

计及绕组空间分布特征的核电站棒控电源发电机 定子接地故障定位方法

王义凯¹, 汤宸骁¹, 乔健^{1*}, 王增平¹, 王英阁¹, 尹项根², 徐天乐³, 顾乔根³

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003; 2. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074; 3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省 南京市 211102)

Stator Grounding Fault Location Method of CRDM Power System Generator in Nuclear Power Plant Considering Spatial Distribution Characteristics of Windings

WANG Yikai¹, TANG Chenxiao¹, QIAO Jian^{1*}, WANG Zengping¹, WANG Yingge¹,
YIN Xianggen², XU Tianle³, GU Qiaogen³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Resources (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China;
3. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Generator stator ground faults are the most common faults in the control rod drive system of a nuclear power plant. Accurately solving the winding fault location is of great significance for rapid fault maintenance and power supply recovery. Based on the spatial structure characteristics of the generator stator winding of the rod-controlled power supply system, the geometric modeling of the winding potential distribution characteristics under the Zig-Zag winding connection mode is carried out. Based on the spatial distribution characteristics of winding potential, the winding fault location method is constructed to realize the precise positioning of the whole winding. PSCAD/EMTDC simulation analysis and dynamic simulation test verify the accuracy of the proposed method, and prove that it is not affected by the grounding fault location, transition resistance and generator operation status.

KEY WORDS: rotating asynchronous machine; stator ground fault; winding fault location; Zig-Zag wiring form; spatial distribution characteristics of winding potential

摘要: 发电机定子接地故障是核电站棒控电源系统中最为常见的故障形式, 精确求解绕组故障位置对实现快速故障检修和供电恢复具有重要意义。该文基于棒控电源系统发电

机定子绕组的空间结构特点, 对 Zig-Zag 绕组接线方式下的绕组电势分布特征进行几何建模; 基于绕组电势空间分布特征构建绕组故障点定位方法, 实现全绕组精确定位; PSCAD/EMTDC 仿真分析和动模试验验证了所提方法的准确性, 并表明其不受接地故障位置、过渡电阻及发电机运行状况的影响。

关键词: 棒控电源系统; 定子接地故障; 绕组故障定位; Zig-Zag 接线方式; 绕组电势空间分布特征

0 引言

大型核电厂中, 核反应堆功率调节依赖于控制棒驱动机构(control rod drive mechanism, CRDM)对燃料棒插入和提出^[1-2]。为控制棒驱动机构供电的专用电气系统为棒控电源系统(rotating asynchronous machine, RAM), 其发电部分由 2 台参数完全相同的发电机构成, 2 台发电机并列运行, 互为后备^[3]。棒控电源系统发电机故障后, CRDM 系统的供电安全性受到威胁, 严重情况下可能导致控制棒落棒, 从而引发停堆事故, 对核电站的运行安全不利。因此, 工程中对棒控电源系统发电机的设备安全和可靠供电具有极端性需求。

工程统计数据表明, 定子绕组单相接地故障是发电机最常见的故障类型^[4-12]。核电站棒控系统发电机发生接地故障后, 低频注入式保护用于实现接

基金项目: 国家自然科学基金项目(52407100); 河北省自然科学基金项目(E2025502012)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52407100); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2025502012).

地故障检测与故障机组判别。判断出故障机组后,现有保护方法无法实现绕组故障点的定位,实际工程中往往通过逐次测量绕组线圈的绝缘情况以确定故障位置,费时费力^[13]。若能在故障发生后通过录波数据精确定位故障点,可以极大减少故障排查工作量和缩短故障机组停机检修时间,避免棒控电源系统长期处于无备用的单机供电状态。同时,由于不同故障位置采取的检修程序不同,高精度的故障定位结果对优化检修流程也有重要意义。

目前,已有一些针对定子接地故障定位的方法。文献[14-15]认为发生故障后发电机基波故障电势幅值大小和故障匝比呈正比例线性关系,其相位和基波相电势相同。然而,由于发电机定子绕组结构的分散性,实际机组各线圈电势呈非线性分布特征,文献[14-15]所近似认为的线性关系将导致较大的定位误差。文献[16]依据汽轮发电机各线圈连接点满足的 60° 相带分布关系,提出基于包络线几何特征的定位方法,提升了故障定位的精度。由于采用特殊的 Zig-Zag 绕组接线形式,文献[16]提出的方法无法适用于棒控电源发电机。文献[17-20]以线圈基波匝电势为单元分析故障电势分布特征,文献[21-22]以线圈三次谐波匝电势为单元分析故障电势分布特征。上述文献均采用基于匝电势分析单元的绕组电势空间构建方法。然而,核电站棒控电源机组采用短距绕组形式,由于绕组线圈节距小于极距,导致线圈两边槽导体会出现空间电角度差异。该方法忽略了线圈两边槽导体电势的相位差异,只能对绕组线圈连接处的故障进行准确定位,对于发生在非线圈连接处的故障存在一定的误差。

为此,本文提出核电站棒控电源系统发电机定子接地故障定位方法。基于棒控电源系统发电机定子绕组的空间结构特点,对 Zig-Zag 绕组接线方式下的绕组电势分布特征进行了几何建模。从发电机本身的绕组结构出发,通过绕组电势空间分布特征构建绕组故障点定位方法,实现全绕组精确定位。PSCAD/EMTDC 仿真分析和动模试验验证了所提方法的准确性,表明所提方法不受接地故障位置、过渡电阻和发电机运行状况的影响,具有较强的工程实用性。

1 核电站棒控电源系统接地故障特征分析

1.1 核电站棒控电源系统特点

核电站控制棒驱动机构电源系统的整体结构

示意图如图1所示。

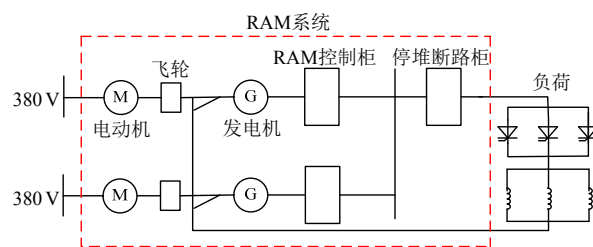


图1 核电站棒控电源系统的整体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall structure of the control rod drive mechanism system of the nuclear power plant

从图1可以看出,棒控电源系统由上游的380V电压供电,棒控电源系统由2台电动机、2台飞轮、2台发电机、2台棒控电源机组控制柜和停堆断路器柜组成。核电站棒控电源系统采用双机并列运行的方式。在正常运行状况下两台机组各承担50%的负荷,发生故障时故障机组解列停机进行检修,由非故障机组承担100%的负荷。在棒控电源系统的下游,通过三相半波整流电路,向核反应堆负荷供电。此外,棒控电源系统的两台发电机采用三相四线制结构。

相较于常规的隐极发电机,棒控电源系统内部存在由半波整流后的直流分量和高次谐波分量产生的恒定磁场及空间脉动磁场。若采用普通的绕组接线方式,易导致磁路饱和,进而导致负载特性受到影响。为此,棒控电源发电机采用特殊的 Zig-Zag 绕组接线方式,可以较好的消除直流分量产生的恒定磁场和空间脉动磁场。Zig-Zag 绕组接线方式和常规绕组接线方式的前半段相同,而后半段相当于其常规绕组接线方式下滞后相绕组的后半段反接而成,与前半段一起构成了新的绕组电势。这种特殊的绕组接线方式给其故障特征分析带来了困难。

1.2 基波电压故障特性分析

假设棒控电源系统中一台发电机A相发生单相接地故障,其故障等效电路如图2所示。

在图2中:设接地故障发生在距离中性点故障匝比为 α ; $E_{A\alpha}$ 为故障绕组电势; U_f 为故障对地电压; R_f 为定子接地故障过渡电阻。根据 KVL(Kirchhoff voltage laws),可以得出故障绕组电势 $E_{A\alpha}$ 、故障对地电压 U_f 、零序电压 U_0 的关系如下:

$$U_0 = U_f - E_{A\alpha} \quad (1)$$

当A相发生单相接地故障时,故障相基波对地

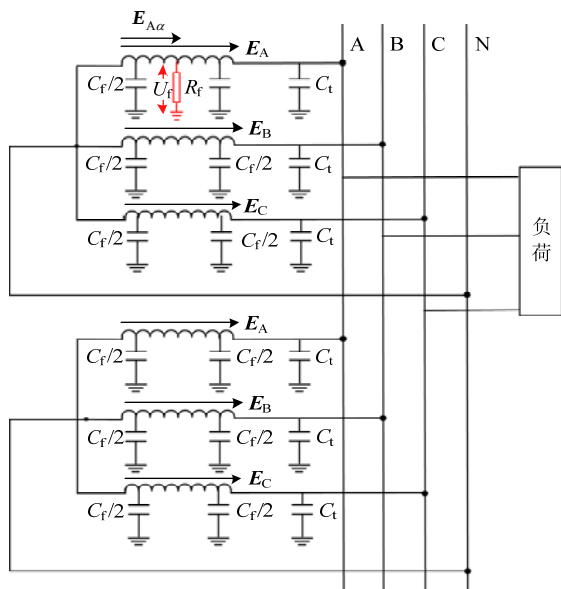


Fig. 2 Schematic circuit diagram of single-phase grounding of stator of RAM system generator

故障电流 I_f 如式(2)所示。

$$I_f = U_f / R_f \quad (2)$$

图2中: C_f 为定子绕组一相对地电容; C_l 为定子绕组机端对地电容, 令 C_Σ 为所有对地电容之和, 即 $C_\Sigma=6C_f+6C_l$ 。由此, 可得故障后系统基波对地电容电流 I_c , 如式(3)所示。

$$I_c = U_0 j \omega C_\Sigma \quad (3)$$

由故障等效电路可知, 在发生定子接地故障后, 系统的基波对地故障电流 I_F 与基波对地电容电流 I_C 幅值相等, 方向相反。结合式(2)、(3), 可得:

$$U_0 j\omega C_\Sigma + U_f / R_f = 0 \quad (4)$$

结合式(1)和(4), 可将故障对地电压 $\mathbf{E}_f$ 由故障绕组电势 $\mathbf{E}_{Aa}$ 代替, 得式(5)。

$$U_0(1+j\omega C_\Sigma R_f) + E_{A\alpha} = 0 \quad (5)$$

式(5)表示故障绕组电势和基波零序电压、过渡电阻、系统总对地电容之间的关系。由式(5)可以做出定子接地故障零序电压轨迹,如图3所示。

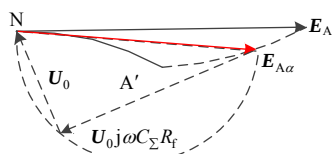


图3 定子接地故障中性点零序电压轨迹

Fig. 3 Neutral zero-sequence voltage trajectory of stator ground fault

由图 3 可以看出, 基波零序电压 U_0 的轨迹是

以故障绕组电势 $E_{A\alpha}$ 为直径的半圆由式(5)可得, 当发电机发生定子单相接地故障时, 故障后的中性点基波零序电压如式(6)所示。

$$U_0 = -\frac{E_{A\alpha}}{1+j\omega C_\Sigma R_f} \quad (6)$$

通过图 3 和式(6)可知,中性点基波零序电压 U_0 的大小受故障位置 α 的影响。若故障过渡电阻 R_f 已知,则故障后中性点基波电压 U_0 与故障电势 $E_{A\alpha}$ 是一一对应的关系,不会出现多解现象。工程上核电站棒控电源系统定子接地保护方法是测量故障过渡电阻,当故障过渡电阻小于设定值时发出告警信号,过渡电阻 R_f 在定子接地保护动作后为已知量。因此,如果可以求解出故障电势 $E_{A\alpha}$ 和故障位置 α 的表达式,就可以通过中性点基波零序电压 U_0 实现故障定位。因此,为了实现故障定位,需要结合棒控电源发电机的特殊绕组分布形式,推导出计及 Zig-Zag 接线形式后定子绕组的电势分布形式,即故障电势 $E_{A\alpha}$ 与故障位置 α 之间的关系。

2 核电站棒控电源发电机定子接地故障定位方法

传统的发电机定子接地故障定位方法往往忽略了绕组电势的分布特征,认为其幅值大小和故障匝比呈正比例关系,即将 $\mathbf{E}_{A\alpha}$ 直接等效为 $\alpha\mathbf{E}_A$, 导致存在较大计算误差。近年来,较为常用的定子接地故障定位方法是基于绕组电势分布的故障定位方法,然而,核电站棒控电源发电机的绕组形式特殊,常规绕组接线方式所使用的故障定位方法并不能用在核电站棒控电源发电机上。

此外,目前常用的故障电势建模方法基于匝电势分析单元。该方法只能实现对于发生在绕组线圈连接处故障位置的定位,对于发生在绕组非线圈连接处的故障定位存在较大误差。因此,本文从棒控电源发电机本身实际绕组结构出发,构建基于绕组电势本身空间分布特点的故障定位方法,以实现故障全绕组任意位置的精确故障定位。

2.1 计及绕组空间分布特点的故障电势建模方法

棒控电源发电机定子槽数 Z 为 96、极对数 p 为 2、极距 τ 为 24、节距为 20, 为短距绕组。一相分支数为 4, 槽距电角度为 7.5° 。采用特殊的 Zig-Zag 接线方式。棒控电源发电机一相共有 8 匝线圈、16 个槽。

Zig-Zag 绕组接线方式和常规绕组接线方式的

前半段相同,而后半段相当于其常规绕组接线方式下滞后相绕组的后半段反接而成,与前半段一起构成了新的绕组电势。基于其绕组空间结构分布特点构建的常规绕组接线方式下的电势分布和 Zig-Zag 接线方式下的电势分布如图4所示。

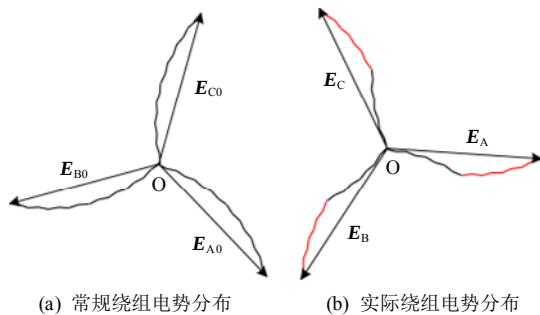


图4 考虑绕组电势相位分布后的
常规绕组电势分布和实际绕组电势分布

Fig. 4 Conventional and actual winding potential distributions after considering the phase distribution of winding potential

图4中: E_{A0} 、 E_{B0} 、 E_{C0} 为常规绕组电势分布的三相电势; E_A 、 E_B 、 E_C 为实际绕组电势分布的三相电势。可以看出,在 Zig-Zag 接线方式下,绕组电势分布会出现较大的不同,常规绕组电势分布和实际绕组电势分布的前半段相同,而在后半段上, Zig-Zag 的特殊绕组接线形式导致两者存在明显的差异。

棒控电源发电机在现有匝电势分析单元下的绕组电势分布如图5所示。

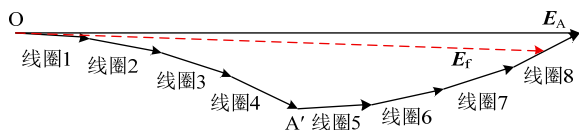


图5 现有匝电势分析单元下 A 相的
实际绕组电势分布情况

Fig. 5 The actual winding potential distribution of phase A under the existing turn potential analysis unit

实际上,定子绕组由多匝线圈串联组成,而每匝线圈是由分属不同槽编号的两根槽导体串联组成的。因此,故障绕组电势本质是所包含的所有槽导体电势的相量叠加。由于采用短距绕组的发电机定子绕组,绕组线圈节距小于极距,导致线圈两边槽导体会出现空间电角度差异,不能用一个线圈匝电势等效。在本文提出的计及绕组电势本身空间分布特点的构建方法下,实际绕组分布(以 A 相为例)如图6所示。

图6中:“ nU ”为发电机定子绕组第 n 匝线圈

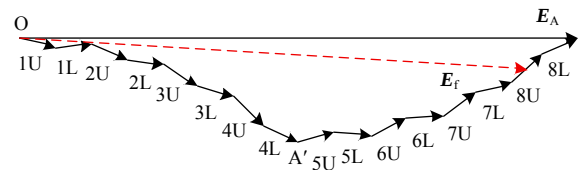


图6 计及绕组电势本身空间分布特点下 A 相的
实际绕组电势分布情况

Fig. 6 The actual winding potential distribution of phase A considering the spatial distribution characteristics of the winding potential itself

的上层槽导体;“ nL ”为发电机定子绕组第 n 匝线圈的下层槽导体。可以看出,本文所提方法对于发电机绕组电势的建模更加精细,也符合发电机本身绕组结构特征。对于发生在线圈连接处的故障,现有方法和本文所提方法会呈现相同的故障定位结果,但对于发生在绕组非线圈连接处的故障,现有方法由于用线圈匝电势等效串联的两根槽导体电势,因此,在进行故障定位时会存在误差。

由图6结合可得,基波故障电势和故障位置的关系如式(7)所示。

$$E_f(\alpha) = E_f(j/2i) + (2i\alpha - j)E_x \angle \beta_{x(j+1)}, \quad j = 0 \sim 2i \quad (7)$$

式中: $2i$ 为发电机定子绕组一支中槽导体的个数。对于核电站棒控电源发电机, $2i=16$; E_x 为定子绕组中槽导体的电势,其计算方式如式(8)所示。

$$E_x = \frac{U_T - U_0}{1 \angle \beta_{x1} + \dots + 1 \angle \beta_{x(j+1)} + \dots + 1 \angle \beta_{x2i}} \quad (8)$$

式中: U_T 为发电机机端电压; $\beta_{x1} \sim \beta_{x2i}$ 为基波槽导体相位,对于采用常规绕组接线方式的发电机,基波槽导体相位可以直接由发电机参数推导求得。

设发电机有 p 对极、 Z 个槽,则发电机的槽距电角度为 $360^\circ \times p/Z$ 。若以 1 号线圈的上层槽导体的相位 β_{x1} 为参考 0 相位,当节距为 y_1 时,1 号线圈的下层槽导体的相位为 $[\beta_{x1} - (180^\circ - y_1 \times (360^\circ \times p / Z))]$ 。在常规绕组接线方式下,各上层槽导体间的相位差和各下层槽导体间的相位差均为槽距电角度 $360^\circ \times p/Z$ 。可以得 $\beta_{x1} \sim \beta_{x2i}$ 的计算方法如式(9)所示。

$$\beta_x = \begin{cases} \beta_{x(2i-1)} = \beta_{x1} + \frac{360^\circ \times p}{Z} \times (i-1) \\ \beta_{x(2i)} = [\beta_{x1} - (180^\circ - y_1 \times \frac{360^\circ \times p}{Z})] + \frac{360^\circ \times p}{Z} \times (i-1) \end{cases} \quad (9)$$

式中 β_{x1} 为参考相位,在实际计算时可以人为指定,

不影响最后的结果。可以看出, $\beta_{x1} \sim \beta_{x2i}$ 的计算可以根据发电机的参数获得。

然而, 由于核电站棒控电源发电机采用 Zig-Zag 的绕组接线形式, 导致绕组后半段基波槽导体的相位($\beta_{x(i+1)} - \beta_{x2i}$)出现变化, 应根据图 4 中的实际绕组分布形式重新计算。

从图 7 可以看出, 实际绕组电势分布的后半段槽导体相位($\beta_{xi+1} - \beta_{x2i}$)和常规绕组电势分布的后半段槽导体相位存在较大不同, 应结合实际绕组电势分布的特点进行实际后半段槽导体相位的推导。

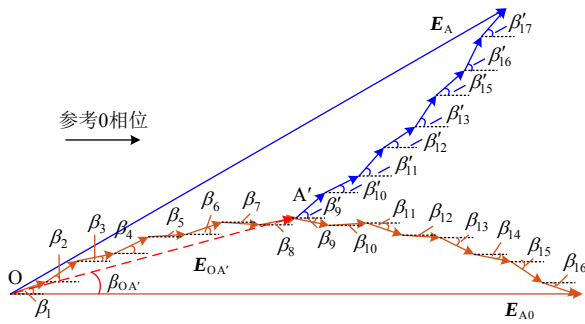


图 7 常规绕组电势分布和实际绕组电势分布的 A 相
Fig. 7 Phase A of the conventional and actual winding potential distribution based on slot potential analysis unit

设当故障发生在绕组中点(0.5 处)时, 故障电势为 $E_{OA'}$, 其相角为 $\beta_{OA'}$ 。由图 7 的几何关系及 Zig-Zag 接线方式的特点可知, 常规绕组电势分布的后半段槽导体和实际绕组电势分布的后半段槽导体关于故障电势 $E_{OA'}$ 对称。根据图 7 可得, 当故障发生在绕组中点处的故障电势 $E_{OA'}$ 等于绕组前半段的 8 个槽导体的向量和, 如式(10)所示。

$$E_{OA'} = E_x \angle \beta_{x1} + E_x \angle \beta_{x2} + E_x \angle \beta_{x3} + E_x \angle \beta_{x4} + E_x \angle \beta_{x5} + E_x \angle \beta_{x6} + E_x \angle \beta_{x7} + E_x \angle \beta_{x8} \quad (10)$$

由此, 可以求出实际绕组故障电势分布下的后半段槽导体相位计算式如式(11)所示。

$$\beta'_{xk} = 2\beta_{OA'} - \beta_{xk}, k = (i+1) \sim 2i \quad (11)$$

以上推导通过从棒控电源发电机本身的绕组结构出发进行故障电势建模, 利用槽导体电势为分析单元, 实现了对于棒控电源发电机特殊绕组形势下基波故障电势和故障位置关系的精确表达。

2.2 发电机定子接地故障定位方法

1 节中, 对棒控电源机组的基波故障特性进行分析, 并在图 3 中给出了定子接地故障零序电压轨迹。

根据接地故障零序电压轨迹可以得出其故障后的中性点基波电压和故障电势之间的数学表达如式(6)所示。式(6)中, U_0 可由录波数据获得, ω 、 C_Σ 均为已知量。工程上核电站棒控电源系统定子接地保护方法是测量故障过渡电阻, 当故障过渡电阻小于 10 kΩ 时发出告警信号, 过渡电阻 R_f 在定子接地保护动作后为已知量。因此, 只存在 $E_{A\alpha}$ 这一个未知量。可以根据式(6)求出发生定子接地故障时的故障电势。

联立式(6)和(7), 可得:

$$U_0(1 + j\omega C_\Sigma R_f) - E(j/2i) + (2i\alpha - j)E_x \angle \beta_{x(j+1)} = 0, \quad j = 0 \sim 2i \quad (12)$$

通过式(12), 即可对故障位置进行求解。将所测量的中性点基波零序电压 U_0 、过渡电阻 R_f 代入式(12)中。当测量值均为准确无误的理想值时, 只有真实故障位置 α 满足式(12)。而其他故障位置对应的函数值并不满足式(12), 且距离真实故障位置越远, 所对应的函数值越大。

考虑到实际工程中, 由于设备和测量误差等因素, 所获取的录波数据不可能是准确无误的理想值。因此, 即使是真实故障位置, 也无法严格满足式(12)中结果为 0 的关系。为此, 可以根据式(12)构建故障定位函数, 并将求解结果最小值对应的故障位置作为真实故障位置。根据式(12)构建故障定位函数, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} f(\alpha) = U_0(1 + j\omega C_\Sigma R_f) - E(j/2i) + (2i\alpha - j)E_x \angle \beta_{x(j+1)}, \\ j = 1 \sim 2i \end{cases} \quad (13)$$

当发生接地故障后, 将所记录的发电机中性点基波零序电压 U_0 的录波数据和定子接地故障保护装置所测量的过渡电阻 R_f 代入式(13)中。并对式(13)在取值范围上进行最小值计算并对比。式(13)计算所得最小值中所对应的故障位置 α 即为真实故障位置。

3 仿真分析与验证

准分布参数模型^[23]可以对发电机不同故障位置下的单相接地故障进行模拟, 因此, 本文基于 PSCAD/EMTDC 软件, 构建棒控电源系统发电机的准分布参数模型对所提方法进行仿真验证。核电站棒控电源发电机一相共有 4 分支, 总槽数为 96, 每个分支由 8 匝线圈串联构成, 槽距电角度为 7.5°。发电机定子绕组为消除直流分量产生的恒定磁场

定子绕组采用 Zig-Zag 接线方式。
其他的模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型中棒控电源机组的基本参数

Table 1 Basic parameters of CRDM system generator in simulation model

参数序号	参数名称	数值
1	基波电动势幅值/V	26.82
3	每匝线圈电感/mH	0.734 71
4	每匝线圈电阻/mΩ	0.382
5	每匝线圈电容/uF	0.024 812 5

本文所提故障定位方法基于定子绕组空间结构的准确建模，对于绕组任意位置的单相接地故障，都能实现准确的故障定位。为了验证所提故障定位方法的有效性，分别在发电机定子绕组非线圈连接处不同故障线圈下 0.293 75、0.593 75 和 0.793 75 故障位置处设置不同过渡电阻的单相接地故障，仿真结果如图 8 所示。此外，对同一线圈不同故障位置的情况进行验证，故障定位的具体结果和定位误差如表 2 所示。

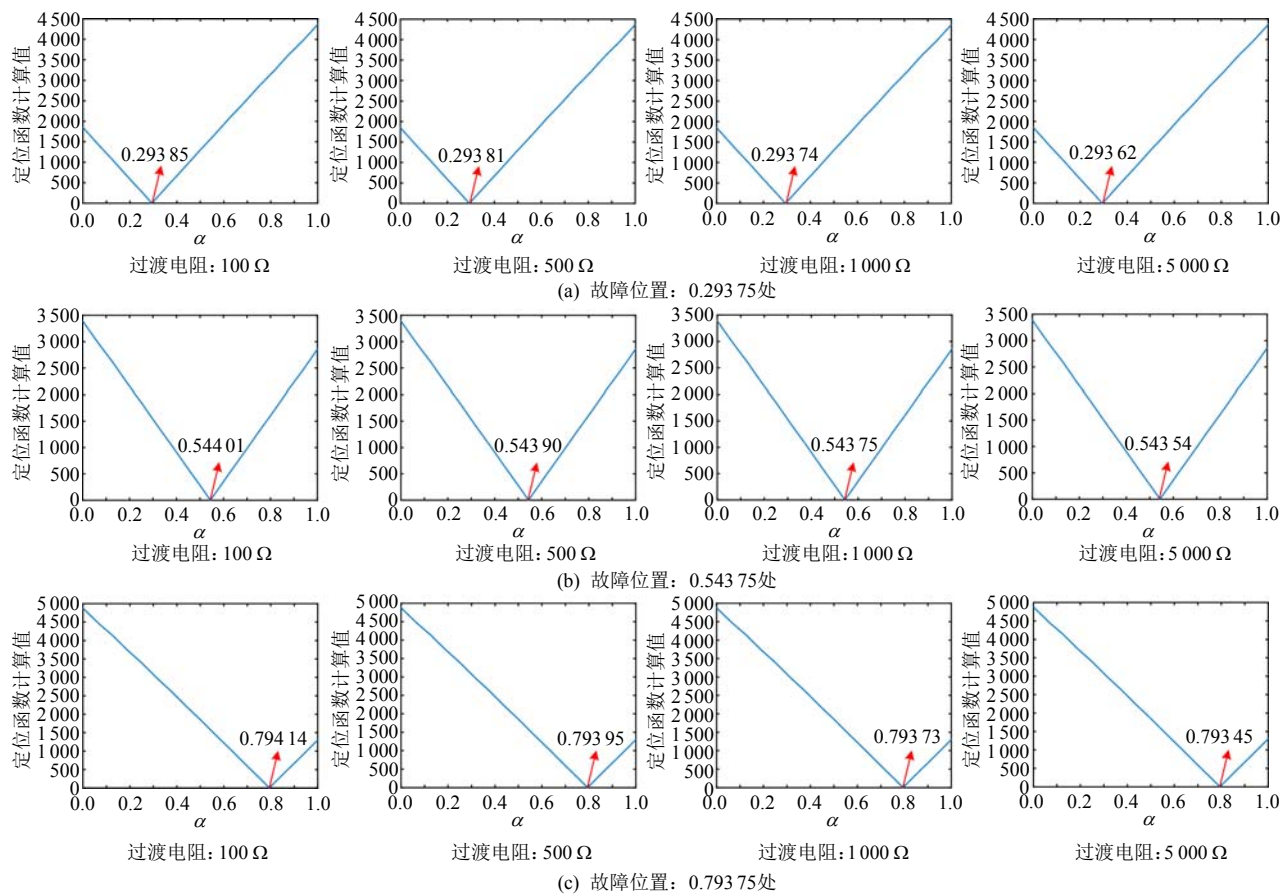


图 8 不同故障条件下的故障定位仿真结果

Fig. 8 Simulation results of fault location under different fault conditions

根据图 8 的定位结果和表 2 中的定位误差可以看出，所提方法不受故障位置和过渡电阻的影响，在不同故障状况下均能实现准确的故障定位。故障定位误差始终保持在 0.05% 以下，具备较强的工程实用性。
为了进一步对比本文所提故障定位方法相较于现有基于匝电势分析单元的故障定位方法的优势，在发电机定子绕组非线圈连接处故障位置 0.293 75、0.593 75 和 0.793 75 处采用现有基于匝电势分析单元的故障定位方法进行仿真，仿真结果和误差如图 9 和表 3 所示。

从图 9 和表 3 可以看出，基于匝电势故障电势分析单元的故障定位方法，对于发生在绕组非线圈连接处的故障无法准确定位故障位置，存在较大误差。本文所提方法相较于现有方法具有显著优势。
此外，由于接地故障发生在近中性点侧时基波零序电压幅值较小，可能会对故障定位产生影响，在发电机定子绕组近中性点侧非线圈连接处故障位置 0.043 75 设置故障，仿真结果见表 4。
从表 4 可以看出，即使故障位置很靠近中性点，本文所提方法依然可以准确计算故障位置。

表 2 定子接地故障仿真结果
Table 2 Stator ground fault simulation results

对比场景	故障位置 α	故障电势 E_f 实际值/(V $\angle^\circ$)	过渡电阻 R_f/Ω	故障电势 E_f 计算值/(V $\angle^\circ$)	故障定位结果 $\hat{\alpha}$	误差 $e/\%$
不同故障 线圈对应 不同过渡 电阻	0.293 75 (线圈 3)	62.57 $\angle$ 134.04	100	62.59 $\angle$ 134.12	0.293 85	0.03
			500	62.56 $\angle$ 134.15	0.293 81	0.02
			1 000	62.57 $\angle$ 133.96	0.293 74	0
			5 000	62.59 $\angle$ 133.78	0.293 62	0.04
	0.543 75 (线圈 5)	114.71 $\angle$ 136.66	100	114.77 $\angle$ 136.54	0.544 01	0.04
			500	114.75 $\angle$ 136.75	0.543 90	0.03
			1 000	114.72 $\angle$ 136.71	0.543 75	0
			5 000	114.78 $\angle$ 136.53	0.543 54	0.04
	0.793 75 (线圈 7)	164.89 $\angle$ 129.42	100	164.78 $\angle$ 129.29	0.794 14	0.05
			500	164.96 $\angle$ 129.51	0.793 95	0.02
			1 000	164.90 $\angle$ 129.38	0.793 73	0
			5 000	165.01 $\angle$ 129.52	0.793 45	0.04
相同故障 线圈对应 不同过渡 电阻	0.287 50 (线圈 3)	61.27 $\angle$ 133.69	100	61.29 $\angle$ 133.78	0.287 59	0.03
			500	61.29 $\angle$ 133.74	0.287 56	0.02
			1 000	61.27 $\angle$ 133.64	0.287 49	0
			5 000	61.31 $\angle$ 134.82	0.287 38	0.04
	0.300 00 (线圈 3)	63.87 $\angle$ 134.37	100	63.90 $\angle$ 134.44	0.300 09	0.03
			500	63.91 $\angle$ 134.43	0.300 10	0.03
			1 000	63.88 $\angle$ 134.39	0.300 01	0
			5 000	63.92 $\angle$ 134.10	0.300 12	0.04
	0.362 50 (线圈 3)	65.17 $\angle$ 134.69	100	65.14 $\angle$ 134.81	0.362 61	0.03
			500	65.18 $\angle$ 134.62	0.362 57	0.02
			1 000	65.17 $\angle$ 134.65	0.362 52	0
			5 000	65.13 $\angle$ 134.52	0.362 36	0.04

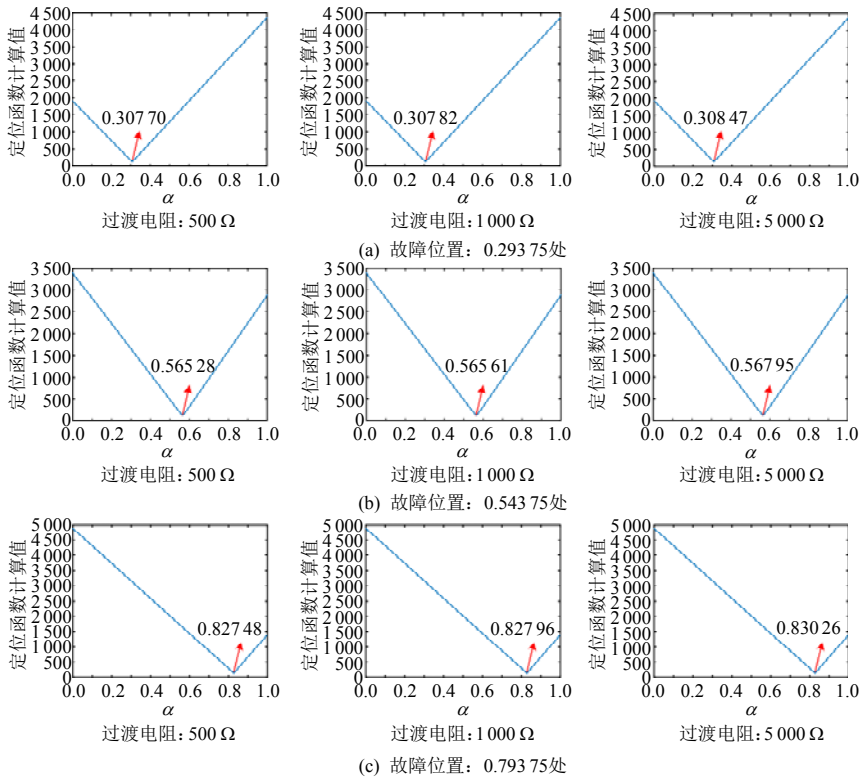


图 9 不同故障条件下现有方法的故障定位仿真结果

Fig. 9 Simulation results of existing method under different fault conditions

表 3 现有方法故障定位仿真结果及误差

Table 3 Simulation results of existing method and error

实际故障位置	过渡电阻/ Ω	故障位置仿真值	定位误差/%
0.293 75	500	0.307 70	4.75
	1 000	0.307 82	4.79
	5 000	0.308 47	5.01
0.543 75	500	0.565 28	3.96
	1 000	0.565 61	4.02
	5 000	0.567 95	4.45
0.793 75	500	0.827 48	4.25
	1 000	0.827 96	4.31
	5 000	0.830 26	4.60

表 4 近中性点侧故障位置故障定位仿真结果及误差

Table 4 Simulation results for fault position near the neutral point side

故障位置 α	过渡电阻 R_f/Ω	故障定位结果 $\hat{\alpha}$	误差 $e/\%$
0.043 75	100	0.043 79	0.08
	500	0.043 78	0.07
	1 000	0.043 77	0.05
	5 000	0.043 71	0.10

4 动模试验分析与验证

在仿真验证环节中，所使用的准分布参数仿真模型无法对发电机的不同负载工况下的励磁调节过程进行模拟^[24-26]，无法验证本文所提方法在发电机不同运行工况下的有效性。因此，搭建双机动模试验模型，以验证本文所提选择性故障定位和绕组故障定位方法的准确性。所使用的动模试验模型包含两台相同的发电机，以模拟核电站棒控电源双机系统。双机系统中机组的参数如表 5 所示。受实验室条件限制，所使用动模试验机组在容量，额定电

压和槽数等参数上和实际棒控电源发电机机组有差异，但其绕组连接方式采用与棒控电源发电机相同的 Zig-Zag 接线方式，具备相同的绕组空间电势分布特征，因此，所使用动模试验机组可以用于本文所提故障定位方法的验证。

表 5 动模试验机组参数

Table 5 Parameters of the dynamic experiment model

参数	数值
发电机容量/kVA	15
额定电压/V	400
每相分支数	2
极对数	1
总槽数	48
过渡电阻实现方式	滑线电阻器
绕组连接方式	Zig-Zag 接线方式

动模试验机组实物图如图 10 所示。

动模试验机组上有定子绕组抽头，抽头位置固定设置为 6.5%、20%和 46.5%处。定子绕组抽头与滑线电阻器相连，可以实现对不同故障位置 and 不同过渡电阻情况下定子接地故障的模拟。

以动模实验机组分别处于空载、50%负载和满载负荷情况为例，在定子绕组 46.5%抽头位置处，通过连接滑动变阻器接地设置过渡电阻为 100 Ω 的定子接地故障，并在 0.2 s 时合上绕组抽头和滑动变阻器间的开关，模拟接地故障。相电势和中性点电压波形如图 11 所示。

对于以上 3 种负载工况，采用本文所提定位方法，实验结果如图 12 所示。可以看出，所提故障定位方法在不同负载工况下均能实现准确故障定位，定位误差在 1%以下。验证了本文所提方法能够

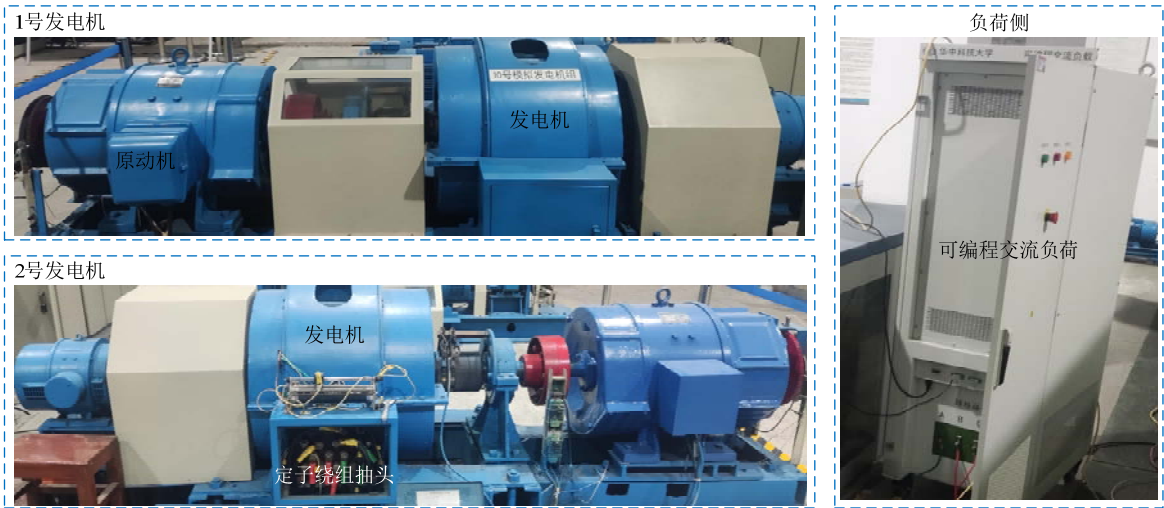


图 10 动模试验机组实物图

Fig. 10 Physical diagram of the dynamic experiment model

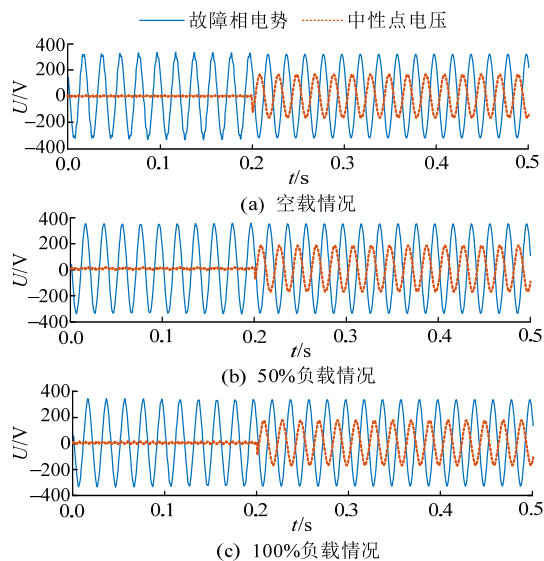


图 11 不同负载工况下发生接地故障时的相电势和中性点电压波形

Fig. 11 Phase potential and neutral point voltage waveforms during ground faults under different load conditions

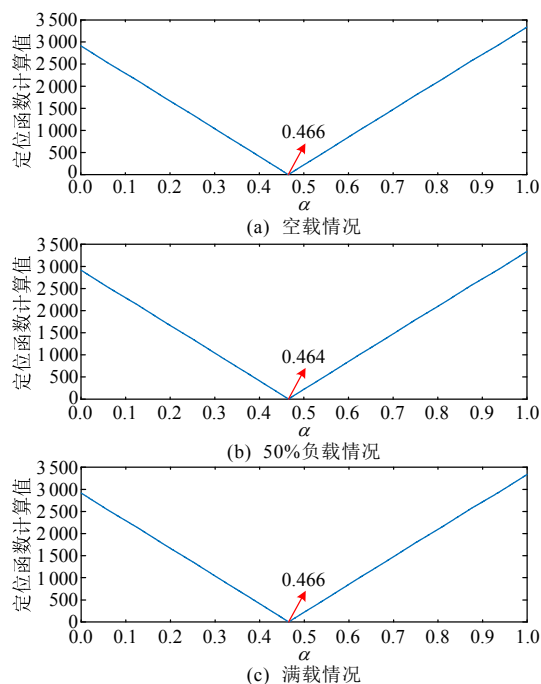


图 12 接地故障定位计算结果

Fig. 12 Ground fault location calculation results

适应不同的负载工况，具备较强的工程实用性。相较于仿真过程的相对理想化场景，动模试验受设备状态、电磁噪声、测量误差影响，定位结果存在更大误差，但误差范围在 1% 以内，能够证明所提方法的工程实用性。

此外，为了证明本文所提方法对于发生在近中性点侧接地故障的定位准确性，选取最靠近发电机中性点的抽头位置 6.5% 进行试验验证，试验结果如

表 6 所示。

表 6 近中性点侧故障位置故障定位试验结果及误差

Table 6 Experimental results for fault position near the neutral point side

故障位置 $\alpha/\%$	过渡电阻 R_f/Ω	负载情况	故障定位结果 $\hat{\alpha}/\%$	误差 $e/\%$
6.5	100	空载	6.52	0.35
		50%负载	6.53	0.39
		满载	6.53	0.41

从表 6 可以看出，即使故障发生在近中性点侧，本文所提方法依然可以准确定位故障位置，定位误差在 1% 以下，验证了本文所提方法的有效性。

5 结论

为满足核电站棒控电源发电机发生定子单相接地故障时，需要进行准确故障定位的要求，本文提出了核电站棒控电源系统发电机定子接地故障定位方法，得出以下结论：

1) 棒控电源发电机定子绕组采用 Zig-Zag 接线方式，前半段电势分布与常规绕组一致，后半段相当于由常规绕组接线方式下滞后相绕组的后半段反接而成。

2) 结合故障时中性点基波零序电压特征和绕组电势空间分布特点，从发电机定子绕组本身结构出发，构建计及绕组空间分布特征的棒控电源发电机定子接地故障定位方法，可实现全绕组任意故障位置的精确定位。

3) PSCAD 仿真分析和动模试验验证了所提方法的准确性，定位误差在 1% 以下，并表明本文所提方法不受故障位置、过渡电阻和发电机运行工况的影响，具有较强的工程实用性。

参考文献

- [1] YU Tianda, FU Guozhong, YU Yanqing, et al. Wear characteristics of the nuclear control rod drive mechanism (CRDM) movable latch serviced in high temperature water[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 26.
- [2] LI Zhi, HU Jianqiang, ZHOU Zhangxiang, et al. Visual inspection system for uncoupling status of control-rod drive rod in nuclear reactor[J]. Sensors, 2022, 22(22): 8805.
- [3] ZHU Lingjin, YIN Xianggen, TAN Liming, et al. Improvement of overcurrent protection for control rod drive mechanism power system[J]. Energy Reports, 2023, 9: 263-270.

- [4] WANG Yikai, TANG Chenxiao, TAN Liming, et al. A novel third-harmonic voltage protection method for the generator stator ground fault of nuclear power plant's rotating asynchronous machine[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(6): 3462-3472.
- [5] 谭力铭, 尹项根, 王义凯, 等. 自适应工况的大型水轮发电机定子接地故障定位方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4411-4422.
- TAN Liming, YIN Xianggen, WANG Yikai, et al. An adaptive load-based location method of stator ground fault for large hydro-generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4411-4422(in Chinese).
- [6] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 大型水轮发电机中性点接地方式的若干问题分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 7-12.
- BI Daqiang, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Study on how to ground for the neutral point of large-sized hydro-generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 7-12(in Chinese).
- [7] WANG Yikai, YIN Xin, YIN Xianggen, et al. A hybrid flexible neutral grounding mode for large generators [J]. Machines, 2022, 10(8): 684.
- [8] 徐雯, 王义凯, 尹项根, 等. 基于零序电压有源调控的发电机定子接地故障消弧方法及保护对策[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 197-202.
- XU Wen, WANG Yikai, YIN Xianggen, et al. Arc suppression method and protection countermeasures of generator stator grounding fault based on active control of zero-sequence voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 197-202(in Chinese).
- [9] 高俊国, 孟睿潇, 胡海涛, 等. 电机定子绝缘老化寿命预测研究进展[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3065-3074.
- GAO Junguo, MENG Ruixiao, HU Haitao, et al. Research progress on prediction of aging life of motor stator insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3065-3074(in Chinese).
- [10] 江建明. 发电机接地系统参数试验方法现场应用[J]. 电气技术, 2023, 24(4): 63-68.
- JIANG Jianming. Field application of test methods for generator grounding system parameters[J]. Electrical Engineering, 2023, 24(4): 63-68(in Chinese).
- [11] 何玉灵, 张文, 张钰阳, 等. 发电机定子匝间短路对绕组电磁力的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2879-2888.
- HE Yuling, ZHANG Wen, ZHANG Yuyang, et al. Effect of stator inter-turn short circuit on winding electromagnetic forces in generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2879-2888 (in Chinese).
- [12] QIAO Jian, YIN Xianggen, WANG Yikai, et al. A precise stator ground fault location method for large generators based on potential analysis of slot conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5203-5213.
- [13] 喻锴, 李理, 曾祥君, 等. 基于对地电压灵活调控的大型发电机定子接地故障降流消弧方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(3): 911-922.
- YU Kun, LI Li, ZENG Xiangjun, et al. Arc suppression method of large generator stator single-phase ground fault based on flexible regulation of stator to ground voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 911-922(in Chinese).
- [14] 陈俊, 刘梓洪, 王明溪, 等. 不依赖注入式原理的定子单相接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 104-107.
- CHEN Jun, LIU Zihong, WANG Mingxi, et al. Location method for stator single-phase ground fault independent of injection type principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 104-107(in Chinese).
- [15] 贾文超, 黄少锋. 水轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 134-139.
- JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Stator single-phase grounding fault location for hydro-generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 134-139(in Chinese).
- [16] 尹项根, 王义凯, 谭力铭, 等. 故障机理深度关联的大型发电机保护新原理探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 1-7.
- YIN Xianggen, WANG Yikai, TAN Liming, et al. Discussion on a new principle of large generator protection deeply associated with fault mechanisms [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 1-7 (in Chinese).
- [17] WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. The fault-current-based protection scheme and location algorithm for stator ground fault of a large generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 871-879.
- [18] 黄少锋, 贾文超. 大型汽轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 35-40.
- HUANG Shaofeng, JIA Wenchao. A new fault location method for stator single-phase ground fault in large turbine generator[J]. Power System Protection and

- Control, 2017, 45(9): 35-40(in Chinese).
- [19] 殷林鹏, 桂林, 张琦雪, 等. 基于基波电势分布特征的大型发电机定子接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 141-146.
- YIN Linpeng, GUI Lin, ZHANG Qixue, et al. Stator grounding fault location method based on distribution characteristics of fundamental wave potential[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 141-146(in Chinese).
- [20] TAI Nengling, STENZEL J. Differential protection based on zero-sequence voltages for generator stator ground fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 116-121.
- [21] JAAFARI K A, NEGAHDARI A, TOLIYAT H A, et al. Modeling and experimental verification of a 100% stator ground fault protection based on adaptive third-harmonic differential voltage scheme for synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3379-3386.
- [22] 王义凯, 尹项根, 谭力铭, 等. 基于三次谐波电势分布特征的发电机定子绕组接地故障定位方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3552-3562.
- WANG Yikai, YIN Xianggen, TAN Liming, et al. Generator stator winding ground fault location algorithm based on third harmonic potential distribution characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3552-3562(in Chinese).
- [23] 王义凯, 尹项根, 乔健, 等. 海洋核动力平台发电机定子绕组单相接地故障风险分析与实时定位[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 178-183.
- WANG Yikai, YIN Xianggen, QIAO Jian, et al. Risk analysis and real-time locating of single-phase grounding fault of generator stator winding for offshore nuclear power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 178-183(in Chinese).
- [24] 武玉才, 范轩杰, 白雨卉, 等. 基于可变节距等值线圈的汽轮发电机转子绕组匝间短路在线检测[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9844-9855.
- WU Yucai, FAN Xuanjie, BAI Yuhui, et al. On-line detection of inter-turn short circuit in turbine generator rotor winding using a variable-pitch equivalent coil [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9844-9855(in Chinese).
- [25] 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 Yucai, 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).
- [26] 王义凯, 尹项根, 谭力铭, 等. 发电机定子接地故障双频有源消弧策略及故障类型辨识[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4835-4847.
- WANG Yikai, YIN Xianggen, TAN Liming, et al. Generator stator ground fault active arc suppression and fault type identification method based on dual-frequency voltage regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4835-4847(in Chinese).



王义凯

在线出版日期: 2025-08-21.

收稿日期: 2025-04-08.

作者简介:

王义凯(1996), 男, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制, wangyikai@ncepu.edu.cn;

汤宸骁(2002), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, 15727205597@163.com;

*通信作者: 乔健(1997), 男, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、大型旋转机组保护, qiaojian@ncepu.edu.cn.

(责任编辑 邱丽萍)