

水轮发电机转子不圆度故障的在线检测

武玉才¹, 刘艳泽¹, 白雨卉¹, 范轩杰², 叶超³, 周天华³, 杨光勇³

- (1. 河北省绿色高效电工新材料与设备重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003;
2. 国网冀北电力有限公司张家口供电公司, 河北省张家口市 075000;
3. 华能澜沧江水电股份有限公司检修分公司, 云南省昆明市 650051)

Online Detection of Non-roundness Fault of Rotor in Hydro-generator

WU Yucan¹, LIU Yanze¹, BAI Yuhui¹, FAN Xuanjie², YE Chao³, ZHOU Tianhua³, YANG Guangyong³

- (1. Hebei Key Laboratory of Green and Efficient New Electrical Materials and Equipment (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China;
2. Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, Hebei Province, China;
3. Maintenance Branch, Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan Province, China)

ABSTRACT: Rotor magnetic pole non-roundness (RMPNR) is a prevalent mechanical failure encountered in large hydro-generators, potentially leading to severe unit vibrations and rotor sweeping, which can significantly impact the safe operation of the unit. An analysis of the air-gap flux density characteristics under various RMPNR conditions in hydro-generators is conducted through the air-gap permeance method in this paper. The fractional harmonic enhancement within the main flux of the hydro-generator is identified. Subsequently, a physical relationship and similarity of fault characteristics are revealed between the leakage flux of the stator core and the main flux, in accordance with the structural characteristics of hydro-generators. A measuring coil is arranged on the stator core positioning rib for capturing the leakage flux, with its fractional harmonics being utilized as the criterion for diagnosing such faults. Furthermore, a method for quantifying the fault severity based on the characteristic harmonic proportion is introduced. Finally, finite element simulations and experimental simulations are performed to validate the proposed method for measuring coils to detect RMPNR. The novel on-line detection method, which eliminates the need for installing sensors inside the generator, enables real-time assessment of RMPNR in hydro-generators and thus mitigates risk to the unit safe operation.

KEY WORDS: hydro-generator; rotor magnetic pole non-roundness (RMPNR); leakage flux; detection coil

摘要: 转子不圆度是大型水轮发电机常见的机械故障,可诱发电机组剧烈振动和转子扫膛,对机组运行安全影响较大。首先,该文利用气隙磁导法分析了水轮发电机在各种不圆度故障形态下气隙磁通密度的特点,指出在此类故障情况下,发电机主磁通中分数次谐波增强;然后,根据水轮发电机结构特点,明确了定子铁心泄漏磁通与主磁通之间的物理联系和故障特征的相似性,提出通过布置在定子铁心定位筋上的测量线圈捕捉泄漏磁通,并将其分数次谐波作为此类故障的判据,进一步引入了量化故障程度的特征谐波占比法;最后,针对所提出的测量线圈检测转子不圆度故障的方法进行了有限元仿真与模拟实验验证。该新型在线检测方法无需在发电机内部安装传感器,可实时判断水轮发电机的转子不圆度故障,对机组运行安全无威胁。

关键词: 水轮发电机; 转子不圆度; 泄漏磁通; 测量线圈

0 引言

水轮发电机是电力系统的重要装备,其机械故障将影响机组安全性、供电连续性和水能利用^[1-3]。水轮发电机转子各磁极采用独立装配工艺,由于装配质量差异和运行中承受电磁力、离心力和热膨胀等复杂应力作用,转子部分磁极出现径向位移,形成转子磁极不圆度故障^[4-5]。该故障与转子动偏心相似,本质在于气隙的不均匀性导致了发电机内部磁场的非对称分布,形成不平衡拉力,引发机组振动和噪声^[6],严重时可引起转子扫膛^[7],损毁主体结构。因此,开展转子磁极不圆度故障特性分析与诊

基金项目: 国家自然科学基金项目(52277048); 河北省自然科学基金项目(E2023502002); 华能集团科技项目“水轮发电机不平衡磁拉力仿真计算及控制方法研究与应用”(JXGS2024/D03)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52277048); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2023502002); Huaneng Group Science and Technology Project (JXGS2024/D03).

断研究具有重要意义。

国内外对转子磁极不圆度故障开展了深入研究，并提出一些新型在线诊断方法，主要有振动监测法、气隙直接监测法和磁通监测法。振动监测法利用了转子不圆度故障对发电机定子振动频率的影响特征。武玉才等^[8]推导得到水轮发电机转子不圆度故障时定子铁心特定点的磁吸力表达式，证明定子铁心同时受偶数次谐波和分数次谐波电磁力的影响；李成峰^[9]基于磁场和电磁力的变化规律分析转子不圆度对水轮发电机定子铁心振动的影响，得出转子不圆度故障时定子铁心振动频率为转动频率整数倍的规律。气隙直接监测法常利用基于反射光学测量技术的光纤传感器或基于气隙静电电容理论的平板式电容传感器安装在定子内壁^[10-11]，动态测量气隙长度，判断发电机转子磁极的不圆度。磁通监测法通过对发电机主磁场对称度变化的监测，间接反映转子动偏心和转子磁极不圆度等故障。Faizan S.M 团队^[12]通过利用每个磁极下气隙磁通探头所感应的电压，反推定转子气隙长度，以此预测和识别发电机动偏心故障，并在 330 MW 的抽水蓄能机组上完成实验验证；王超等^[13]提出采用气隙磁通传感器实时动态测量大型水轮发电机气隙磁通密度，根据每极实测磁通密度与其平均值的偏差评估电机转子不圆度。以上方法各具特点，但普遍无法同时满足非侵入性、高灵敏度、低成本及低风险等多重技术要求，因此，在传感器便捷部署、故障特征高效提取及诊断性能提升等领域进行了深入探究。

以发电机外围空间泄漏磁场为特征参数的检测方法因其非侵入性特点近年来备受关注^[14-17]。Bernier S 等^[18]分析了杂散磁通和主磁通反映电机故障的相似性和差异性，证明了杂散磁通在大型水轮发电机电气和机械故障识别中的有效性。Ehya H 等^[19]提出了一种基于杂散磁场时频分析的离散小波算法，以检测水轮发电机的静、动偏心和混合偏心故障，并利用小波熵量化故障程度，最后，对多台实验机组进行了测试验证。随后，进一步对大型水轮发电机的杂散磁通分别进行了连续小波变换和傅里叶分析，发现偏心故障时，时频色谱图中能量强度将集中在每个旋转周期的中间位置，频谱图中将出现分数次谐波^[20-21]。Ramirez-Nunez J A 等^[22-24]先后证明了杂散磁通检测感应电机和永磁同步发电机转子偏心故障的可行性，表明外围磁通对

旋转电机故障检测具有重要价值。以外围漏磁场为检测对象的故障检测方法无疑是最为便捷的途径，利用弱磁传感器或多匝线圈在机壳背部或定子铁心外部直接进行测量，但检测效果易受传感器安装位置、线圈匝数或现场其他信号的影响。

为克服现有外部磁场检测方法的局限性，本文在兼顾检测精度与成本的基础上，结合水轮发电机的结构特点和凸极磁场的不对称分布规律，提出一种以定位筋为漏磁场测量线圈载体的在线诊断水轮发电机转子不圆度故障的方法。首先，建立转子磁极不圆度故障模型，从不均匀气隙造成的磁导变化入手，分析转子不圆度故障时气隙磁通密度变化特征；其次，根据水轮发电机定子结构设计，分析定子铁心外缘磁通分布特点，并提出以定位筋为载体安装漏磁场测量线圈，进一步分析预测该线圈感应电压谐波特征。建立水轮发电机的有限元仿真模型，验证转子不圆度故障对泄漏磁场分数次谐波的影响。最后，通过故障模拟实验验证新型检测方法的有效性，揭示转子不圆度故障时泄漏磁场的谐波特性。

1 转子不圆度故障时磁场分析

如图 1 所示，凸极水轮发电机的气隙不均匀，但正常情况下转子各磁极外缘与定子铁心的最小气隙长度相同(忽略定子开槽对气隙的影响)，关于 d 轴对称，气隙磁导可表示为

$$\lambda_0(\theta_s, t) = \frac{A_d + A_q}{2} + \sum_i A_{2i} \cos 2i(\omega t - p\theta_s) \quad (1)$$

式中： A_d 、 A_q 分别为 d 轴、 q 轴磁导； A_{2i} 为凸极效应引起的磁导偶次谐波幅值； i 为谐波次数， $i=1,2,3,\dots$ ； ω 为角频率； p 为极对数； θ_s 为定子空间机械角度。

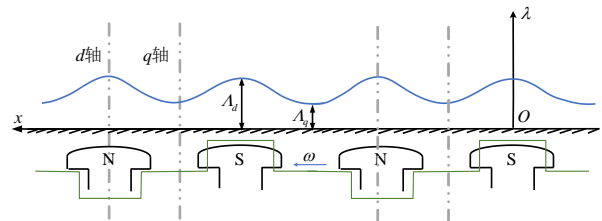


图 1 正常情况气隙磁导分布

Fig. 1 Air gap permeance distribution

在图 1 坐标系中，忽略定子绕组产生的异步磁场，仅考虑定子同步旋转磁势和转子磁势，气隙合成磁势可表示为一系列奇数次谐波磁势的叠加，为

$$f(\theta_s, t) = \sum_v F_{mv} \cos v(\omega t - p\theta_s - \varphi_v) \quad (2)$$

式中: F_{mv} 为第 v 次谐波磁势幅值; φ_v 为 v 次谐波磁势相位。

忽略切向磁通密度, 径向气隙磁通密度可表示为

$$b_0(\theta_s, t) = f(\theta_s, t) \lambda_0(\theta_s, t) = \frac{A_d + A_q}{2} \sum_v F_{mv} \cos v(\omega t - p\theta_s - \varphi_v) + \frac{1}{2} \sum_v \sum_i F_{mv} A_{2i} \{ \cos[(v+2i)(\omega t - p\theta_s) - v\varphi_v] + \cos[(v-2i)(\omega t - p\theta_s) - v\varphi_v] \} \quad (3)$$

由式(3)可知, 转子磁极正常时, 气隙磁通密度包含基波和奇数次($v \pm 2i$)谐波分量, 这些磁场均以同步速旋转。

转子不圆度故障的几种典型情况如图2所示。

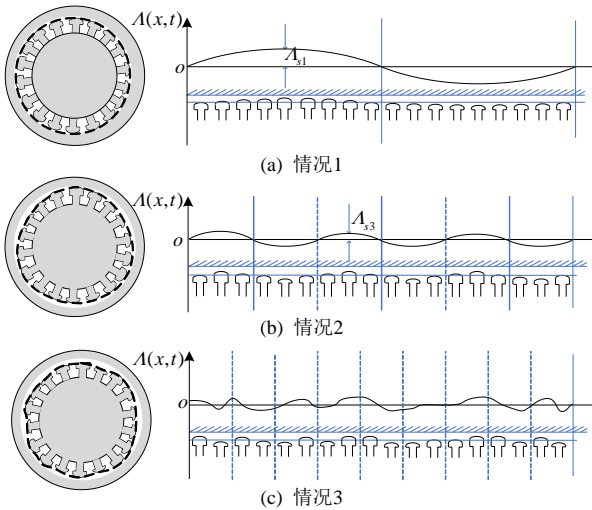


图2 转子磁极不同类型不圆度故障时附加磁导示意图

Fig. 2 Additional permeance diagram for different types of RMPNR

图2(a)中转子圆周一侧磁极外凸(最小气隙变小), 另一侧磁极内凹(最小气隙变大)。气隙磁导 $A_1(\theta_s, t)$ 可等效为正常情况下的磁导与幅值为 A_{s1} 的单周磁导波叠加。气隙磁导可表示为

$$A_1(\theta_s, t) = \lambda_0(\theta_s, t) + A_{s1} \sin\left(\frac{\omega t}{p} - \theta_s\right) \quad (4)$$

气隙磁通密度为

$$b'_0(\theta_s, t) = f(\theta_s, t) \cdot A_1(\theta_s, t) = b_0(\theta_s, t) + \frac{1}{2} \sum_v F_{mv} A_{s1} \{ \sin[(v + \frac{1}{p})\omega t - (vp + 1)\theta_s - v\varphi_v] - \sin[(v - \frac{1}{p})\omega t - (vp - 1)\theta_s - v\varphi_v] \} \quad (5)$$

由式(5)可知, 气隙磁通密度中出现($v \pm 1/p$)次谐波分量, 这些谐波的转速可以表示为

$$n = \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{(v+1/p)\omega}{vp+1} = \frac{\omega}{p} \quad (6)$$

由此可知, 该谐波磁场以同步机械角速度旋转, 故其不会在转子阻尼上感应电流, 亦不会被转子阻尼效应所削弱。

图2(b)所示的磁极不圆度故障, 各磁极最小气隙在一个转子旋转周期内波动3次, 气隙磁导可以表示为

$$A_3(\theta_s, t) = \lambda_0(\theta_s, t) + A_{s3} \sin 3\left(\frac{\omega t}{p} - \theta_s\right) \quad (7)$$

类比可知, 对于图2(c)的一般性转子磁极不圆故障, 气隙磁导 $A(\theta_s, t)$ 可等效为正常磁导与一系列幅值为 A_{sk} 的 k (k 为正整数)次谐波磁导波叠加:

$$A(\theta_s, t) = \lambda_0(\theta_s, t) + \sum_k A_{sk} \sin k\left(\frac{\omega t}{p} - \theta_s\right) \quad (8)$$

气隙磁通密度为

$$b'_0(\theta_s, t) = f(\theta_s, t) \cdot A(\theta_s, t) = b_0(\theta_s, t) + \frac{1}{2} \sum_v \sum_k F_{mv} A_{sk} \{ \sin[(v + \frac{k}{p})\omega t - (vp + k)\theta_s - v\varphi_v] - \sin[(v - \frac{k}{p})\omega t - (vp - k)\theta_s - v\varphi_v] \} \quad (9)$$

由式(9)可知, 转子存在磁极不圆度故障时, 气隙磁通密度除了主要的基波和奇数次谐波外, 出现了 $vp \pm k$ 对极的谐波磁场, 相对于 p 对极水轮发电机而言, 为 $(v \pm k/p)$ 等分数次谐波, 这些谐波以同步速旋转, 这是转子不圆度故障的典型特征。

转子磁极不圆度故障检测的关键是捕捉磁场中的上述分数次谐波。在发电机定、转子间隙安装传感器尽管可以直接获取磁场数据, 但水轮发电机气隙较小, 考虑定子和转子不圆度问题, 传感器容易与转子发生碰撞, 技术难度和安全风险较大, 相比之下测量发电机泄漏磁场则更为适宜。因此, 可以选择能反映主磁场变化的泄漏磁场测点开展传感器安装和测量。

水轮发电机定子铁心背部的定位筋、托块和环板都是高磁导率的铁磁物质, 用于将叠压的定子铁心硅钢片可靠地固定在机座上, 防止硅钢片松动、移位。定位筋一般采用鸽尾型设计, 一部分内嵌至定子铁心背部预留槽内, 另一侧通过托块焊接到环板上, 如图3所示。依据磁场的分散性分布特性^[25], 主磁通中将有一少部分磁通从定子铁心背部泄漏至定位筋并经环板回流, 如图4所示。虽然主磁通泄漏部分会因涡流损耗发生幅值衰减与相位偏移,

但其谐波成分与主磁通保持一致^[26]。

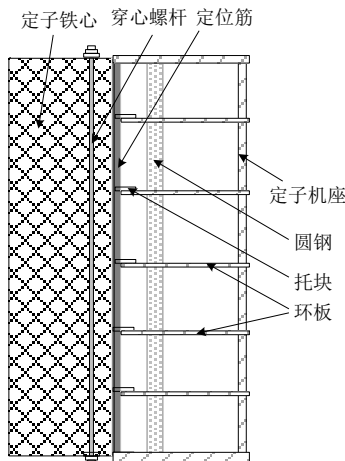


图 3 水轮发电机定子铁心与机座结构

Fig. 3 Stator core and frame structure of hydro-generator

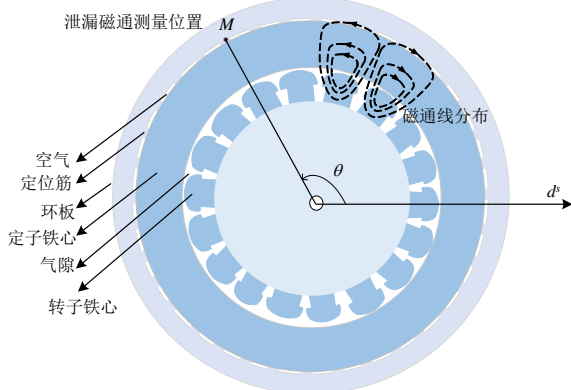


图 4 水轮发电机二维结构示意图

Fig. 4 Two-dimensional structure diagram of hydro-generator

基于上文分析，可在水轮发电机定子铁心背部的定位筋上安装线圈，作为磁场测量的传感器，通过采集装置记录测量线圈的感应电压，如图 5 所示。

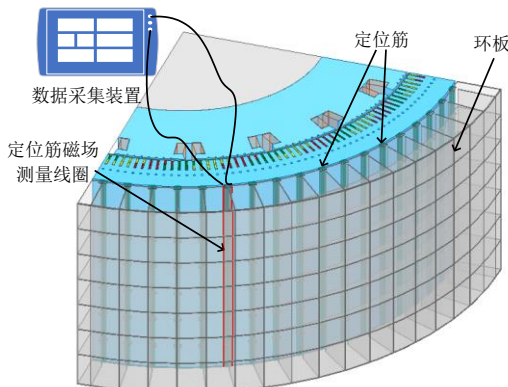


图 5 磁通测量线圈放置位置

Fig. 5 Position of magnetic flux measurement coil

转子磁极不圆度故障时，线圈感应电压中将涌现出 $(v \pm k/p)$ 次谐波分量，可以此特征监测辨别水轮发电机转子不圆度故障。

鉴于转子磁极不圆度引起的特征谐波分量较

多，可以通过计算特定谐波占比(特征谐波幅值与整体谐波幅值的比率)来定量描述故障的严重度，具体计算表达式如下：

$$A\% = 100\% \times \sum E_i / \sqrt{\sum_l^m E_l^2} \quad (10)$$

式中： E_i 为特征谐波幅值 ($i=(v \pm k/p)$)，其中， $v=1,3,5,\dots$ ， $k=1,2,3,\dots$ ，且 $k \neq np$ ， $n=1,2,3,\dots$ ； E_l 为经傅里叶分解后第 l 个谐波的幅值 ($l=1,2,3,\dots,m$ ， m 为傅里叶变换的上限)。

2 仿真实验

2.1 仿真模型搭建

选取某大型水电站一台 18 极 216 槽的水轮发电机作为研究对象，机组主要参数见表 1，建立转子不圆度故障的有限元仿真模型，如图 6 所示。

表 1 SAV 620/27518 型水轮发电机具体参数

Table 1 Basic parameters of SAV 620/27518 hydro-generator

参数	数值	参数	数值
额定容量/MVA	334	额定频率/Hz	50
额定电压/kV	18	额定励磁电流/A	1712
额定电流/kA	10.713	空载励磁电流/V	934.6
定子槽数	216	转速/(r/min)	333.3
极对数	9	气隙长度/mm	39.5
相数	3	接线方式	YY 型

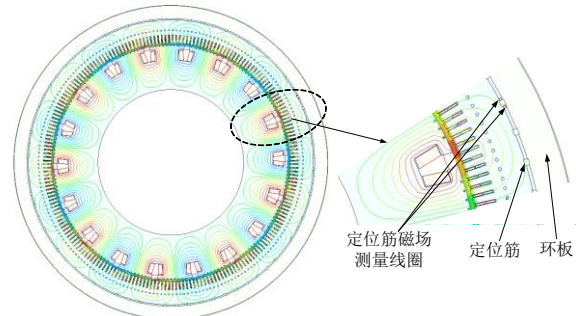


图 6 水轮发电机有限元仿真模型

Fig. 6 Finite element simulation model of hydro-generator

2.2 仿真结果分析

考虑到转子磁极不圆度故障形态的多样性，模拟 2 种典型的转子不圆度故障：①转子磁极随机凸起或凹陷变化；②单个磁极凹陷。具体如表 2 所示。

以故障形态①为例，模拟转子磁极在随机位置和大小上的不圆度变化，分析其对磁通密度分布和测量线圈感应电压的综合性影响。转子发生随机磁极不圆度故障时，进行水轮发电机空载与满载工况仿真，得到磁通密度分布与测量线圈感应电压，如图 7、8 所示。

表2 水轮发电机2种转子不圆度故障形态
Table 2 Two kinds of rotor non-roundness fault forms of hydro-generator

故障形态	图示	故障磁极说明
故障形态①		各磁极长度随机变化
故障形态②		单个磁极凹陷 不圆度为 2 mm 0.050δ
		单个磁极凹陷 不圆度为 5 mm 0.127δ
		凹陷 不圆度为 8 mm 0.20δ
		凹陷 不圆度为 8 mm 0.20δ

注：表中转子不圆度 δ =(最大磁极长度-最小磁极长度)/气隙长度。

由图7(a)可以看出，空载水轮发电机在转子故障形态①时：在磁极凹陷区域，气隙径向磁通密度和同方位穿过定位筋的泄漏磁密均较正常情况减小；在磁极凸起处则呈现相反趋势。泄漏磁密变化幅度大于主磁密变化幅度，表明转子不圆度故障时泄漏磁通密度比气隙磁通密度更为敏感。观察图7(b)，定位筋磁场测量线圈感应电压与磁通密度的变化保持一致，即磁极凹陷时线圈感应电压降低，凸起时则升高。在图7(c)的感应电压频谱图中，可以明显观察到 $v \pm k/9$ 分数次谐波(例如44.4、55.6、

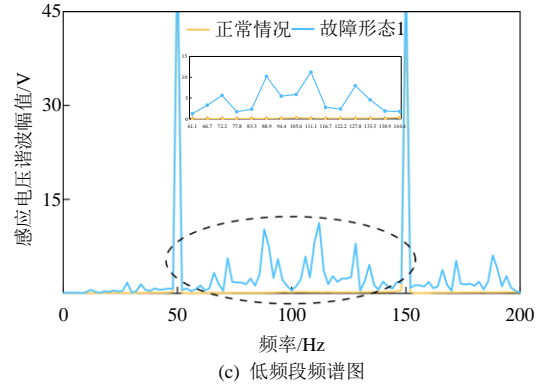


图7 空载故障形态①-磁通密度与磁场测量线圈感应电势
Fig. 7 No-load fault form ①- magnetic flux density and magnetic field measurement coil induced potential

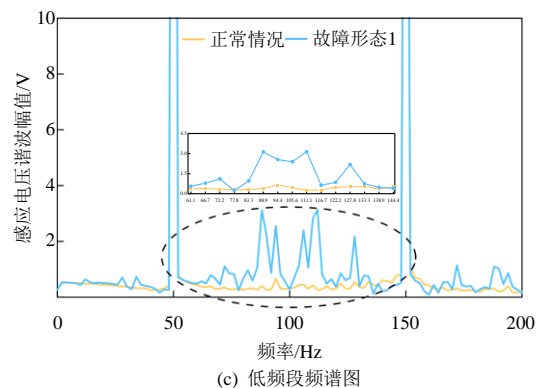
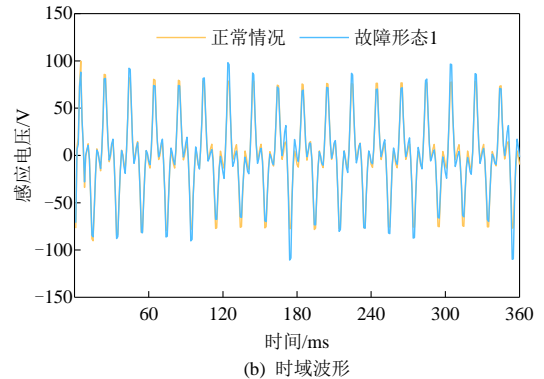
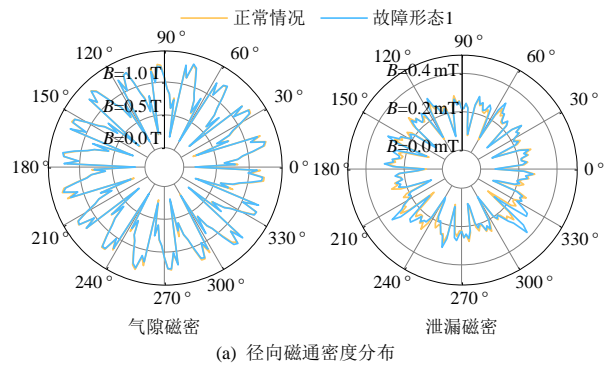
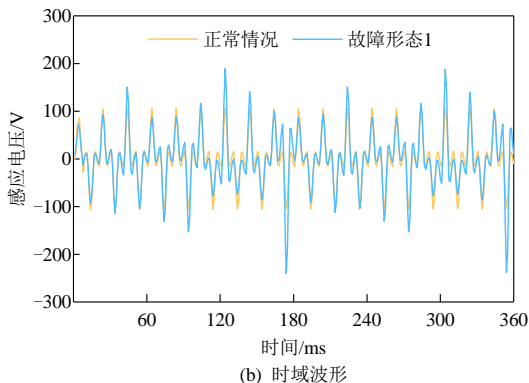
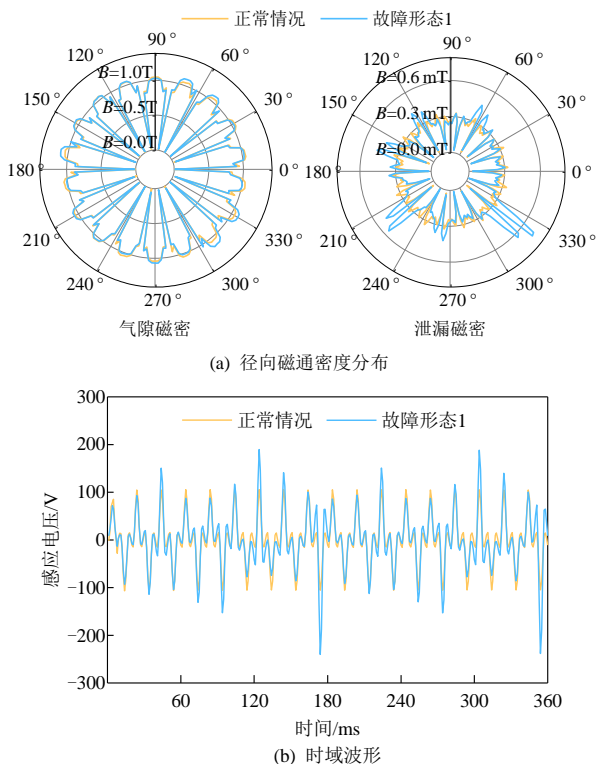


图8 满载故障形态①-磁通密度与磁场测量线圈感应电势
Fig. 8 Full load fault form ①- magnetic flux density and magnetic field measurement coil induced potential

61.1 Hz 等)的出现，在50~150 Hz 的频段内尤为显著。在水轮发电机满载下(图8)亦有类似特征。

开展故障形态②(单个磁极凹陷)的转子磁极不



圆度仿真，以评估局部缺陷对整体性能的具体影响。设置 3 个等级的故障程度，即转子单个磁极分别凹陷 2、5 和 8mm，对应表 2 中故障程度，观察分析磁场测量线圈的感应电压特征，如图 9、10 所示。

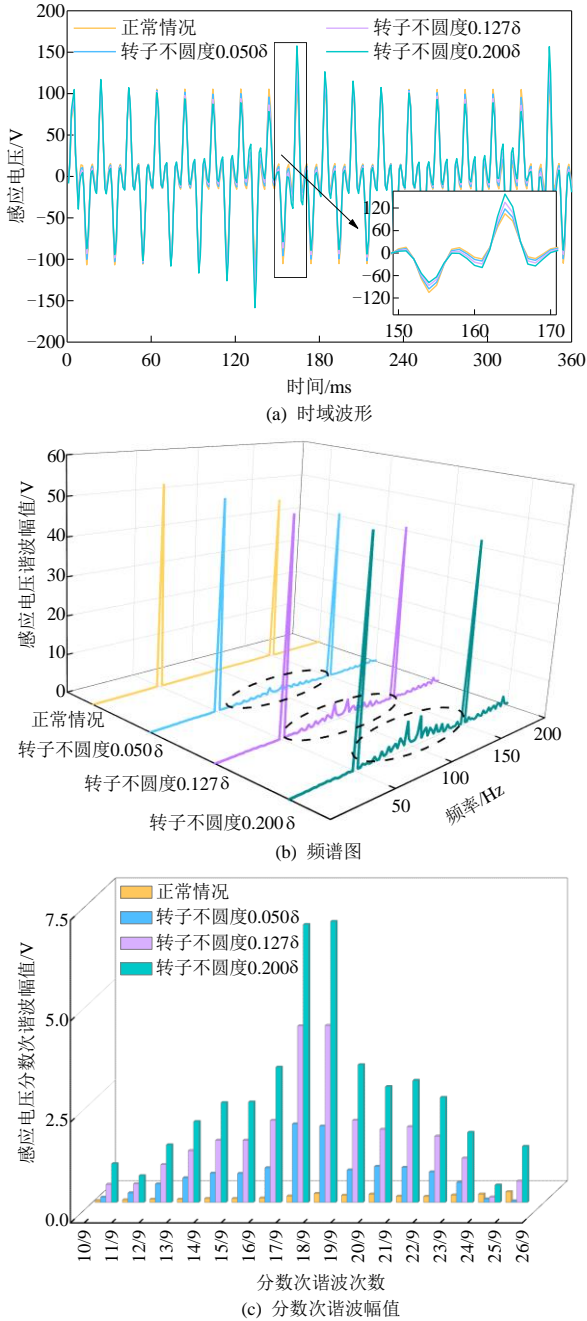


图 9 空载故障形态②-磁场测量线圈感应电势
Fig. 9 No-load fault form ②- magnetic flux density and magnetic field measurement coil induced potential

由图 9、10 可知，无论空载或满载，当凹陷的故障磁极扫过线圈时，其感应电压幅值较正常情况减小，出现了 55.6Hz(10/9 次)、61.1Hz(11/9 次)、66.7Hz(12/9 次)等分数次谐波，随着故障程度加深，分数次谐波幅值增大，在 50~150Hz 频段内谐波增长尤为明显。

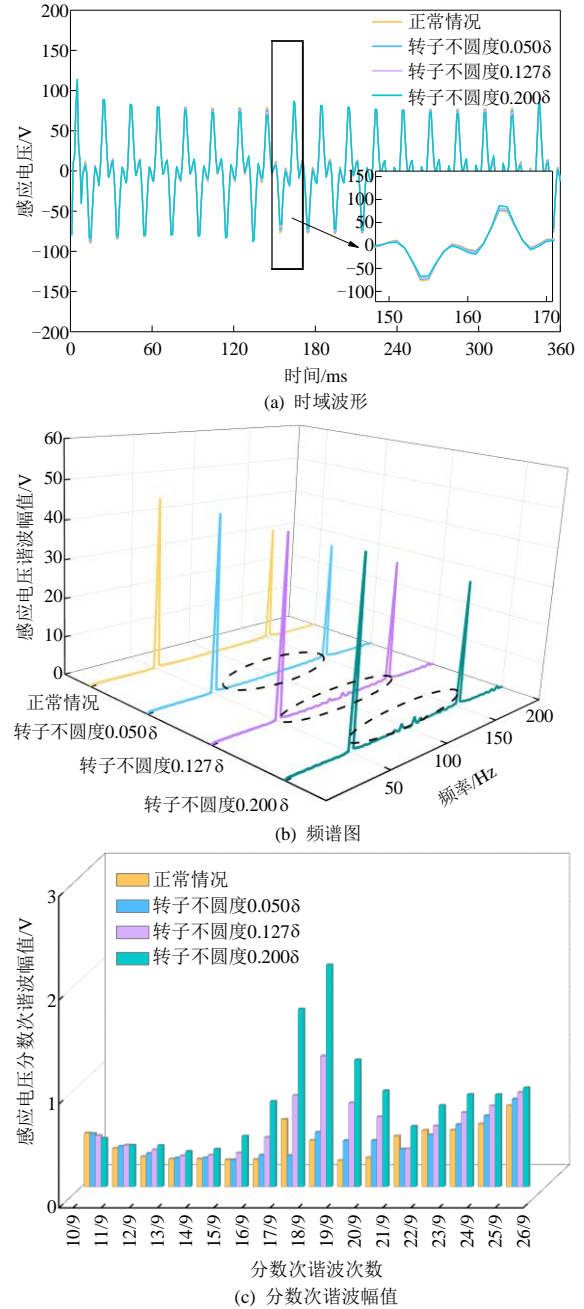


图 10 满载故障形态②-磁场测量线圈感应电势
Fig. 10 Load fault form ②- magnetic flux density and magnetic field measurement coil induced potential

取 0~200 Hz 频段内分数次谐波为特征谐波，计算总特征谐波占比，如表 3 所示。特征谐波占比

表 3 不同工况特征谐波占比

Table 3 Proportion of characteristic harmonics in different conditions

故障程度	空载		满载	
	时域最大幅值/V	ΣA%	时域最大幅值	ΣA%
正常情况	105.1	3.23	76.7	12.14
不圆度 0.05δ	95.5	16.33	73.7	12.54
不圆度 0.127δ	86.4	36.64	70.2	17.14
不圆度 0.20δ	78.8	58.28	66.8	23.71

均随转子不圆度程度的加深而增大。

3 实验验证

3.1 实验平台介绍

搭建故障模拟实验平台见图 11, 故障模拟机组为额定功率 2kW 的 4 极凸极同步发电机, 基本参数见表 4, 由 1 台直流电动机拖动。

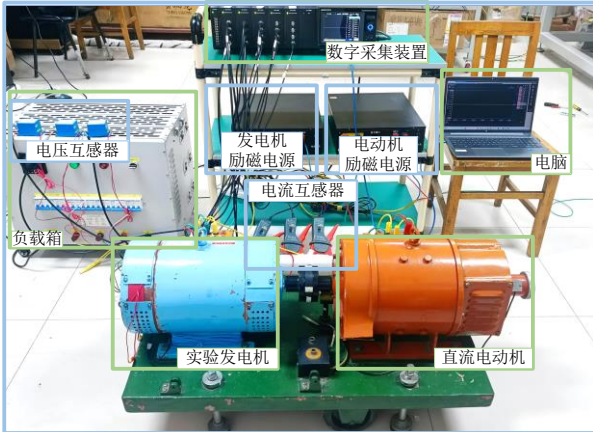


图 11 实验平台图

Fig. 11 Experimental platform diagram

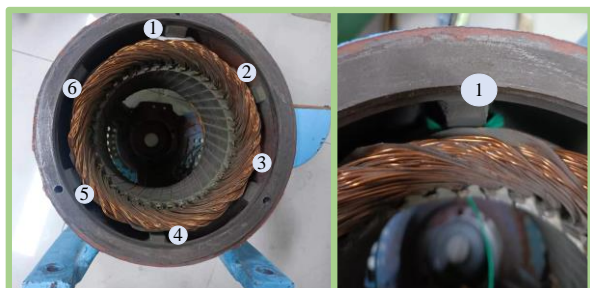
表 4 三相同步发电机基本参数

Table 4 Basic parameters of hydro-generator

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	2	额定电流/A	3.61
额定电压/V	400	额定转速/(r/min)	1500
径向气隙/mm	0.5	额定频率/Hz	50
定子内径/mm	150	极对数	2
转子磁极外径/mm	149	定子槽数	36

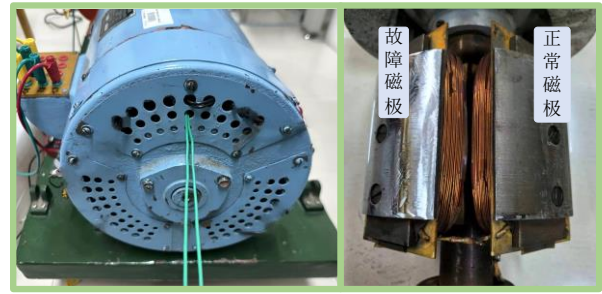
实验发电机的定子机壳内侧有 6 根定位筋, 均匀分布在圆周方向, 见图 12(a)。为了检测泄漏到定位筋上和机壳的磁通, 在 1 号定位筋上包绕 5 匝绝缘导线, 构成磁通测量线圈, 见图 12(b), 线圈从励端引出接至数据采集装置, 见图 12(c)。

实验机组各磁极制造阶段已安装完毕, 无法调整各磁极径向位置模拟转子不圆度故障。因此, 实验采用破坏性方案, 对转子某一磁极的极靴表面进行打磨(采用保护措施避免铁屑飞溅到绕组上), 制造局部磁极凹陷, 其余磁极维持不变, 见图 12(d)。



(a) 实验发电机定位筋位置

(b) 测量线圈放置位置



(c) 测量线圈引线接法

(d) 转子不圆度故障设置

图 12 实验发电机结构实物图

Fig. 12 Prototype structure physical diagram

磁极先后打磨掉 0.15 和 0.3mm 厚度, 对应转子不圆度故障程度分别为 0.3δ 与 0.6δ。每次打磨完成后, 采用配重法对转子进行动平衡, 重新装配。

3.2 实验结果分析

开展转子健康状态下的发电机实验测试, 模拟机组空载和满载状态, 获取定子电压、定子电流, 如图 13 所示。可以看出, 在转子健康状态下, 发电机电压和电流以正弦基波为主, 有效值与额定参数吻合, 电压波形中含有一些高次谐波, 与齿槽效应有关。

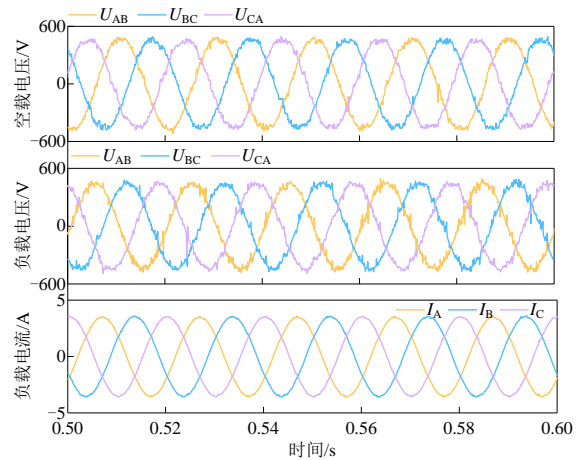


图 13 正常情况-电压、电流

Fig. 13 Time domain distribution of voltage and current in normal conditions

设置发电机转子磁极不圆度故障程度分别为 0.3δ 与 0.6δ, 进行空载与满载测试, 机端电压均调节至额定电压。图 14 为不同故障程度下的励磁电流。可以看出, 励磁电流基本稳定在 2A 左右, 随着故障程度加重, 励磁电流有所增长, 这源于故障对励磁磁场的弱化效应, 只能通过增加励磁来维持机端电压(机组带独立负载, 若机组并网则励磁电流增幅将大幅下降)。

制造转子磁极不圆度故障, 得到不同工况下磁场测量线圈感应电压, 其时域、频域分布如图 15、16 所示。取 0~300Hz 频段内($v \pm k/2$)次谐波(25、75、

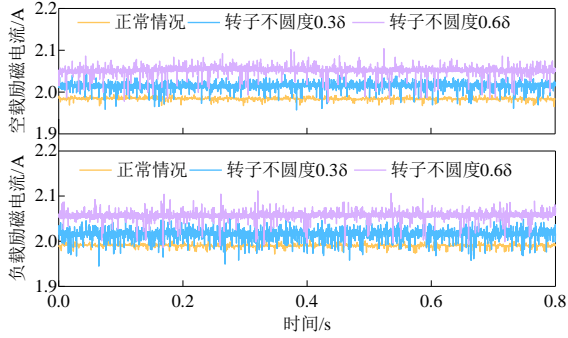


图 14 发电机励磁电流

Fig. 14 Excitation current under different fault conditions

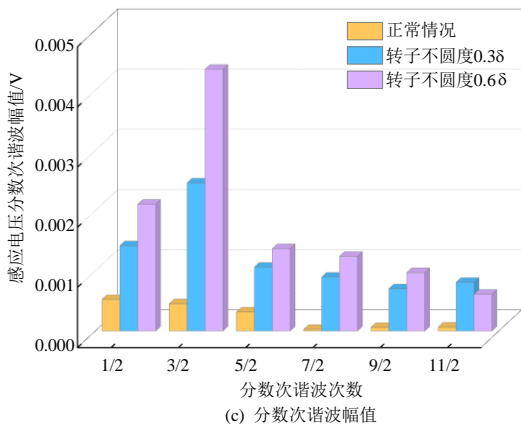
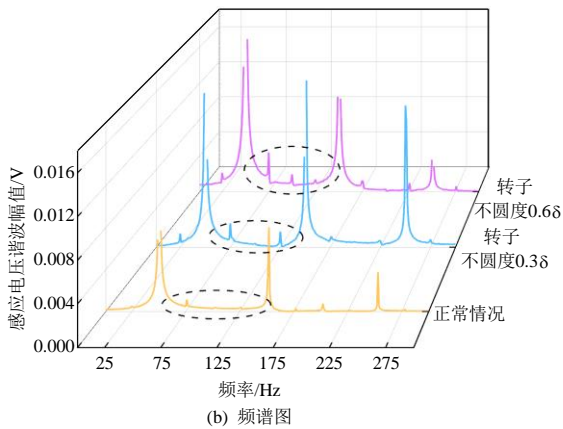
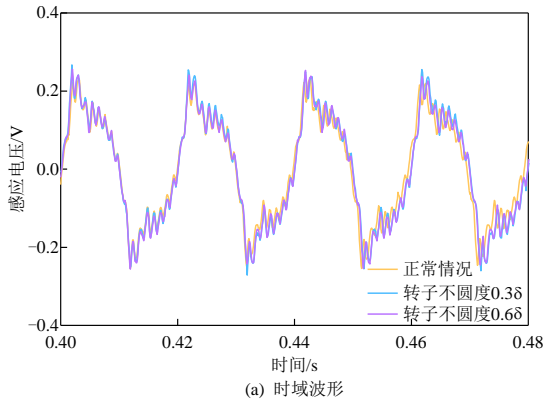


图 15 空载工况磁场测量线圈感应电压

Fig. 15 Magnetic flux density and magnetic field measurement coil induced potential in no-load

125 Hz) 为特征谐波, 计算特征谐波占比如表 5 所示。

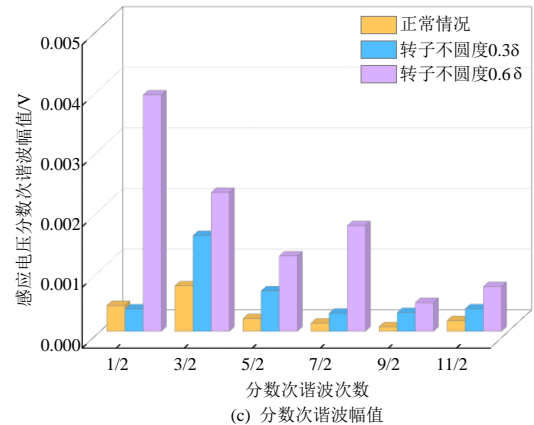
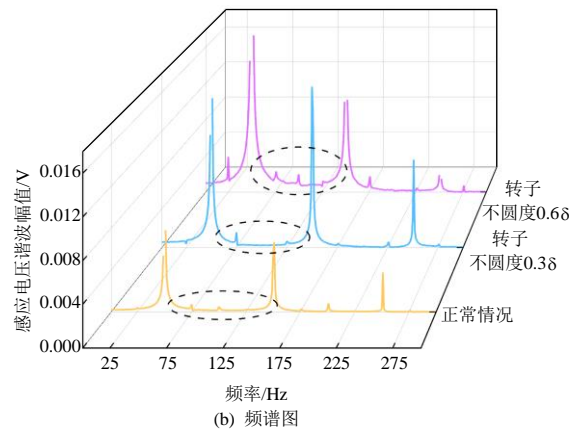
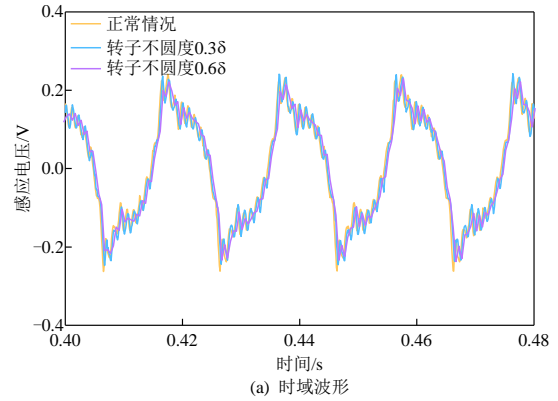


图 16 负载工况磁场测量线圈感应电压

Fig. 16 Magnetic flux density and magnetic field measurement coil induced potential in load

表 5 不同工况特征谐波

Table 5 Proportion of characteristic harmonics in different conditions

转子 磁极状态	空载情况		负载情况	
	时域最大幅值/V	∑A%	时域最大幅值/V	∑A%
正常情况	0.238	0.78	0.239	0.93
不圆度 0.3δ	0.235	3.70	0.237	1.89
不圆度 0.6δ	0.232	5.43	0.235	5.42

由图 15、16 和表 5 可知, 实验结果与仿真结果一致, 随着转子不圆度故障程度的加重, 25 Hz (1/2 次)、75 Hz (3/2 次)、125 Hz (5/2 次) 等分数次谐波呈现显著的增大趋势。转子不圆度程度与特征谐波占

比呈正相关特点,可用来进一步评估转子磁极不圆度程度。

对比仿真和实验可以看出,由于机组的极对数和同步转速差异,故障特征谐波分别为 $v \pm k/9$ 和 $v \pm k/2$ 次,表3、5均符合此规律,但数值相差较大。由于仿真机组的极对数多,特征谐波较为丰富,在50~150Hz频段内密集分布,实验电机极对数少,在低频段可以观测到25、75、125和175Hz谐波的显著增大。

4 结论

本文提出了一种新型水轮发电机转子不圆度故障在线诊断方法,通过理论分析、有限元仿真和故障模拟实验,得出以下结论:

1) 转子不圆度故障导致水轮发电机主磁场产生分数次谐波,流过定位筋的泄漏磁通可看作是气隙磁场的衰减,漏磁通中也出现分数次谐波,故障程度越深,谐波含量越高。

2) 通过将测量线圈包绕于水轮发电机的定位筋或环板,可捕捉该位置泄漏磁通信息,反映水轮发电机的转子不圆度故障。

3) 相对于侵入式检测方法,新型检测方法的传感器安装简单,不影响机组安全运行,抗干扰效果优于机外测量方式,具有安全可靠、方便精确的优点。

参考文献

- [1] 张智, 霍超, 郭尊, 等. 新型电力系统下抽水蓄能集群规划与运营关键问题综述及研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 5810-5832.
ZHANG Zhi, HUO Chao, GUO Zun, et al. Overview and research prospects of key issues in pumped storage cluster planning and operation under the new type power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 5810-5832 (in Chinese).
- [2] 樊世英. 大中型水力发电机组的安全稳定运行分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 140-148.
FAN Shiying. Analysis of stability for large and medium-sized hydro-generating unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 140-148(in Chinese).
- [3] 顾国彪, 郑小康, 阮琳. 浅谈中国未来大型水电装备技术挑战与创新[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6959-6973.
GU Guobiao, ZHENG Xiaokang, RUAN Lin. Discussion on the technical challenges and innovations of large hydropower equipment in the future in china [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6959-6973(in Chinese).
- [4] 陈光辉, 吴和静, 钟苏, 等. 水轮发电机定转子动态气隙分析研究[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 81-85.
CHEN Guanghui, WU Hejing, ZHONG Su, et al. Study on the dynamic air gap between stator and rotor of the hydro-generators[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 81-85(in Chinese).
- [5] LI Jianwei, XIAO Liangyu, TIAN Chao, et al. Cause analysis of low frequency vibration of flexible support stator frame for giant hydro generator[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(14): 3151-3156.
- [6] EHYA H, FAIZ J. Electromagnetic analysis and condition monitoring of synchronous generators[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023: 437-504.
- [7] LI Ruhai, LI Chaoshun, PENG Xuanlin, et al. Electromagnetic vibration simulation of a 250-MW large hydropower generator with rotor eccentricity and rotor deformation[J]. Energies, 2017, 10(12): 2155.
- [8] 武玉才, 范轩杰, 纪璇, 等. 水轮发电机转子不圆度诱发的定子铁心振动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 342-351.
WU Yucui, FAN Xuanjie, JI Xuan, et al. Study on vibration characteristics of stator core induced by rotor non-roundness in hydro-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 342-351(in Chinese).
- [9] 李成峰. 国内某电站巨型水轮发电机定子铁心振动的分析[J]. 电站系统工程, 2013, 29(3): 47-48.
LI Chengfeng. Analysis of vibration in stator core for large hydro turbine[J]. Power System Engineering, 2013, 29(3): 47-48(in Chinese).
- [10] 董开松. 基于气隙动态测量技术的定转子变形评价方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
DONG Kaisong. Study on the assessment methods of stator-rotor distortion based on air gap dynamic measurement[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007(in Chinese).
- [11] LEVITSKYI A S, RASSOVSKYI V L, ZAITSEV I O. A capacitive sensor with parallel complanare electrodes system for measurement of air gap in hydrogenerators [J]. Tekhnichna Elektrodynamika, 2023, 2023(3): 80-85.
- [12] FAIZAN SHAIKH M, KIM H J, LEE S B, et al. Online airgap flux based diagnosis of rotor eccentricity and field winding turn insulation faults in synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 359-366.
- [13] 王超, 李建富, 柏勇, 等. 基于磁通密度分布特征的水轮发电机低频振动评估与精确处理方法探究[J]. 水力发电, 2022, 48(11): 96-101.
WANG Chao, LI Jianfu, BAI Yong, et al. Evaluation and

- precise treatment of low-frequency vibration of hydro-generator based on magnetic flux density distribution characteristics[J]. *Water Power*, 2022, 48(11): 96-101(in Chinese).
- [14] ZAMUDIO-RAMIREZ I, OSORNIO-RIOS R A, ANTONINO-DAVIU J A, et al. Magnetic flux analysis for the condition monitoring of electric machines: a review [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(5): 2895-2908.
- [15] KEDJAR B, MERKHOUF A, AL-HADDAD K. Large synchronous machines diagnosis based on air-gap and stray fluxes-an overview[C]//2020 International Conference on Electrical Machines(ICEM). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2020.
- [16] CAPOLINO G A, ROMARY R, HÉNAO H, et al. State of the art on stray flux analysis in faulted electrical machines[C]//2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). Athens, Greece: IEEE, 2019.
- [17] GURUSAMY V, CAPOLINO G A, AKIN B, et al. Recent trends in magnetic sensors and flux-based condition monitoring of electromagnetic devices[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(4): 4668-4684.
- [18] BERNIER S, MERKHOUF A, AL-HADDAD K. Stray flux and air gap flux experimental measurement and analysis in large hydro generators[C]//2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis(WEMDCD). Newcastle upon Tyne, United Kingdom: IEEE, 2023.
- [19] EHYA H, NYSVEEN A, ANTONINO-DAVIU J A. Static, dynamic and mixed eccentricity faults detection of synchronous generators based on advanced pattern recognition algorithm[C]//2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives(SDEMPED). Dallas, TX, USA: IEEE, 2021.
- [20] EHYA H, NYSVEEN A, ANTONINO-DAVIU J A. Advanced fault detection of synchronous generators using stray magnetic field[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(11): 11675-11685.
- [21] EHYA H, NYSVEEN A, AKIN B, et al. An expeditious algorithm for identification and classification of rotor faults in salient pole synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(2): 2008-2017.
- [22] RAMIREZ-NUNEZ J A, ANTONINO-DAVIU J A, CLIMENTE-ALARCON V, et al. Evaluation of the detectability of electromechanical faults in induction motors via transient analysis of the stray flux[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 4324-4332.
- [23] SHAIKH M F, PARK J, LEE S B. A non-intrusive leakage flux based method for detecting rotor faults in the starting transient of salient pole synchronous motors[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(2): 1262-1270.
- [24] JIANG Chen, LI Sufei, HABELTLER T G. A review of condition monitoring of induction motors based on stray flux[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017.
- [25] WIAK S, DEMS M, KOMEŹA K. Recent developments of electrical drives: best papers from the international conference on electrical machines ICEM'04 [M]. Dordrecht: Springer, 2006.
- [26] EHYA H, NYSVEEN A, NILSSEN R, et al. Static and dynamic eccentricity fault diagnosis of large salient pole synchronous generators by means of external magnetic field[J]. *IET Electric Power Applications*, 2021, 15(7): 890-902.



武玉才

在线出版日期: 2025-04-07。

收稿日期: 2024-10-24。

作者简介:

武玉才(1982), 男, 博士, 教授, 研究方向为大型电气设备状态监测与故障诊断, wuyucaincepu@163.com;

刘艳泽(2001), 女, 硕士研究生, 研究方向为大型电气设备状态监测与故障诊断, liuyanzena@126.com;

白雨卉(1999), 女, 博士研究生, 研究方向为大型电气设备状态监测与故障诊断, baiyuhui99@163.com;

范轩杰(1998), 男, 高级工程师, 研究方向为大型电气设备状态监测与故障诊断, 18731301480@163.com;

叶超(1989), 男, 高级工程师, 研究方向为水电站机电设备检修及技术管理, 344285759@qq.com;

周天华(1988), 男, 高级工程师, 主要从事水电站机电设备检修及技术管理, 398516294@qq.com;

杨光勇(1976), 男, 高级工程师, 主要从事水电站机电设备检修及技术管理, 78822444@qq.com。

(编辑 陈娟, 李新洁)