

基于行星优化算法的变速抽水蓄能机组定子绕组 接地故障的精确定位方法

乔健¹, 王凯¹, 王义凯^{1*}, 尹昕², 余浩源¹, 苏毅³, 屠黎明³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003;

2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北省 武汉市 430070;

3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京市 海淀区 100085)

Accurate Location Method of Stator Winding Ground Fault of Variable Speed Pumped Storage Unit Based on Planetary Optimization Algorithm

QIAO Jian¹, WANG Kai¹, WANG Yikai^{1*}, YIN Xin², YU Haoyuan¹, SU Yi³, TU Liming³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Resources (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei Province, China; 3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Aiming at the stator ground fault with the highest fault probability of large units, this paper proposes an accurate location method for stator winding ground fault of variable speed pumped storage units based on planetary optimization algorithm. Firstly, according to the analysis of the fault equivalent circuit, the fault location idea based on the intersection of phasor trajectory is proposed and the corresponding fault location optimization model is constructed. Furthermore, the planetary optimization algorithm is introduced to solve the positioning model. Combined with the distribution characteristics of winding potential, the reasons for the phenomenon of multiple solutions of fault location results are analyzed and summarized. By introducing the injection information or the third harmonic voltage information as the auxiliary information, the multi-solution screening of the positioning is realized, and the unique solution of the positioning is obtained. Finally, the effectiveness of the proposed positioning method is proved by simulation and experimental analysis.

KEY WORDS: variable speed pumped storage power unit; stator ground fault; fault location; planetary optimization algorithm; multiple solutions screening method

摘要: 针对大型机组故障概率最高的定子接地故障, 该文提出一种基于行星优化算法的变速抽水蓄能机组定子绕组接

地故障的精确定位方法。首先, 根据故障等值电路分析, 提出基于相量轨迹交点的故障定位思路并构造对应的故障定位最优化模型; 进而, 引入行星优化算法对该定位模型进行求解。结合绕组电势的分布特征, 分析并总结出故障定位结果多解现象的原因。通过引入注入式信息或三次谐波电压信息作为辅助信息, 实现定位多解筛选, 得到定位的唯一真解; 最终, 通过仿真与实验分析证明所提定位方法的有效性。

关键词: 变速抽水蓄能机组; 定子接地故障; 故障定位; 行星优化算法; 多解筛选方法

0 引言

定子接地故障是大容量机组故障概率最高的故障类型, 也是绕组短路故障的先兆。目前, 大型变速抽水蓄能机组普遍采用双频式定子接地保护^[1]和注入式定子接地保护^[2], 其保护方案已较为成熟。当接地保护动作使机组停机后, 工作人员需检查机组的内外部绝缘, 排查故障位置并进行维修, 其工作量大且停机时间长。故障检修程序与故障位置有关, 对于机端故障可直接进行修复, 而对于绕组内的接地故障需转子吊心后进行检修。因此, 若预先实现接地故障的精确定位, 可减轻排查工作并优化检修流程^[3], 具有重要意义。

近年来, 定子接地故障定位问题已是行业研究的热点难题。各国学者提出了多种故障定位思路,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52507099)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52507099).

如基于电路原理的电势分析法^[4]、基于外接低频电源的注入式法^[5]、基于磁场畸变的磁通分析法^[6]和基于数据训练的智能学习法^[7]。电势分析法和注入式法是接地保护功能的延伸，在工程中的接受度更高。电势分析法的本质是基于绕组感应电势的相位分布特征实现故障位置的电路求解^[8]。对于汽轮发电机，其绕组电势通常为 60°相带分布，每相两分支电势互不重合，要求同时定位故障分支和故障位置(故障点在分支总长中的占比)。文献[9]将绕组电势的包络线视为圆弧，基于电势分布的几何简化实现故障定位；文献[10]结合高压发电机的绕组材料特点，对常规 60°相带分析法进行改进。对于水轮发电机，其绕组电势通常为多组相带串联组成^[11]，每相各分支电势重合，仅要求定位故障位置。文献[12]通过查表法刻化其绕组电势的分布特征，进而实现故障线圈的定位。变速抽蓄机组的绕线方式、极对数、槽数、分支数等参数特点介于汽轮发电机和水轮发电机之间，使其接地定位方法的思路和要求与二者均有不同。注入式法并不关注机组类型，也不要求实现故障分支识别，注入电源的安装位置多样，如中性点的二次侧^[13]、机端侧电压互感器的二次侧^[14]和机端的一次侧^[15]。磁通分析法^[16]较为巧妙，但相关研究较少，其本质是利用磁通的特征反映不同的接地故障。智能学习法主要有神经网络法^[17]、集成学习法^[18]、层次聚类法^[19]等。智能学习法通常依赖数据样本的准确度，对于不同类型机组，尤其是电势分布差异较大的机组，其通用性很难满足工程要求。

本文结合变速抽蓄机组的绕线方式和参数特点，提出一种基于行星优化算法的定子绕组接地故障的精确定位方法。根据零序等值电路中各参数的相量关系，提出基于相量轨迹交点的接地故障定位思路和故障定位最优化模型；进而，引入行星优化算法对该定位模型进行求解；在此基础上，结合绕组电势分布特征阐释定位结果多解的原因；通过引入注入式测量信息和三次谐波测量信息实现多解筛选，将定位结果筛选至故障分支上的唯一真解；最后，通过仿真与实验分析，证明所提定位方法在不同故障条件下均具有较高的定位精度。检修人员可根据定位结果直接对故障位置进行检修，相较于传统耗时数日的逐个线圈排查方案，所提定位方法的求解用时可忽略不计，能够大幅缩短故障停机时间。

1 基于相量轨迹交点的故障定位思路

大型变速抽水蓄能发电电动机的定子中性点通常经高阻接地，发生单相接地故障后的基频零序等值电路如图 1 所示^[4,9]。

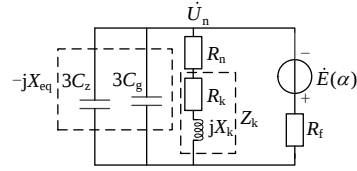


图 1 定子接地故障的基频零序等值电路

Fig. 1 Fundamental frequency zero-sequence equivalent circuit of stator ground fault

图 1 中： R_f 为接地电阻； $\dot{U}_n$ 为中性点处的零序电压； Z_k 为接地变压器的短路阻抗； R_k 和 X_k 分别为短路阻抗的电阻和电抗分量； R_n 为中性点接地电阻的一次值； C_g 和 C_z 分别为单相绕组对地电容和外部等效对地电容； $\dot{E}(\alpha)$ 为故障绕组(故障点至中性点)的基频电势； α 为故障绕组在整个绕组中的占比，介于 0~1 之间。

根据电路分析可得：

$$\dot{U}_n \left(\frac{1}{R_{eq} + jX_k} + \frac{1}{-jX_{eq}} \right) + (\dot{U}_n + \dot{E}(\alpha)) \frac{1}{R_f} = 0 \quad (1)$$

式中： $R_{eq} = R_n + R_k$ ； $X_{eq} = 1/(3\omega C_z + 3\omega C_g)$ 。

对式(1)进行变换，可得：

$$\dot{U}_n + \dot{E}(\alpha) = \dot{U}_f = \frac{-R_{eq} - j[(R_{eq}^2 + X_k^2)/X_{eq} - X_k]}{R_{eq}^2 + X_k^2} R_f \dot{U}_n \quad (2)$$

式中 $\dot{U}_f$ 为故障点电压。 $\dot{U}_f$ 与 $\dot{U}_n$ 在相量图中的夹角 θ 受该式的分子部分决定，具体为

$$\theta = 180^\circ - \arctan\left(\frac{R_{eq}^2 + X_k^2 - X_k X_{eq}}{R_{eq} X_{eq}}\right) \quad (3)$$

式中夹角 θ 是容易获得的。因为中性点接地的阻抗参数 R_{eq} 和 X_k 是已知量，等效对地容抗 X_{eq} 与运行工况匹配，可由电站提供。

以 A 相接地故障为例，故障后三相对地电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 和中性点电压 $\dot{U}_n$ 可分别由机端和中性点处的电压互感器测量得到，在相量平面中如图 2 所示。图 2 中，接地符号表示零电位，O 表示定子绕组的中性点。当夹角 θ 被确定后，相量 $\dot{U}_f$ 的相位能够随之被确定。但由于故障过渡电阻 R_f 是未知的，相量 $\dot{U}_f$ 的幅值无法确定，故将相量 $\dot{U}_f$ 表示为图中的红色虚线。

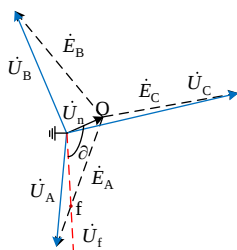


图2 A相发生接地故障后的电压相量图

Fig. 2 Voltage phasor diagram of A phase ground fault

进一步, $\dot{U}_f$ 的轨迹终点应与故障相绕组电势 $\dot{E}_A$ 相交, 该终点(交点)f为故障点, 从而满足式(2)中 $\dot{U}_n + \dot{E}(\alpha) = \dot{U}_f$ 的三角形关系。基于该特征, 可构造故障定位的最优化模型:

$$\min o_{bj}(\alpha) = |\angle(\dot{U}_n) - \angle(\dot{U}_n + \dot{E}(\alpha)) - \delta| \quad (4)$$

式中 $\angle()$ 为求相位的计算符号。该最优化模型中 o_{bj} 为最优目标函数, 故障位置 α 为决策变量。

求解式(4)的前提是准确刻画 $\dot{E}(\alpha)$ 与 α 的映射关系, 即明确机组绕组电势的相位分布规律。在传统的定子接地故障定位研究中, 忽略了 $\dot{E}(\alpha)$ 的相位特征, 认为 $\dot{E}(\alpha) = \alpha \dot{E}_A$ [20], 故障点为图2中相量 $\dot{U}_f$ 和 $\dot{E}_A$ 的轨迹交点, 据此实现故障定位, 但无法判断故障分支。此外, 该简化处理导致定位误差极大, 而实际变速抽蓄机组的绕组电势分布十分复杂。

2 变速抽蓄机组定子绕组电势分布的特征分析

汽轮发电机定子绕组常采用叠绕组绕线形式, 相邻线圈的感应电势相位差值为槽距电角度, 整个分支电势多为单一 60°相带分布; 水轮发电机常采用波绕组绕线形式, 由感应电势相位一致的多个线圈构成一个线圈单元, 线圈单元之间的相位差值为槽距电角度, 整个分支电势由多个线圈单元依次串联构成, 其相带分布特点因机组而异, 多由数段相带串联组成。变速抽蓄机组的诸多参数特点介于二者之间, 如极对数、转速、定子槽数、每分支线圈匝数等。所以, 汽轮发电机和水轮发电机的定子绕组结构和电势分布特点在变速抽蓄机组上均有不同程度的体现。在绕线形式上, 变速抽蓄机组采用叠绕组绕线形式, 与汽轮发电机相似, 其绕组电势分布易于构成 60°相带。但受每分支线圈匝数较多的影响, 与水轮发电机相似, 其绕组电势分布不会仅有一个 60°相带, 而是由多段相带串联组成。

以一台 300 MW 实际变速抽蓄机组为例, 其定子槽数为 252, 极对数为 7, 槽距电角度为 10°, 极

距为 18, 节距为 15(短距绕组), 定子每相并联分支数为 4, 每分支串联匝数为 21。由于槽距电角度为 10°, 故 6 匝线圈可组成一个 60°相带, 而每分支有 21 匝线圈, 其绕组电势是由 3 段 60°相带(共 18 匝线圈)和一段不规则相带(共 3 匝线圈, 采用跳线接法, 相带约为 40°)构成的。根据该机组实际的三相绕组连接顺序, 以匝电势相量为单元(即包络线法[21])画出定子绕组的每分支电势分布如图3左侧所示, 其中, A相各分支绕组电势分布的细节如图3右侧所示。

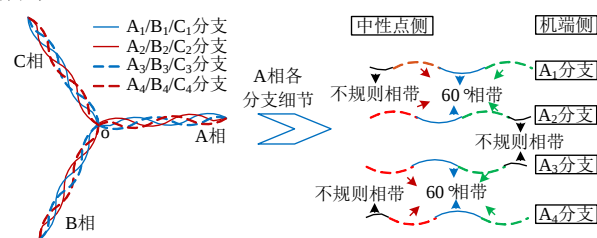
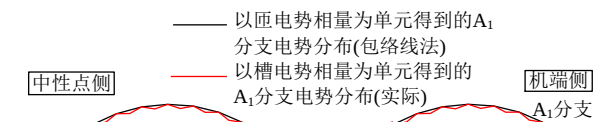


图3 变速抽蓄机组定子绕组的各分支电势分布及其细节

Fig. 3 Potential distribution and details of stator winding each branch of the variable speed pumped storage unit

由图3可知: 变速抽蓄机组的定子绕组电势分布具有两个特点: 1) 每相的四分支电势分布互不重合; 2) 对于每一相, 不规则相带与 60°相带呈首尾交替变化的特点。对于特点1), 由于每相各分支电势分布互不重合, 使其具备判断接地故障位于哪一支的前提。对于特点2), 不规则相带的出现和多段相带连接的特点使包络线的几何特点变得复杂, 难以简单地得到绕组电势分布的数学表达式。

更关键的是, 大型变速抽蓄机组的定子绕组多为短距绕组形式, 构成每匝线圈的两根槽导体感应电势存在相位差异。若考虑该相位差异, 在图3的基础上做进一步的细化, 以槽电势相量为单元画出定子绕组的 A_1 分支实际的电势分布, 如图4所示, 本文仅以 A_1 分支为例, 其他分支具有类似特点。

图4 定子绕组 A_1 分支电势的实际分布Fig. 4 The actual distribution of the branch potential of the stator winding A_1

可以发现, 在线圈中点处两者相差最大, 现有电势分布计算方法简化处理的引入的量化误差如图5所示, 其误差基准为单根槽导体电势幅值。因此, 包络线分析法在不同故障位置下的最大误差可能超过槽导体电势的 30%。尽管图4中两种分析

方法的电势分布较为接近,但由于图 3 中定子每相四分支的绕组电势分布过于密集,超过 30% 的电势计算误差极有可能对故障分支的准确识别造成不利影响。4 节的仿真分析结果中也证明了所提精确电势计算是有必要的。

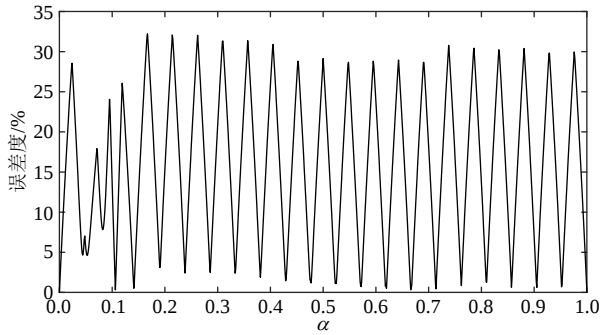


图 5 包络线法在不同故障位置下的计算误差

Fig. 5 Calculation error of the envelope method under different fault locations

为了精确刻画定子的复杂电势分布特征,体现不同分支的具体差异,选择以槽电势为单元的绕组电势计算方法,对于绕组连接顺序为 $(x_1U, x_2L) \Rightarrow (x_3U, x_4L) \Rightarrow \dots \Rightarrow (x_{2i-1}U, x_{2i}L)$ 的分支, $x_1 \sim x_{2i}$ 表示定子槽编号, U 和 L 分别表示槽内上、下层边导体。将编号为 x 的槽导体电势可记为 $\dot{E}_x \angle \beta_x$, $\beta_x = \pm x\theta$, θ 为槽距电角度,“ $\pm$ ”根据抽蓄机组的工况确定,其本质是发电工况和电动工况的转子转向相反产生的。

根据槽电势分析方法^[22],令 $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_n$ 表示分支所在相的机端电压和中性点电压。可得到故障绕组电势 $\dot{E}(\alpha)$ 与故障位置 α 的数学关系:

$$\dot{E}(\alpha) = \begin{cases} 2i\alpha\dot{E}_x \angle \beta_{x1}, & 0 < \alpha \leq 1/(2i) \\ \dot{E}[1/(2i)] - (2i\alpha - 1)\dot{E}_x \angle \beta_{x2}, & 1/(2i) < \alpha \leq 2/(2i) \\ \vdots & \vdots \\ \dot{E}(\frac{j-1}{2i}) + (-1)^{j-1}(2i\alpha - j + 1)\dot{E}_x \angle \beta_{xj}, & \frac{j-1}{2i} < \alpha \leq \frac{j}{2i} \end{cases} \quad (5)$$

$$\dot{E}_x = (\dot{U}_s - \dot{U}_n) / [1 \angle \beta_{x1} - 1 \angle \beta_{x2} + \dots + (-1)^{j-1} \angle \beta_{xj} + \dots + 1 \angle \beta_{x2i-1} - 1 \angle \beta_{x2i}]$$

该电势计算方法不受多段相带不规则连接特点的影响,可准确刻画变速抽水蓄能机组的定子绕组电势分布。

3 基于行星优化算法的故障定位方法

3.1 行星优化算法

本文采用行星优化算法求解式(4)和(5)联立得到的最优化模型。该算法通常会随机生成一定数量

的行星,所有行星都具有一定的质量。由于行星之间存在万有引力,所有行星从初始位置开始,每颗行星会随机被吸引到一个位置。通过计算可得每颗行星当前的质量值及其所在位置,比较得到的行星质量值,质量最大行星的位置即为当前最优解,重复上述迭代过程,直到找到最优解为止,具体步骤如下。

1) 给定初始行星数量 N , 最大迭代次数 T , 太阳与行星之间的最小距离 $R_{\min}$ 。

2) 计算每个行星的质量。

$$m_i, m_j = \frac{1}{a^{o_{bj,j}/\varepsilon}} \quad (6)$$

式中: m_i 和 m_j 分别为第 i 和 j 颗行星的质量; $a=2$; $\varepsilon = |\max(o_{bj}) - o_{bj-\text{sun}}|$, 即如果一个行星的目标函数值越小,这个行星的质量就越大; $o_{bj,j}$ 为第 i 个或第 j 个行星的目标函数值; $\max(o_{bj})$ 为行星的最差目标函数值; $o_{bj-\text{sun}}$ 为行星的最佳目标函数值。

3) 计算第 t 次迭代时第 i 颗和第 j 颗行星之间的距离 R_{ij} 。

$$R_{ij} = \|X_i^t - X_j^t\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{Dim} (X_i^t - X_j^t)^2} \quad (7)$$

式中: X_i^t 为第 i 颗行星在第 t 次迭代中的位置; X_j^t 为第 j 颗行星在第 t 次迭代中的位置。

4) 计算第 t 次迭代时行星间的力矩。

$$M = |\vec{F}| R_{ij} = G \frac{m_i m_j}{R_{ij}^2} \times R_{ij} \quad (8)$$

式中: $|\vec{F}| = G m_i m_j / R_{ij}^2$ 为两颗行星之间的引力; G 为引力常数。

5) 计算太阳与每个行星之间的距离 $R_{\text{sun-planet}(i)}$, 将其与给定的太阳与行星之间最小距离 $R_{\min}$ 进行对比,根据对比结果选择第 i 颗行星在第 $t+1$ 次迭代中的搜索方式。

若 $R_{\text{sun-planet}(i)} > R_{\min}$, 则第 i 颗行星在搜索其第 $t+1$ 次迭代中的位置时采用全局搜索。

$$\vec{X}_i^{t+1} = \vec{X}_i^t + b \times \beta \times r_1 \times (\vec{X}_{\text{sun}}^t - \vec{X}_i^t) \quad (9)$$

式中: $\vec{X}_i^t$ 为第 i 颗行星在第 t 次迭代中的位置; $\beta = M_i^t / M_{\max}^t$; M_i^t 为第 t 次迭代时太阳对第 i 颗行星的力矩; $M_{\max}^t$ 为第 t 次迭代中 M_i^t 的最大值; $r_1 = \text{rand}(0,1)$; b 为常数; $\vec{X}_{\text{sun}}^t$ 为第 t 次迭代中太阳的位置。

若 $R_{\text{sun-planet}(i)} < R_{\min}$, 则第 i 颗行星在搜索其第 $t+1$

次迭代中的位置时采用局部搜索。

$$\overline{X}_i^{t+1} = \overline{X}_i^t + c \times r_1 \times (\overline{r}_2 \times \overline{X}_{\text{sun}}^t - \overline{X}_i^t) \quad (10)$$

式中: $c = c_0 - t/T$; t 为第 t 次迭代; T 为最大迭代次数; $c_0 = 2$; r_2 的取值满足均值为 0.5, 标准差为 0.2 的高斯分布。

6) 进行迭代寻优, 重复执行步骤 2) — 5), 判断当前最佳行星质量是否大于上次迭代结果, 直到达到设置的最大迭代次数 T , 输出最优解。

综上所述, 根据所提行星优化算法能够对该定位最优化模型进行求解。仍以前述机组发生 A 相接地故障为例, 基于槽电势分析对图 2 中的绕组电势分布做进一步细化, 得到的电压相量图如图 6 所示。图 6(a)和(b)对应两个不同的故障情况(不同的故障位置和故障过渡电阻)。为便于展示细节, 在图中略去了非故障相。可以发现, 故障相电势 $\dot{E}_A$ 由多段折线构成, 每一段对应一根槽导体感应电势。

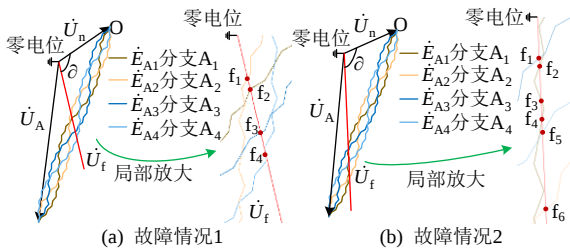


图 6 考虑绕组电势分布特征的电压相量图

Fig. 6 Voltage phasor diagram considering winding potential distribution characteristics

可以发现, $\dot{U}_f$ 的轨迹与绕组电势存在多个交点, 由于事先不知道故障位于哪个分支, 所以存在接地故障定位多解的现象, 可将每个交点称为备选故障点。由于四分支绕组电势分布互不重合, 故定位多解个数等于分支数的现象是容易理解的。但由于绕组电势分布过于复杂, 存在图 6(b)所示的备选故障点个数大于分支数, 单分支上的多个备选故障点相距极近的特殊情况, 如 f_2 、 f_3 和 f_4 。使接地故障定位的多解问题更加复杂。

3.2 定位多解筛选对策

根据上文分析, 利用行星优化算法对式(4)求解, 将计算得到的各备选故障点记为 α'_1 、 α'_2 、 α'_3 、 $\dots$ 。在此基础上, 基于式(2)可反推各备选故障点对应的故障电阻:

$$R_f = \text{abs} \left[\frac{(\dot{U}_n + \dot{E}(\alpha))(R_{\text{eq}}^2 + X_k^2)X_{\text{eq}}}{\dot{U}_n(R_{\text{eq}}X_{\text{eq}} + j(R_{\text{eq}}^2 + X_k^2 - X_kX_{\text{eq}}))} \right] \quad (11)$$

类似地, 将各备选故障点对应的故障过渡电阻记为 R'_{f1} 、 R'_{f2} 、 R'_{f3} 、 $\dots$, 根据相量轨迹交点法可获

得各备选故障点对应的故障位置和故障过渡电阻, 但尚未对这些备选故障点进行筛选。因此, 需要引入辅助信息实现进一步的判断。在常规大型发电机组的定子接地故障保护中, 注入式保护和三次谐波电压保护是基频零序电压保护的补充。因此, 利用注入式信息或三次谐波信息作为辅助信息是一种思路。

对于注入式信息, 由于注入式定子接地保护具有测量故障过渡电阻的能力, 可将其测量值记为 R'_f 。通过对比 R'_f 与 R'_{f1} 、 R'_{f2} 、 R'_{f3} 、 $\dots$ 的差异大小, 就能够实现备选故障点的筛选。若共有 k 个备选故障点, 则第 h 个备选故障点的是实际故障位置的的概率指标为

$$P_h = \left(\frac{1}{|R'_f - R'_{fh}|} \right) / \left(\frac{1}{|R'_f - R'_{f1}|} + \dots + \frac{1}{|R'_f - R'_{fk}|} \right) \quad (12)$$

式中 P_h 为第 h 个备选故障点为实际故障位置的的概率指标, 所有备选故障点的概率指标之和为 1, 故概率指标越大, 其为实际故障点的可能越大。

对于三次谐波信息, 受机组的气隙磁通非完全正弦分布和铁磁饱和特性的影响, 绕组电势中会含有一定的三次谐波含量^[23]。故障后三次谐波等值电路如图 7 所示。图中: $\dot{E}_3^{\text{phase}}$ 为定子绕组的三次谐波电势; $\dot{U}_s^3$ 和 $\dot{U}_n^3$ 分别为机端和中性点的三次谐波电压, 二者可直接测量得到; $\dot{E}_3(\alpha)$ 为故障绕组的三次谐波电势。

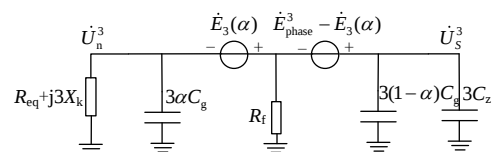


图 7 故障后的三次谐波等值电路

Fig. 7 The third harmonic equivalent circuit after fault

由基尔霍夫电压定律可得:

$$\dot{U}_n^3 + \dot{E}_3(\alpha) = \dot{U}_f^3 = \dot{I}_f^3 R_f \quad (13)$$

式中相量 $\dot{U}_n^3$ 、 $\dot{E}_3(\alpha)$ 和 $\dot{U}_f^3$ 也存在一个相量三角形关系, 相量 $\dot{U}_f^3$ 的终点(与相量 $\dot{E}_3(\alpha)$ 的交点为故障点)。发生接地故障后, 相量 $\dot{U}_f^3$ 的相位与相量 $\dot{I}_f^3$ 的相位一致, 且相对 $\dot{U}_n^3$ 的相位差仅与分配在机端和中性点的对地阻抗有关。因此, 只要各备选故障点在相量图中与零电位不构成一条直线, 则具备了筛选备选故障点的前提条件。

以图 6(b)所示的多解情况为例进行分析, 备选

故障点 f_2 、 f_3 和 f_4 均位于 A_1 分支上。 A_1 分支的三次谐波电势分布如图 8 所示。与图 6(b) 不同, 各备选故障点与零电位不在一条直线上, 其他分支上的备选故障点也存在类似现象。这是因为绕组三次谐波电势分布与基频电势分布规律不同导致的, 验证了利用三次谐波电压信息筛选备选故障点的可行性。

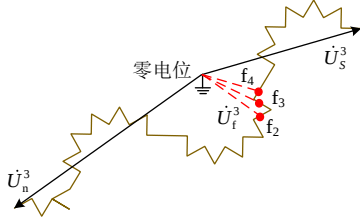


图 8 f_2 、 f_3 和 f_4 在 A_1 分支的三次谐波电势相量分布情况

Fig. 8 Distribution of the third harmonic potential phasors of f_2 , f_3 and f_4 in the A_1 branch

对式(13)进行细化分析, 可知故障后的实际故障位置 α 和实际故障过渡电阻 R_f 满足:

$$\dot{U}_n^3 \left(\frac{1}{R_{eq} + j3X_k} + \frac{j9\alpha}{X_g} \right) + \frac{(\dot{U}_n^3 + \dot{E}_3(\alpha))}{R_f} + \dot{U}_s^3 j \left(\frac{9(1-\alpha)}{X_g} + \frac{9}{X_z} \right) = 0 \quad (14)$$

式中: $X_g = 1/\omega C_g$; $X_z = 1/\omega C_z$ 。 $\dot{E}_3(\alpha)$ 的计算方法类似于式(5), 具体为

$$\dot{E}_3(\alpha) = \begin{cases} 2i\alpha\dot{E}_x^3\angle\beta_{x1}^3, & 0 < \alpha \leq 1/(2i) \\ \dot{E}_3(\frac{1}{2i}) - (2i\alpha - 1)\dot{E}_x^3\angle\beta_{x2}^3, & \frac{1}{2i} < \alpha \leq \frac{2}{2i} \\ \vdots & \vdots \\ \dot{E}_3(\frac{j-1}{2i}) + (-1)^{j-1}(2i\alpha - j + 1)\dot{E}_x^3\angle\beta_{xj}^3, & \frac{j-1}{2i} < \alpha \leq \frac{j}{2i} \end{cases} \quad (15)$$

$$\dot{E}_x^3 = (\dot{U}_s^3 - \dot{U}_n^3) / [1\angle\beta_{x1}^3 - 1\angle\beta_{x2}^3 + \dots + (-1)^{j-1}\angle\beta_{xj}^3 + \dots + 1\angle\beta_{x2i-1}^3 - 1\angle\beta_{x2i}^3]$$

将第 h 个备选故障点 $[\alpha'_h, R'_{fh}]$ 代入式(14), 可得:

$$d_h = \text{abs} \left\{ \dot{U}_n^3 \left(\frac{1}{R_{eq} + j3X_k} + \frac{j9\alpha'_h}{X_g} \right) + \frac{[\dot{U}_n^3 + \dot{E}_3(\alpha'_h)]}{R'_{fh}} + \dot{U}_s^3 j \left(\frac{9(1-\alpha'_h)}{X_g} + \frac{9}{X_z} \right) \right\} \quad (16)$$

式中 d_h 类同于前述 R'_f 与 R'_{fh} 的差值, 理想情况下, 实际故障点的 d_h 等于 0。则第 h 个备选故障点的是实际故障位置的概率指标为

$$P_h = (1/d_h) / \left(\frac{1}{d_1} + \dots + \frac{1}{d_h} + \dots + \frac{1}{d_k} \right) \quad (17)$$

由此, 得到唯一的故障分支和故障位置。

根据上述行星优化算法与定位多解筛选对策可得本文所提定位的实现流程如图 9 所示。

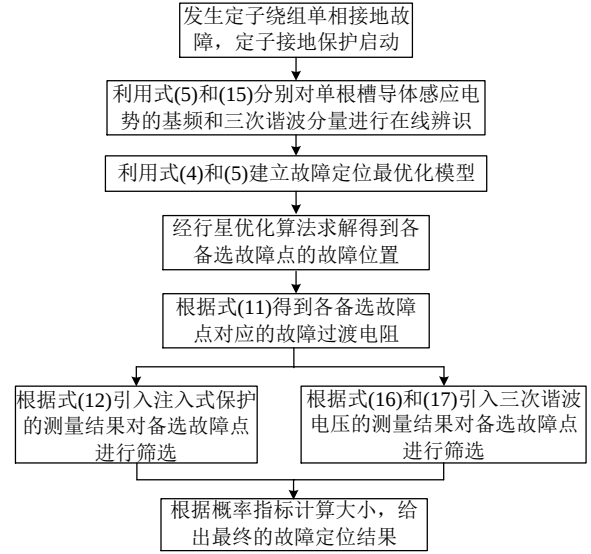


图 9 本文所提定位方法的实现流程图

Fig. 9 Realization flow chart of the location method proposed in this paper

4 仿真分析与验证

4.1 仿真模型

基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件, 构建包含基波、三次谐波电势的准分布参数模型。准分布参数模型是常用的大型机组定子接地故障仿真模型, 且已有多篇文献证实了准分布参数模型的正确性和有效性^[22-25]。本文所分析的变速抽蓄机组的基本参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型中变速抽蓄机组的基本参数

Table 1 Basic parameters of variable speed pumped storage unit in simulation model

参数	数值	参数	数值
额定线电压/kV	15.75	定子槽数	252
每相绕组电感值/mH	1.307	极对数	7
每相绕组电阻值/mΩ	0.98	每相分支数	4
每相对地电容值/μF	1.418	每分支匝数	21
机端每相等效电容值/μF	0.405	槽导体数	42
中性点等效接地阻抗/Ω	1 477.58+j226.47	节距	15
基波电角度/(°)	10	短距系数	0.965 9

4.2 不同故障条件下的性能分析

为验证所提定位方法在不同故障条件下的性能, 设置如表 2 所示的 4 次接地故障。以 Case1 为例, 故障位于 A_1 分支距中性点侧的第 9 根槽导体上, 故障点至中性点的绕组长度占 A_1 分支绕组总长的比例为 0.2, 即 $\alpha=0.2$ 。

表 2 设置的故障点位置
Table 2 The fault point location set

故障情况	故障所在槽导体	故障位置 α
Case1	A ₁ -9	0.2
Case2	A ₂ -17	0.4
Case3	A ₃ -26	0.6
Case4	A ₄ -34	0.8

将故障过渡电阻设置为 $100\ \Omega$ ，故障后根据机端三相基频对地电压和中性点基频对地电压的测量值以及绕组的连接顺序，画出故障后 Case1~Case4 4 种情况的基频相量图，如图 10(a)—13(a)所示。为便于读者阅读，略去了非故障相的绕组电势分布。基于式(4)和(5)对故障相各分支的 42 根槽导体分别建立最优化模型，利用所提行星优化算法进行求解，得到各备选故障点的判断结果如图 10(b)—图 13(b)所示。由于故障位置 α 为最优化模型的决策变量，经求解可得到各备选故障点对应的故障定位结果及对应的故障过渡电阻计算值，如表 3 所示。

可以发现，不同故障条件下备选故障点的个数是不同的，而实际故障点在多个备选故障点中，不存在漏选的情况。此外，实际故障点对应的定位结果和过渡电阻计算值较其他备选故障点精度更高。在此基础上，引入注入式保护的测量结果或三次谐波电压的测量信息作为辅助信息，以筛选备选故障点。筛选方法分别如式(12)和(17)所示，两种方法得到的概率指标值如表 4 所示。表中，定位误差 e 的计算公式为： $e = (\alpha' - \alpha) \times 2i \times 100\%$ ， α' 为筛选后的定位结果，

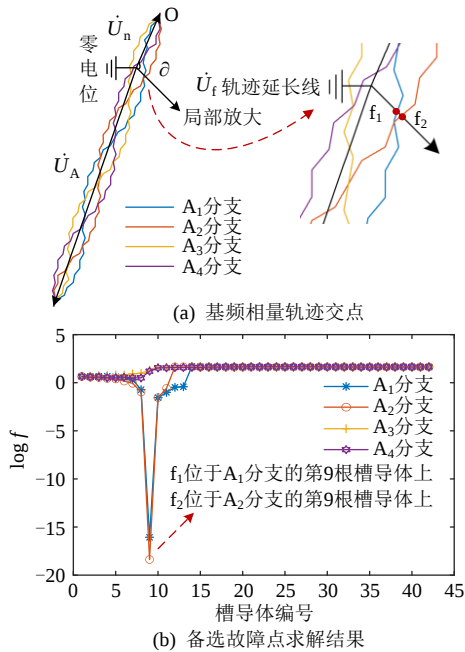


图 10 Case1 故障情况下的求解结果
Fig. 10 Solution results of Case1 under fault condition

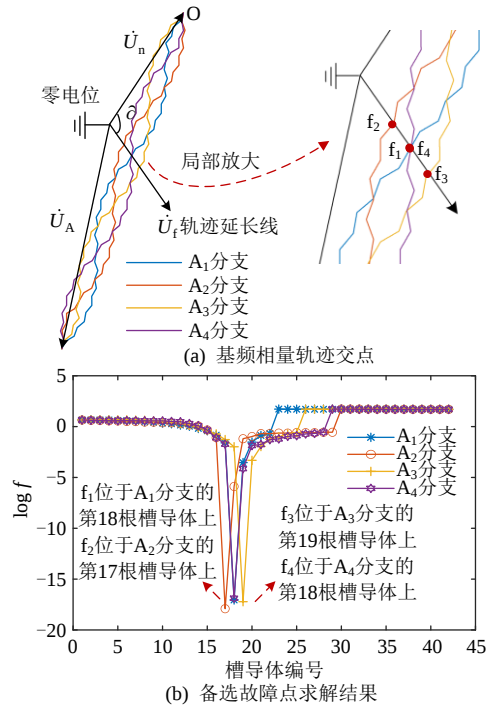


图 11 Case2 故障情况下的求解结果
Fig. 11 Solution results of Case2 under fault condition

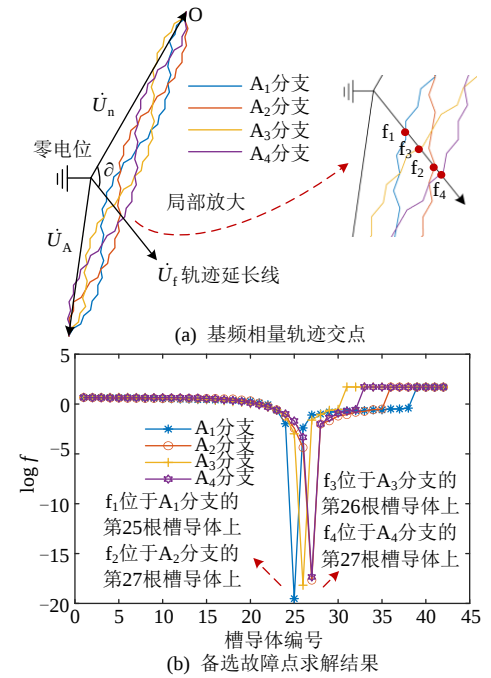


图 12 Case3 故障情况下的求解结果
Fig. 12 Solution results of Case3 under fault condition

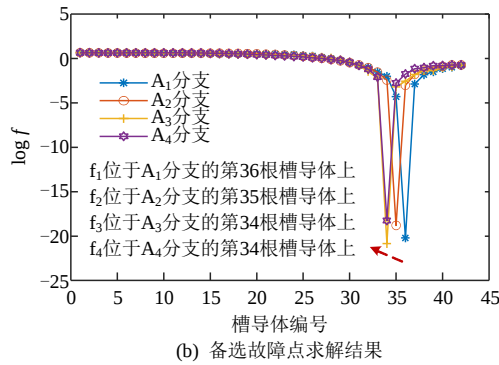


图 13 Case4 故障情况下的求解结果

Fig. 13 Solution results of Case4 under fault condition

表 3 Case1~Case4 的故障定位结果

Table 3 Fault location results of Case1~Case4

故障情况	备选故障点	所在槽导体	故障定位结果 α	过渡电阻计算值 R_f / Ω
Case1	f_1	A ₁ -9	0.205 6	100.715 3
	f_2	A ₂ -9	0.206 1	116.566 8
Case2	f_1	A ₁ -18	0.425 4	155.038 1
	f_2	A ₂ -17	0.404 3	102.795 2
	f_3	A ₃ -19	0.447 1	210.552 5
	f_4	A ₄ -18	0.426 4	155.531 5
Case3	f_1	A ₁ -25	0.584 3	70.571 7
	f_2	A ₂ -27	0.620 7	133.731 2
	f_3	A ₃ -26	0.601 3	100.647 5
	f_4	A ₄ -27	0.624 2	146.177 4
Case4	f_1	A ₁ -36	0.837 7	152.775 7
	f_2	A ₂ -35	0.824 8	135.296 3
	f_3	A ₃ -34	0.802 5	107.931 4
	f_4	A ₄ -34	0.801 5	101.117 8

表 4 Case1~Case4 的概率指标计算结果

Table 4 Probability index calculation results of Case1~Case4

故障情况	备选故障点	注入式法的概率指标/%	三次谐波法的概率指标/%	筛选结果
Case1	f_1	95.86	80.23	f_1 182U, 误差不超过单根槽导体长度的 23.52%
	f_2	4.14	19.77	
Case2	f_1	4.51	3.01	
	f_2	88.78	93.43	f_2 186U, 误差不超过单根槽导体长度的 18.06%
	f_3	2.24	1.28	
	f_4	4.47	2.28	
Case3	f_1	2.09	12.07	
	f_2	1.81	19.83	f_3 201U, 误差不超过单根槽导体长度的 5.46%
	f_3	94.77	57.06	
	f_4	1.33	11.04	
Case4	f_1	1.77	4.36	
	f_2	2.65	5.57	f_4 164L, 误差不超过单根槽导体长度的 6.30%
	f_3	11.80	15.46	
	f_4	83.78	74.61	

α 为实际故障位置, $2i$ 表示单分支所含槽导体个数, e 表示定位偏差占单根槽导体长度的百分比。

可以发现, 注入式筛选法和三次谐波筛选法均能够正确的筛选出实际故障点, 且实际故障点对应的概率指标远大于其他备选故障点的概率指标, 验证了所提筛选方法的有效性和灵敏性。在不同故障位置下, 所提定位方法均能够准确定位故障槽导体, 定位误差均不超过单根槽导体长度的 25%, 定位精度高。利用该方法可将故障槽导体的槽编号 准确的报送给检修部门, 对加快故障检修具有重要意义。

4.3 等效对地电容参数误差对定位方法性能影响

由式(4)可知, 本节所提定位方法受夹角 θ 的精度影响。变速抽蓄机组的中性点接地变压器短路阻抗、中性点接地电阻和定子绕组单相对地电容参数主要由一次设备的生产厂家经型式试验提供, 因此上述参数的精度通常较高。而机组外部等效对地电容参数 C_z 主要由抽蓄电站根据机组运行工况提供, 也可根据文献[26]所提方法进行在线辨识, 这使该参数可能存在一定误差, 进而影响夹角 θ 和定位结果的精度。为此, 分别对参数 C_z 设置+20%和-20%的严重误差, 以 Case2 和 Case4 发生故障过渡电阻为 100 Ω 的接地故障为例, 计算故障相各槽导体的最优目标函数值, 得到各备选故障点的判断结果如图 14、15 所示, 对应的故障定位结果如表 5 所示。

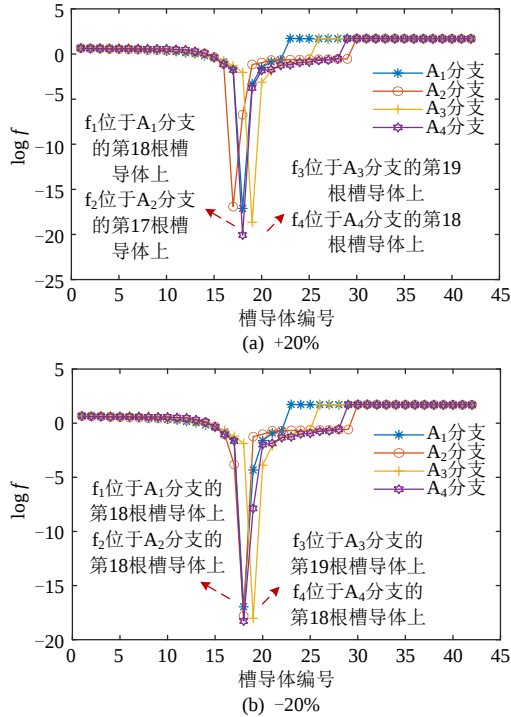


图 14 不同电容参数误差程度下 Case2 的求解结果

Fig. 14 Solution results of Case2 under different capacitance parameter errors

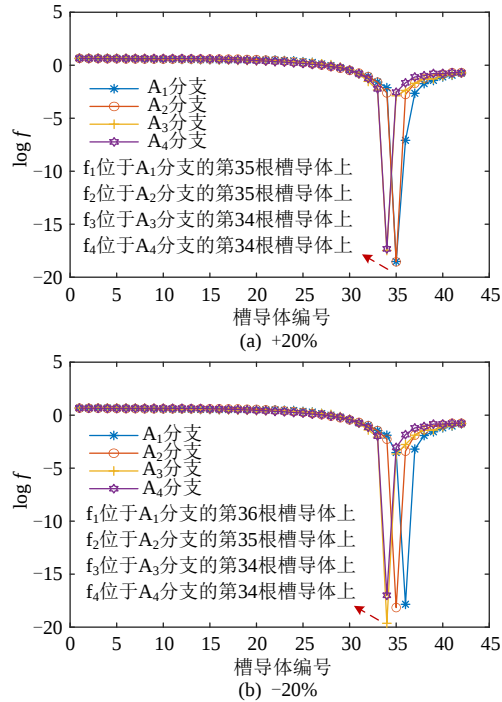


图 15 不同电容参数误差程度下 Case4 的求解结果
Fig. 15 Solution results of Case4 under different capacitance parameter error degrees

表 5 考虑等效对地电容参数误差情况下的定位结果
Table 5 Fault location results considering the error of external equivalent ground capacitance parameters

故障情况	参数误差/%	备选故障点	所在槽导体	定位结果 α	过渡电阻计算值 R'_t/Ω
Case2	+20	f_1	A ₁ -18	0.424 4	151.585 6
		f_2	A ₂ -17	0.404 6	100.566 3
		f_3	A ₃ -19	0.446 3	206.167 2
		f_4	A ₄ -18	0.425 1	151.468 7
Case2	-20	f_1	A ₁ -18	0.427 3	162.436 5
		f_2	A ₂ -18	0.406 2	107.362 4
		f_3	A ₃ -19	0.449 5	219.907 8
		f_4	A ₄ -18	0.428 3	164.348 6
Case4	+20	f_1	A ₁ -35	0.833 1	144.448 2
		f_2	A ₂ -35	0.822 5	130.525 4
		f_3	A ₃ -34	0.800 2	102.965 6
		f_4	A ₄ -34	0.798 3	97.302 9
Case4	-20	f_1	A ₁ -36	0.842 7	162.255 7
		f_2	A ₂ -35	0.827 4	140.429 1
		f_3	A ₃ -34	0.805 1	113.400 7
		f_4	A ₄ -34	0.803 3	105.243 8

为节约篇幅,略去各故障情况下的基频相量图。各备选故障点概率指标如图 16 所示,相同故障情况下的左侧柱形图对应注入式法、右侧对应三次谐波法。

由表 5 中的定位结果可以发现,随电容参数 C_z 的误差程度的增加,故障定位结果的精度较表 3

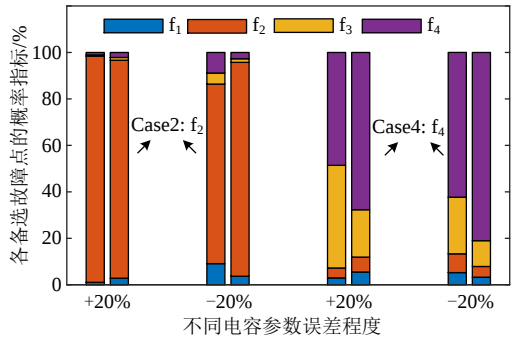


图 16 不同电容参数误差程度下备选故障点的概率指标
Fig. 16 Probability index of candidate fault points under different capacitance parameter errors

略微下降, Case2 和 Case4 中实际故障点的最大定位误差分别为 26.04%和 13.86%根槽导体长度,仍有较高定位精度,说明所提方法对电容参数的误差具有较强的鲁棒性。但需要注意的是,在 Case2 故障且电容参数误差为-20%的情况中,由于实际故障点本就接近 A₂ 分支第 17 根槽导体的末端,所以受定位误差的影响,使求解得到的定位结果变为第 18 根槽导体的首端。因此,在故障排查时定位结果两侧临近的槽导体也应一同检查。由图 16 可以发现,不同电容参数误差程度下,两种筛选方法均能够从备选故障点中准确识别出实际故障点,但在 Case4 故障且电容参数误差为+20%的情况中,故障点 f_3 和 f_4 的概率指标分别为 44.17%和 48.58%,较为相近。不过,考虑到实际工程中电容参数的误差通常不会达到 20%,所以在故障排查时,对其他概率指标偏大的备选故障点也重点关注。

4.4 单分支上存在多解情况的性能分析

故障定位过程中存在如图 6(b)所示的单分支上有多个备选故障点的特殊情况,此时,准确筛选出实际故障点更为困难。为此,以表 6 所示的两种特殊故障情况为例进行分析。两次故障的基频相量图和各备选故障点的判断结果如图 17、18 所示,对应的故障定位结果如表 7 所示。

可以发现,在单分支上有多个备选故障点的特殊情况下,所提方法仍可以正确筛选出实际故障点,其定位误差不超过单根槽导体长度的 30%,能够准确定位出故障槽导体。

表 6 单分支上有多个备选故障点的特殊故障情况
Table 6 Special fault cases with multiple candidate fault points on a single branch

故障情况	故障所在槽导体	故障位置 α	故障过渡电阻/ Ω
Case5	A ₁ -30	0.702 4	1 000
Case6	A ₃ -34	0.797 6	900

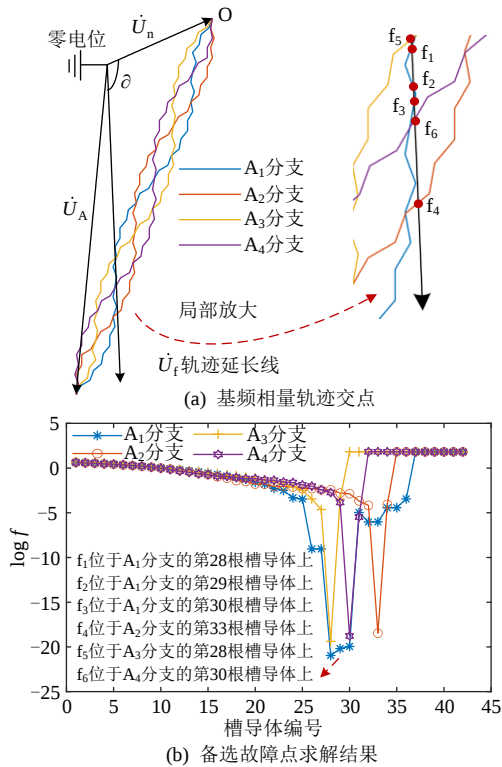


图 17 Case5 故障情况下求解结果

Fig. 17 Solution results of Case5 under fault condition

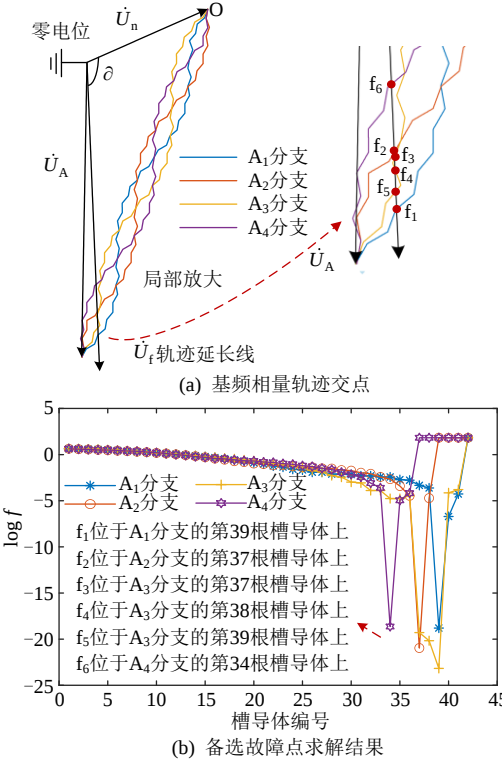


图 18 Case6 故障情况下的求解结果

Fig. 18 Solution results of Case6 under fault condition

在 Case5 中，实际故障点 f_3 的概率指标和备选故障点 f_2 和 f_6 的概率指标相近。这是因为在图 17(a) 中，相量交点 f_2 、 f_3 和 f_6 的位置较为接近。同理，在 Case6 中，实际故障点 f_6 的概率指标远大于其他

表 7 两种特殊情况的故障定位结果

Table 7 Fault location results of two special cases

故障情况	备选故障点	故障定位结果 α	过渡电阻计算值 R'_f/Ω	注入式法的概率指标/%	三次谐波法的概率指标/%	多解筛选结果
Case5	f_1	0.6514	924.6158	6.43	11.55	f_3 199U, 误差不超过单根槽导体长度的 20.16%
	f_2	0.6855	985.3727	33.14	19.78	
	f_3	0.6976	1012.1792	39.80	27.66	
	f_4	0.7731	1171.4207	2.83	6.78	
	f_5	0.6482	913.2021	5.58	13.12	
	f_6	0.7103	1039.6352	12.22	21.11	
Case6	f_1	0.9274	1117.2133	3.69	1.28	f_6 56U, 误差不超过单根槽导体长度的 29.82%
	f_2	0.8702	1023.3111	6.49	2.15	
	f_3	0.8756	1043.9242	5.56	1.81	
	f_4	0.8874	1057.7744	5.07	1.66	
	f_5	0.9125	1087.9897	4.26	1.58	
	f_6	0.8047	910.6838	74.93	91.52	

备选故障点，这也是因为在图 18(a)中，相量交点 f_6 与其他交点相距较远。因此，故障排查时对其他概率指标较大的备选故障点一同进行排查有必要的。此外，虽然存在单分支上有多个备选故障点的特殊情况，如 Case5 中的 f_1 、 f_2 和 f_3 及 Case6 中的 f_3 、 f_4 和 f_5 ，但不可能出现单根槽导体上有多个备选故障点情况，因为 $\dot{U}_f$ 轨迹与单根槽导体电势是两根直线，两者仅可能有一个交点。因此，不会出现单根槽导体上有多个备选故障点情况，不会影响所提定位方法的通用性。

4.5 多解筛选方法的鲁棒性分析

对于注入式筛选法，考虑到实际工程中基于注入式设备的过渡电阻测量值可能存在一定误差，试验结果表明，该测量误差较小，通常小于 5%^[27-29]。以表 3 和 7 中的 Case1—Case6 为例，对过渡电阻测量值分别施加 $\pm 2\%$ 和 $\pm 5\%$ 4 种测量误差，得到备选故障点概率指标的变化情况如图 19 所示。可以发现，在多数情况下注入式筛选法能够正确筛选出实际故障点。但在电阻测量误差较大的部分情况，如 Case4 和 Case5，该筛选方法可能存在误判，会将故障点判断为相量图中的临近交点。

对于三次谐波筛选法，由于机端和中性点处的三次谐波电压受负荷大小和功率因数的影响变化范围较大。保险起见，应考虑机端三次谐波电压和中性点三次谐波电压存在测量误差时所提方法的性能。对二者施加 4 组测量误差：0%和+5%、+5%和 0%、+5%和-5%、-5%和+5%，得到备选故障点概率指标的变化情况如图 20 所示。可以发现，不

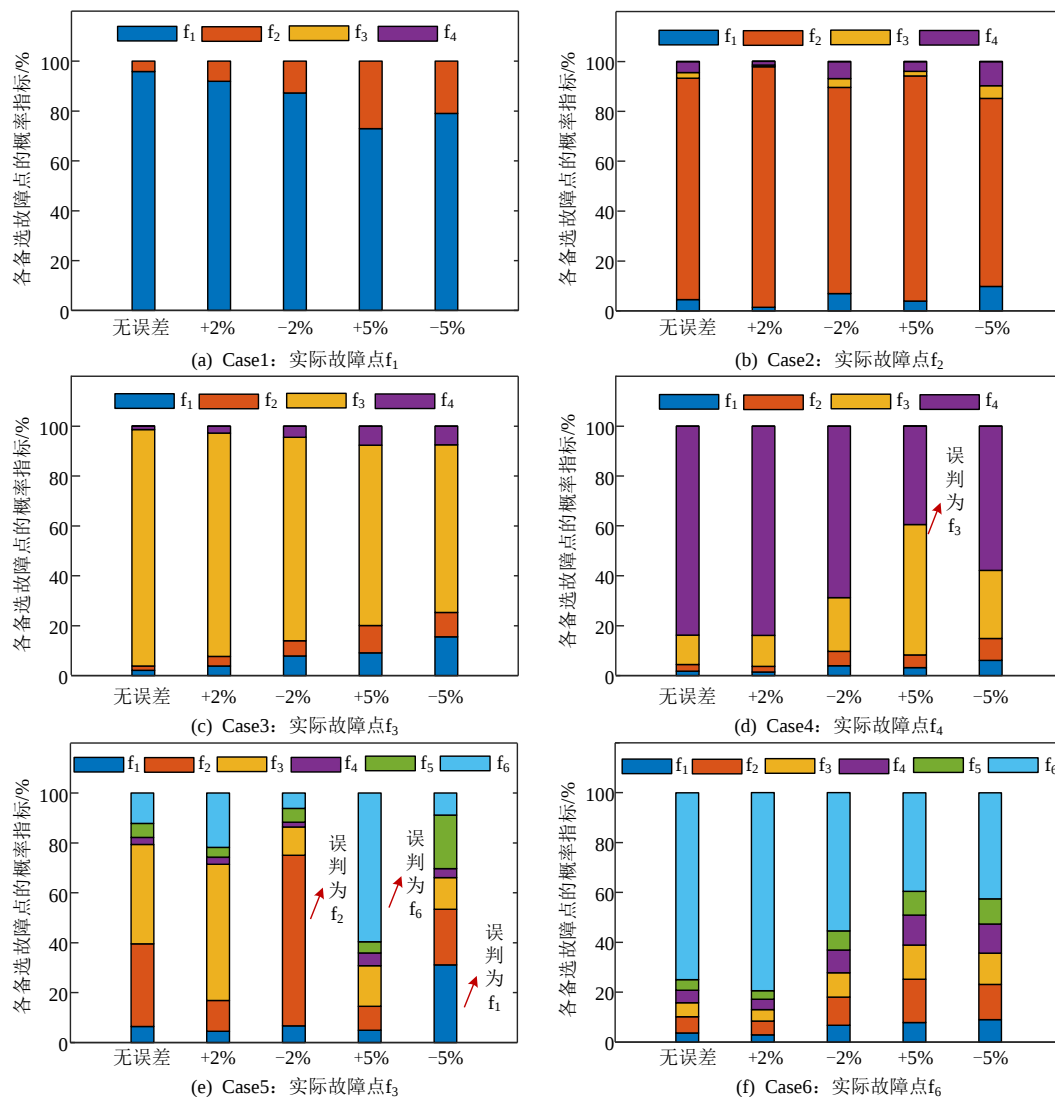
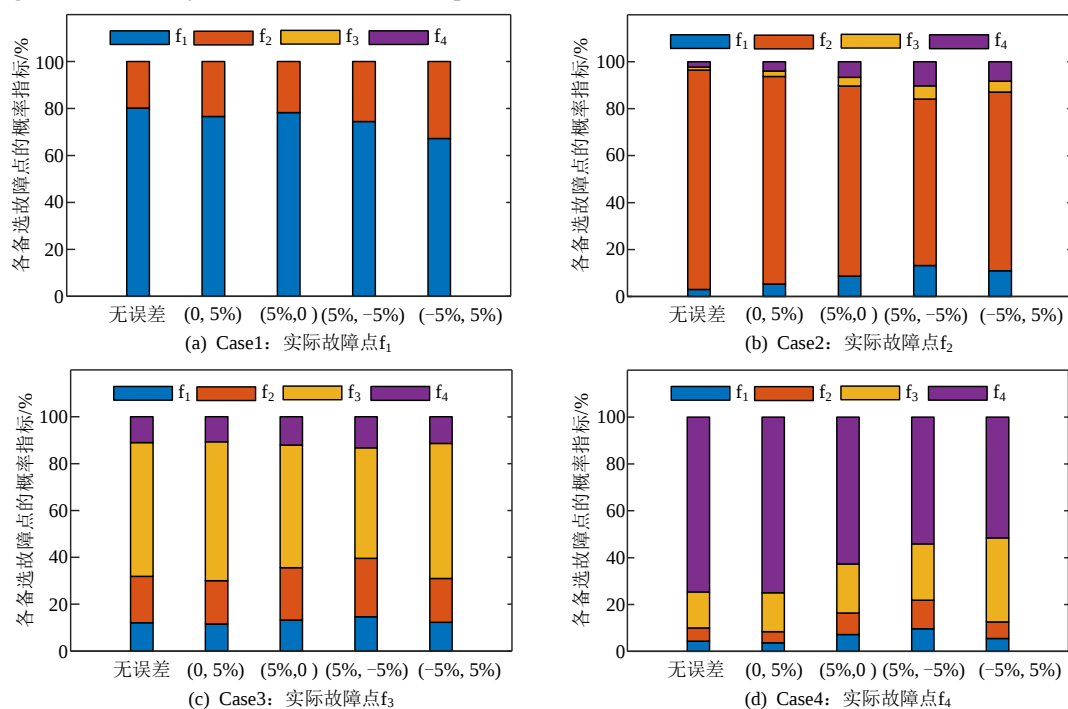


图 19 不同过渡电阻测量误差下备选故障点的概率指标

Fig. 19 Probability index of candidate fault point under different transition resistance measurement errors



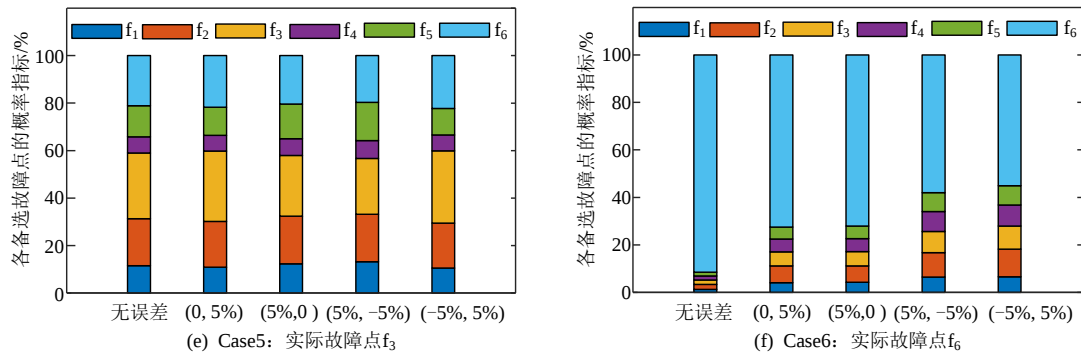


图 20 不同三次谐波电压测量误差下的概率指标

Fig. 20 Probability index of candidate fault point under different third harmonic voltage measurement errors

同误差情况下三次谐波筛选法均能够正确筛选出实际故障点，其鲁棒性较注入式筛选法更优。在实际工程中，应优先参考三次谐波筛选法的概率指标。

4.6 与现有定位方法的性能对比

现有的定位方法普遍对绕组电势分布作简化处理，文献[20]忽略绕组电势的相位分布特征，文献[21]基于包络线法计算故障相上各线圈末端故障时 $\dot{E}(\alpha)$ 的幅值和相位，并将计算结果记录于表 8。利用注入式设备测量过渡电阻，最终借助查表法定位故障所在线圈。本文所研究机组的包络线分布较为复杂。以 A_1 分支为例，基于包络线法得到 $\dot{E}(\alpha)$ 的简化表达式如式(18)所示。以 Case1~Case6 为例，对比文献[20-21]和本文所提方法的定位性能，计算结果如表 8 所示。

表 8 与现有方法的定位性能对比

Table 8 Compares the location performance with existing methods

故障情况	所在分支	故障位置	文献[20]		文献[21]		本文方法	
			法定位分支	法定位结果	法定位分支	法定位结果	法定位分支	法定位结果
Case1	A_1	0.200 0	—	0.213 5	A_4	0.190 5	A_1	0.205 6
Case2	A_2	0.400 0	—	0.418 5	A_4	0.381 0	A_2	0.404 3
Case3	A_3	0.600 0	—	0.591 6	A_3	0.619 0	A_3	0.601 3
Case4	A_4	0.800 0	—	0.786 2	A_4	0.809 5	A_4	0.801 5
Case5	A_1	0.702 4	—	0.723 4	A_4	0.714 3	A_1	0.697 6
Case6	A_4	0.797 6	—	0.686 3	A_4	0.666 7	A_4	0.804 7

由于文献[20]认为故障绕组电势与故障相电势方向相同，忽略了每相各分支电势的差异，使其无法定位故障分支。由于文献[21]忽略的短距绕线对电势分布的影响，当故障位置不在线圈连接点时存在较大的理论误差，使其故障分支的判断结果不可靠，表 8 中 Case1、Case2 和 Case5 出现故障分支误判的问题。此外，对于故障位置 α ，本文所提方法的定位精度也高于现有方法，证明了所提方法具有

更优的性能。

$$\dot{E}(\alpha) = \begin{cases} \frac{\dot{E}_{\text{phase}}}{7 \sin(\pi/9)} \sin\left(\frac{7\alpha\pi}{9}\right) \angle \left(\frac{7\alpha\pi}{9} - \frac{\pi}{9}\right), & 0 < \alpha \leq \frac{1}{7} \\ \frac{\dot{E}_{\text{phase}}}{7} + \frac{4\dot{E}_{\text{phase}}}{7} \sin\left[\frac{(7\alpha-1)\pi}{12}\right] \angle \left[\frac{\pi}{6} - \frac{(7\alpha-1)\pi}{12}\right], & \frac{1}{7} < \alpha \leq \frac{3}{7} \\ \frac{3\dot{E}_{\text{phase}}}{7} + \frac{4\dot{E}_{\text{phase}}}{7} \sin\left[\frac{(7\alpha-3)\pi}{12}\right] \angle \left[\frac{(7\alpha-3)\pi}{12} - \frac{\pi}{6}\right], & \frac{3}{7} < \alpha \leq \frac{5}{7} \\ \frac{5\dot{E}_{\text{phase}}}{7} + \frac{4\dot{E}_{\text{phase}}}{7} \sin\left[\frac{(7\alpha-5)\pi}{12}\right] \angle \left[\frac{\pi}{6} - \frac{(7\alpha-5)\pi}{12}\right], & \frac{5}{7} < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

4.7 实验验证

为了验证所提定子绕组接地故障定位方法在工程中的有效性，采用图 21 所示的 12 kW 动模实验机组进行验证。在 A_1 分支上分别设置单相接地故障 $f_1 \sim f_3$ ，对应的故障位置 α 分别为 0.333 3、0.666 7 和 0.833 3，接地故障过渡电阻为 3.6 Ω ，对应的故障定位结果如表 9 所示。



图 21 实验机组的实物图

Fig. 21 Physical diagram of the experimental unit

可以发现，在不同的故障位置、负载水平和功率因数情况下所提方法均能够实现准确的故障定位，最大定位误差约为单根槽导体长度的 8.28%，验证了所提定位方法的工程实用性。

表 9 实验验证的定位结果

Table 9 Experimentally verified location results

故障条件				故障定位结果	
故障	故障位置	负载水平/kW	功率因数	定位结果	误差 $e/\%$
f_1	0.333 3	8.5	0.84	0.331 9	1.68
f_2	0.666 7	6.6	0.71	0.659 8	8.28
f_3	0.833 3	5.2	0.51	0.832 0	1.56

5 结论

本文针对变速抽水蓄能机组的定子绕组接地故障精确定位方法展开研究，主要工作和结论总结如下：

1) 提出基于相量轨迹交点的定子绕组接地故障定位思路 and 故障定位最优化模型。分析并总结了变速抽蓄机组的定子绕组电势分布特征，针对现有绕组电势计算方法存在的简化误差的问题，引入以槽电势为分析单元的绕组电势精确计算方法。该方法不存在简化误差，可为接地故障的故障分支准确辨识提供实现基础。

2) 提出利用行星优化算法求解故障定位优化模型。进而，结合变速抽蓄机组的定子绕组电势分布特征，分析并总结其接地故障定位结果多解的原因。通过引入注入式测量信息或三次谐波电压测量信息实现多解筛选，使所提定位方法不仅能确定故障分支，还能够准确定位具体的故障位置，为故障检修提供指示。

3) 仿真与实验结果表明，所提定子绕组接地故障定位方法在不同故障条件下均具有较高的定位精度，能够正确筛选出实际的故障点，定位误差均不超过单根槽导体长度的 30%。此外，经仿真对比，所提方法的综合定位性能优于现有定位方法。

参考文献

[1] 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.

[2] SAFARI-SHAD N, FRANKLIN R, NEGAHDARI A, et al. Adaptive 100% injection-based generator stator ground fault protection with real-time fault location capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2364-2372.

[3] 董昱, 周劼英, 张晓, 等. 新型电力系统信息物理安全防护体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 5738-5751.

DONG Yu, ZHOU Jieying, ZHANG Xiao, et al. Research on cyber-physical security protection of new power

system[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 5738-5751(in Chinese).

[4] 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).

[5] LI Li, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Research on generator stator ground fault injection online location method based on multi-mode grounding[C]//2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference. Wuhan, China: IEEE, 2021: 1-6.

[6] AL JAAFARI K, TOLYAT H A. Performance analysis of synchronous generators under stator windings ground faults near the star point-experimental verification [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1402-1410.

[7] TAI Nengling, CHEN Jiajia. Wavelet-based directional stator ground fault protection for generator[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(5-6): 455-461.

[8] FRIEDEMANN D F, MOTTER D, OLIVEIRA R A. Stator-ground fault location method based on third-harmonic measures in high-impedance grounded generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 794-802.

[9] 裴丽秋, 杨洪涛, 张琦雪, 等. 基于几何关系求解的汽轮发电机定子接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 204-209, 216.

PEI Liqiu, YANG Hongtao, ZHANG Qixue, et al. Stator grounding fault location method of turbo-generator based on geometric relationship algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 204-209, 216(in Chinese).

[10] WANG Yuanyuan, HUANG Xiancheng, ZENG Xiangjun, et al. Studies on stator single-line-to-ground faults protection for a Powerformer considering the winding electromotive force distribution[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119: 105940.

[11] TAN Liming, WANG Yikai, YIN Xianggen, et al. Injected current regulation based stator ground fault arc suppression method for large hydro-generators [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 143: 108513.

[12] 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).
- [13] BLÁNQUEZ F R, PLATERO C A, REBOLLO E, et al. On-line stator ground-fault location method for synchronous generators based on 100% stator low-frequency injection protection[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 125: 34-44.
- [14] 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.
- [15] DAVARPANA M, KERA VAND M, FAIZ J, et al. Precise locating of stator winding earth fault in large synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 3137-3145.
- [16] ZAMANI M, HAGHJOO F, SAMIMI M H, et al. A simple magnetic-flux-based method for localizing high-resistance stator ground faults in synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 5253-5262.
- [17] LI Qinwei, JIA Wenchao. Phase selection and location method of generator stator winding ground fault based on BP neural network[J]. Energies, 2023, 16(3): 1503.
- [18] WANG Yuanyuan, GUO Yongsheng, ZENG Xiangjun, et al. Stator single-line-to-ground fault protection for bus-connected powerformers based on s-transform and bagging ensemble learning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 88322-88332.
- [19] WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, DONG Zhaoyang, et al. Stator single-phase-to-ground fault protection for bus-connected powerformers based on hierarchical clustering algorithm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 991-998.
- [20] 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).
- [21] WANG Yikai, YIN Xianggen, XU Wen, et al. Active arc suppression algorithm for generator stator winding ground fault in the floating nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5356-5365.
- [22] 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.
- [23] SAFARI-SHAD N, FRANKLIN R. Adaptive 100% stator ground fault protection based on third-harmonic differential voltage scheme[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1429-1436.
- [24] FORTES G, GOMES E, VILKN P, et al. Real-time rotor ground fault protection based on the convolution integral for synchronous motors with static excitation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 4181-4190.
- [25] QIAO Jian, YIN Xin, WANG Yikai, et al. Faulty phase selection and location method of rotor ground fault for variable speed pumped storage generator-motor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4253-4262.
- [26] 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).
- [27] 丁大尉, 谢辉, 王高林, 等. 电网电压不平衡条件下永磁电机无电解电容驱动系统网侧电流谐波抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4458-4468.
- DING Dawei, XIE Hui, WANG Gaolin, et al. Suppression strategy of grid-side current harmonics for electrolytic capacitor-less permanent magnet motor drives under unbalanced grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4458-4468(in Chinese).
- [28] 栾一航, 李琼林, 代双寅, 等. 分布式全功率变速抽水机组调速器-变流器控制交互稳定性提升方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(21): 8338-8349.
- LUAN Yihang, LI Qionglin, DAI Shuangyin, et al. Enhancement method for governor-converter control interaction stability in distributed full-power variable speed pumped storage units[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(21): 8338-8349(in Chinese).
- [29] SANG-TO T, HOANG-LE M, WAHAB M A, et al. An efficient Planet Optimization Algorithm for solving engineering problems[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 8362.



乔健

在线出版日期: 2025-04-16。

收稿日期: 2024-12-06。

作者简介:

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;

王凯(2003), 男, 硕士研究生, 研究方向为变速抽水蓄能机组的继电保护技术, 1684787012@qq.com。

(责任编辑 邱丽萍)