核电多相环形无刷励磁机静偏心故障特征分析

王泽民[1]， 郝亮亮[1]， 刘东旭[1]， 章良健[2]， 王光[3]， 李华忠[3]
（1. 北京交通大学 电气工程学院，北京 100044；2. 浙江浙能电力股份有限公司台州发电厂，浙江 台州 318016；
3. 南京南瑞继保电气有限公司，江苏 南京 211102）

摘 要：多相环形无刷励磁系统具有良好的冗余特性，是大容量核电机组最常见的励磁形式。由于各相绕组集中分布在电机圆周的局部，偏心故障会导致各相绕组较大的不平衡，并引起振动超标和定子内部过电压。为探究静偏心故障特征，从偏心后的不平衡气隙磁导着手，通过对偏心故障后的励磁绕组与电枢绕组的相互耦合作用分析得出可量测的定子励磁电流的谐波特征。之后，对不同程度偏心故障后的电磁暂态模型进行仿真，并对仿真结果进行频域分析，电枢电流、空间磁密、励磁电流仿真结果的谐波特征均与理论分析结果吻合。最后，通过现场真机的故障励磁电流实际录波进一步验证理论分析的正确性。所提出的静偏心故障的分析方法及结论可应用于不同相数的多相环形无刷励磁机，其故障励磁电流的谐波特征为静偏心故障监测的研究提供理论依据。

关键词：多相环形无刷励磁机；静偏心；气隙磁导；故障特征；励磁电流
DOI：10.15938/j.emc.2026.02.002
中图分类号：TM341 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-449X(2026)02-0010-11

Characteristic analysis of static eccentricity fault of nuclear power multiphase annular brushless exciter

WANG Zemin[1], HAO Liangliang[1], LIU Dongxu[1], ZHANG Liangjian[2],
WANG Guang[3], LI Huazhong[3]
(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Taizhou Power Plant of Zhejiang Zheneng Power Co., Ltd., Taizhou 318016, China; 3. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Multiphase annular brushless excitation systems, with their excellent redundancy, are the most common form of excitation for high-capacity nuclear power units. Since the windings of each phase are concentrated in localized sections of the motor circumference, eccentricity faults can lead to significant imbalance among the phases, resulting in excessive vibration and internal overvoltage in the stator. To investigate the characteristics of static eccentricity faults, starting from the unbalanced air gap permeance after eccentricity, the harmonic features of the stator excitation current that can be measured were derived by analyzing the mutual coupling between the excitation winding and the armature winding after eccentricity faults. Subsequently, electromagnetic transient models with varying degrees of eccentricity faults were simulated, and the results were analyzed in the frequency domain. The harmonic characteristics observed

收稿日期：2025-06-11
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金(2024YJS051)；黑龙江省自然科学基金(ZD2024E009)
作者简介：王泽民(1999—)，男，博士研究生，研究方向为多相无刷励磁系统故障监测及其保护；
郝亮亮(1985—)，男，博士，副教授，博士生导师，研究方向为电力系统主设备故障分析及保护；
刘东旭(2002—)，男，硕士研究生，研究方向为多相无刷励磁系统故障监测及其保护；
章良健(1976—)，男，硕士，工程师，研究方向为继电保护与运行管理；
王 光(1980—)，男，硕士，研究员级高级工程师，研究方向为电气主设备继电保护和技术管理；
李华忠(1983—)，男，硕士，研究员级高级工程师，研究方向为电力主设备在线监测与故障诊断系统。
通信作者：郝亮亮

in the armature current, spatial magnetic flux density, and excitation current from the simulations align well with the theoretical analysis. Finally, the validity of the theoretical analysis was further verified through actual field recordings of faulty excitation currents from an operational machine. The analysis method and conclusion of the proposed static eccentricity fault can be applied to multiphase annular brushless exciters with different phase numbers, and the harmonic characteristics of the fault excitation current provide a theoretical basis for the research of static eccentricity fault monitoring.

Keywords: multiphase annular brushless exciter; static eccentricity; air gap magnetic permeability; fault characteristics; excitation current

0　引　言

为应对气候变化,落实“双碳”目标,核电因其独特优势成为以新能源为主体的新型电力系统的稳定基荷电源[1-3],但其安全性是公众最为关注的问题。励磁系统可靠性直接关乎机组的稳定运行,目前在运的百万千瓦级核电机组大多采用电枢绕组环形连接的多相无刷励磁系统。该励磁系统不仅在减少谐波电流方面表现出色,还在改善整流电压品质、实现故障冗余运行等方面[4-5]具有显著优势。

多相无刷励磁系统因其独特设计特点为核能发电的稳定运行提供了重要保障,但同时其结构的复杂性使其在实际运行过程中故障频发。近年来由励磁机偏心运行故障引起的事件案例不断涌现,2015 年 5 月某电厂 3 号机因转子偏心导致励磁机定子 12 点钟方向被绝缘击穿,事故导致绝缘检测仪损毁,机组停机。2018 年 5 月,某电厂#8 励磁机定子支撑板 10 颗固定螺栓有 5 颗断裂,定子支撑板与外壳贴合不再牢固,发生偏心运行故障,导致运行中励磁机外壳随负载变化产生不同程度的振动,机组被迫非计划停机。此类事故迫切需要更深入的研究和探索。因此,实现对无刷励磁机偏心运行的早期监测,可有效避免事故进一步恶化,确保大型无刷励磁发电机组的安全稳定运行,对保障发电系统的安全性具有重要意义。

目前对多相环形无刷励磁机的研究集中在电枢绕组[6]、励磁绕组[7-8]、旋转整流器[9-13]等电气故障特征与保护方案。电枢绕组和旋转整流器故障直接引起励磁机转子电枢绕组出现不同于正常运行时的电流(各相电流出现差异),进而使各相电流产生的合成电枢反应磁场发生变化。励磁绕组短路则是首先使励磁磁动势产生畸变,带来励磁磁场的变化。该励磁磁场将影响各相电枢绕组的电流,进而影响与励磁绕组切割的旋转磁场,在励磁绕组上感应出故障谐波电流。但属于机械类的偏心故障机理完全不同于电气故障,因此以上研究均无法直接用于故障分析和特征提取。

关于电机偏心故障的研究和检测方法,已有较多专家学者开展了相关的研究,文献[14]重点介绍了如何利用电流信号中的谐波成分来识别不同类型的故障。文献[15]探讨了不同偏心故障条件下气隙磁通的特征变化,并通过监测电机气隙磁通进行了实验验证。文献[16]介绍了如何通过振动频谱中的特征成分进行故障诊断,利用振动传感器监测电机运行时的振动信号,通过分析振动信号中的特征频率和模式来识别偏心故障。文献[17]分析了电机在偏心故障下的声学噪声与振动特性,探讨了气隙磁场不对称引发异常噪声的机理,并建立了估算模型验证了利用噪声信号识别偏心故障的可行性。文献[18]采用电机电磁暂态模型模拟不同运行条件下的偏心故障,研究了故障下的电磁场详细分布。文献[19]介绍了常见的机器学习算法在电机故障检测中的应用,利用机器学习算法训练模型,识别电机正常和故障状态下的特征,适应于不同类型的电机。文献[20]通过在电机外部安装磁通传感器,联合监测杂散磁通与定子电流的频谱变化,检测偏心故障,并对比分析了两种信号在故障诊断中的灵敏度,验证了外部磁通检测法能够有效补充传统电流分析的不足,提供准确的故障信息。但多相环形无刷励磁机电枢采用多相对称绕组首尾相接的波绕组形式,相较于三相及其衍生的无刷励磁机,并不存在中性点和并联分支结构,因此采用零序电流横差保护[21-22]、裂相横差保护[23-24]、不完全纵差保护[25]将完全失效。进一步地,无刷励磁结构也使得定子励磁电流成为唯一可量测量。因此在故障特征

选取方面,传统较为直接的偏心故障特征(例如分支电流、电压)均无法获取,仅能通过励磁电流获取特征。因此以上偏心故障的研究和检测方法无法推广至多相环形无刷励磁机。

针对上述问题,本文以多相环形无刷励磁机为研究对象,从励磁机静偏心故障运行下的气隙磁导变化入手,进一步分析故障下定子、转子的磁动势性质及其在气隙磁场中的相互作用,得到唯一可监测量励磁电流偏心故障下的谐波特征。最后,通过仿真与实验结果验证理论分析的正确性。本文所提方法适用于任意核电多相环形无刷励磁机的静偏心故障的特征分析,可应用到核电多相环形无刷励磁机偏心故障的监测方法的进一步研究中。

1 多相环形无刷励磁机系统结构

多相环形无刷励磁系统的结构如图 1 所示,无刷的特点体现在励磁机为外转子的转枢式结构,励磁绕组为静止部分,电枢绕组为旋转部分。这一结构决定了定子励磁电流是实际运行中可被直接监测的电气特征。电枢侧的多相绕组为以某电角度差在空间分布的分数槽波绕组,各相首尾顺次相接后,首端引入到多相不控整流器。电枢绕组与整流器同轴旋转为直流侧的主发电机励磁绕组供电。根据主发电机的励磁容量,实际运行中的无刷励磁机常采用的极相形式有 5 对极 11 相、11 对极 39 相、13 对极 46 相等形式。

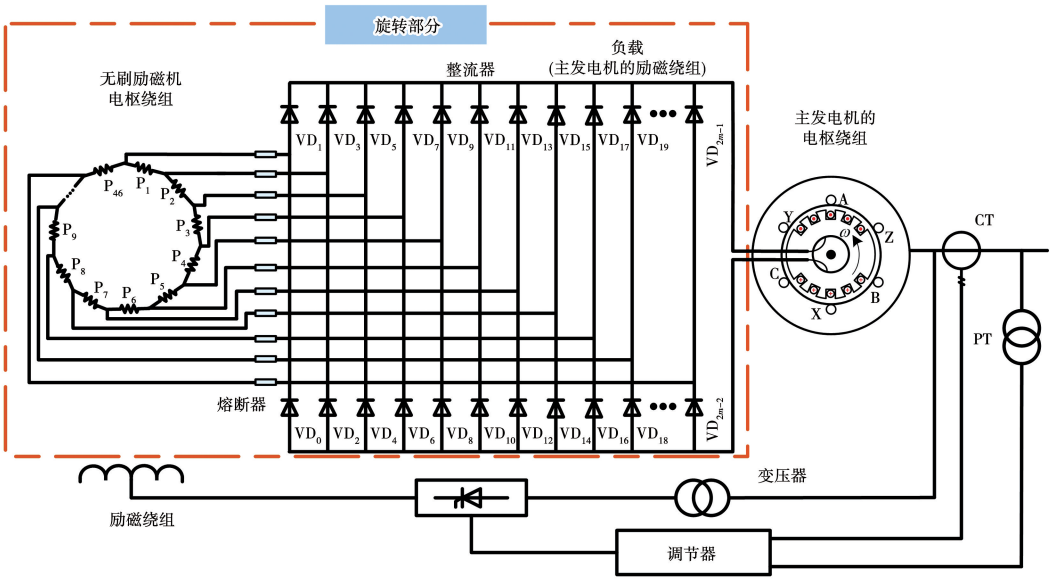

图 1 多相环形无刷励磁机系统示意图

Fig. 1 Multiphase annular brushless exciter system sketch

2 无刷励磁机静偏心故障特征分析

2.1 静偏心时的气隙磁导

多相无刷励磁机运行时的电磁关系与凸极同步电机类似,气隙长度沿电机定子圆周方向变化周期为 $2\pi/P$,其中 P 为电机极对数。正常运行时励磁机内部的气隙磁导仅含有直流及偶数次谐波分量,气隙磁导系数 λ 可表示为

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2} + \sum_{l_0=1,2,\cdots}^{\infty} \lambda_{2l_0}\cos(2l_0\alpha)。 \tag{1}$$

式中:$\lambda_0/2$ 为磁导系数的常数项;$2l_0$ 为磁导系数的谐波次数;λ_{2l_0} 为 $2l_0$ 次谐波磁导的幅值;α 为沿电机定子圆周方向的电角度。

当励磁机发生静偏心故障后,其气隙变化如图 2所示。图中:δ_s 为相对偏心值;g_0 为径向气隙长度的平均值;R_s 为内部定子半径;R_r 为外部电枢转子半径;α_m 表示气隙周向位置的机械角。

由图 2 可知,任意位置下气隙长度 $g(\alpha_m)$ 随周向圆周角的变化关系可表示为

$$g(\alpha_m) = OB - OA = R_r + g_0\delta_s\cos\alpha_m - \sqrt{(g_0\delta_s\cos\alpha_m)^2 - g_0^2\delta_s^2 + R_s^2}。 \tag{2}$$

由于 R_s 远远大于 $g_0\delta_s$,并且径向气隙平均值长度小于 R_s,气隙长度进一步可表示为

$$g(\alpha_m) \approx R_r + g_0\delta_s\cos\alpha_m - R_s = g_0(1 + \delta_s\cos\alpha_m)。 \tag{3}$$

结合气隙长度,将气隙磁导进行幂级数展开并忽略高次谐波,静偏心故障下气隙磁导系数 λ' 可表示为

$$\lambda' = \frac{\mu_0}{g(\alpha_m)} = \frac{\mu_0}{g_0(1+\delta_s\cos\alpha_m)} \approx \lambda(1-\delta_s\cos\alpha_m+\delta_s^2\cos^2\alpha_m-\cdots) = \lambda[C_0-C_1\cos\alpha_m+C_2\cos(2\alpha_m)-\cdots] = \lambda\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n C_n\cos\frac{n\alpha}{P}。 \tag{4}$$

式中:μ_0 为真空磁导率,值为 $4\pi\times10^{-7}$ H/m;为简化公式表达,此处的 $C_n(n\in N)$ 表示降幂后各余弦项的系数。由式(4)可以看出偏心运行状态下的气隙磁导本质上是正常运行下气隙磁导叠加了 n/P 次谐波。

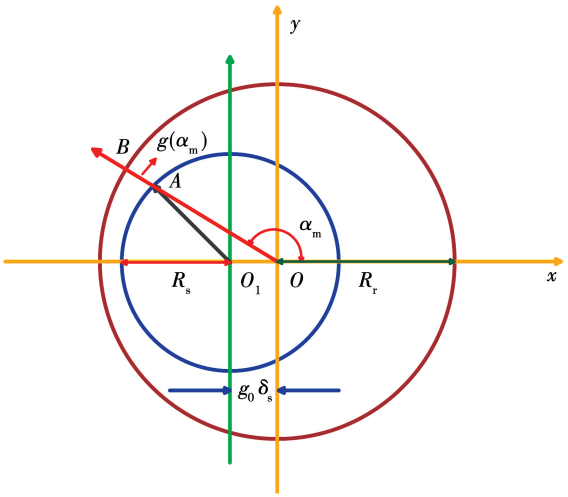

图 2　静态偏心故障示意图

Fig. 2　Static eccentricity fault sketch

2.2　定子产生的励磁磁场分析

无刷励磁机定子励磁绕组仅在相邻极下因绕组方向相反而呈现相反的极性。这种磁动势在空间上以每对极为周期重复出现,因此仅含有基波及 3、5 等奇数次空间谐波分量。定子励磁电流在空间中产生的谐波磁动势可表示为

$$f_{fd,j} = F_j\cos(j\alpha)。 \tag{5}$$

式中:j 为谐波磁动势次数 $(j=1,3,5,\cdots)$;F_j 为 j 次谐波磁动势幅值。

根据式(1)、式(4)及式(5)得定子励磁电流产生的 j 次空间谐波磁势在气隙中产生的磁通密度为

$$B = F_j\sum_{l=0}^{\infty}\frac{\lambda_{2l}}{2}\cos(j\pm2l)\alpha\cdot\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n C_n\cos\frac{n\alpha}{P} = B_j\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\lambda_{2l}}{2}\cos(j\pm2l\pm n/P)\alpha。 \tag{6}$$

式中:l 为气隙磁导的次数;B_j 为 j 次谐波磁通密度幅值。因此故障后定子励磁电流产生的气隙磁场次数为 $j\pm2l\pm n/P$,即奇数次及其附近 $1/P$ 的整数倍次谐波磁场。

2.3　转子产生的电枢反应磁场分析

励磁磁场故障引发的各谐波分量磁场均呈现与电枢绕组同步速的相对运动。奇数次及其附近 $1/P$ 的整数倍次谐波磁场,在电枢绕组中会产生相应的奇数次及其附近 $1/P$ 的整数倍次的谐波电流。第 k 相电枢绕组的 $\mu/P(\mu=(j\pm2l)P\pm n)$ 次谐波电流可表示为

$$i_{k,\mu/P} = \sqrt{2}I_{\mu/P}\cos\left\{\frac{\mu}{P}\left[\omega t-(k-1)\frac{2Py\pi}{m}\right]\right\}。 \tag{7}$$

式中:ω 为电气角频率;m 为励磁机电枢绕组相数;$I_{\mu/P}$ 为 μ/P 次谐波电流有效值;$2Py\pi/m$ 为相邻两相电枢绕组电角度差。

同理,对一相电枢绕组电流产生的空间磁动势进行傅里叶分解,同样会产生分数次和整数次的空间谐波磁动势,第 k 相电枢绕组的 μ/P 次谐波电流产生的 $v/P(v=1,2,3,\cdots)$ 次空间谐波磁势可以表示为

$$f_{k,\mu/P,v/P} = F_{\mu/P,v/P}\frac{i_{k,\mu/P}}{\sqrt{2}I_{\mu/P}}\times\cos\left\{\frac{v}{P}\left[\gamma-(k-1)\frac{2Py\pi}{m}\right]\right\}。 \tag{8}$$

将电枢电流即式(7)代入式(8)得

$$f_{k,\mu/P,v/P} = F_{\mu/P,v/P}\cos\left\{\frac{v}{P}\left[\gamma-(k-1)\frac{2Py\pi}{m}\right]\right\}\times\cos\left\{\frac{\mu}{P}\left[\omega t-(k-1)\frac{2Py\pi}{m}\right]\right\}。 \tag{9}$$

式中:$\gamma=\alpha+\omega t$ 为转子空间坐标;$F_{\mu/P,v/P}$ 为每相绕组谐波磁势幅值。

各相绕组产生的磁势均为脉振磁势,将其分解为正转磁势 $f^+_{k,\mu/P,v/P}$ 与反转磁势 $f^-_{k,\mu/P,v/P}$ 可表示为:

$$f^+_{k,\mu/P,v/P} = \frac{1}{2}F_{\mu/P,v/P}\times\sum_{k=1}^{m}\cos\left[\frac{\mu}{P}\omega t-\frac{v}{P}\gamma-(k-1)\frac{\mu-v}{P}\frac{2Py\pi}{m}\right]; \tag{10}$$

$$f^-_{k,\mu/P,v/P} = \frac{1}{2}F_{\mu/P,v/P}\times\sum_{k=1}^{m}\cos\left[\frac{\mu}{P}\omega t+\frac{v}{P}\gamma-(k-1)\frac{\mu+v}{P}\frac{2Py\pi}{m}\right]。 \tag{11}$$

进一步地,单相电枢绕组产生的正转磁势与反

转磁势幅值可表示为：

$$F^{+}_{v/P,\Sigma}=\frac{1}{2}F_{\mu/P,v/P}\frac{\sin[\gamma(\mu-v)\pi]}{m\sin\left[\frac{\gamma(\mu-v)\pi}{m}\right]};\quad(12)$$

$$F^{-}_{v/P,\Sigma}=\frac{1}{2}F_{\mu/P,v/P}\frac{\sin[\gamma(\mu+v)\pi]}{m\sin\left[\frac{\gamma(\mu+v)\pi}{m}\right]}。\quad(13)$$

由式(12)可知，当且仅当 $v=\mu-mn_1(n_1\in N)$ 时，$F^{+}_{v/P,\Sigma}$ 才不为0，电枢反应中仅存在 $\mu-mn_1$ 次正转分量。同理，当且仅当 $v=mn_2-\mu(n_2\in N)$ 时，$F^{-}_{v/P,\Sigma}$ 才不为0，电枢反应中只存在 $mn_2-\mu$ 次反转分量。

电枢反应合成磁动势会在偏心故障后的不均匀气隙中建立形成电枢反应合成磁场，电枢反应合成磁动势与偏心后的故障气隙磁导相乘可以得出电枢反应的合成磁场。以电枢合成磁场的正转分量推导为例，电枢反应合成磁动势在静偏心故障后所产生的不均匀气隙中感应出的电枢反应合成磁场通过式(4)、式(10)及式(12)可得

$$B^{+}_{\Sigma}(\alpha,\omega t)=F^{+}_{v/P,\Sigma}\cos\left(\frac{\mu}{P}\omega t-\frac{v}{P}\gamma\right)\times\lambda'=B^{+}_{v/P,\Sigma}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{\frac{\lambda_{2l}}{2}\times\cos\left[\frac{\mu-v}{P}\omega t-\left(\frac{v}{P}\pm2l\pm\frac{n}{P}\right)\alpha\right]\right\}。\quad(14)$$

式中 $B^{+}_{v/P,\Sigma}$ 为正转磁场强度幅值。对于电枢合成磁场的反转分量，可以通过式(4)、式(11)及式(13)得出

$$B^{-}_{\Sigma}(\alpha,\omega t)=B^{-}_{v/P,\Sigma}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{\frac{\lambda_{2l}}{2}\times\cos\left[\frac{\mu+v}{P}\omega t-\left(\frac{v}{P}\pm2l\pm\frac{n}{P}\right)\alpha\right]\right\}。\quad(15)$$

式中 $B^{-}_{v/P,\Sigma}$ 为反转磁场强度幅值。由式(14)与式(15)的推导结果可得，电枢电流产生的 v/P 次谐波合成磁动势会在气隙中建立 $(v\pm n)/P+2l$ 次的正转和反转磁场，同时也会建立 $(v\pm n)/P-2l$ 次的正转和反转磁场。

2.4 定子励磁电流谐波故障特征分析

当励磁机发生静偏心故障时，需进一步考虑 v/P 次电枢反应合成磁动势在气隙中建立的气隙谐波磁场在励磁绕组上感应电动势的情况。$(v\pm n)/P+2l$ 次电枢反应磁场的极对数为 $(v\pm n)/P+2l$，其正转磁场相对定子转速为 $(\mu-v)/(v\pm n+2lP)$ 倍同步转速，会在定子绕组中感应出 $(\mu-v)/P$ 倍基频的电动势，即 mn_1/P 倍基频的电动势；其反转磁场相对定子转速为 $(\mu+v)/(v\pm n+2lP)$ 倍同步转速，会在定子绕组中感应出 $(\mu+v)/P$ 倍基频的电动势，即 mn_2/P 倍基频的电动势。同理，$(v\pm n)/P-2l$ 次的正转和反转电枢反应磁场也会在定子绕组中分别感应出 mn_1/P 和 mn_2/P 倍基频的电动势。因此，多相无刷励磁机偏心故障时励磁电流中除直流分量外主要存在 m/P 整数倍次的谐波电流。

由于故障而产生的 m/P 整数倍次励磁谐波电流也将进一步通过影响励磁磁场、电枢绕组再次产生励磁谐波电流。mn_3/P 次偏心谐波励磁电流产生的 j 次励磁磁动势可以表示为

$$f_{j,mn_3/P}(\alpha,\omega t)=i_{mn_3/P}\cos(j\alpha)=\sqrt{2}I_{mn_3/P}\cos\left(\frac{mn_2}{P}\omega t\right)\cos(j\alpha)。\quad(16)$$

式中：$i_{mn_3/P}$ 表示 mn_3/P 次定子谐波电流；$I_{mn_3/P}$ 表示 mn_3/P 次定子谐波电流有效值。

由式(4)、式(16)可得 mn_3/P 次偏心谐波励磁电流在气隙中建立的谐波磁场为

$$B_{mn_3/P}(\alpha,\omega t)=f_{j,mn_3/P}(\alpha,\omega t)\times\lambda'=\sqrt{2}I_{mn_3/P}\cos\left(\frac{mn_3}{P}\omega t\right)\times\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\cos\left[\left(j\pm2l\pm\frac{n}{P}\right)\alpha\right]。\quad(17)$$

可知该磁场为脉振磁场，可分解为正转及反转分量，即 $j\pm2l\pm n/P$ 次的正转和反转磁场。以正转磁场为例，$j\pm2l\pm n/P$ 次磁场的极对数为 $j\pm2l\pm n/P$，转速为 $mn_3/[(j\pm2l)P\pm n]$ 倍同步转速，相对转子转速为 $mn_3/[(j\pm2l)P\pm n]\pm1$ 倍同步速，在电枢绕组上感应出 $(mn_3\pm1)/P\pm j\pm2l$ 倍基频的电动势。因此 mn_3/P 次谐波励磁电流在故障后的气隙中建立的谐波磁场会在励磁机电枢绕组中感应出奇数次及其附近的 $1/P$ 整数倍次谐波电流。

励磁机电枢绕组中的电流次数与电枢反应合成磁势次数仍然满足 $\mu-v=mn_1$（正转分量）和 $\mu+v=mn_2$（反转分量）。因此电枢反应合成磁动势在定子励磁绕组上感应的励磁谐波电流依然为 mn_3/P 次谐波。图3描述了本章一系列的分析流程，整个过程形成了一条完整的闭环分析链。

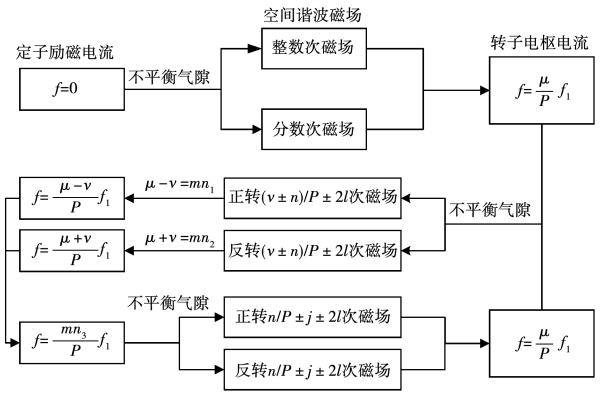

图 3　多相环形无刷励磁机静偏心故障时定转子间各频率电流相互感应关系

Fig. 3　Induction relationship of current at different frequencies between stator and rotor during static eccentricity fault of multiphase annular brushless exciter

3　仿真验证

选取某 11 相无刷励磁动模样机为研究对象开展相关验证。为验证静偏心下故障特征分析的正确性,按照动模样机的百分百尺寸搭建了静偏心故障有限元仿真模型,模型的转子与定子的基本参数分别如表 1、表 2 所示,转速设置为 960 r/min,则电枢感应电势基波频率为 80 Hz。在样机不同程度偏心故障运行下对电枢电流、空间磁密、励磁电流谐波进行分析并验证理论结果。

表 1　多相无刷励磁机转子仿真模型基本参数

Table 1　Parameters of rotor simulation model for multiphase brushless exciter

参数	数值	参数	数值
极对数	5	转子铁心外径/mm	227
并联支路数	1	极身宽/mm	30
励磁绕组每极匝数	90	极身高/mm	38
励磁绕组电阻/Ω	4.65	极靴高/mm	6
气隙尺寸/mm	1.5	极靴宽/mm	50

表 2　多相无刷励磁机定子仿真模型基本参数

Table 2　Parameters of stator simulation model for multiphase brushless exciter

参数	数值	参数	数值
定子槽数	77	铁材料	DW310_35
定子外直径/mm	327	定子槽尺寸 h_{s0}/mm	0.5
定子内直径/mm	230	定子槽尺寸 h_{s1}/mm	1.5
线圈类型	双层叠绕组	定子槽尺寸 h_{s2}/mm	21
每槽导体数	14	定子槽尺寸 b_{s0}/mm	2.5
每导体匝数	1	定子槽尺寸 b_{s1}/mm	4.8
并联支路数	1	定子槽尺寸 b_{s2}/mm	6.5

3.1　电枢电流谐波特征验证

将仿真模型转子设置为不同程度的径向静偏心位移,正常运行与 5 种偏心状态下的第一相电枢电流对比如图 4 所示。为进一步对比偏心故障前后电枢电流谐波变化情况,图 5 选取了偏心 1.25 mm 工况与正常运行的电枢电流进行对比。

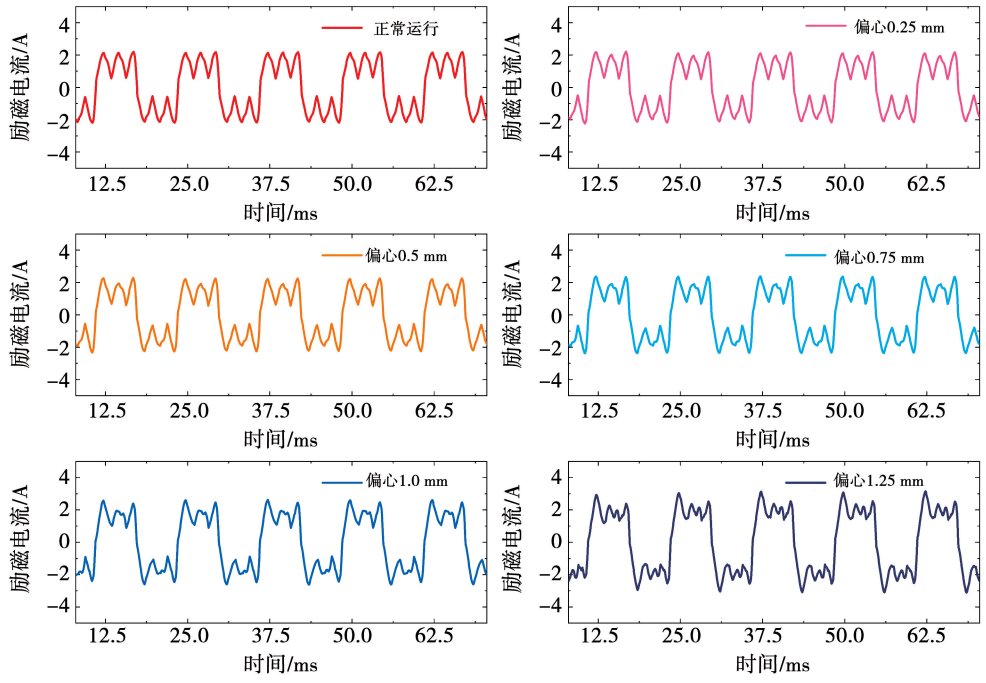

图 4　不同偏心程度下电枢电流对比

Fig. 4　Comparison of armature current under different degrees of eccentricity

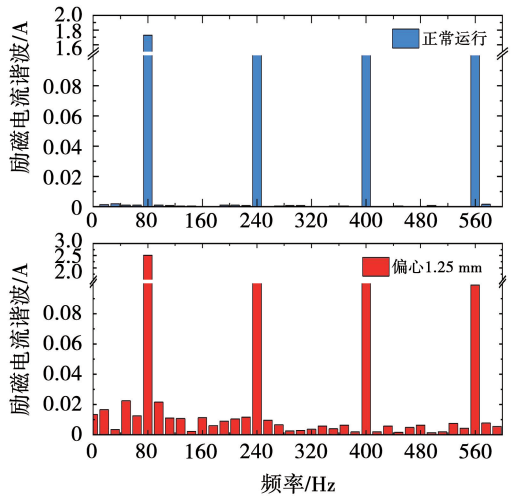

图 5 偏心故障前后电枢电流频谱对比

Fig. 5 Comparison of armature current spectra before and after eccentricity fault

由图 4 可知,静偏心故障下的电枢电流随着偏心程度增大逐渐畸变,谐波含量也逐渐增大。由图 5可知,偏心故障后的电枢电流对比正常运行明显感应出各次谐波,除了都含有奇次谐波分量外,故障后产生了奇次谐波附近 1/P 的整数倍次谐波分量。

表 3 为故障前后不同程度偏心运行下的 1 次与 3 次谐波及其附近的 1/5 次谐波幅值,与理论分析中静偏心故障下的电枢电流谐波特征一致,同时各次谐波幅值随着偏心程度增大而增大。

表 3 不同偏心位移故障时的电枢电流谐波

Table 3 Harmonic current of armature under different eccentricity distance faults

偏心位移/mm	电枢电流谐波幅值/A					
	4/5 次	1 次	6/5 次	14/5 次	3 次	16/5 次
0	0	1.727	0	0	0.634	0
0.25	0.001	1.761	0.001	0.001	0.683	0.001
0.50	0.002	1.826	0.001	0	0.732	0
0.75	0.001	1.941	0.002	0.001	0.783	0.001
1.00	0.001	2.162	0.006	0.003	0.863	0.001
1.25	0.013	2.514	0.022	0.012	0.975	0.010

3.2 空间磁密特征验证

偏心运行下,气隙在偏心方向减小,其磁通密度最大,反之故障相对方向的气隙会更大,磁通密度最小。正常运行与 5 种偏心程度运行下的空间磁密云图的仿真结果对比如图 6 所示。

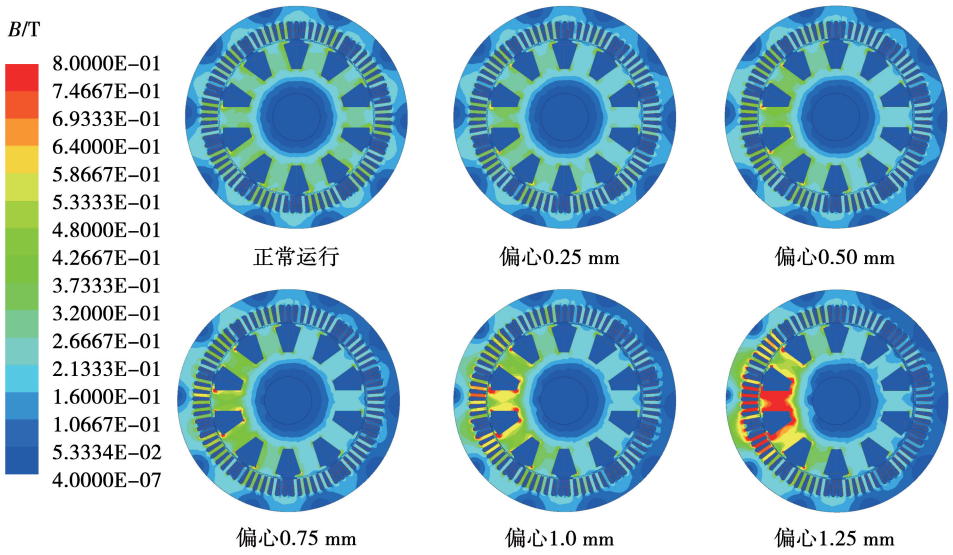

图 6 不同偏心程度空间磁密对比

Fig. 6 Comparison of spatial magnetic density under different degrees of eccentricity

在同一磁密尺度下,从图 6 中可以明显看到随着偏心程度的增大,电机偏心部分颜色逐渐加深,磁密幅值逐渐增加。不同运行状态下的气隙磁密的幅值波形如图 7 所示。

图 7 中圆周外的角度坐标为机械角度,径向为气隙磁密的幅值。由于电机的转子为 10 极,可以观察到磁密波形存在与之对应的峰值。随着偏心位移的增加,图中偏心部分的气隙磁密幅值逐渐增大,与图 6 的磁密云图所呈现的结果相同,也与理论分析的结果一致。

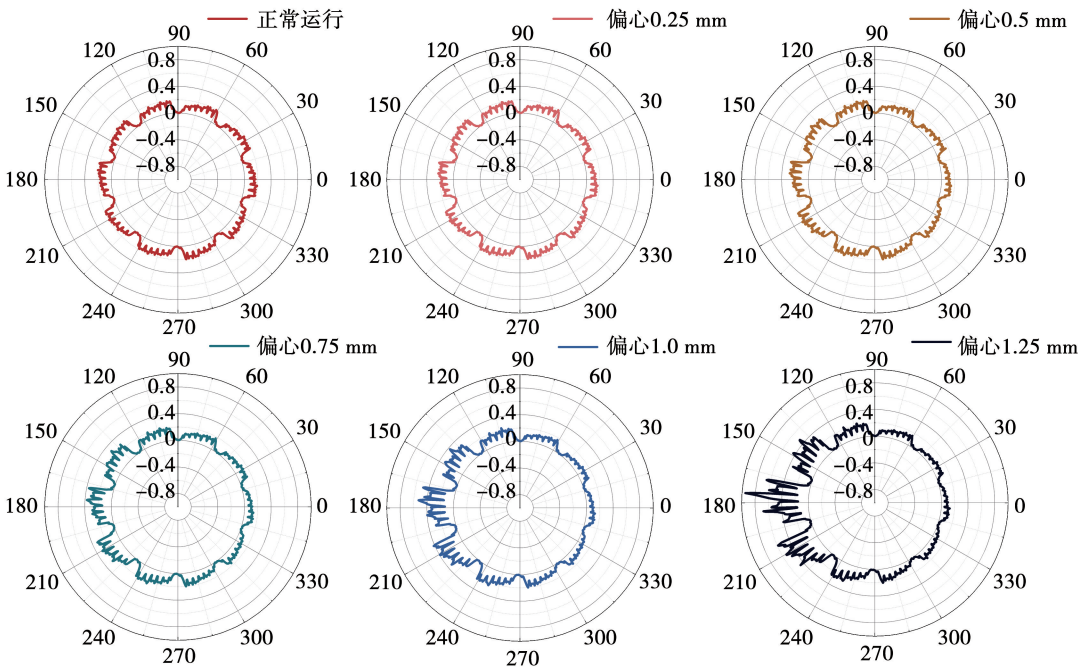

图 7　不同偏心程度下气隙磁密幅值对比

Fig. 7　Comparison of air gap magnetic flux density amplitude waveforms under different degrees of eccentricity

进一步对不同偏心下气隙磁密进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT),其结果如图 8 所示。表 4 为不同偏心情况下基波及其周围的 1/P 整数次倍谐波与正常运行时的对比。

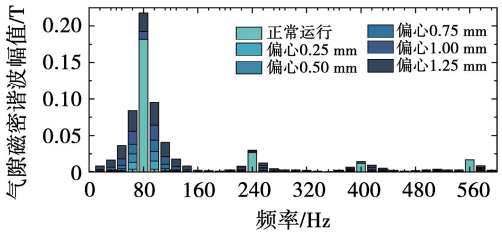

图 8　不同偏心程度下气隙磁密 FFT 对比

Fig. 8　Comparison of FFT for air gap magnetic density under different degrees of eccentricity

表 4　不同偏心运行时的气隙磁密部分谐波对比

Table 4　Comparison of harmonics in the air gap magnetic density during different eccentricity operations

偏心位移/mm	气隙磁密谐波幅值/T				
	3/5 次	4/5 次	1 次	6/5 次	7/5 次
0	0.001	0.004	0.182	0.004	0.001
0.25	0.002	0.013	0.165	0.015	0.002
0.50	0.005	0.025	0.170	0.028	0.005
0.75	0.009	0.038	0.178	0.044	0.010
1.00	0.018	0.056	0.193	0.064	0.021
1.25	0.036	0.084	0.218	0.095	0.041

由图 8 和表 4 可知,励磁机发生静偏心故障后,气隙磁密中出现奇数次谐波及其附近的 1/P 的整数倍次谐波等特征,且与偏心程度成正比,与理论分析的结果一致。

3.3　励磁电流谐波特征验证

不同的偏心程度下的一个机械周期(62.5 ms)励磁电流波形如图 9 所示。

由图 9 可知,随着偏心程度的增加,励磁电流谐波分量随之增大,波形振幅逐渐增大。为进一步直观对比,图 10 选取了偏心 1.25 mm 工况的励磁电流 FFT 与正常运行下的励磁电流 FFT 进行对比。

由图 10 可知,偏心故障后的励磁电流出现了明显的 m/P 的整数倍次(即 176、352、528 Hz)的谐波电流,这与本文第 2 章的理论分析结论一致。

为进一步研究偏心故障励磁电流的谐波特征,对正常运行与 5 种偏心程度工况的励磁电流进行 FFT,如表 5 所示。

由表 5 中的数据可知,电机偏心故障前后的直流分量基本与正常运行状态一致,根据偏心程度的增加,m/P 及其整倍数次谐波分量逐渐增加,其中 m/P 次的谐波变化幅度尤为明显。图 11 展示了不同偏心程度下励磁电流 m/P 及其整数倍次谐波。

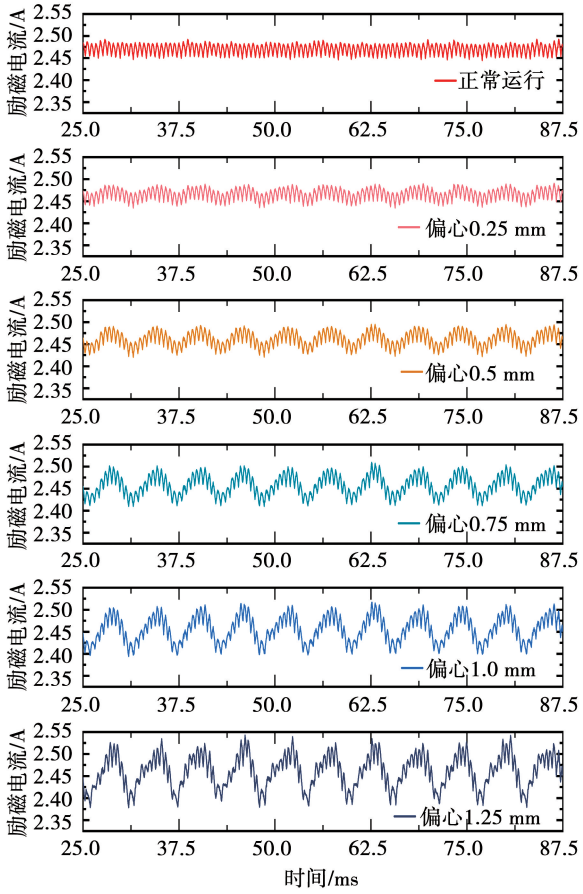

图 9 不同偏心程度下励磁电流对比

Fig. 9 Comparison of excitation current under different degrees of eccentricity

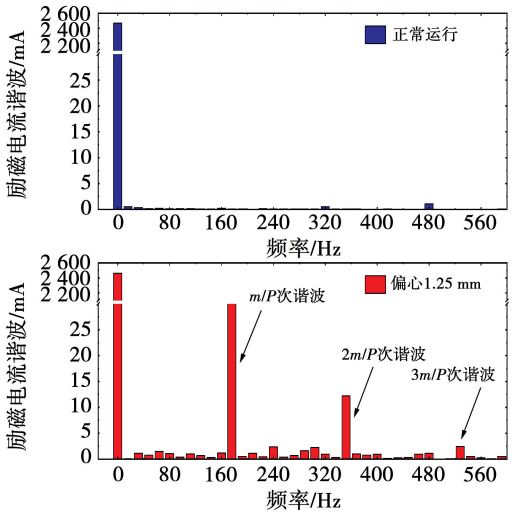

图 10 正常运行与偏心 1.25 mm 励磁电流 FFT 对比

Fig. 10 Comparison of FFT of excitation current between normal operation and eccentricity of 1.25 mm

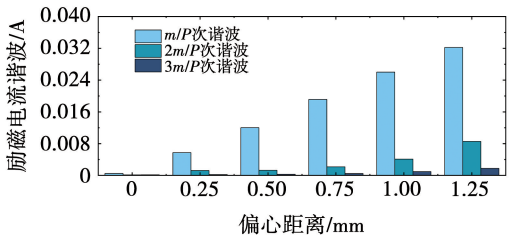

图 11 不同偏心程度下励磁电流特征谐波对比

Fig. 11 Comparison of excitation current characteristic harmonics under different degrees of eccentricity

表 5 不同偏心程度下的励磁电流谐波

Table 5 Harmonic of excitation current under different degrees of eccentricity

偏心位移/mm	励磁电流谐波幅值/A									
	直流	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次	m/P 次	$2m/P$ 次	$3m/P$ 次
0	2.471	0	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0
0.25	2.466	0	0	0	0.001	0	0.001	0.006	0.001	0
0.50	2.461	0	0	0	0	0	0.001	0.012	0.001	0
0.75	2.458	0	0	0.001	0	0	0.001	0.019	0.002	0
1.00	2.456	0	0	0.002	0.001	0	0.001	0.026	0.004	0.001
1.25	2.460	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.032	0.009	0.002

由图 11 的对比分析可知，正常运行下的 m/P 的整数倍次的谐波励磁电流近乎为 0，随着偏心程度越大，其励磁电流的 m/P 的整数倍次的谐波也逐渐增大。

4 实际机组故障录波验证

选取某火电厂发生静偏心事故的真机现场实测数据，对静偏心故障特征分析理论进行验证。故障机组由于定子支撑板固定螺栓断裂，导致励磁机长时间以偏心状态运行，事故后测量偏心故障最大位移处为 1.2 mm。本文选取了同厂一台配置参数与故障机组完全相同的机组作为对比样本，验证励磁机在偏心故障工况下的励磁电流谐波特征。通过高精度录波装置采集机组励磁电流波形，机组正常和

故障状态下的励磁电流如图 12 所示,励磁电流 FFT 频谱分析结果如图 13 所示。

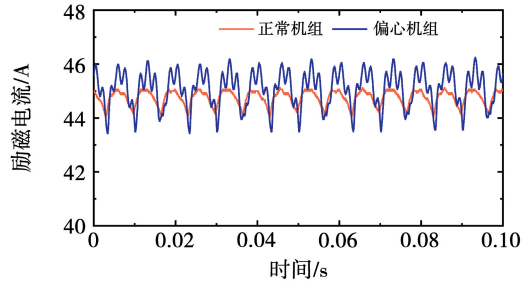

图 12　正常机组与偏心机组励磁电流波形

Fig. 12　Excitation current waveforms for normal and eccentric units

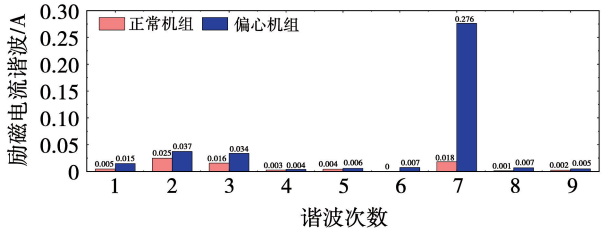

图 13　正常机组与偏心机组稳态励磁电流谐波成分

Fig. 13　Harmonic components of steady-state excitation current for normal and eccentric units

从图 12 可以看出,无刷励磁机正常运行时含有励磁电源固有的 150 Hz 桥式整流谐波,发生静态偏心故障后的励磁电流出现了明显的高次谐波。图 13表明励磁机静偏心故障后产生 m/P 及其整数倍次谐波,与理论和仿真的结果一致,验证了多相环形无刷励磁机静偏心故障下的励磁电流特征。

5　结　论

本文以多相环形无刷励磁机为研究对象,分析了其静偏心故障时的电枢电流、磁场和励磁电流谐波特征,理论分析与仿真结果相符合,并且实际中的励磁电流谐波特征也与理论一致。结论如下:

1)励磁机偏心故障后气隙磁密与电枢电流都将产生奇次谐波附近 $1/P$ 的整数倍次谐波分量;

2)故障后的实际可监测量励磁电流产生 m/P 整数倍次的谐波,并且随偏心程度的增加而增大。

本文为核电多相环形无刷励磁机的静偏心故障提供了一种普适的理论分析方法,并给出了实际中便于测量的励磁电流谐波特征,为此类故障的检测与诊断提供了重要的依据。下一步需对星形绕组以及对于动偏心、混合偏心等类型故障特征作进一步分析,并研究相应的检测方法。

参 考 文 献:

[1] 王莹杰, 彭现科, 赵万广, 等. 我国内陆核电发展问题的再研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(6): 180.
WANG Yingjie, PENG Xianke, ZHAO Wanguang, et al. Re-examination of the development issues of inland nuclear power in China[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(6): 180.

[2] 梁艳萍, 陈建清, 黄浩. 转子磁路结构对汽轮发电机励磁电流和磁场分布的影响[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(4): 13.
LIANG Yanping, CHEN Jianqing, HUANG Hao. Influence of rotor magnetic circuit structure on excitation current and magnetic field distribution of turbogenerator[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(4): 13.

[3] 武玉才, 马冠华. 核电汽轮发电机转子绕组匝间短路的定子环流特征[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 45.
WU Yucai, MA Guanhua. Stator circulating current characteristics in nuclear turbine generator after rotor windings inter-turn short circuit fault[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(3): 45.

[4] 蔡波冲. 无刷励磁机旋转整流系统典型故障的在线检测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

[5] 梁郑秋, 郝亮亮, 周艳真, 等. 基于卷积神经网络的核电多相无刷励磁系统旋转整流器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5458.
LIANG Zhengqiu, HAO Liangliang, ZHOU Yanzhen, et al. Fault diagnosis of rotating rectifier in nuclear multi-phase brushless excitation system based on convolutional neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5458.

[6] 孙宇光, 杜威, 桂林, 等. 用于多相无刷励磁机开路与短路故障检测的磁极探测线圈设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3542.
SUN Yuguang, DU Wei, GUI Lin, et al. Design of pole detection coils for open-circuit and short-circuit faults in multiphase brushless exciter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3542.

[7] 郝亮亮, 常江, 李洪学, 等. 核电多相角形无刷励磁机定子匝间短路故障特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6726.
HAO Liangliang, CHANG Jiang, LI Hongxue, et al. Characteristics analysis of stator inter-turn short circuits in nuclear power multi-phase angular brushless exciter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6726.

[8] 章良健, 王燚, 常江, 等. 多相环形无刷励磁机定子过电压机

理分析[J]. 大电机技术, 2021(6): 34.
ZHANG Liangjian, WANG Yi, CHANG Jiang, et al. Mechanism analysis of stator overvoltage in multi-phase angular brushless exciter[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021(6): 34.

[9] 郝亮亮, 李佳慧, 李洪学, 等. 核电多相角形无刷励磁系统旋转二极管开路故障特征分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 112.
HAO Liangliang, LI Jiahui, LI Hongxue, et al. Characteristic analysis of open-circuit fault of rotating diode in nuclear multi-phase angular brushless excitation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 112.

[10] 武玉才, 孙淑琼. 多相无刷励磁机旋转二极管开路故障在线检测方法[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 99.
WU Yucai, SUN Shuqiong. Online detection method of open circuit fault of rotating diode in multi-phase brushless exciter[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 99.

[11] 姚若苹, 余尤好, 陈培民, 等. 11相无刷励磁机故障工况的谐波分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007(2): 127.
YAO Ruoping, YU Youhao, CHEN Peimin, et al. Harmonic analysis of the fault cases in 11-phase brushless exciter based on FFT[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2007(2): 127.

[12] WU Yucai, CAI Bochong, MA Qianqian. An online diagnostic method for rotary diode open-circuit faults in brushless exciters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 1677.

[13] 刘为群, 吴龙, 牟伟. 多相无刷励磁系统旋转整流器故障检测新方法[J]. 大电机技术, 2010(6): 61.
LIU Weiqun, WU Long, MU Wei. New fault detection method for rotary rectifier of multi-phase brushless excitation system[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2010(6): 61.

[14] BENBOUZID M E H. A review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 984.

[15] DORRELL D G, THOMSON W T, ROACH S. Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1): 24.

[16] NANDI S, TOLIYAT H A, LI Xiaodong. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(4): 719.

[17] KIM D, KIM H, HONG J, et al. Estimation of acoustic noise and vibration in an induction machine considering rotor eccentricity[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 745.

[18] LI Yanxin, LU Qinfen, ZHU Ziqiang, et al. Analytical synthesis of air-gap field distribution in permanent magnet machines with rotor eccentricity by superposition method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1.

[19] ZHAO Rui, YAN Ruqiang, CHEN Zhenghua, et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 213.

[20] VITEK O, JANDA M, HAJEK V, et al. Detection of eccentricity and bearings fault using stray flux monitoring[C]//8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, September 5 - 8, 2011, Bologna, Italy. 2011: 62 - 67.

[21] 周精明, 管醇. 转子偏心对水轮发电机中性点电流的影响分析[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(4): 40.
ZHOU Jingming, GUAN Chun. Analysis of the impact of rotor eccentricity on neutral point current in hydroelectric generators[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2024, 47(4): 40.

[22] 诸嘉慧, 邱阿瑞. 转子偏心对凸极同步发电机主保护不平衡电流的影响[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 57.
ZHU Jiahui, QIU Arui. Effects of rotor eccentricity on unbalanced current of salient-pole synchronous generator main protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 57.

[23] 桂林, 陈俊, 王光, 等. 柔性光学电流互感器在水轮发电机保护及监测上的应用探索[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(3): 1.
GUI Lin, CHEN Jun, WANG Guang, et al. Discussion on the application of flexible optical TA in the protection and monitoring of hydro-generator[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(3): 1.

[24] 尹项根, 乔健, 贺儒飞, 等. 基于FFT-LSTM的变速抽蓄机组转子绕组短路故障和偏心故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 73.
YIN Xianggen, QIAO Jian, HE Rufei, et al. FFT-LSTM-based fault diagnosis method for a rotor winding short circuit fault and rotor eccentricity fault of a variable-speed pumped storage unit[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 73.

[25] 邹茂娟, 曾玉好, 柏勇, 等. 某大型冲击式水电机组内部故障分析与主保护设计[J]. 水电与抽水蓄能, 2025, 11(1): 82.
ZOU Maojuan, ZENG Yuhao, BAI Yong, et al. Internal faults analysis and main protection design of a large impact hydro unit[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2025, 11(1): 82.

(编辑:朱美华)