

大容量核电站偶数相环形无刷励磁旋转整流系统定子电流谐波特性分析

谢卓泰¹, 郝亮亮^{1*}, 王泽民¹, 蔡宇昂¹, 彭洪亮², 段贤稳³

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 台山核电合营有限公司, 广东 台山 529228;

3. 中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518172)

Stator Current Harmonic Characteristics in High-Capacity Nuclear Power Plants with Even-Phase Toroidal Brushless Excitation Rotating Rectifier Systems

XIE Zhuotai¹, HAO Liangliang^{1*}, WANG Zemin¹, CAI Yu'ang¹,
PENG Hongliang², DUAN Xianwen³

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Taishan 529228, China;

3. China Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen 518172, China)

Abstract: [Objective] The 46 phase brushless exciter used in the 1 750 MW nuclear power unit, which has the largest single unit capacity in the world, is significantly different from the common odd numbered camera types. Currently, research on ultra large capacity and even-phase brushless exciters is still relatively lagging behind, and there is an urgent need to analyze the operating mechanism of the 46 phase exciter under various working conditions, including normal and fault conditions, in order to provide a basis for subsequent fault protection. Thus, this paper proposes an analysis method for the parallel equivalent model of armature winding based on even-phase toroidal brushless excitation machine. [Methods] Firstly, the actual structure of the armature winding of the 46 phase brushless excitation machine was analyzed in detail, and then the theoretical waveforms of diode current, armature current, and excitation current were obtained. Then, based on the armature reaction magnetic potential, the harmonic characteristics of the stator excitation current during normal operation, single-diode open circuit, single-phase open circuit, and two-phase open circuit were obtained. Finally, the performance of the proposed analytical method was validated by establishing a finite element simulation model consistent with the actual physical machine.

[Results] The correctness of the armature winding parallel equivalent model and the harmonic characteristics of stator excitation current under various operating conditions were verified based on the real machine experiments and finite element simulation results of the 46 phase actual unit.

[Conclusion] This paper investigates the operational characteristics of even-phase annular brushless excitation systems and the fault signatures associated with various diode open-circuit failures. The study provides a reference for further research on fault diagnosis in high-capacity nuclear power plants multi-phase brushless excitation systems.

Key words: brushless exciter; even-phase toroidal; parallel equivalent model; harmonic characteristic; high-capacity nuclear power

摘要: [目的]世界上单机容量最大的 1 750 MW 核电机组采用的 46 相无刷励磁机与常见奇数相机型有较大区别。目前,对于超大容量、偶数相无刷励磁机的研究仍相对滞后,处于励磁系统保护中的薄弱环节,迫切需要对 46 相励磁机进行正常和故障等多种工况的运行机理进行分析,为后续故障保护提供依据。因此,本文提出一种基于偶数相环形无刷励磁机的电枢绕组并联等值模型的分析方法。【方法】首先对 46 相无刷励磁机电枢绕组的实际结构进行详细分析,进而得出二极管电流、电枢电流和励磁电流的理论波形。然后,根据电枢反应磁势得出正常运行、单管开路、一相开路和两相开路时定子励磁电流的

基金项目: 台山核电合营有限公司资助项目(E23GY00100)

Project Funded by Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd. (E23GY00100)

谐波特性。最后,通过仿真与现场试验对比验证所提分析方法的性能。【结果】46相实际机组的真机试验和有限元仿真结果,验证了电枢绕组并联等值模型与多种工况下定子励磁电流谐波特性的正确性。【结论】本文揭示了偶数相环形无刷励磁系统的运行特性以及不同类型二极管开路的故障特征,为进一步研究大容量核电站多相无刷励磁系统的故障诊断提供了参考。

关键词: 无刷励磁;偶数相环形;并联等值模型;谐波特性;大容量核电

0 引言

核电作为稳定可靠、清洁低碳的基荷能源,是实现“双碳”目标的关键支撑之一^[1-2]。无刷励磁系统因取消碳刷结构,显著提升了核电发电机组的运行可靠性^[3-4]。其中,多相环形励磁技术凭借高冗余度和低谐波特性,已成为超大容量核电机组的优选方案^[5-6]。

台山核电装备的46相环形无刷励磁系统采用世界单机最大容量机组,其旋转整流器是励磁核心部件。二极管在恶劣工况下易发生开路故障(含单管、一相及两相开路),而短路故障会触发熔断器保护转化为开路模式。工程允许单管和一相开路短时运行,但两相开路需停机处理,因此故障类型的快速辨识对系统安全至关重要。由于旋转部件的电气量难以直接监测^[7-9],定子励磁电流成为故障诊断唯一有效特征。

然而,现有研究存在局限性,包括多集中于三相衍生和奇数相环形励磁系统^[10-17],对多相数偶数相环形结构的研究几近空白;奇数相系统的导通换相规律、故障分析方法均不适用于偶数相拓扑^[18-24];46相系统存在强磁耦合、非线性饱和及1 200 Hz高频换相等复杂因素,导致时域特征混叠,传统谐波分析法失效;人工智能诊断方法在多相数场景下可解释性差,且难以区分细微故障特征^[25-28]。

为研究偶数相励磁机正常及故障工况的运行特性,本文以台山核电46相环形励磁机为例,从励磁系统结构的角度出发,揭示正常运行机理,建立并联等值模型。然后,对励磁机不同故障情况进行特征分析,量化电气量波形与频谱特性;最后,通过仿真与现场试验数据对比,验证模型的准确性,为

多相数偶数相励磁系统的故障诊断提供基础。

1 励磁机正常运行机理分析

1.1 基于并联等值的二极管电流分析

台山核电站46相无刷励磁机及旋转整流系统的结构如图1所示。在实际绕组排布中相邻连接两相电枢绕组的相位差为 $10\pi/46$ 电角度。从第1相到第46相的各相相量依次连接形成一个正四十六边形(转动5圈或 10π 弧度后最终闭合),各相电枢绕组内电势的相量如图2所示。值得注意的是,由于46相励磁机是偶数相机型,存在相对两相(如第1相与第24相)电势相位严格相差 π 电角度的固有特性,构成反相电压关系,如图2所示。

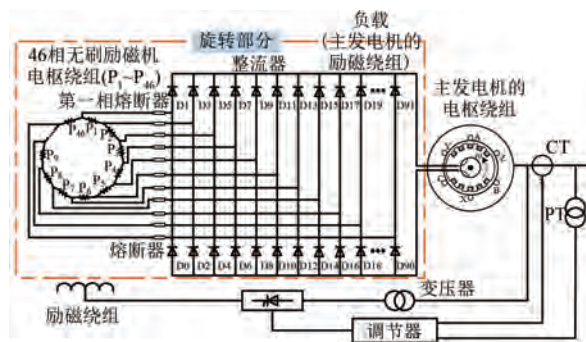


图1 46相环形无刷励磁机结构图

Fig. 1 Structural diagram of 46 phase annular brushless exciter

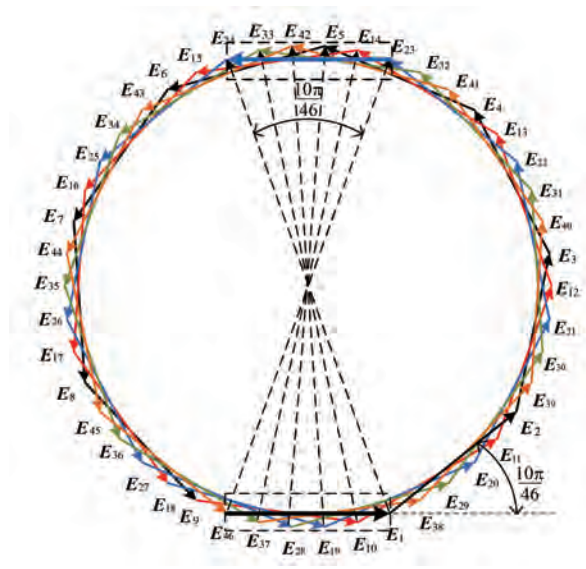


图2 电枢相量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of armature phasor

系统以正多边形的对角线为换相点轮流导通, 相邻换相点对应的相位之间相差 $2\pi/46$ 电角度。在此换相机制下, 处于相对位置的两相所接的上下桥臂功率二极管总是同步导通或关断。系统等效为前 23 相与后 23 相电枢绕组反并联, 为整流器供电, 如图 3 所示。D1~D46 导通, 等效为第 1~23 相与第 24~46 相反并联; 旋转 $10\pi/46$ 电角度后 D3~D48 导通, 等效更新为第 2~24 相与第 25~1 相反并联。因电磁耦合与换相动态性, 参与并联的 23 相绕组随转子位置动态更新, 无法视为固定两组绕组。

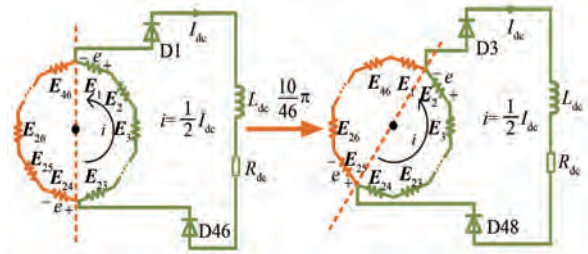


图 3 偶数相机型并联等值模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of even-phase camera type parallel equivalent model

随着励磁机转子的旋转, 二极管在一个周期内会遍历所有的导通状态, 稳定的导通状态有 46 个, 每个二极管导通 $2\pi/46$ 电角度, 如图 4 所示。根据并联等值模型, 共阴极和共阳极的二极管同步换相, 换相状态数等于电枢相数为 46。与偶数相励磁系统相比, 奇数相机型的共阴极管和共阳极管换相不同步, 存在相位差, 二极管换相的状态数是电枢绕组相数的 2 倍。在理想情况下, 可以忽略二极管换相的时间, 二极管电流如图 5 所示。在实际正常运行时, 由于电枢侧存在电感, 二极管的换相过程不能忽略, 电流不能突变, 存在多个二极管同时导通的情况。



图 4 二极管导通顺序图

Fig. 4 Diagram of diode conduction sequence

1.2 正常运行时电枢电流分析

电枢电流随二极管的导通变化而变化。因此, 在 46 相励磁机中, 电枢电流随二极管的换相过程分为 46 个阶段。电枢绕组可等效为前 23 相

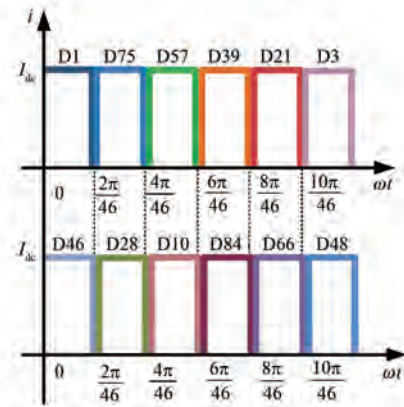


图 5 理想情况下, 正常运行的二极管电流图

Fig. 5 Current waveforms of a properly functioning diode under ideal conditions

与后 23 相并联, 每相电流大小为负载电流 I_{dc} 的一半。D0 和 D47 导通时, 第一相电流为 $0.5I_{dc}$ 。同理, D18 和 D65、D36 和 D83 导通时, 第一相电流维持 $0.5I_{dc}$ 不变。D54 和 D9 导通时, 第一相电流大小仍为 $0.5I_{dc}$, 但方向相反。根据并联等值模型, 第 24 相电流始终与第 1 相电流大小相等、方向相反, 如图 6 虚线所示。忽略电感影响时, 电流波形为分段直线。因电枢电感阻碍电流突变, 换相过程存在重叠, 导致电流波形呈现 4 个波头的曲线, 如图 6 实线所示。

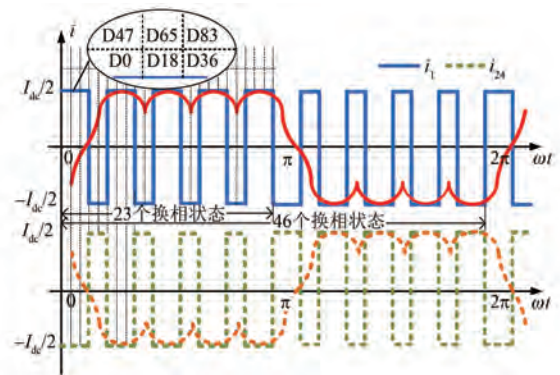


图 6 正常运行电枢电流波形图

Fig. 6 Diagram of normal operation armature current waveforms

1.3 正常运行时励磁电流分析

在实际运行中, 电枢绕组采用超高电感设计, 其电感值接近理想无穷大。为了简化理论分析过程, 假设电枢侧的电感无穷大, 因此电枢电流的纹波可以忽略不计, 等效为宽度为 π 、周期为 2π 、高度为 I 的矩形波。第 1 相和第 2 相电枢电流如图 7

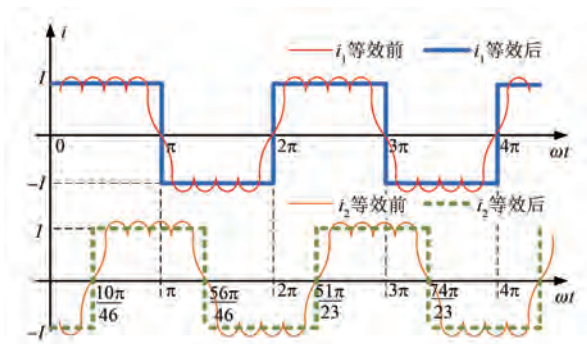


图7 电枢电流等效示意图

Fig. 7 Equivalent schematic diagram of armature current

所示,数学表达式为

$$i_1 = \begin{cases} I, & 0 \leq \omega t < \pi \\ -I, & \pi \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

$$i_2 = \begin{cases} I, & \frac{10\pi}{46} \leq \omega t < \pi + \frac{10\pi}{46} \\ -I, & 0 \leq \omega t < \frac{10\pi}{46}, \pi + \frac{10\pi}{46} \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为旋转角速度。

通过对等效电枢电流进行傅里叶变换,得出该电流包含奇次谐波正弦波特性且相邻电枢绕组之间存在固定电角度差的结论。第 k 相电枢绕组的 μ 次谐波电流可表示为

$$i_{k,\mu} = I_\mu \sin \left\{ \mu \left[\omega t - (k-1) \frac{10\pi}{46} \right] \right\}, \quad \mu = 1, 3, 5, \dots \quad (3)$$

式中: μ 为电枢电流谐波次数; I_μ 为 μ 次谐波电流有效值; k 为电枢绕组相数。

产生的 v 次空间谐波磁动势可表示为

$$f_{k,\mu,v} = F_{\mu,v} \cdot \sin \left\{ \mu \left[\omega t - (k-1) \frac{10\pi}{46} \right] \right\} \cdot \cos \left\{ v \left[\alpha - (k-1) \frac{10\pi}{46} \right] \right\} \quad (4)$$

式中: α 为沿电机转子圆周方向的电角度; v 为电枢磁动势谐波次数; $F_{\mu,v}$ 为谐波磁动势幅值。

各相绕组产生的正、反转磁动势的表达式为

$$f_{k,\mu,v}^+ = \frac{1}{2} F_{\mu,v} \sum_{k=1}^{46} \left[(\mu \omega t - v \alpha) - (\mu - v)(k-1) \frac{10\pi}{46} \right] \quad (5)$$

$$f_{k,\mu,v}^- =$$

$$\frac{1}{2} F_{\mu,v} \sum_{k=1}^{46} \left[(\mu \omega t + v \alpha) - (\mu + v)(k-1) \frac{10\pi}{46} \right] \quad (6)$$

对式(5)推导可得:当且仅当 $v = 46n_1 + \mu$ ($n_1 \in \mathbb{N}$)时, $f_{k,\mu,v}^+$ 才不为零。 $46n_1 + \mu$ 次谐波磁动势转速为 $\mu/(46n_1 + \mu)$ 倍同步转速,定子励磁绕组会出现直流和 $46n_1$ 倍的谐波电流。

励磁机正常运行过程中,励磁电流会因为二极管换相而产生谐波。根据分析,一个周期内二极管会发生46次换相,导致励磁电流出现46次纹波,呈现出良好的对称性和周期性变化。正常情况下,励磁电流的波形如图8所示。与奇数相励磁系统不同,奇数相机型的励磁电流谐波次数是电枢绕组相数的2倍。

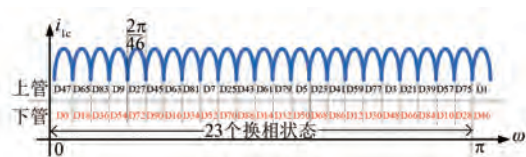


图8 励磁电流波形示意图

Fig. 8 Schematic diagram of excitation current waveform

2 旋转整流器开路故障的特征分析

2.1 旋转整流器单管开路励磁电流分析

当旋转整流器发生二极管开路故障时,会导致换相过程中的二极管提前导通,换相后二极管延迟关断,从而导致故障二极管的导通状态被平分。为了便于理论分析,假设电枢绕组的纹波可以忽略不计。因此,开路故障只会对故障相邻相的电枢电流造成延迟关断或提前导通的影响。假设二极管D3发生开路故障,第1相和第2相的电枢电流分别是 i_1' 和 i_2' ,在故障状态下,根据叠加原理, i_1' 和 i_2' 可以看作是正常运行状态下的电枢电流与故障分量 $\Delta i_1'$ 和 $\Delta i_2'$ 的叠加。单管开路故障时,电枢电流如图9所示,故障分量 $\Delta i_1'$ 和 $\Delta i_2'$ 的表达式为

$$\Delta i_1' = \begin{cases} -2I, & 0 \leq \omega t < \frac{5\pi}{46} \\ 0, & \frac{5\pi}{46} \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta i'_2 = \begin{cases} 2I, & \frac{5\pi}{46} \leq \omega t < \frac{10\pi}{46} \\ 0, & 0 \leq \omega t < \frac{5\pi}{46}, \frac{10\pi}{46} \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

对故障分量 $\Delta i'_1$ 进行傅里叶分解可得:

$$\begin{aligned} \Delta i'_1 = & -\frac{5I}{46} + 0.22\sin(\omega t + 0.45\pi) + \\ & 0.21\sin(2\omega t + 0.39\pi) + 0.21\sin(3\omega t + 0.34\pi) + \\ & 0.2\sin(4\omega t + 0.28\pi) + 0.19\sin(5\omega t + 0.23\pi) + \\ & 0.18\sin(6\omega t - 0.17\pi) + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

对故障分量 $\Delta i'_2$ 进行傅里叶分解可得:

$$\begin{aligned} \Delta i'_2 = & \frac{5I}{46} + 0.22\sin(\omega t + 0.34\pi) + \\ & 0.21\sin(2\omega t + 0.17\pi) + 0.21\sin(3\omega t + 0.01\pi) + \\ & 0.2\sin(4\omega t - 0.15\pi) + 0.19\sin(5\omega t - 0.32\pi) + \\ & 0.18\sin(6\omega t - 0.48\pi) + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

对式(9)和式(10)分析可得,故障分量 $\Delta i'_1$ 和 $\Delta i'_2$ 同时存在直流分量和各次谐波分量。当 46 相环形无刷励磁系统二极管单管开路故障时,励磁绕组中的电流波形受到扰动,并产生整数次谐波。

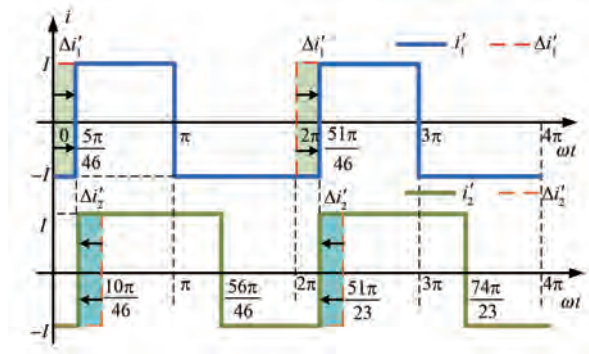


图 9 单管开路电枢电流图

Fig. 9 Single-diode open-circuit armature current diagram

2.2 旋转整流器相开路励磁电流分析

当二极管开路故障时,产生的过电流往往会使得故障扩大,引起熔断器熔断形成一相开路故障。第 $x+1$ 相电枢绕组发生一相开路时,只会影响第 $x, x+1$ 相电枢绕组提前导通或关断,其余各相电枢电流不会受到影响。故障时,第 $x, x+1$ 相电枢电流为 i''_x 和 i''_{x+1} ,故障分量 $\Delta i''_x$ 和 $\Delta i''_{x+1}$ 的表达式为

$$\Delta i''_x = \begin{cases} -2I, & \begin{aligned} & 10(x-1)\pi/46 \leq \omega t \\ & < 10(x-1)\pi/46 + 5\pi/46 \end{aligned} \\ 2I, & \begin{aligned} & 10(x-1)\pi/46 + \pi \leq \omega t \\ & < 10(x-1)\pi/46 + 51\pi/46 \end{aligned} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta i''_{x+1} = \begin{cases} 2I, & \begin{aligned} & 10(x-1)\pi/46 + 5\pi/46 \leq \\ & \omega t < 10x\pi/46 \end{aligned} \\ -2I, & \begin{aligned} & 10(x-1)\pi/46 + 51\pi/46 \leq \\ & \omega t < 10x\pi/46 + \pi \end{aligned} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

对故障分量 $\Delta i''_x$ 进行傅里叶分解可得:

$$\Delta i''_x = \sum_{\mu=1,3,5} A_{\mu} \sin(\mu\omega t + B_{\mu}) \quad (13)$$

式中: A_{μ} 为 μ 次谐波幅值; B_{μ} 为 μ 次谐波相位,则:

$$\begin{cases} A_{\mu} = \frac{4I}{\mu\pi} \sqrt{2 - 2\cos b} \\ B_{\mu} = \arctan \frac{\sin a - \sin(a+b)}{\cos(a+b) - \cos a} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} a = \mu\omega[10\pi(x-1)/46] \\ b = 5\pi\mu\omega/46 \end{cases} \quad (15)$$

当第 1 相桥臂发生开路故障时,第 1、2 相电枢电流如图 10 所示。

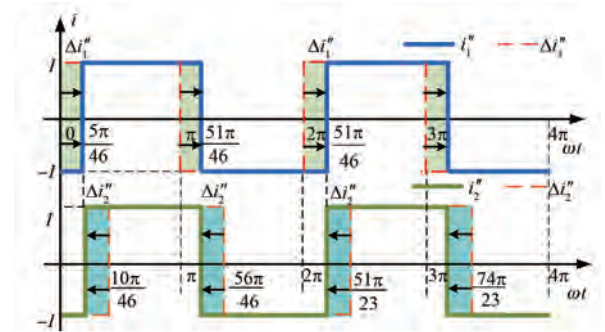


图 10 一相开路电枢电流图

Fig. 10 Armature current of single-phase open circuit

同理,将第 $x+1$ 相电枢电流分解代入式(13)~式(15)即可。分析可知,故障电流分量 $\Delta i''_x$ 和 $\Delta i''_{x+1}$ 中仅包含基频和奇数次谐波。第 x 相故障引起电枢电流各次谐波幅值只与谐波次数有关,其随着谐波次数增大而减小,幅值与故障相位无关,谐波相位与相开路的位置和次数有关,一相开路产生偶数次谐波电流。对比分析单管开

路故障和一相开路故障,由式(9)和式(13)可知,奇数次谐波存在 $\Delta i''_{x,奇} = 2\Delta i'_{1,奇}$ 、 $\Delta i''_{x,奇} = 2\Delta i'_{2,奇}$,得出一相开路故障偶数次谐波电流是单管开路的2倍。

当发生两相开路故障时,为不失一般性,假设第 x 和 y 相两相开路,可将两相开路故障引起的电枢绕组故障分量等效为第 x, y 相故障引起的故障分量叠加,将两相开路故障等效为不同位置的两个一相开路故障。此时,式(15)改为

$$\begin{cases} a = \mu\omega [10\pi(y-1)/46] \\ b = 5\pi\mu\omega/46 \end{cases} \quad (16)$$

第 y 相故障时,引起电枢电流产生相位不同、幅值相等的谐波。当 $y=x+1$ 两相相邻时,开路故障同时影响第 x 相电枢电流,使得电枢电流畸变程度增大,导致励磁电流谐波增大。当第 y, x 两不相邻时,故障对电枢电流的影响不会重合,根据式(13)~式(16)可以计算得出故障时励磁电流波形的谐波次数。由于两个故障电枢绕组相对位置不同,存在的相位偏差使两个一相开路故障非线性叠加,使得励磁电流不同次谐波增大或减小,两相开路故障定子励磁绕组仅会产生偶数次谐波电流。

特殊地,当 $y=x+23$ 时,46相无刷励磁系统发生空间正相对的两相开路故障(比如第2相和25相),代入式(14)、式(16)可得:

$$B_{x,k} = \arctan \frac{\sin a - \sin(a+b)}{\cos(a+b) - \cos a} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} B_{y,k} = \\ \arctan \frac{\sin(a+\pi) - \sin(a+b+\pi)}{\cos(a+b+\pi) - \cos(a+\pi)} = \\ \pi + \arctan \frac{\sin a - \sin(a+b)}{\cos(a+b) - \cos a} \end{aligned} \quad (18)$$

由式(17)可知,故障产生的谐波相位相反,且相对位置相反,可以将其线性叠加。进一步地,相对两相开路故障偶数次谐波电流是一相开路的2倍。

以第2相和第25相桥臂发生相对两相开路故障为例进行说明。在并联等值模型中,电枢绕组可等效为前23相与后23相并联,电流大小相等且相位相反。当第2相和第25相桥臂发生两相开路故障时,两个电枢故障对相邻绕组的影响完全一致,故障后在整个周期内二极管换相过程

和电枢绕组的导通规律始终关于原点中心对称。换句话说,可以将相对两相开路故障看作是第2相、25相开路故障线性叠加。此时,励磁电流的谐波是一个单相开路故障的2倍。两相开路故障下电枢绕组的导通情况如图11所示。

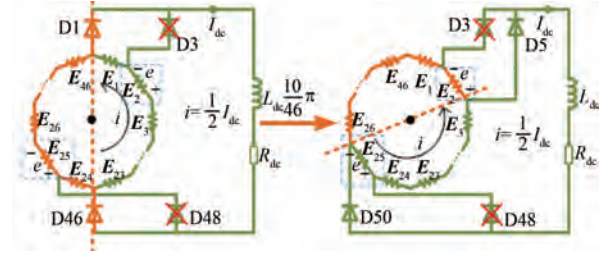


表 1 46 相环形励磁机基本仿真参数

Tab.1 Basic simulation parameters of 46 phase annular exciter

参数名称	参数值
额定频率/Hz	325
额定励磁电压/V	93
线圈节距	5
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
额定励磁电流/A	192
额定相电压/V	400
转子槽数	138
极对数	13
电枢连接形式	双层波绕组

为验证仿真模型的正确性,引入皮尔逊相关系数。通过计算励磁电流的仿真数据和试验数据之间的皮尔逊相关系数,可以判断波形的相似程度。皮尔逊相关系数的计算如式(19)所示:

$$\sigma_{XY} = \frac{N \sum_i X_i Y_i - \sum_i X_i \sum_i Y_i}{\sqrt{\sum_i X_i^2 - (\sum_i X_i)^2} \sqrt{\sum_i Y_i^2 - (\sum_i Y_i)^2}}$$

(19)

式中: X 、 Y 为两组时间序列数据; N 为两组数据的长度; σ_{XY} 为 X 、 Y 之间的皮尔逊相关系数,取值范围为 $[-1,1]$, σ_{XY} 越接近 1,说明 X 和 Y 的时间序列变化越相似。

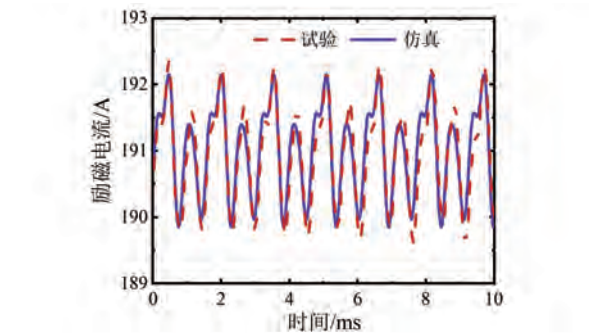


图 13 励磁电流波形仿真与试验对比图

Fig. 13 Comparison between simulation and experiment of excitation current waveforms

本文选取仿真数据和试验数据各 1 100 个点,计算得出皮尔逊相关系数为 0.965 2,表明仿真电流波形和试验电流波形高度吻合。对仿真和试验的相间两相开路故障励磁电流滤波后进行傅

里叶分解,直流分量为 191 A,具体数据如表 2 所示。

表 2 仿真和试验定子电流的谐波分析

Tab.2 Harmonic analysis of stator current in simulation and experiment

工况	基波	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次
仿真	0	0.39	0	0.58	0	0.31
试验	0.01	0.41	0	0.64	0.01	0.32

由表 2 可知,仿真数据与试验数据的谐波成分吻合,验证了仿真模型的正确性。同时,2~4 相间两相开路时励磁绕组只产生偶数次谐波电流,这也验证了理论分析的正确性。

3.2 理论分析的仿真验证

旋转整流器正常运行时二极管电流如图 14 所示。

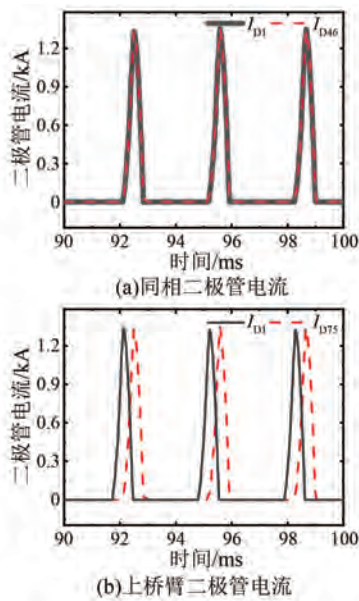


图 14 正常运行二极管电流图

Fig. 14 Normal operation diode current diagram

图 14(a)中,二极管电流重合,上管和下管同时换相;图 14(b)中二极管电流与理论分析相同,可以证明二极管按照换相规律进行换相。

整流器正常运行、单管开路故障、一相开路故障以及 2~25 相对两相开路故障时电枢电流波形如图 15 所示。

由图 15(a)可知,电枢电流波形出现 4 个波头,与理论分析电流波形基本一致;图 15(b)中第 1、2 相电枢电流相位符合故障分析中相位偏差 $10\pi/46$;图 15(c)一相开路故障中,第 1、2 相电枢

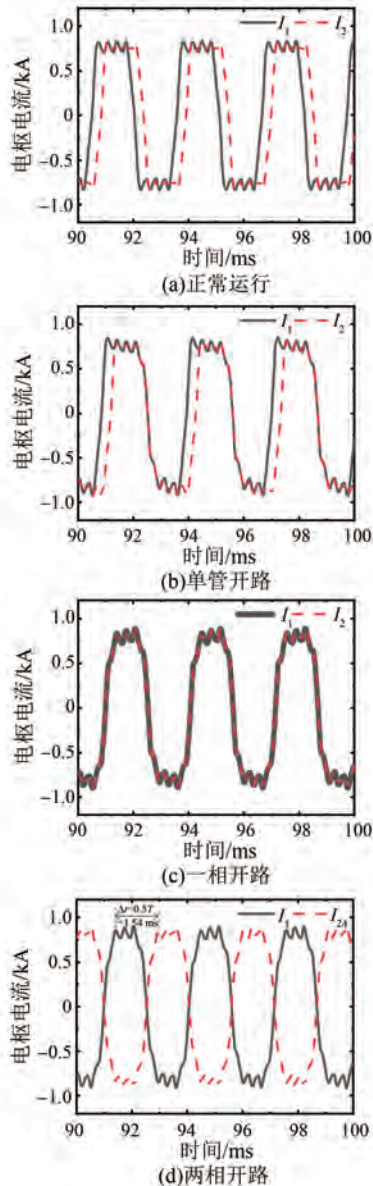


图 15 不同工况电枢电流图

Fig. 15 Diagram of armature current under different operating conditions

电流大小相等;图 15(d)中第 1、24 相电枢电流大小相等、相位相反,验证了偶数相励磁机电枢对称性。

整流器正常运行、单管开路故障、一相开路故障及相对两相开路故障时励磁电流波形如图 16 所示。图 16(a)中,正常运行时励磁电流主要为直流分量,纹波可以忽略不计;图 16(b)中单管开路工况波头之间相距 1 个电周期 0.308 ms,存在明显的基波分量;图 16(c)、(d)中有明显的 2 次谐波分量,可以看出两种故障类型波形相同而谐

波大小不等,相对两相开路故障谐波约为一相开路故障谐波电流的 2 倍,验证了 46 相机型反并联结构及相对两相开路故障特性。通过对比不同工况下励磁电流波形,可得随着故障程度增加,励磁电流畸变越来越大。综上所述,验证了理论分析的正确性。

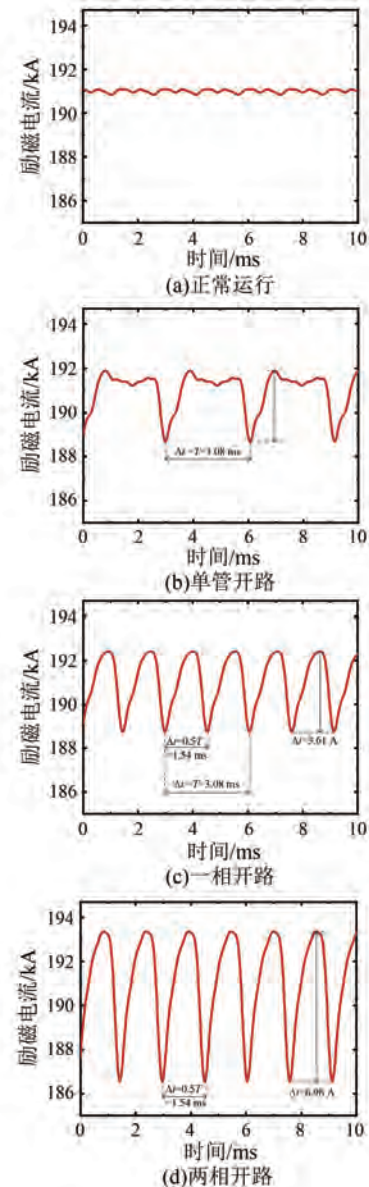


图 16 不同工况下励磁电流波形图

Fig. 16 Excitation current waveforms under different operating conditions

对台山核电站 46 相环形无刷励磁机不同工况下的励磁电流进行谐波分析。当故障发生前直流分量均为 191 A,故障发生后定子电流谐波如图 17 所示。

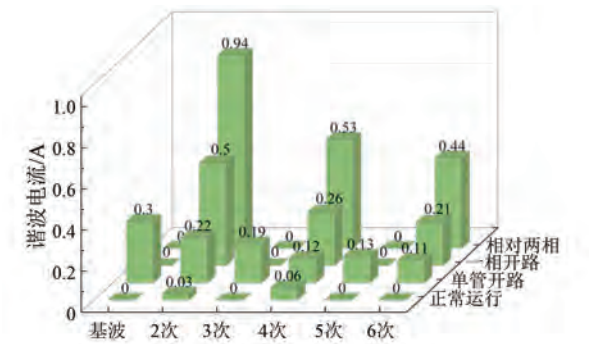


图 17 仿真励磁机定子电流的谐波分析图

Fig. 17 Harmonic analysis diagram of stator current of simulated exciter

由图 17 可知,励磁机正常运行时,励磁电流基本上不含有任何低次谐波电流;而单管开路故障时,励磁电流中出现整数次谐波电流;一相开路故障时,励磁电流中仅出现偶数次谐波电流,并且偶数次谐波分量明显增加,约为单管开路偶数次分量的 2 倍;2-25 相对两相开路工况下,励磁机电流中仅出现偶数次谐波电流,且偶数次谐波分量与一相开路故障呈现出 2 倍的关系,证明了偶数相电机反并联的特殊结构,与理论分析相符合。

46 相整流器两相开路故障种类很多,本文选取部分两相开路故障励磁电流进行分析,结果如图 18 和表 3 所示。

由图 18 可知,当第 1-2 相发生两相开路故障时,励磁电流中的谐波幅值显著增加,其余两相故障出现不同程度的畸变,与故障电枢电流相位有关。

表 3 不同两相开路定子电流的谐波分析

Tab. 3 Harmonic analysis of stator currents with different two-phase open circuits						
工况	基波	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次
1-2 相开路	0	1.43	0	0.81	0	0.16
1-3 相开路	0	0.39	0	0.58	0	0.31
1-4 相开路	0	0.68	0	0.18	0	0.46
1-5 相开路	0	0.93	0	0.38	0	0.12

由表 3 可知,第 1-2 两相开路故障对励磁电流影响最大,其余两相开路故障使得励磁电流不同次数谐波增大或减小,且不会产生奇数次谐波电流,只会产生偶数次谐波电流,与理论分析结论一致。

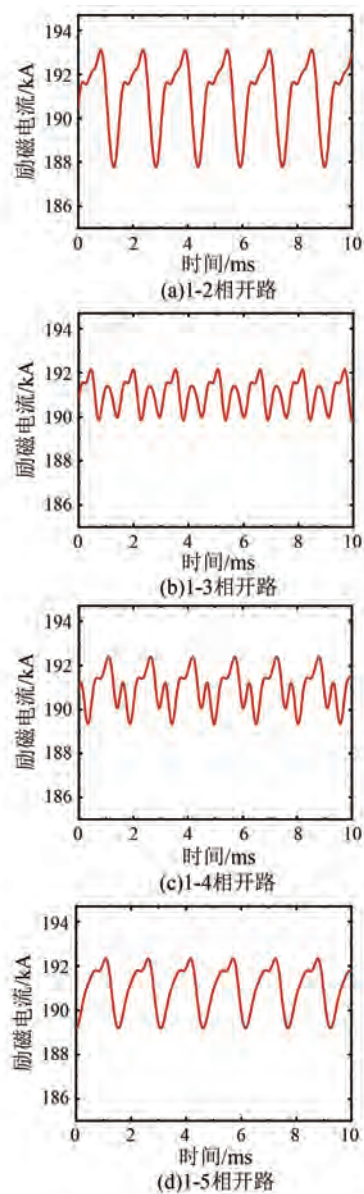


图 18 不同两相开路故障工况下励磁电流波形图

Fig. 18 Excitation current waveforms under different two-phase open circuit fault conditions

4 结语

本文以 46 相环形无刷励磁机为研究对象,深入分析了偶数相环形无刷励磁旋转整流系统的运行特性。研究总结了系统在正常运行状态以及单管开路、一相开路、两相开路故障下,定子励磁电流的频域特性,并揭示了其背后的机理。通过仿真和试验数据验证了理论的正确性,结论如下。

(1) 46 相励磁机存在电枢相电压相位相反的情况,从而呈现出 23 相并联结构。

(2) 励磁机整流器单管开路故障时, 定子励磁电流存在各整数次谐波电流分量; 一相开路和两相开路故障时, 励磁电流仅出现偶数次谐波。

(3) 旋转二极管单管开路、一相开路和相对两相开路谐波存在倍数关系, 相对两相开路故障偶数次分量为单相开路时的 2 倍, 一相开路故障偶数次分量为单管开路时的 2 倍。

本文结论为分析偶数相环形无刷励磁机的结构提供思路, 并揭示不同类型二极管开路的故障特征, 这些研究成果可进一步应用于大容量核电多相无刷励磁系统的故障诊断研究中。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

谢卓泰进行了方案设计、内容总结与论文撰写, 王泽民、蔡宇昂、彭洪亮和段贤稳进行了试验研究, 郝亮亮参与论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summarization, and paper writing were conducted by Xie Zhuotai. The experimental research was carried out by Wang Zemin, Cai Yu'ang, Peng Hongliang, and Duan Xianwen. The review and revision of the paper were participated in by Hao Liangliang. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 荆春宁, 高力, 马佳鹏, 等. “碳达峰、碳中和”背景下能源发展趋势与核能定位研判[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1): 1-9.
- JING C N, GAO L, MA J P, et al. Study and judgment on energy developing trend and nuclear energy positioning under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(1): 1-9.
- [2] 朱传雨, 吴健荣, 韩长宇, 等. 用于核电无损检测的小型直流电机控制器设计[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 95-99.

- ZHU C Y, WU J R, HAN C Y, et al. Design of small DC motor controller for non-destructive testing in nuclear power plants [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(6): 95-99.
- [3] 鲍晓华, 黄贤法, 赵博, 等. 无刷交流励磁机等效电路中换相电抗的分析与计算[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(3): 251-261.
- BAO X H, HUANG X F, ZHAO B, et al. Analysis and calculation of commutation reactance in the equivalent circuit of a brushless AC exciter [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(3): 251-261.
- [4] 丁杰, 杨国润, 谢沁园, 等. 船舶无刷相复励同步发电机励磁系统设计[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 1-9.
- DING J, YANG G R, XIE Q Y, et al. Phase-compounding excitation system design for marine brushless synchronous generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 1-9.
- [5] 刘海涛, 王东, 易新强, 等. 适用于多种缺相故障的十五相感应电机统一容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 327-336.
- LIU H T, WANG D, YI X Q, et al. A unified fault-tolerant control for 15-phase induction machine under various phase failure conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 327-336.
- [6] 张旭东, 郑晓钦, 李修东, 等. 基于相电流平均值改进算法的九相永磁同步电机系统开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1589-1597.
- ZHANG X D, ZHENG X Q, LI X D, et al. An improved mean phase currents method of open-circuited faults diagnosis for nine-phase permanent synchronous motor systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1589-1597.
- [7] 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, 40(6): 61-65.
- LIU W Q, WU L, MU W. New fault detection method for rotary rectifier of multi-phase brushless excitation system [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2010, 40(6): 61-65.
- [8] 姚维康, 徐余法, 黄厚佳, 等. 基于 VBA 的 Maxwell 二次开发在无刷交流励磁机电磁计算中的应用[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 82-87.

- YAO W K, XU Y F, HUANG H J, et al. Application of Maxwell secondary development based on VBA in electromagnetic calculation of brushless AC exciter [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(12): 82-87.
- [9] 姜国豪, 陈伟, 郑涛, 等. 多相自励磁同步电机零低速域高频电流相位优化策略[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(10): 64-74.
- JIANG G H, CHEN W, ZHENG T, et al. Phase optimization strategy for high-frequency current in zero-low speed domain of multiphase self-excited synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(10): 64-74.
- [10] 姚维康, 徐余法, 黄厚佳, 等. 基于有限元法的无刷交流励磁机空载特性分析及额定励磁电流计算[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(3): 58-63.
- YAO W K, XU Y F, HUANG H J, et al. No-load characteristics analysis and rated excitation current calculation of brushless AC exciter based on finite element method [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(3): 58-63.
- [11] WEI Z H, LIU W G, PANG J, et al. Fault diagnosis of rotating rectifier based on waveform distortion and polarity of current [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(3): 2356-2367.
- [12] SUN C H, LIU W G, HAN X, et al. Fault diagnosis of a rotating rectifier in a wound-rotor synchronous starer/generator in the generation mode [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 8(4): 4569-4582.
- [13] ZHANG Z, LIU W G, PENG J C, et al. Identification of TBAES rotating diode failure [J]. *IET Electric Power Applications*, 2017, 11(2): 260-271.
- [14] 张艳辉, 吴新振, 郑晓钦, 等. 十二相整流发电机系统二极管故障时场路耦合仿真分析[J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(4): 71-78.
- ZHANG Y H, WU X Z, ZHENG X Q, et al. Field-circuit coupling simulation analysis of diode fault of 12-phase rectifier generators system [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2019, 38(4): 71-78.
- [15] 张伟玲, 吴新振, 魏锟, 等. 十二相整流发电机缺桥故障运行分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(6): 1724-1730.
- ZHANG W L, WU X Z, WEI K, et al. Analysis of bridge-loss fault operation of 12-phase generators with rectifier-load [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1724-1730.
- [16] MCARDLE M G, MORROW D J. Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(2): 378-383.
- [17] LI X Y. A microprocessor-based fault monitor for rotating rectifiers of brushless AC exciters using a pattern-recognition approach [C] // *Conference Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Hamamatsu, 1994.
- [18] SALAH M, BACHA K, CHAARI A, et al. Brushless three-phase synchronous generator under rotating diode failure conditions [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, 29(3): 594-601.
- [19] 张超, 夏立. 基于谐波分析的旋转整流器故障检测[J]. *电机与控制应用*, 2008, 35(11): 51-54.
- ZHANG C, XIA L. Fault detection of rotary rectifier based on harmonic analysis [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2008, 35(11): 51-54.
- [20] 郝亮亮, 张杨, 屈天龙, 等. 多相多边形无刷励磁机及旋转整流系统的运行状态分析[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(4): 159-165.
- HAO L L, ZHANG Y, QU T L, et al. Operating state analysis of multi-phase angular brushless exciter and rotating rectifier system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(4): 159-165.
- [21] 郝亮亮, 王善铭, 邱阿瑞, 等. 多相无刷励磁系统旋转整流器故障的仿真与识别[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(4): 138-144.
- HAO L L, WANG S M, QIU A R, et al. Simulation and recognition for rotary rectifier fault of multi-phase brushless excitation system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(4): 138-144.
- [22] 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): 99-109.
- WU Y C, SUN S Q. Online detection method of open circuit fault of rotating diode in multi-phase brushless exciter [J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 99-109.
- [23] 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): 112-120.
- HAO L L, LI J H, LI H X, 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): 112-120.
- [24] CHEN J L, HAO L L, LI H Z, et al. Time-frequency characteristics analysis and diagnosis of rotating rectifier faults in multi-phase annular brushless system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(4): 3233-3244.
- [25] 刘念, 谢驰, 王涛, 等. 基于免疫算法的无刷励磁发电机旋转整流器故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 32-35.
- LIU N, XIE C, WANG T, et al. Immune algorithm in rotating rectifier fault diagnosis of brushless generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 32-35.
- [26] CAI Y A, HAO L L, ZHOU Y Z, et al. Rotating rectifier fault diagnosis of nuclear multiphase brushless excitation system based on DTW metric and KNN classifier [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 10329-10343.
- [27] 刘繁, 崔江, 林华. 一种航空发电机旋转整流器故障在线诊断技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 46(2): 104-108.
- LIU F, CUI J, LIN H. An online diagnosis technology of aero generator rotating rectifier fault [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 46(2): 104-108.
- [28] 朱瑞雨, 崔江. 一种航空发电机电枢绕组匝间短路故障诊断技术[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 22-35.
- ZHU R Y, CUI J. A fault diagnosis technique for armature winding inter-turn short circuit in aerospace generators [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 22-35.

收稿日期:2025-04-29

收到修改稿日期:2025-05-30

作者简介:

谢卓泰(2000-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统主设备故障分析及保护,22121535@bjtu.edu.cn;

*通信作者:郝亮亮(1985-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统主设备故障分析及保护、直流输电控制与保护和励磁控制,llhao@bjtu.edu.cn。