

大型汽轮发电机转子匝间短路检测方法研究

Research on Detection Method for Interturn Short Circuit of Large Turbogenerator Rotors

周洁 陈光慧 俞仰峰

Jie Zhou Guanghui Chen Yangfeng Yu

中广核核电运营有限公司 中国·福建 宁德 355209

China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Ningde, Fujian, 355209, China

摘要: 论文通过对百万千瓦级发电机转子绕组匝间短路故障的检测及判断方法进行描述和剖析,并根据发电机实际运行情况,对大型汽轮发电机转子匝间短路故障判断方法及各自局限性进行研究和探讨,并分析阳江某电站发电机转子匝间短路发现及处理过程及大亚湾某电站交流阻抗值偏低分析过程。

Abstract: This paper describes and analyzes the detection and judgment methods for interturn short circuit faults in the rotor winding of a million kilowatt level generator, and based on the actual operation of the generator, studies and explores the judgment methods and their respective limitations for interturn short circuit faults in large turbogenerator rotors. It also analyzes the discovery and handling process of interturn short circuit faults in the rotor of a power station in Yangjiang and the analysis process of low AC impedance values in a power station in Daya Bay.

关键词: 发电机; 转子绕组; 匝间短路

Keywords: electric generator; rotor winding; interturn short circuit

DOI: 10.12346/etr.v5i8.8475

1 引言

汽轮发电机转子绕组匝间短路故障是发电机转子常见故障之一,造成匝间短路的原因有多种,转子制造过程中因异物遗留刺穿转子匝间绝缘会导致匝间短路;机组运行后由于异物进入或冷却不足造成局部过热也会造成匝间短路故障。轻微的匝间短路故障在初期并不会对汽轮发电机组正常运行造成太大影响,但匝间短路会和局部过热现象相互促进,如果不能及时发现,故障持续发展将会导致转子电流显著增大,转子绕组温度升高,无功输出下降,电压波形畸变,机组振动加剧等现象,严重时会造成转子接地^[1]。因而,研究发电机转子绕组匝间短路的故障原理及早期诊断处理方法是很有必要的。论文重点探讨目前存在的大型汽轮发电机转子匝间短路的诊断技术,并对各诊断技术进行分析和探讨,并重点分析阳江某电站发电机转子匝间短路发现及处理过程,以及大亚湾某电站交流阻抗值降低分析过程。

2 发电机转子绕组匝间短路故障检测方法

发电机转子绕组匝间短路主要分为两种情况,一种是运

行期间与转子转速、温度相关的非稳定性匝间短路,一种是与机组运行无关的稳定性匝间短路;发电机转子匝间短路诊断方法有多种,分别有直流电阻法、空载特性法、短路特性法、交流阻抗法、转子气隙波形法、RSO (Recurrent Surge Oscillograph) 重复脉冲法等。

2.1 直流电阻法

发电机转子直阻测量是每轮发电机停运检修必须执行的项目,通过测量转子直阻与历史值进行比较,当换算至同一温度下偏差不超过2%即认为发电机转子直阻是合格的,由于大型汽轮发电机转子匝数较多,即使出现1至2匝短路,转子直阻的下降也是有限的,此方法判断匝间短路的灵敏度较低,不能作为判断发电机是否出现匝间短路的主要手段,仅可用于辅助判断。

2.2 空载、短路特性法

发电机空载特性是发电机以额定转速空载运行时其定子电流与励磁电流的关系,如有匝间短路,该处的涡流去磁作用将使励磁电流增大;发电机短路特性是指发电机在额定转速下,当定子绕组出现三相短路时,短路电流与励磁电流之

【作者简介】周洁(1990-),男,中国河南信阳人,本科,工程师,从事电气设备维护研究。

间的关系,当出现匝间短路时由于安匝数减小,励磁电流与短路电流也将会减少;此方法由于受测量精度的影响,匝间短路的匝数较少时,在空载特性和短路特性曲线上变化不明显,其灵敏度也较低。

2.3 交流阻抗法

测量发电机转子绕组交流阻抗值是目前发电机大修常用的诊断发电机转子绕组是否出现匝间短路的试验之一,若转子绕组出现匝间短路情况,则转子绕组的有效匝数减少,其交流阻抗值就会减小,但由于试验受转子膛内、膛外、定转子间隙、槽楔和护环结构等影响,测量偏差较大,同一机组的试验结果与同样状况下的历次试验数据相比,阻抗值变化不超过 5% 即认为合格。只有在出现明显匝间短路情况下才能发现,且不能定位匝间短路点,是作为诊断匝间短路的辅助手段。

2.4 气隙波形法

目前大多大型汽轮发电机组都配备了转子匝间短路在线监测装置,此装置通过将气隙探测线圈安装在一定子线棒槽内,并靠近转子表面,转子绕组旋转过程中除产生主磁通外,还产生漏磁通。当转子转动时,每个槽的漏磁通都会经过气隙探测线圈,会产生感应电压,当匝间短路故障存在时,探测线圈感应出的电压相对就会降低,通过与对称位置的波形以及历史波形进行比较,可以判断匝间短路情况。

从根本上讲,气隙探测线圈波形反映的是转子绕组阻抗值变化,但是引起阻抗值变化的因素很多包括转子绕组出现匝间短路情况,转子绕组绝缘值变化以及探测线圈自身状态的改变,因此气隙探测线圈所产生的阻抗变化并不代表绕组的实际短路比。

2.5 RSO 重复脉冲法

RSO 试验工作原理是采用双脉冲信号发生器对发电机转子两极同时施加一个前沿陡峭的高频脉冲波,当脉冲波沿着绕组传播到匝间短路点时,会出现反射波和透射波,在测量点可以测出与无匝间短路时不同的响应波形。一般通过记录重叠波与相减波(如图 1 所示)的波形来判断转子绕组是否存在匝间短路的情况,当两个波形完全重叠或相减波形呈一条水平直线时,表明发电机转子无匝间短路情况,反之,说明转子可能存在匝间短路故障缺陷。当重叠波不完全重叠或相减波不呈一条水平直线时,通过传播时间波形来定位故障点。

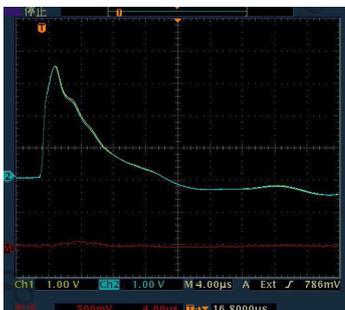


图 1 重叠波与相减波

RSO 试验具有试验方法操作简单,灵敏度高,可定位等特点;试验操作仅需要把接线接至导电螺钉上,转子处于定子膛内或定子膛外均可进行试验,通过波形对比可以比较灵敏地发现转子早期匝间短路故障情况,通过相减波形可以对故障点进行定位^[2]。

虽然 RSO 试验对于发现转子绕组匝间短路缺陷具有很多优点,但对于多处匝间短路,RSO 的波形变化会比较复杂,很难通过重叠波和相减波及传播时间来进行准确的分析判断^[3]。同时,当转子绕组出现了严重的匝间短路情况时,转子绕组的阻抗值变化会比较大,通过 RSO 试验方法测量的波形会在故障点产生较大的畸变,对分析不同位置的匝间短路情况容易引起误判。

3 阳江某电站发电机转子匝间短路分析

3.1 概述

阳江某电站发电机,经过一年的运行在首次大修停机 50% 功率平台录波时,发现匝间短路监测数据达到报警值。停机后对转子(发电机膛内)进行了 RSO 试验、交流阻抗试验,试验结果超出标准范围且 RSO 波形存在不重叠情况,怀疑此发电机转子绕组可能存在匝间短路故障。

3.2 现场检查

转子抽出后,对转子进行外观检查、膛外 RSO 试验、膛外交流阻抗试验;现场通过目视、内窥镜检查,发现转子汽侧及励侧两端护环下均存在大量的粉末状物质,颜色为棕黄色,并伴有油性物质,磁铁可较容易吸起,对粉末状污染物取样,进行能谱分析,确定其主要元素为 C、O、Fe;膛外 RSO 试验波形结果与膛内 RSO 试验波形基本一致,重叠波有不重叠部分,相减波不呈一条水平直线;膛外交流阻抗试验数据见表 1,与交接试验相比,差值最大为 9%,不满足程序标准要求。经过转子外观检查,发现大量铁磁性污染物及油污,对转子进行定子膛外 RSO 试验及交流阻抗试验后,确认转子存在匝间短路故障。

表 1 膛内交流阻抗试验数据

单位 mA								
本次测量值				交接试验测量值				Z 差值
U (V)	I (A)	P (W)	Z (Ω)	U (V)	I (A)	P (W)	Z (Ω)	
50	18.57	572	2.693	49.96	17.17	553	2.909	7.4%
100	34.63	2200	2.888	99.16	31.14	2060	3.156	8.4%
150	47.68	4649	3.146	149.23	43.34	4364	3.456	9%
200	58.01	7699	3.488	199.40	52.60	7171	3.790	9%
220	61.6	8963	3.571	219.48	55.9	8422	3.926	9%

通过故障定位确定匝间短路位置在 #4 极 3 号线圈第二匝和第三匝线圈之间,通过返厂修复,匝间短路故障消除。

3.3 匝间短路原因分析

从发电机现场检查情况来看,转子护环内、风扇座内有大量铁磁性粉末,定子铁芯背部及转子表面有锈迹,机座局

部有积累的铁屑,经取样成分分析均含有铁磁性物质。发电机返厂维修后,线圈拆除过程中发现匝间绝缘表面有脏污,端部尤为明显,同时拆除线圈后发现转子槽绝缘脏污特别严重,且表面附着大量锈迹。同时发电机运行过程中,发现发电机汽励端均伴随漏油。在转子拆除过程中,发现转子表面、护环内部、转子线圈存在大量油污,且情况比较严重。从转子装配结构看,线圈端部垫块需要根据装配要求进行修配,垫块与线圈之间不可避免存在缝隙。端部线圈需进行拼焊,可能造成上下匝线圈之间存在缝隙。从转子氢冷通道来看,故障点在转子入风口处,粉末状异物随着风路循环可能会进入这些缝隙,容易在油污粘附作用下聚积,从而削弱绝缘性能,长期作用下会造成匝间短路,机组运行时,铁磁性污染物在发电机氢气流动的作用下叠加端部线圈匝间绝缘处油污粘连积累效应,造成匝间绝缘不断磨损,进而导致匝间绝缘削弱,随着运行时间的积累,线圈匝间绝缘电阻下降,家具匝间绝缘损坏,最终引发线圈匝间短路故障。

3.4 改进措施

针对漏油问题,改进密封支座结构,减小油挡与转子之间的间隙,提高发电机油封能力,同时增大回油孔尺寸,提高回油能力;为了进一步提高转子可靠性,将匝间绝缘由单层结构拼接改为双层无缝拼接结构,降低接缝处因积灰、积油后发展成匝间短路的可能性。

4 大亚湾某电站交流阻抗值偏低

4.1 概述

进行发电机转子膛内交流阻抗试验时,发现试验阻抗值与上轮次大修试验值比较,偏差超过-5%的程序要求,最大偏差为-13.7%。由于上轮次大修更换了发电机转子,转子交流阻抗值只有上轮次大修测量值作为对比,无其他历史值对比分析。

4.2 数据分析对比

通过两种仪器对比测量发电机转子交流阻抗试验数据显示与上轮次大修新转子回穿后膛内交流阻抗偏差最大值均大于-5%,可以排除测量方法及测量仪器造成的误差。发电机转子交流阻抗试验通常是判断转子绕组有无匝间短路的一种试验方法,主要是通过与历史数据变化比较,检验转子是否存在匝间绝缘缺陷或恶化,根据发电机转子交流阻抗试验原理(阻抗和损耗),该试验期间会受到多种因素影响,

如试验电压、膛内或膛外、试验转速、转子剩磁、线圈位置及外部环境(磁阻)等影响,只能作为判断发电机转子是否存在匝间绝缘缺陷的辅助手段。而还可以通过RSO试验、转子气隙波形测量、转子直阻等多种手段进行判断。

通过0°、90°、180°、270°四个角度测量RSO波形分析,此次大修与上轮次大修波形趋势一致,无明显变化,未发现匝间短路情况。通过大修停机阶段0%,50%,100%三个平台与上轮次大修启机阶段0%,50%,100%三个平台的径向和切向波形对比,无明显变化,说明发电机转子在运行状态下的匝间绝缘情况良好,未发现匝间短路情况。进一步测量发电机转子直阻,换算至20℃与出厂值进行对比,偏差为0.02%,标准为≤2.0%,偏差远低于标准值,发电机转子直阻合格。

4.3 原因分析

根据转子匝间短路故障测量比较敏感的RSO波形及动态转子气隙波形,可以判断该发电机转子目前不存在静态和动态匝间短路问题。针对本次大修发电机转子交流阻抗比上次新安装期间有所降低,判断也是该转子安装前长时间放置,经历实际运行后(3000RPM),转子线圈受离心力影响线圈位置变化且更靠近槽楔,交流阻抗较新安装转子有所下降,属于正常现象。

5 结语

对阳江某电站发电机转子真实出现过匝间短路故障和大亚湾某电站发电机转子绕组交流阻抗值偏低疑似匝间短路故障缺陷进行分析,RSO和气隙波形测量对判断转子是否存在匝间短路故障敏感性更高,更准确;RSO可以通过在大修窗口静态判断转子匝间绝缘情况,气隙波形测量可以在机组运行时在线监测转子匝间绝缘情况,两种诊断方法相互促进,可以更早地发现转子匝间绝缘缺陷,是目前诊断匝间绝缘缺陷行之有效的手段。

参考文献

- [1] 安郁镜.大型发电机转子匝间短路的检查及处理[J].中国科技信息,2005(7):125.
- [2] 武玉才,马明哈.同步发电机转子绕组匝间短路及诊断方法[M].中国电力出版社,2018(9):40-84.
- [3] 李永刚,李和明,万书亭.发电机转子绕组匝间短路故障特性分析与识别[M].北京:中国电力出版社,2009.