

## 火电机组发电机定子绕组故障分析与处理

崔清博 刘翔 郑浩 苗晏玮 傅金  
华能日照电厂, 山东 日照 276800

**[摘要]**发电机定子绕组在火电机组里是负责电能转换的关键部件, 它的运行是否可靠关乎整个发电系统的安全以及稳定情况。定子绕组长时间处在高电压、大电流、强电磁力还有复杂运行环境等综合应力的影响之下, 很容易出现诸如电绝缘老化、局部过热、放电击穿以及机械损伤等一系列常见的故障。此文针对这些故障展开了系统性的分析, 对其生成机理进行了剖析, 还全面概述了当下主流的离线试验以及在线监测技术, 最后还给出了从应急处理一直到预防管理的全流程防控策略。

**[关键词]**火电机组; 发电机; 定子绕组; 故障诊断; 绝缘监测

DOI: 10.33142/hst.v9i1.18987

中图分类号: TM311

文献标识码: A

### Analysis and Handling of Stator Winding Faults in Thermal Power Unit Generators

CUI Qingbo, LIU Xiang, ZHENG Hao, MIAO Yanwei, FU Jin  
Huaneng Rizhao Power Plant, Rizhao, Shandong, 276800, China

**Abstract:** The stator winding of the generator is a key component responsible for energy conversion in thermal power units, and its reliable operation is related to the safety and stability of the entire power generation system. The stator winding is subjected to comprehensive stresses such as high voltage, high current, strong electromagnetic force, and complex operating environment for a long time, which can easily lead to a series of common faults such as electrical insulation aging, local overheating, discharge breakdown, and mechanical damage. This article systematically analyzes these faults, dissects their generation mechanisms, comprehensively outlines the current mainstream offline testing and online monitoring technologies, and finally provides a full process prevention and control strategy from emergency response to prevention and management.

**Keywords:** thermal power units; alternator; stator winding; fault diagnosis; insulation monitoring

火力发电厂的稳定运行对保障电网安全至关重要, 作为国民经济的重要支柱, 其运行稳定性直接关系到电力系统的安全和经济效益。同步发电机作为火力发电厂的核心设备, 其定子绕组作为电机中最为关键的部分, 长期运行过程中不可避免地会受到温度、振动、介质污染及机械应力等多种因素的影响, 从而产生绝缘老化、局部短路或绕组松动等故障。因此, 针对定子绕组出现的故障展开细致分析, 推动有效诊断技术不断发展, 并且制定出科学合理的应对措施, 这一系列事项始终都是电力行业极为关注的核心要点所在。

#### 1 发电机定子绕组的结构与运行特点

##### 1.1 定子绕组基本结构

定子绕组其实就是指嵌放在定子铁芯槽里面的那一串串导电线圈的统称。就大型汽轮发电机而言, 它的定子绕组一般都会采用条形线棒这种形式。而这些线棒乃是凭借着多股包着绝缘材料的扁铜导线经过换位编织的操作

才得以成形的, 如此一来便能够有效减少涡流损耗的情况出现。之后, 这些线棒会被嵌入到由硅钢片一层层叠压起来所形成的定子铁芯线槽当中。并且, 铁芯是依靠着定位筋牢牢地安装在机座之内的。每一根线棒都有专门的槽楔将其固定在槽里面。而且, 线棒的直线部分以及端部全都包裹着厚厚的绝缘层。不仅如此, 其端部还得多借助像绝缘支架、绑绳这类的构件来开展一系列颇为复杂的紧固操作, 以此来抵挡住运行期间那极为强大的电磁力。定子绕组结构算得上是一个将电磁设计、机械固定还有绝缘防护等多种要素都集成在一起的相当精密的一个系统。

##### 1.2 运行环境与电气应力

定子绕组所处的工作环境极为苛刻, 在电气层面来讲, 它要直接去承受系统工频所带来的高电压以及几百乃至几千安培负荷电流所产生的作用, 其主绝缘长时间都处在强电场以及焦耳热的严峻考验之下。从机械方面来看, 转子旋转磁场会在绕组之上产生频率为 100Hz 的周期性交

变电磁力,这种电磁力会不断地拉扯挤压绕组,进而有可能引发绝缘出现磨损的情况。除此之外,像系统短路、非同期并列这类暂态过程还会给绕组施加额外的电动力以及热应力。就环境方面而言,冷却系统的介质纯度、压力、温度都得严格加以控制,如果水质不纯的话,那么就极有可能导致线棒空心导体的内壁出现结垢堵塞的现象;而氢气湿度过高的情况,则会十分严重地降低绝缘性能。所以说,绕组的可靠性其实是其结构强度、绝缘性能与外界多重应力之间的一种动态平衡所呈现出的结果。

## 2 定子绕组常见故障类型及成因分析

### 2.1 绝缘老化故障

绝缘老化属于定子绕组那种极为常见且较为基础的渐进性故障范畴,具体而言,其指的是绕组的主绝缘以及匝间绝缘性能呈现出一种不可逆的并且逐步恶化的态势。而这一过程乃是诸多因素协同发力共同作用所形成的。其中,电老化是源自于绝缘内部气隙在工频电压作用之下所产生的局部放电情况,随着时间一天天过去,这种放电情况不断累积,进而对绝缘本体造成侵蚀。热老化则是由于运行过程中产生的热量使得绝缘材料长时间处于较高的温度状态,如此一来便致使高分子聚合物出现脆化现象,最终使其丧失原本具备的弹性和韧性。机械老化是因为100Hz 电磁力持续不断地振动而引发的,这种情况会让绝缘产生微小的相对摩擦,尤其是在那些端部固定得不够牢固的部位,其破损的速度会更快<sup>[1]</sup>。除此之外,冷却介质当中存在的潮气、油污等环境方面的因素同样也会渗透进去并对绝缘造成损害。当老化的程度积累到了一定程度之后,击穿电压就会低于运行所处的水平,进而诱发接地或者短路这类事故的发生。

### 2.2 过热故障

过热故障指标指的是定子绕组出现局部或者是整体温度异常升高的情况,其温度甚至会超出绝缘所允许的限值范围。这一故障指标自身是独立存在的现象,同时它还是加速设备老化并最终引发严重事故的直接导因。过热故障产生的原因多种多样。其中最为常见的原因是冷却系统出现故障,就好比水冷绕组的冷却水路被杂质给堵塞住了,又或者是氢冷发电机的氢气冷却器工作效率出现了下降的情况。除此之外,还有可能是电气方面的原因,例如绕组内部的股线发生断裂,或者焊接处理得不够好,使得接头处的电阻增大,当有大电流通过时就会产生集中化的热量。铁芯出现局部过热的情况也不少见,像是硅钢片之间的绝缘遭到损坏,进而形成了短路环,产生了涡流发热的现象,如此一来便会对上方的线棒绝缘起到烘烤的作用。

过热故障的危害程度是相当大的,它会导致绝缘材料迅速发生碳化现象,使其丧失原本具备的介电强度,要是监测工作稍有迟滞,那么就很有可能会酿成严重事故。

### 2.3 放电性故障

放电性故障所涉及的是处于高电场强度环境下的气体电离击穿状况,依据放电的具体部位以及强度方面的不同情况,能够划分出内部放电、槽部放电以及端部电晕这几个类型。其中,内部放电是出现在绝缘层内部存在的气隙之处;槽部放电则是发生在线棒表面和铁芯槽壁二者之间的位置;而端部电晕会出现在绕组从铁芯伸出之后的端部,且处于不均匀电场所存在的区域当中。虽然放电所释放的能量是比较微小的,然而其产生的化学腐蚀效应以及离子轰击效应却会不断地对固体绝缘造成侵蚀,使得绝缘层渐渐呈现出树木状的缺陷,并且这种缺陷还会朝着纵深方向不断发展,最终引发贯穿性的击穿现象。

### 2.4 机械性与环境性故障

这类故障主要是指并非由电气因素直接引发的绕组损坏情况。机械性故障具体来讲,像端部固定结构在长时间受到电磁力振动作用时出现松动或者疲劳断裂,如此一来,端部绕组的振幅就会变得过大,进而产生磨损,最终使得绝缘遭到破坏。在安装或者检修的过程中,如果工艺处理不当,那么也极有可能致使出现磕碰、划伤这类机械损伤状况。环境性故障和运行条件紧密相关,比如说氢气湿度超出标准严重超标,这会直接使绝缘表面电阻有所下降;水冷绕组因为水质不过关,结果导致空心导线内壁出现腐蚀穿孔的情况,进而漏水;又或者是发电机内部混入了油污灰尘,进而形成了爬电路径。除此之外,像频繁启停、过负荷等不属于正常运行的工况,都会让绕组所承受的综合应力进一步加剧。

## 3 定子绕组故障的诊断与监测技术

### 3.1 电气试验方法

离线电气试验属于一种在机组处于停运状态之时对绕组绝缘状态加以评估的有效手段,其中最为基本的操作便是测量绕组绝缘电阻以及吸收比,如此一来便能够直观地反映出整体出现受潮的情况以及表面存在脏污的情形。直流耐压及泄漏电流试验具备发现绝缘当中所存在的集中性缺陷的能力。交流耐压试验在考核主绝缘电气强度方面是一项极具权威性的试验,其可有效地察觉到内部较为严重的缺陷。局部放电试验算得上是当下用于诊断绝缘内部微观缺陷的一种极为灵敏的方法,借助对放电脉冲信号展开分析的方式来判定放电的具体类型以及其严重程度。另外还存在着槽部电位外移试验,这项试验专门针对定子

线棒防晕层的完好性进行检查。上述这些试验需要综合起来加以运用,并且彼此之间相互印证,唯有如此才能够做出较为全面的评估。

### 3.2 在线监测技术

在线监测技术可做到不停机且实时对绕组状态予以监视,精准捕捉故障在早期阶段出现的征兆,从而促使相关维护方式从“定期检修”逐步转变为“状态检修”。局部放电在线监测系统借助高频电流传感器来持续捕捉放电信号。就发电机局部过热监测系统而言,其是通过氢冷却介质里面的特殊气体产物展开监测的方式,以此来对过热情况发出预警。近些年来,声学成像检测技术被颇具创新性地引入到发电机电晕检测这一领域当中,该技术凭借声阵列传感器来捕捉放电所产生的超声波,并将其图像化加以定位,切实有效地克服了传统紫外成像法存在视场角较为狭窄的不足之处。除此之外,像定子绕组端部振动在线监测以及分布式光纤测温系统等,也都达成了对运行状态更为精细的测量效果。

### 3.3 绝缘状态评估

绝缘状态评估属于一种决策流程,它是依靠对多源信息展开综合性的分析与诊断来完成的。在这个过程中,得把历史离线试验所获取的数据、当下在线监测所得的数据还有绕组的运行履历等方面内容融合起来并加以对比。专家系统以及人工智能算法在这一领域正获得日益增多的应用,其可从数量庞大的数据当中挖掘出相关特征,进而构建起绝缘老化和各种应力之间存在的关联模型,以此对绝缘剩余寿命给出带有概率性质的预测结果。该评估所要达成的目标是要判断绕组绝缘究竟处于健康的状态、需要注意的状态又或者是异常危险的状态,从而给维修决策给予量化的依据。

### 3.4 故障定位技术

精准定位故障点是高效修复的基础,针对接地故障,可运用电压施加法,测定绕组各点对地电位,以此确定接地点的大致区域。而针对匝间短路或者断股故障,则需结合绕组直流电阻测量以及分支路环流测量展开综合分析。局部放电定位技术相对更为先进,就好比时差定位法,借助多个传感器来接收放电信号,依据时间差来计算放电点的位置。对于因振动引发的磨损故障,模态试验与超声波探伤能够助力找到松动的具体部位。

## 4 定子绕组故障的处理与预防措施

### 4.1 故障应急处理原则

当在线监测发出警报或者运行参数提示绕组有可能出现严重故障时,运行人员要依照安全准则来开展应急处

置工作。起初得依据故障现象的严重程度快速做出判断。要是出现的是轻微异常,并且其发展速度较为缓慢,那么可以强化对设备的监视力度,同时适当把负荷降下来,还要做好停机的相关准备工作。倘若出现了保护动作导致跳机的情况,那就应当立刻施行紧急停机程序,以此来阻止事故进一步扩大<sup>[2]</sup>。就氢冷发电机而言,在紧急停机的这个过程当中,还需要格外留心氢气的置换事宜以及密封油系统的维持状况。在故障停机之后,如果没有经过细致的检查以及相应的试验,是绝对不允许随意再次启动设备的。

### 4.2 检修与修复技术

具体修复技术依据故障类型、所在部位以及严重程度而定。像表面出现电晕腐蚀这类局部轻微绝缘损伤情况,能够运用现场修补工艺来处理,也就是借助绝缘带实施半叠包缠绕,以此恢复其厚度,并且要涂刷防晕漆,完成烘干固化操作。要是线棒主绝缘内部出现严重放电现象或者接头发生开焊,一般就得更换存在故障的线棒。这项工作极为精细,得小心翼翼地抽出发故障的线棒,切忌损伤到相邻那些完好的部件,随后把新线棒嵌入进去,接着重新开展绝缘处理以及焊接相关事宜。而因端部固定出现松动所引发的故障,则需要重新对整个端部绕组加以加固,在此之后务必要进行模态试验,从而保证其固有频率能够避开 100Hz 以及它的倍频。

### 4.3 日常维护与保养

预防性维护可减少定子绕组故障,日常维护要制度化、标准化,如定期检查水质、控制氢气参数、保持清洁、检查紧固件等。运行时要时刻关注温度、氢气参数等变化,及时发现异常情况。

### 4.4 预防性管理策略

从更高层次来讲,构建起一套科学合理的预防性管理策略体系显得格外重要。得进一步完善技术监督方面的体系,要严格且细致地去监督设备从选型开始,一直到制造、安装、调试,再到后续的运行、检修这一整个过程中的每一个环节,尤其要着重强化对于定子绕组制造工艺以及现场安装质量的监督力度<sup>[3]</sup>。要积极推动检修策略实现转型,充分借助那些已经成熟运用的在线监测技术,多积累有关设备状态方面的各类数据,从而慢慢从以往那种固定的计划检修模式转变为以状态评估当作基础依据的预测性检修方式,以此来达成检修工作的精准化以及经济化目标。除此之外,还应当重视人员培训工作,着力提升运行人员以及检修人员识别绕组故障早期所呈现出的种种征兆的能力,同时也要让他们能够正确地去操作维护设备,并且具备较强的应急处理能力。要努力建立健全设备的技术档

案, 详尽地将每一次试验所得的数据、每一次检修的具体内容以及每一次出现异常情况时的处理经过都记录下来, 而这些历史数据恰恰是在开展状态评估以及寿命管理工作当中最为宝贵的一笔财富。唯有凭借这样一种把技术因素与管理举措同等看重的综合防控手段, 才能够最大限度地确保发电机定子绕组可以实现长期的安全稳定运行状态。

## 5 结束语

发电机定子绕组出现故障, 其分析以及后续处理事宜属于一个涉及诸多学科领域的综合性技术研究范畴。就当前而言, 伴随火电机组朝着大容量且参数更高的趋势不断发展, 定子绕组所面临的应力情况变得愈发复杂起来, 对于它的可靠性要求也是变得越来越严格了。本文较为系统地阐述了从结构特点方面、故障机理层面一直到诊断处理环节等整个链条上的技术相关内容。经分析可以发现, 绝缘呈现渐进性的老化状况是最根本的原因所在, 而像局部出现过热情况、存在电晕放电现象以及有机械振动等问题, 则是促使失效加快发生的那些主要诱发因素。现代技术给人们带来了从传统的试验方式到更为先进的在线监测手

段等一系列丰富的诊断途径。不过即便如此, 再先进、再高端的技术同样需要切实落实到日常维护工作要扎实开展以及科学合理的管理体系构建这两方面当中去。未来, 进一步加深对于在复杂应力作用下老化机理的认识理解程度, 着力发展更为智能化的状态评估系统, 并且积极推动检修运维模式实现深层次的变革举措, 这将会是确保发电机定子绕组能够安全、经济且长时间稳定运行的关键所在方向。

## 【参考文献】

- [1]林宽.火力发电厂同步发电机定子绕组故障检测技术研究[J].家电维修,2025(9):110-112.
- [2]薛玉林,王雪松,曾义昌.中小型发电机定子接地故障查找辅助决策系统研究[J].四川水力发电,2025,44(2):1-4.
- [3]王义凯,郑海然,乔健,等.发电机定子绕组接地故障混合柔性消弧方法[J].电力自动化设备,2025,45(3):109-114.

作者简介: 崔清博(1997.6—), 男, 毕业院校: 德州学院, 学历: 本科, 所学专业: 电气工程及其自动化, 当前就职单位: 华能日照电厂, 职务: 检修部工作组长, 年限: 1年, 助理工程师。