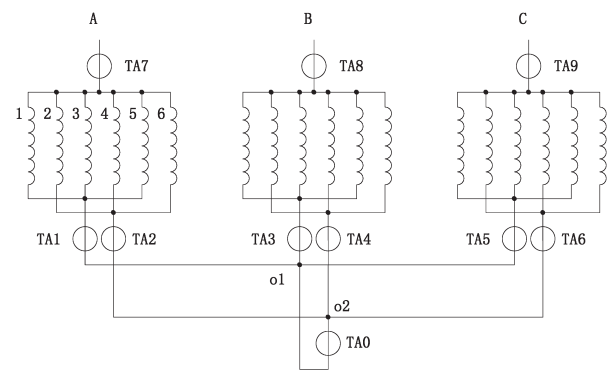


图2 发电机中性点引出方式和电流互感器配置方式二

2.1.3 方案配置

鉴于发电机内部故障主保护均存在保护死区,保护配置方案采用纵差保护和横差保护组合配置的方式,确保能够兼顾定子绕组内部短路和机端引线短路故障,并保证保护范围最大化。保护配置方案共考虑4种,见表2。表中“01”代表中性点引出方式一,“02”代表中性点引出方式二。“A、B、C、D”表示对应的保护类型。“A+D+01”代表一种主保护配置方案编号,即发电机中性点引出方式选用代号01,配置一套完全纵差保护和一套零序电流型横差保护。

表2 不同中性点引出方式下发电机内部故障主保护配置方案

组合方案	编号	保护配置数量			
		完全纵差保护(A)	不完全纵差保护(B)	裂相横差保护(C)	零序电流型横差保护(D)
方案一	A+D+01	1	0	0	1
	A+D+02	1	0	0	1
方案二	B+C+D+01	0	2	1	1
	B+C+D+02	0	2	1	1
方案三	A+C+D+01	1	0	1	1
	A+C+D+02	1	0	1	1
方案四	A+B+C+D+01	1	2	1	1
	A+B+C+D+02	1	2	1	1

2.2 配置方案数据统计

在并网空载运行方式下,针对该发电机可能发生的各种类型的内部故障,运用多回路分析法^[2]进行了仿真计算,并按照主保护的灵敏系数 $K_{sen}<1.5$ 为不能可靠动作的边界条件进行统计分析,获得不同方案在同槽故障和端部故障时的动作性能,见表3~表5。

表3 各种方案在同槽故障和端部故障时保护动作情况

组合方案	编号	故障类型	2种及以上保护均动作	只有1种保护动作	保护均不动作
方案一	A+D+01	同槽故障	108	322	2
		端部故障	6 392	2 590	486
	A+D+02	同槽故障	108	324	0
		端部故障	6 546	2 802	120
方案二	B+C+D+01	同槽故障	432	0	0
		端部故障	9 032	154	282
	B+C+D+02	同槽故障	432	0	0
		端部故障	9 360	48	60
方案三	A+C+D+01	同槽故障	430	2	0
		端部故障	8 968	218	282
	A+C+D+02	同槽故障	432	0	0
		端部故障	9 342	66	60
方案四	A+B+C+D+01	同槽故障	432	0	0
		端部故障	9 032	154	282
	A+B+C+D+02	同槽故障	432	0	0
		端部故障	9360	48	60

表4 发电机并网空载工况下同槽故障各种方案不能可靠动作情况

组合方案	编号	不能可靠动作故障	相间短路	相同相别同一分支的匝间短路	相同相别不同分支的匝间短路
方案一	A+D+01	2	0	0	2
	A+D+02	0	0	0	0
方案二	B+C+D+01	0	0	0	0
	B+C+D+02	0	0	0	0
方案三	A+C+D+01	0	0	0	0
	A+C+D+02	0	0	0	0
方案四	A+B+C+D+01	0	0	0	0
	A+B+C+D+02	0	0	0	0

表5 发电机并网空载工况下端部故障各种方案不能可靠动作情况

组合方案	编号	不能可靠动作故障	相间短路	相同相别同一分支的匝间短路	相同相别不同分支的匝间短路		
					相邻分支	相隔分支(5匝)	相隔分支(>5匝)
方案一	A+D+01	486	0	68	382	22	14
	A+D+02	120	0	12	12	90	6
方案二	B+C+D+01	282	0	36	246	0	0
	B+C+D+02	60	0	0	0	60	0
方案三	A+C+D+01	282	0	36	246	0	0
	A+C+D+02	60	0	0	0	60	0
方案四	A+B+C+D+01	282	0	36	246	0	0
	A+B+C+D+02	60	0	0	0	60	0

2.3 综合分析

对表3~表5的数据进行统计分析发现:1)方案一保护死区较大。在同一发电机中性点分支分组引出方式下,方案二、方案三、方案四中保护不能动作的故障数相同,且小于方案一。2)各

(下转第111页)

2.2 鱼道水位沿程变化规律

为研究鱼道进口段水位沿程变化规律,以池室位置为横坐标,点绘鱼道进口段水位沿程变化图以直观比较水位沿程变化趋势,并利用9#、14#池室竖缝水位内插13#池室竖缝水位,将鱼道研究段分为末段(1#—5#池室)、中段(5#—9#池室)和前段(9#—13#池室)等长的3段,考察鱼道进口段水位沿程变化情况,主要呈现以下规律:1)鱼道14#~1#池室沿程水位逐渐下降;2)鱼道进口段的末段(1#—5#池室)水位下降幅度大于中段(5#~9#池室)和前段(9#—13#池室),即出现陡降;3)当上下游水位差逐渐缩小时,鱼道进口段的中段水面线出现平台,即中段水位下降幅度小于另外两段。这种现象表明,鱼道进口段水位不是均匀下降的,而是在末段(鱼类上溯的关键区段)发生陡降,因此造成该区域流速大、流态紊乱,对鱼道过鱼效率有不利影响。随着上下游水位差的缩小,鱼道进口段的中段水面线出现平台,其原因是上下游水位差较小时,鱼道内部流速不大,经过转弯(15#池室)后,流速能较快回归平稳,因此沿程水位线在中段(5#—9#池室)出现平台;而当鱼道内部流速较大时,经过转弯(15#池室)后的流速仍较大,紊动状态持续时间长,尚未平稳就已进入末段(1#—5#池室),整个鱼道转弯至进口整段内部流态均较为紊乱,这从侧面说明上下游水头差过大时,会导致鱼道内部流态紊乱,流速过大。

2.3 鱼道水位差与上下游水位差的关系

点绘上下游水位差与鱼道进口各段(1#—5#池室、5#—9#池室、9#—13#池室)水位差的关系曲线(见图2),以进一步分析二者的关系。由图2可以看出,上下游水位差越大,鱼道沿程水

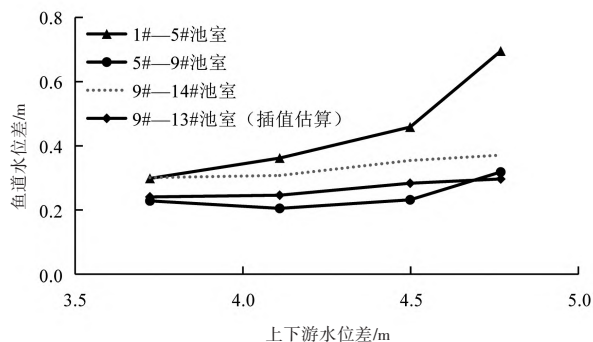


图2 鱼道水位差与上下游水位差关系曲线

位下降幅度越大、跌水现象越严重。上下游水位差小于4.7 m时,中段(5#—9#池室)水位差小于另外两段的水位差,说明中段出现了水位平台;当上下游水位差大于4.7m时,水位平台消失,鱼道沿程水位下降幅度增大。

3 结论

1)鱼道竖缝水位与下游水位相关性较强、与上游水位相关性较弱,原因主要是鱼道进口段位于电站下游、受下游水位影响较为明显,而上游水位距离鱼道进口段较远,其影响经多个鱼道池室隔板消减后,在鱼道进口段表现不明显。

2)鱼道进口段水位变化不是均匀下降,而是在末段发生水位陡降,易造成流速增大、流态紊乱现象,而该段是鱼类上溯的关键区段,因此对鱼道过鱼效率有关键影响。同时,随着上下游水位差的缩小,鱼道进口段中段水面线出现平台。

3)上下游水位差越大,鱼道沿程水位下降幅度越大,上下游水位差主要由鱼道进口段的末段承担。

4)鱼道水位下降集中在进口段,可以尝试通过工程措施改善该段的水位陡降现象,从而稳定水流流态、提升鱼道运行效果。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局.第一次全国水利普查公报[M].北京:中国水利水电出版社,2013:3-4.
- [2] KATOPODIS C, RAJARATNAM N, WU S, et al. Denil Fishways of Varying Geometry[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(7): 624-631.
- [3] 孙双科,邓明玉,李英勇.北京市上庄新闻竖缝式鱼道的水力设计研究[C]//中国水利学会,中国水力发电工程学会,中国大坝委员会.水电2006国际研讨会论文集.北京:中国水利水电科学研究院,2006:951-957.
- [4] 徐体兵,孙双科.竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J].水利学报,2009,40(11):1386-1391.
- [5] 边永欢,孙双科,郑铁刚,等.竖缝式鱼道180°转弯段的水力学水力特性与改进研究[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(1):90-96.
- [6] 蔡玉鹏,刘火箭,刘志雄,等.竖缝式鱼道梯形断面池室水动力学特性研究[J].人民长江,2021,52(7):204-209,230.

【责任编辑 张智民】

(上接第109页)

种方案下发电机中性点分支分组引出方式二保护死区明显小于方式一。方案二、方案三、方案四中方式二下不能动作的故障数为60种,小于方式一下不能动作的故障数(282种)。且不能动作的故障类型都是发生在相隔分支间、两短路点距中性点的位置相差5匝的相近电位同相不同分支匝间短路。3)方案三保护配置数量与方案二、方案四比较,相对简化,便于保护计算和运维工作。4)方案三与方案二和方案四比较,双重化能力稍弱。方案三在发生故障时,两种及以上不同原理的主保护可靠动作的故障数量要比方案二、方案四少18种,占内部故障总数的0.18%。考虑发电机保护装置按照双重化配置,此项对于保护配置方案配置的制约性较小。

综上所述,推荐使用方案三作为发电机主保护和TA配置方案,既能体现出电机中性点分支分组引出方式二有效减小保护死区的优越性,又能简化保护方案。

3 结论

发电机内部故障主保护配置对发电机的安全运行发挥着重要的作用。发电机内部故障时,不同的配置方案对于故障的动作情况各不相同。通过科学的仿真计算,并综合考虑保护配置的可靠性、经济型等设计因素,最终形成了一套完整的保护配置方案。若发电机在运行中发生内部故障时,主保护能够可靠动作的故障数量占总数的99.39%,两种及以上不同原理主保护能够可靠动作的故障数量占总数的94.36%,为同类型机组提供了一种关于发电机内部故障的主保护配置方案。

参考文献:

- [1] 桂林,王祥珩,王维俭,等.三峡电站1号发电机内部故障主保护配置方案的研究[J].继电器,2001,29(2):4-13.
- [2] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统的分析[M].北京:清华大学出版社,2005:12-18.

【责任编辑 张 帅】