

Research on Measurement Technology of Magnetic Flux Density of Air Gap Magnetic Field of Francis Generator in Nansha Hydropower Station

Linghua Li

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Yuanyang, Yunnan, 662400, China

Abstract

This study investigates the factors influencing magnetic flux density in air-gap magnetic fields of Nansha Hydropower Station generators. By comparing technical characteristics of mainstream measurement methods, we developed a composite measurement system integrating Hall sensors and electromagnetic induction coils. Field tests demonstrated the system's accuracy and stability, with proposed solutions for magnetic field distortion diagnosis and optimization. The composite system achieves measurement errors $\leq \pm 1.2\%$, enabling precise capture of air-gap magnetic field dynamics. These findings provide technical support for condition-based maintenance and efficiency enhancement of the Nansha Hydropower Station generators.

Keywords

mixed-flow generator; air-gap magnetic field; magnetic flux density; Hall sensor; measurement technology; condition-based maintenance

南沙水电站混流式发电机气隙磁场磁通密度测量技术研究

李凌华

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南 元阳 662400

摘要

本文以南沙水电站发电机为研究对象, 系统分析气隙磁场磁通密度的影响因素, 对比主流测量方法的技术特性, 建立基于霍尔传感器与电磁感应线圈的复合测量系统, 通过现场试验验证测量精度与稳定性, 并提出磁场畸变的诊断与优化方案。复合测量系统的测量误差 $\leq \pm 1.2\%$, 可精准捕捉气隙磁场的动态分布规律, 为南沙水电站发电机的状态检修与效能提升提供技术支持。

关键词

混流式发电机; 气隙磁场; 磁通密度; 霍尔传感器; 测量技术; 状态检修

1 引言

云南南沙水电站于2007年12月投产发电, 装机容量 $3 \times 50\text{MW}$, 机组经过近二十年运行, 受转子偏心、转子磁极绕组松动变形、绕组老化等因素影响, 气隙磁场出现不同程度的畸变, 2022年检修中发现机组最大气隙偏差达 0.8mm , 导致有功功率波动幅度超过额定值的 3% , 影响机组的安全稳定运行。

本次研究的内容: 分析混流式发电机气隙磁场的生成机理与影响因素; 对比霍尔效应法、电磁感应法、磁通门法等测量技术的优劣; 设计适用于南沙水电站机组的复合测量系统; 开展现场试验与数据验证; 提出磁场畸变的诊断指标

与优化措施。

采用的技术路线: 文献调研→磁场特性分析→测量方案设计→系统搭建与校准→现场试验→数据处理与误差分析→诊断与优化方案提出。

2 混流式发电机气隙磁场磁通密度理论基础

2.1 气隙磁场生成机理

$B_{\delta\text{max}} = \frac{\mu_0 N_f I_f}{2\delta}$ 混流式发电机的气隙磁场由转子励磁绕组通以直流电流后产生, 通过定转子铁心的磁耦合作用形成闭合磁路。在理想工况下, 气隙均匀分布, 磁场磁通密度呈正弦规律分布, 其最大值可表示为:

其中, μ_0 为真空磁导率, N_f 为励磁绕组匝数, I_f 为励磁电流, δ 为气隙长度。

实际运行中, 由于定转子加工误差、安装偏差、运行

【作者简介】李凌华(1968-), 男, 中国湖南郴州人, 本科, 副高, 从事电气工程及其自动化研究。

中的机械变形等因素,气隙磁场会偏离理想正弦分布,出现谐波分量。

2.2 影响磁通密度分布的关键因素

气隙几何参数:气隙长度的均匀性是决定磁场分布的核心因素,转子偏心会导致气隙呈周期性变化,引发磁场幅值波动;定转子铁心齿槽结构会使气隙磁导产生脉动,形成齿谐波磁场。

电磁参数:励磁电流的大小直接影响磁通密度幅值,电流波动会导致磁场不稳定;定子绕组负载电流产生的电枢反应会使气隙磁场发生畸变,感性负载下磁场会被削弱,容性负载下则会被增强。

机械与环境因素:机组运行中的振动会导致定转子相对位移,改变瞬时气隙长度;铁心损耗产生的温升会影响材料磁导率,进而改变磁场分布;绕组绝缘老化会导致匝间短路,形成局部磁场异常。

3 主流气隙磁场磁通密度测量方法对比分析

3.1 霍尔效应法

霍尔效应法利用半导体霍尔元件在磁场中产生的霍尔电压与磁通密度成正比的特性实现测量。其核心优势是响应速度快(可达 ns 级)、测量范围宽(0~2T),可实现非接触式测量,适用于动态磁场检测。但霍尔元件受温度影响较大,需进行温度补偿;在强磁场环境下,元件线性度会下降,且易受电磁干扰。该方法适用于对动态响应要求较高的场景,如机组启动、负荷突变时的磁场测量。

3.2 电磁感应法

电磁感应法基于法拉第电磁感应定律,通过测量线圈在磁场中运动产生的感应电动势计算磁通密度。其优点是结构简单、成本低、抗干扰能力强,适用于稳态磁场测量;但动态响应速度较慢,难以捕捉高频磁场变化,且测量精度受线圈运动速度稳定性影响较大。该方法常用于机组稳态运行时的磁场均匀性检测,可通过多线圈阵列实现磁场分布测绘。

3.3 磁通门法

磁通门法利用软磁材料的磁滞特性,通过激励线圈使铁芯交替饱和,检测线圈感应电压的幅值与相位变化来计算磁通密度。其测量精度高($\pm 0.5\%$)、分辨率高,适用于弱磁场测量,但测量范围较窄(通常 $\leq 0.5T$),且响应速度较慢,不适用于混流式发电机强磁场、动态测量场景。

3.4 光纤光栅法

光纤光栅法通过磁场导致光纤光栅中心波长偏移的特性实现测量,具有抗电磁干扰能力极强、耐高温、体积小等优势。但设备成本高昂,解调系统复杂,且对安装精度要求极高,目前仅在少数高端机组的科研试验中应用,尚未大规模推广。

4 南沙水电站发电机气隙磁场测量系统设计

4.1 测量系统总体架构

测量系统由传感器模块、信号调理模块、数据采集模

块、数据处理模块及供电模块组成。传感器模块安装于定子铁心槽口,实时采集气隙磁场信号;信号调理模块对传感器输出信号进行滤波、放大与温度补偿;数据采集模块将模拟信号转换为数字信号并存储;数据处理模块通过算法对数据进行分析,输出磁通密度分布曲线与诊断结果。

4.2 核心部件选型与设计

4.2.1 传感器模块:

霍尔传感器:选用 CS350A 型霍尔元件,测量范围 0~2T,线性误差 $\leq \pm 0.5\%$,工作温度 -40~125℃,满足现场高温环境要求;采用双霍尔元件差分结构,抑制共模干扰。

电磁感应线圈:采用漆包铜线绕制,匝数 1000 匝,线圈直径 5mm,确保小型化安装;线圈骨架采用耐高温环氧树脂材料,增强机械稳定性。

传感器阵列布置:沿定子铁心圆周均匀布置 16 个测量点,每个测量点同时安装霍尔传感器与电磁感应线圈,覆盖整个气隙圆周,确保磁场分布的全面检测。

4.2.2 信号调理模块:

滤波电路:采用二阶低通滤波器,截止频率 1kHz,滤除高频电磁干扰;

放大电路:选用仪表放大器 INA128,放大倍数可调(1~100 倍),确保微弱信号的有效放大;

温度补偿电路:采用 PT100 温度传感器实时检测环境温度,通过单片机控制补偿电阻网络,修正霍尔元件的温度漂移误差。

数据采集模块:选用 NI USB-6211 数据采集卡,采样频率 10kHz,分辨率 16 位,支持 8 路模拟信号同步采集,满足多传感器并行测量需求;通过 USB 接口与上位机通信,实现数据实时传输与存储。

数据处理模块:基于 LabVIEW 开发上位机软件,具备数据采集、实时显示、曲线绘制、数据存储与分析功能;集成磁场畸变诊断算法,自动计算磁通密度最大值、最小值、平均值及谐波畸变率。

4.3 系统校准

静态校准:利用标准亥姆霍兹线圈产生已知磁通密度的均匀磁场,分别对霍尔传感器与电磁感应线圈进行校准,建立输出信号与磁通密度的线性关系,拟合校准曲线,确保测量精度。

动态校准:搭建模拟机组旋转的试验平台,通过调整转速与励磁电流,模拟不同运行工况,验证测量系统的动态响应性能与稳定性。

现场校准:在机组停机状态下,通过手动调整气隙长度,验证传感器对气隙变化的敏感程度,确保测量系统适应现场实际工况。

5 现场试验与结果分析

5.1 试验条件

试验对象为南沙水电站 3 号混流式发电机,额定功率

50MW, 额定电压 10.5kV, 额定转速 120r/min, 额定励磁电流 280A, 设计气隙长度 2.5mm。试验工况包括空载工况(励磁电流 100~300A)、额定负荷工况、甩负荷工况, 全面覆盖机组典型运行状态。

5.2 试验步骤

传感器安装: 在机组停机并断电的情况下, 将 16 个传感器阵列固定于定子铁心槽口, 确保传感器探头与转子表面距离符合设计要求, 避免运行中发生碰撞;

系统调试: 连接测量系统各模块, 进行通电调试, 检查信号传输是否正常, 校准传感器零点;

工况测试: 依次启动机组, 调整至不同试验工况, 每个工况稳定运行 30 分钟, 采集气隙磁场磁通密度数据;

数据记录: 通过上位机软件记录各测量点的磁通密度数据, 生成时间序列曲线与圆周分布曲线;

系统拆卸: 试验完成后, 关闭机组与测量系统, 拆卸传感器阵列, 恢复机组原有结构。

5.3 试验结果分析

空载工况下磁通密度分布: 当励磁电流为 280A 时, 气隙磁通密度平均值为 1.2T, 最大值 1.35T, 最小值 1.05T, 变异系数为 3.8%; 圆周分布曲线呈近似正弦分布, 但在第 3、11 测量点出现局部峰值, 表明该位置气隙存在轻微偏心, 与机组检修中发现的转子偏心情况一致。

额定负荷工况下磁通密度分布: 额定负荷时, 磁通密度平均值为 1.15T, 较空载工况略有下降, 这是由于电枢反应的去磁作用; 谐波畸变率为 5.2%, 主要存在 3 次、5 次谐波, 表明定子绕组负载电流导致磁场轻微畸变, 但在允许范围内。

甩负荷工况下磁通密度动态变化: 甩负荷瞬间, 励磁电流出现短暂波动(最大值 320A), 磁通密度幅值瞬间上升至 1.5T, 随后在 1 秒内恢复稳定; 测量系统成功捕捉到这一动态过程, 验证了系统的快速响应能力。

测量精度验证: 将试验结果与数值仿真结果对比, 复合测量系统的测量误差为 $\pm 1.2\%$, 优于单一测量方法(霍尔效应法误差 $\pm 1.8\%$, 电磁感应法误差 $\pm 2.1\%$), 满足工程测量要求。

5.4 磁场畸变诊断

基于试验数据, 建立磁通密度畸变诊断指标:

幅值畸变率:

$$K_A = \frac{B_{\max} - B_{\text{avg}}}{B_{\text{avg}}} \times 100\%, \text{ 允许值} \leq 5\%$$

相位畸变率:

$$K_\phi = \frac{\Delta\phi}{\pi} \times 100\%, \text{ 允许值} \leq 3\%$$

谐波畸变率:

$$K_H = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} B_n^2}}{B_1} \times 100\% \text{ 允许值} \leq 8\%$$

南沙水电站 3 号机组在额定工况下, 幅值畸变率为

4.3%, 相位畸变率为 2.1%, 谐波畸变率为 5.2%, 均在允许范围内, 表明机组气隙磁场畸变程度较轻, 但需关注局部峰值位置的气隙调整。

6 气隙磁场优化措施

6.1 气隙调整

针对转子偏心导致的磁场局部峰值, 采用激光对中技术调整转子中心位置, 使气隙长度偏差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内; 对定子铁心变形部位进行整形处理, 确保气隙均匀分布。

6.2 励磁系统优化

优化励磁调节器参数, 采用 PID 自适应控制算法, 抑制励磁电流波动, 确保磁场幅值稳定; 增加励磁回路滤波装置, 减少谐波分量对磁场的影响。

6.3 铁心与绕组检修

定期清理定转子铁心表面的粉尘与油污, 减少磁阻不均; 检查定子绕组绝缘状态, 及时处理匝间短路隐患; 对老化绕组进行更换, 确保电枢反应均匀。

6.4 状态监测与维护

基于本文设计的测量系统, 建立南沙水电站发电机气隙磁场定期监测机制, 每半年进行一次全面测量, 跟踪磁场分布变化趋势; 结合振动、温升等监测数据, 实现机组状态的综合评估与预警。

7 结语

分析了混流式发电机气隙磁场磁通密度的生成机理与影响因素, 明确了气隙几何参数、电磁参数、机械与环境因素是导致磁场畸变的主要原因。

对比了主流测量方法的特性, 提出霍尔效应法与电磁感应法相结合的复合测量方案, 兼顾了测量精度、动态响应与抗干扰能力。

设计并搭建了适用于南沙水电站机组的气隙磁场测量系统, 通过现场试验验证, 系统测量误差 $\leq \pm 1.2\%$, 可精准捕捉不同工况下的磁场分布规律。

基于试验数据建立了磁场畸变诊断指标, 提出了气隙调整、励磁系统优化等针对性措施, 为机组状态检修提供了量化依据。

参考文献

- [1] 王鹏, 朱红波, 刘润兵. 水电站过流部件涂层下裂纹检测方法对比[J]. 热力发电, 2020: 113-117.
- [2] 祖海松. 水准测量在水电站发电机转子安装调平中的应用[J]. 水电站机电技术, 2021: 4(155-158).
- [3] 仇一凡[1], 杨博文[1], 李仕晰[1]. 乌东德水电站自并励下励磁电压波动分析及处理[J]. 人民黄河, 2021: 2.
- [4] 华朝锋. 水电站河道冲刷破坏水下多波束测深检测分析[J]. 中国水能及电气化, 2022: 42-47.
- [5] 代开锋, 何志锋, 桂绍波, 何昌炎. 巴基斯坦卡洛特水电站水轮发电机组参数选择及结构特点[J]. 水利水电快报, 2020: 4.