

变速抽水蓄能机组转子接地故障精确定位方法

乔健¹, 尹昕², 王义凯¹, 尹项根³, 刘之畅³, 戴志辉¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统全国重点实验室, 河北 保定 071000; 2. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070;
3. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:变速抽水蓄能机组的转子绕组是特殊的三相绕组结构, 不仅令传统的转子接地故障定位方法不再适用, 还增加了接地故障选相问题。为此, 提出了一种变速抽水蓄能机组转子绕组接地故障定位方法。分析了转子槽导体感应电势的产生机理, 总结了转子绕组电势的相位特征与运行工况的关系, 利用分段函数精确解析了绕组电势的幅值和相位变化规律。在此基础上, 基于相量轨迹分析提出了一种可靠的转子接地故障选相方法。进一步, 根据中性点对地电压相量、故障点对地电压相量及故障绕组电势相量的几何关系, 构造了转子接地故障定位的最优化模型, 通过求解可实现转子接地故障的精确定位。仿真和实验结果验证了所提方法的有效性。

关键词:变速抽蓄机组; 转子接地故障; 故障选相; 故障定位; 绕组电势分布

中图分类号: TM771

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202501006

0 引言

随着风电、光伏等可再生能源渗透率的逐渐提高, 功率波动、频率调节等问题日渐凸显^[1-2]。变速抽水蓄能机组具有功率双向调节能力, 可为解决此类问题提供有效手段, 因此得到了广泛关注^[3-4]。变速抽水蓄能机组采用双馈式交流励磁的工作原理, 其转子绕组为特殊的三相绕组结构, 与传统同步发电机的直流励磁方式有较大差异, 使传统发电机中的转子接地故障的保护和定位方法不再适用^[5]。

变速抽蓄机组的转速较高, 转动惯量较大。受离心力、振动和热应力影响, 易发生转子接地故障。发生一点接地故障后, 由于对地电路不构成通路, 通常不会对发电机造成严重破坏^[6]。因此, 接地故障保护通常出口为发信号, 而非立刻跳闸。但是, 单相接地故障通常是匝间或相间短路故障的先兆^[7]。对于大容量机组, 有必要在发生转子接地故障后, 尽快定位故障位置, 以缩短故障排查所需要的时间, 提高故障检修的效率^[8]。

现有的转子接地故障定位方法主要应用于采用直流励磁方式的同步机。文献[9]基于励磁变压器中性点对地电压的频谱分析区分转子接地故障位于励磁系统中的交流侧还是直流侧, 该方法无须配置传统的注入电源。文献[10]在文献[9]基础上, 更进一步地提出了一种转子接地故障定位方法, 该方法不受负载大小的影响。文献[11-12]针对乒乓式接

地保护, 根据电子开关的打开和闭合状态可得到含有过渡电阻和故障位置的电路方程组, 通过求解方程组得到故障位置。文献[13]将变压器故障诊断中的重复脉冲法应用于发电机转子一点接地故障定位, 但该方法存在无法在线应用的问题。

考虑到变速机组的转子绕组为三相结构, 且绕组电势存在相带分布的特点^[14-15]。因此, 传统的发电机的定子接地故障定位方法更具有参考价值。文献[16]引入智能算法, 通过学习训练样本, 建立了具有选择性的发电机定子绕组单相接地故障保护判别模型。文献[17-18]通过分析定子侧电枢反应电流对绕组电势的影响, 提出了工况自适应的故障定位方法。文献[19]利用低频注入装置测量接地故障电阻, 进而实现100%定子绕组接地故障定位。但变速机组的转子中性点处不具备安装注入式装置的条件。文献[20]基于绕组电势为单个60°相带分布假设提出接地故障位置解析求解方法。虽然变速机转子绕组结构与常规定子绕组结构类似, 但其相位分布规律受运行工况影响更加复杂且不满足单个60°相带特征。此外, 其转子绕组中性点处无法直接测量对地电压。上述原因导致现有的故障定位方法无法直接适用。除故障定位问题外, 转子接地故障的选相问题也更为复杂。在定子接地故障选相中, 通常根据故障相电压最低的原则直接判断故障相^[21-22]。但变速机组的转子中性点为不接地形式, 该选相原则会在接地故障电阻较大时产生误判。

针对上述问题, 本文提出了一种变速抽水蓄能机组转子接地故障精确定位方法。结合变速机组的结构和运行特点, 开展了一系列工作, 包括: 分析了机组的运行工况和转子转速对绕组电势相位特征的影响, 提出了由多个不规则相带构成的绕组电势解

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-12-26

在线出版日期: 2025-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52407100)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52407100)

析计算方法、基于相量轨迹的转子接地故障选相方法、基于相量几何关系的转子接地故障定位模型。仿真和实验结果验证了所提方法的有效性,在不同故障条件下,所提方法均能够准确可靠地实现故障选相,且转子接地故障定位结果的误差不超过单匝线圈长度,可为故障检修提供有效的指示。

1 转子绕组电势分布特征分析

类似于定子绕组,变速抽蓄机组的转子绕组电势也存在相位分布现象,该现象可从旋转磁动势切割槽导体产生感应电势的角度进行解释^[23]。

以附录A图A1所示的最简单的电机结构为例进行说明,定、转子铁心上各有6根槽导体。其中,2号与5号槽导体形成1匝线圈,构成A相绕组;6号与3号槽导体形成1匝线圈,构成B相绕组;4号与1号槽导体形成1匝线圈,构成C相绕组。转子逆时针旋转,转速为 n 。定子绕组电流产生旋转磁动势 F_s ,转子绕组电流产生旋转磁动势 F_r 。

定子侧三相电流频率 $f_s=50$ Hz,其产生的磁动势 F_s 在物理空间中相对固定的定子铁心的转速为 $n_s=60f_s/p$, p 为极对数。转子侧三相电流频率为 f_r , $f_r=sf_s$, s 为转差率, $s=(n_s-n)/n_s$,其产生的磁动势 F_r 在物理空间中相对旋转的转子铁心的转速为 $n_r=60f_r/p$ 。由于转子本身以转速 n 相对定子铁心旋转,因此磁动势 F_r 在物理空间中相对定子铁心的转速也为 n_s ,与磁动势 F_s 的转速和转向相同,构成电机内部的合成磁动势 F 。

对于定子绕组,当转子逆时针旋转时,磁动势 F 切割定子侧槽导体的顺序为6-5-4-3-2-1-6,从而使定子侧各槽导体感应电势的相位不同,槽号大的槽导体相位超前于槽号小的槽导体。当变速抽蓄机组的运行工况(抽水工况和发电工况)发生转换时,转子旋转方向及合成磁动势 F 的旋转方向均反向变化。此时,槽号大的槽导体的感应电势相位滞后于槽号小的槽导体。一般地,对于存在众多槽导体的大型机组,这些相位不一的槽导体经串联构成具有一定相位分布规律的绕组电势。

该现象对于转子侧槽导体则更为复杂。由于转子本身存在转速 n ,合成磁动势 F 相对转子铁心的转速为 $n_r=n_s-n$,其相对转子铁心旋转方向与转速 n 的大小有关。对于转子逆时针旋转工况,当机组运行在次同步状态时($n<n_s$),合成磁动势 F 相对转子铁心的转向为逆时针,转子侧槽号大的槽导体感应电势相位超前于槽号小的槽导体;当机组运行在超同步状态时($n>n_s$),合成磁动势 F 相对转子铁心的转向顺时针,转子侧槽号大的槽导体感应电势相位滞后于槽号小的槽导体。同理,对于转子顺时针旋转工况,根据转速 n 的大小也存在2种情况。因此,对

转子接地故障进行定位时需要考虑机组的运行工况和转子转速对绕组电势相位特征的影响,可总结为以下2种情况。

情况1:槽号大的槽导体感应电势相位滞后于槽号小的槽导体;

情况2:槽号大的槽导体感应电势相位超前于槽号小的槽导体。

以中国丰宁抽水蓄能电站的300 MW变速抽蓄机组为例,情况1、2下的转子绕组电势分布特征分别如附录A图A2(a)、(b)所示。

该变速抽蓄机组极对数为7、转子铁心槽数为294,则槽距电角度为 $7\times 360/294\approx 8.5714^\circ$ 。转子采用双层波绕组绕线形式,每相分支数为2,则每相每分支线圈匝数为 $294\div 3\div 2=49$ 。根据经验,最常见的波绕组方案是7个线圈单元组正反串联,每个线圈单元组由7匝同相位线圈组成,各线圈单元组彼此相差槽距电角度,由此构成 60° 相带($7\times 8.5714^\circ\approx 60^\circ$)。但该变速抽蓄机组的绕线方案有些特殊,概要而言,它将每个传统线圈单元组拆分为“4匝线圈+3匝线圈”2组,形成2套组合,它们交替串联,使其转子绕组的电势分布为图A2所示的2个幅值和相位相等的 60° 相带(每个 60° 相带由24匝半线圈组成)。下文将单个相带角度记为 φ 。

转子A相绕组发生接地故障后的示意图如附录A图A3所示。图中: U_A 、 U_B 和 U_C 为三相端口对地电压,由端口处的霍尔式电压互感器直接测量得到; U_0 为中性点对地电压; E_A 、 E_B 和 E_C 为转子三相绕组电势, $E_A+E_B+E_C=0$; C_g 为转子绕组单相等效对地电容; C_z 为绕组外部单相等效对地电容;将故障点距中性点距离与绕组总长的比值记为 α , E_α 为故障点至中性点的绕组电势(下文简称故障绕组电势); R_f 为接地故障电阻; U_f 为故障点对地电压。

需要说明的是,变速抽蓄机组的转子处于高速旋转状态,其中性点为不接地形式,不具有安装测量互感器的条件。因此,转子中性点对地电压无法测量,但可通过机端三相对地电压计算得到,具体如式(1)所示。

$$U_0 = \frac{(U_A - E_A) + (U_B - E_B) + (U_C - E_C)}{3} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} \quad (1)$$

以A相为例,得到机端电压 U_A 和中性点电压 U_0 后,可计算得到相电势 E_A 。将相电势 E_A 的幅值和相位分别表示为 $|E_A|$ 和 θ_A 。

对于情况1,根据解析几何分析,可得到故障绕组电势关于故障位置 α 的表达式,几何分析示意图如图1所示。

由图1可知,故障绕组电势 E_α 是一个分段函数,具体如式(2)所示。

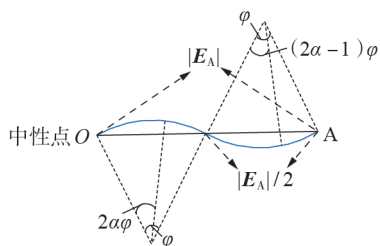


图1 故障绕组电势的几何分析示意图

Fig.1 Geometric analysis diagram of fault winding potential

$$E_\alpha = \begin{cases} \frac{|E_A| \sin(\alpha\varphi)}{2\sin(\varphi/2)} \angle(\theta_A + \varphi/2 - \alpha\varphi) & 0 < \alpha \leq 0.5 \\ \frac{U_A - U_o}{2} + \frac{|E_A| \sin[(2\alpha-1)\varphi/2]}{2\sin(\varphi/2)} \angle(\theta_A - \varphi + \alpha\varphi) & 0.5 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

类似地,对于情况2,不同之处在于相位的变化。故障绕组电势 E_α 为:

$$E_\alpha = \begin{cases} \frac{|E_A| / [2\sin(\alpha\varphi)]}{2\sin(\varphi/2)} \angle(\theta_A - \varphi/2 + \alpha\varphi) & 0 < \alpha \leq 0.5 \\ \frac{U_A - U_o}{2} + \frac{|E_A| \sin[(2\alpha-1)\varphi/2]}{2\sin(\varphi/2)} \angle(\theta_A + \varphi - \alpha\varphi) & 0.5 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知,变速抽水蓄能机组的转子绕组电势分布更为复杂。应该根据机组的运行工况和转子转速大小选择正确的故障绕组电势计算方法。此外,需要说明的是,所建立的式(2)、(3)与图1所示的电势分布是严格匹配的。当电势分布改变后,式(2)和式(3)也应进行调整。考虑到电机绕线通常都具有明显的几何特征,而依托几何分析得到新的式(2)和式(3)并不困难。因此本文所提方法是具有普遍性的,但其普遍性成立的前提是对不同机组电势分布重新进行几何分析,并更新式(2)和式(3)。

2 转子接地故障精确定位方法

图A3所示转子接地故障的零序等值回路如附录A图A4所示。图中: C_Σ 为总体的等效对地电容。

根据基尔霍夫电流定律可得:

$$E_\alpha = -U_o + I_f R_f = -U_o - j\omega C_\Sigma U_o R_f \quad (4)$$

式中: I_f 为接地故障电流相量; ω 为转子工作角频率。

以情况1为例进行分析,根据式(4)绘制转子接地故障后的相量图,如图2所示。相量 U_o 由式(1)计算得到,其幅值和相位可被确定。相量 $-j\omega C_\Sigma U_o R_f$ 与相量 U_o 相差 90° ,由于接地故障电阻 R_f 未知,所以只能确定相量 $-j\omega C_\Sigma U_o R_f$ 的方向,无法确定其幅值,其相量轨迹分布如图2中的黑色虚线所示。相对应地,故障绕组电势 E_α 如红色虚线所示。

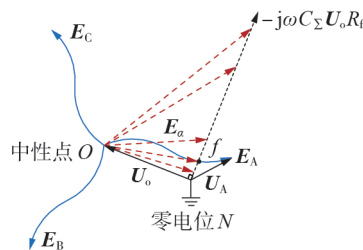


图2 转子接地故障后的相量图

Fig.2 Phasor diagram after rotor grounding fault

由于故障绕组电势 E_α 的终点一定落在A相绕组电势上,该终点也是相量 $-j\omega C_\Sigma U_o R_f$ 与相电势 E_A 轨迹的交点。因此,联立式(2)一定能确定唯一的故障绕组电势 E_α ,进而实现转子接地故障定位。

值得注意的是,图2所示的相量轨迹法还具有故障选相的功能。在传统的大型发电机定子接地故障中,根据故障相电压最低的原则直接判断故障相,这是定子中性点采用经高阻接地方式决定的^[24]。但在变速抽水蓄能机组的转子绕组中,中性点为不接地形式,发生接地故障后的三相电压变化规律与中性点不接地的配电网相似^[25]。当接地故障电阻大于 $\sqrt{3}$ 倍的对地容抗 $1/(j\omega C_\Sigma)$ 时,故障相的滞后相对地电压最小。由于 C_Σ 受绕组外部等效对地电容 C_x 变化的影响较大,因此,当接地故障电阻接近 $\sqrt{3}$ 倍的对地容抗时,现有方法准确判断故障相是有困难的。

以转子绕组A相发生过渡电阻为 $\sqrt{3} / (\omega C_\Sigma)$ 的接地故障为例,故障后的相量图如附录A图A5所示。由图可以发现,故障相电压 U_A 和滞后相电压 U_B 的幅值几乎相等,现有方法很难准确判断故障相。而相量 $-j\omega C_\Sigma U_o R_f$ 与A相绕组电势相交,因此本文所提相量法仍然适用,可准确地将A相判断为故障相。

综上所述,对于情况1,应联立式(2)和式(4)求解故障位置 α ;对于情况2,应联立式(3)和式(4)求解故障位置 α 。然而,式(2)~(4)是含有复数的非线性方程,直接解方程是不可行的。

考虑到相量 U_o 、相量 E_α 与相量 $U_o + E_\alpha$ 须构成直角三角形。因此,可根据该几何关系,将该解方程问题转化为最优化求解问题,将故障位置 α 作为决策变量,根据直角关系构造优化函数。以情况1为例,该最优化问题的数学表示为:

$$\min f(\alpha) = \text{abs}\left(|U_o|^2 + |U_o + E_\alpha|^2 - |E_\alpha|^2\right)$$

$$E_\alpha = \begin{cases} \frac{|E_x| \sin(\alpha\varphi)}{2\sin(\varphi/2)} \angle(\theta_x + \varphi/2 - \alpha\varphi) & 0 < \alpha \leq 0.5 \\ \frac{U_x - U_o}{2} + \frac{|E_x| \sin[(2\alpha-1)\varphi/2]}{2\sin(\varphi/2)} \angle(\theta_x - \varphi + \alpha\varphi) & 0.5 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $|E_x|$ 和 θ_x 分别为故障相电势的幅值和相位, 下标 x 表示故障相。

假设故障位置 α 由 0 至 1 变化, 图 2 中 $\angle ONf$ 由锐角变为钝角。因此, 式(5)所示的最优化问题是一个凸优化问题, 不存在由局部最优引起的多解问题, 其求解结果一定是真实的故障位置。利用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法进行求解, 所选的粒子数为 4, 迭代次数为 50。初始化粒子位置时, 在区间 $[0, 0.5]$ 和 $[0.5, 1]$ 各随机初始化 2 个粒子, 以加快该优化算法的收敛。

综上所述, 本文所提转子接地故障定位方法的实现流程可被总结为:

1) 转子接地故障保护动作后, 根据转子三相电压测量值计算中性点电压 U_o , 绘制 U_o 、 U_A 、 U_B 和 U_C 的相量图;

2) 根据机组的运行工况和转子转速确定转子绕组的相位特征, 绘制三相绕组电势 E_A 、 E_B 和 E_C 的轨迹图;

3) 按照与相量 U_o 成 90° 关系, 绘制相量 $-j\omega C_\Sigma U_o R_f$ 的轨迹延长线, 根据该延长线与三相绕组电势的交点确定故障相, 实现故障选相;

4) 根据式(5)建立转子接地故障定位的最优化模型, 利用 PSO 算法对其进行求解, 最优的决策变量即为故障定位结果, 该定位结果可为故障检修提供指导。

3 仿真分析与验证

3.1 仿真模型

仍以前述实际变速抽蓄机组为例, 在 PSCAD / EMTDC 软件中建立转子绕组的准分布参数仿真模型^[23], 详细参数如附录 B 表 B1 所示。仿真模型模拟的工况为: 变速抽蓄机组运行于发电工况, 转子逆时针旋转; 转差率为 -0.02, 转速为超同步转速; 转子绕组的相位特征与情况 1 对应, 转子侧工作频率为 1 Hz。

在转子绕组的不同位置设置转子接地故障, 具体为: ① f_1 , 故障相为 A 相, 故障位置 $\alpha=0.1429$; ② f_2 , 故障相为 C 相, 故障位置 $\alpha=0.2857$; ③ f_3 , 故障相为 B 相, 故障位置 $\alpha=0.4286$; ④ f_4 , 故障相为 A 相, 故障位置 $\alpha=0.5714$; ⑤ f_5 , 故障相为 C 相, 故障位置 $\alpha=0.7143$; ⑥ f_6 , 故障相为 B 相, 故障位置 $\alpha=0.8571$ 。

转子接地故障主要是由于槽导体与铁心之间的绝缘损坏造成的, 故障通道如附录 B 图 B1 所示。故障电流流经故障通道内表面, 过渡电阻主要为碳化物电阻, 其值相对稳定。即使发生燃弧, 电弧也被限制在窄而短的故障通道中, 受风吹影响较小。因此, 在转子接地故障发展过程中过渡电阻变化平缓, 仿真中采用恒定电阻。

3.2 故障选相方法的性能分析

为分析本文所提故障选相方法在不同故障条件下的性能, 在 f_1 — f_3 处设置多种不同的接地故障电阻, 包括: ①在 f_1 处设置金属性接地故障; ②在 f_2 处设置 500Ω 接地故障电阻; ③在 f_3 处设置阻值为 $\sqrt{3} / (\omega C_\Sigma)$ 的接地故障电阻。对应的 3 种故障的相量图如附录 B 图 B2 所示。由图可见, 相量 $-j\omega C_\Sigma U_o R_f$ 的轨迹延长线均能够与故障相的电势轨迹相交, 进而准确识别接地故障相。其中, f_1 处的金属性接地故障较为特别, 由于接地故障电阻 $R_f=0$, 使故障点对地电压为 0, 该情况下为相量 $-j\omega C_\Sigma U_o R_f$ 的根部与故障相电势轨迹重合。总而言之, 本文所提故障选相方法在不同故障位置、不同接地故障电阻条件下均适用。

3.3 故障精确定位方法的性能分析

为进一步验证本文所提转子接地故障定位方法在不同故障条件下的有效性, 在 f_1 — f_6 处分别设置接地故障电阻为 10 、 100 、 1000Ω 和 $10 \text{ k}\Omega$ 的转子接地故障。在前述故障选相的基础上, 根据式(5)列写转子接地故障定位优化模型, 并利用 PSO 算法进行求解, 结果如附录 B 表 B2 所示。其中, 以故障 f_1 处故障为例, 4 种接地故障电阻条件下, 求解过程中的最优目标函数值变化过程如附录 B 图 B3 所示。由图可见, 迭代次数超过 30 次后计算结果均能够收敛, 计算难度较小。在计算机配置为处理器 i7-11700、内存 16 GB 的情况下, 4 种接地故障电阻条件所需要的平均计算时间为 0.74 s , 具有较高的计算速度。

表 B2 中, 故障定位结果的相对误差 δ 的计算公式为:

$$\delta = \frac{|\alpha' - \alpha| N_s}{1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: α' 为由所提方法计算得到的定位结果; N_s 为转子单分支绕组的线圈匝数; 分母 1 代表 1 匝。

相对误差 δ 的物理意义为转子故障定位偏差占单匝线圈长度的比例。由表 B2 可知, 不同故障条件下本文所提方法的 δ 均不超过半匝线圈, 即 $\delta < 50\%$ 。检修人员在寻找转子接地故障点时可对定位结果附近的 2 匝线圈进行重点排查, 一定能够找到实际故障点。上述结果和分析验证了本文所提转子接地故障定位方法的有效性。

考虑到故障点 f_1 — f_6 分别位于分支绕组的 $1/7$ 、 $2/7$ 、 $3/7$ 、 $4/7$ 、 $5/7$ 、 $6/7$ 处, 具有一定的规律。为更充分地验证本文所提转子接地故障定位方法不受故障位置的影响, 在 A_1 分支的 $\alpha=0.3265$ 处分别设置故障接地电阻为 10Ω 和 $5 \text{ k}\Omega$ 的接地故障, 以分别校验本文方法在小电阻接地和大电阻接地情况下的故障定位性能, 对应的故障相量图分别如图 3、4 所示。

由图 3、4 可以得到以下结论。

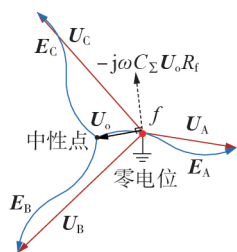


图 3 转子接地故障相量图(A1 分支, $\alpha=0.3265, R_f=10 \Omega$)
Fig.3 Phasor diagram of rotor grounding fault
(Branch A1, $\alpha=0.3265, R_f=10 \Omega$)

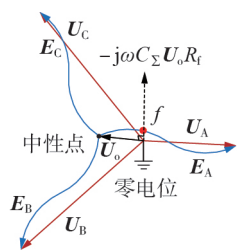


图 4 转子接地故障相量图(A1 分支, $\alpha=0.3265, R_f=5 \text{ k}\Omega$)
Fig.4 Phasor diagram of rotor grounding fault
(Branch A1, $\alpha=0.3265, R_f=5 \text{ k}\Omega$)

1) 相量 $-j\omega C_{\Sigma} U_0 R_f$ 的轨迹延长线均能够与故障相的电势轨迹相交, 进而准确识别转子接地故障相。图 3、4 的故障定位结果分别为 0.3262 和 0.3271, 误差分别小于单匝线圈长度的 1.62% 和 2.79%, 进一步验证了本文所提转子接地故障定位方法的性能不受故障位置的影响。

2) 故障选相及故障定位的性能受相量 $-j\omega C_{\Sigma} U_0 R_f$ 与故障相电势轨迹交点的准确度影响较大。相量 $-j\omega C_{\Sigma} U_0 R_f$ 是基于与相量 U_0 成 90° 关系得到的, 当转子接地故障非常靠近中性点时, 故障后 U_0 的幅值极小, 相量 U_0 可能存在较大的计算误差, 进而导致相量 $-j\omega C_{\Sigma} U_0 R_f$ 的准确度差, 可能对本文方法的故障定位性能造成不利影响。因此, 当相量 U_0 的计算值小于一定程度后, 可略过故障选相及故障定位步骤, 直接对三相绕组中性点侧的线圈进行故障排查。

4 实验分析与验证

为进一步验证本文所提方法的工程实用性, 利用 1 台容量为 $15 \text{ kV}\cdot\text{A}$ 的双馈式模拟变速抽蓄机组进行实验分析, 其基本参数如下: 极对数为 3, 额定转速为 $1000 \text{ r}/\text{min}$, 定子额定电压为 380 V , 额定电流为 18.23 A ; 转子额定电压为 380 V , 额定电流为 5.66 A 。主变压器采用 Yd11 接线, 容量为 $15 \text{ kV}\cdot\text{A}$, 变比为 $380 \text{ V}/380 \text{ V}$ 。实验机组的实物图如附录 B 图 B4 所示。该试验变速抽蓄机组的转子槽数为 45, 转子绕组每相 1 分支, 每分支由 15 匝线圈串联组成, 转子侧短距系数为 0.95144, 采用双层叠绕组绕线形

式, 由三组“进 2 回 3”部分绕组串联组成, 每组“进 2 回 3”绕组的幅值和相位相等, 此时其电势分布特点已不与前述机组一致, 需要根据其电势分布的几何特点更新式(2)和式(3), 此处不再赘述。在机组侧面引出多个绕组抽头, 用于设置机组内部故障。其中, 转子绕组上共引出 6 个抽头 Tap₁—Tap₆, 如图 5 所示。由于转子处于高速旋转工况, 限制了其内部引出抽头的数量, 6 个抽头中有 3 个经机端滑环引出, 仅有余下 3 个抽头在机组内部通过额外安装滑环引出。

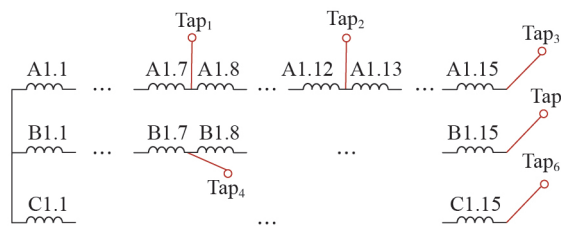


图 5 实验机组的故障抽头
Fig.5 Fault taps of test unit

图 5 中 A1 分支上的抽头 Tap₁—Tap₃ 对应的故障位置 α 分别为 0.4667、0.8000 和 1.000, 这 3 个抽头可用于验证不同故障位置、不同机组负载水平和功率因数情况下本文所提转子接地故障定位方法的有效性。具体地, 当转差率为 0.1 时, 在 Tap₁—Tap₃ 上分别设置单相转子接地故障 f_1 — f_3 , 接地点为机组外壳, 接地故障电阻为 3.6Ω 。根据录波数据绘制各故障情况下转子三相电压波形和基频相量图, 分别如图 6 和附录 B 图 B5 所示, 对应的故障定位结果如附录 B 表 B3 所示。

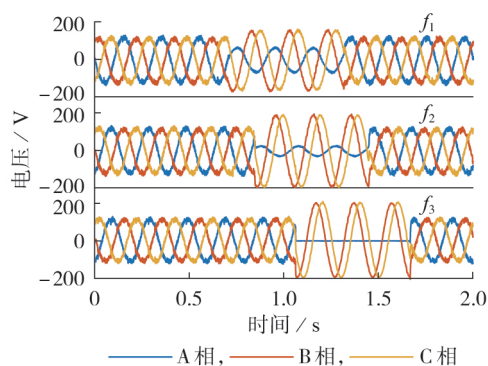


图 6 实验机组在不同故障情况下的三相电压波形
Fig.6 Three-phase voltage waveforms of test unit under different fault conditions

进一步, 将接地故障电阻增大至 50Ω , 对应的故障定位结果如表 B3 所示。可以发现, 在不同的故障条件下, 本文所提方法能够正确选相, 最大误差约为单匝线圈长度的 30.45%, 具有较高的定位精度。由图 B5 的基频相量轨迹交点可以发现, 实验机组的故障点均位于零电位附近, 其原因是实验机组的体

积较小、绕组总长较短,使绕组等效对地电容较小(受实验条件限制,不设置外挂电容),即接地故障电流极小。该接地故障电流流经故障过渡电阻时,产生的故障点对地电压较小。因此,基频相量轨迹交点均位于零电位附近。综上所述,本文所提方法在不同故障位置、负载水平和功率因数情况下均能够实现正确选相,有较高的故障定位精度,误差不超过单匝线圈长度,证明了该方法在应用于实际机组时的有效性。

5 结论

本文提出了一种变速抽蓄机组转子接地故障精确定位方法,所得结论如下。

1)从磁动势切割槽导体产生感应电势的角度出发,总结了多工况下转子绕组槽导体感应电势的相互相位关系。在此基础上,提出绕组电势的分段解析方法。

2)基于相量轨迹分析,提出转子接地故障选相方法,并建立转子接地故障定位的最优化求解模型。利用PSO算法对其进行求解,最优决策变量即为故障定位结果。

3)仿真和实验结果表明,本文所提方法能够准确选相,对于不同位置、接地故障电阻条件下的转子接地故障,故障定位结果的绝对误差均小于1匝线圈长度,定位精度较高。

4)本文所提方法可推广应用至中性点不接地的电动机定子接地故障定位。

在第4章中,由于未在动模机组转子三相端口外挂电容,使机组接地容性电流较小,难以真实反映转子高阻接地故障特征。因此,在下一步研究工作中,将重点针对转子高阻接地故障的检测和定位技术开展研究,探究传统同步发电机定子高阻接地故障定位的多解问题是否也存在于变速抽蓄机组的转子高阻接地故障。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 井浩然,赵红生,姚伟,等. 含分布式变速抽水蓄能的新能源发电系统灵活性资源规划[J]. 电力自动化设备,2023,43(11):117-123,173.
JING Haoran,ZHAO Hongsheng,YAO Wei, et al. Flexible resource planning of renewable generation systems with distributed variable speed pumped storages[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(11):117-123,173.

[2] 陈晓,冀鹏,郝婧,等. 面向系统功角稳定性提升的变速抽水蓄能机组故障穿越性能优化[J]. 电力系统自动化,2023,47(24):156-164.
CHEN Xiao,ZI Peng,HAO Jing, et al. Fault ride-through performance optimization of variable-speed pumped storage units for enhancing power angle stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(24):156-164.

[3] 丁理杰,史华勃,陈刚,等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备,2024,44(3):166-171,179.
DING Lijie,SHI Huabo,CHEN Gang, et al. Control strategy and regulation characteristics of variable speed pumped storage unit with full-size converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(3):166-171,179.

[4] ALIZADEH BIDGOLI M,YANG W J,AHMADIAN A. DFIM versus synchronous machine for variable speed pumped storage hydropower plants:a comparative evaluation of technical performance[J]. Renewable Energy,2020,159:72-86.

[5] QIAO Jian,YIN Xianggen,WANG Yikai. A rotor ground fault protection method based on injection principle for variable speed pumped storage generator-motor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2023,38(2):1159-1168.

[6] BLÁNQUEZ F R,PLATERO C A,REBOLLO E, et al. Field-winding fault detection in synchronous machines with static excitation through frequency response analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2015,73:229-239.

[7] PARDO M,BLÁNQUEZ F R,PLATERO C A, et al. Detection and location of a ground-fault in the excitation circuit of a 106 MV·A synchronous generator by a new on-line method[J]. Electric Power Systems Research,2016,140:303-311.

[8] BLANQUEZ F R,PLATERO C A,REBOLLO E, et al. Novel rotor ground-fault detection algorithm for synchronous machines with static excitation based on third-harmonic voltage-phasor comparison[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(4):2548-2558.

[9] GAONA C A P,BLÁZQUEZ F,FRÍAS P, et al. A novel rotor ground-fault-detection technique for synchronous machines with static excitation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(4):965-973.

[10] PLATERO C A,BLÁZQUEZ F,FRÍAS P, et al. New on-line rotor ground fault location method for synchronous machines with static excitation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26(2):965-973.

[11] 陈晓明,熊良根,周荣斌,等. 电阻分压式转子接地保护改进算法[J]. 电力系统自动化,2013,37(22):90-95.
CHEN Xiaoming,XIONG Lianggen,ZHOU Rongbin, et al. Improved algorithm for rotor earth fault protection in resistor divider mode[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(22):90-95.

[12] 李玉平,桑建斌,朱宇聪,等. 基于双端直流注入切换采样原理的发电机转子接地保护[J]. 电力系统自动化,2020,44(21):139-144.
LI Yuping,SANG Jianbin,ZHU Yucong, et al. Earth fault protection for generator rotor based on switching sampling principle with double-end DC injection[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(21):139-144.

[13] 俞卫新,王晓剑,何天磊,等. 重复脉冲法在发电机转子一点接地故障诊断中的研究与应用[J]. 大电机技术,2021(6):22-27.
YU Weixin,WANG Xiaojian,HE Tianlei, et al. Research and application of repetitive surge oscillograph method in one-point ground fault diagnosis of generator rotor winding[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2021(6):22-27.

[14] 乔健,尹项根,王义凯,等. 以槽电势为分析单元的大型发电机定子接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(11):204-210,217.
QIAO Jian,YIN Xianggen,WANG Yikai, et al. Slot potential based stator grounding fault location method for large generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(11):204-210,217.

- [15] WANG Yuanyuan, HUANG Xiancheng, ZENG Xiangjun. Studies on stator single-line-to-ground faults protection for a powerformer considering the winding electromotive force distribution[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 119: 1-7.
- [16] WANG Yuanyuan, ZHOU Jiaming, WEI Gen. Stator winding single-phase grounding faults protective scheme based on discriminant analysis for powerformers with selectivity[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 77: 145-150.
- [17] 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. 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.
- [18] TAN Liming, WANG Yikai, YIN Xianggen. Injected current regulation based stator ground fault arc suppression method for large hydro-generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 143: 1-11.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 贾文超, 黄少锋. 基于零序电压故障分量相位特征的发电机定子单相接地故障选相[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 116-121.
- JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Phase selection based on fault component phase characteristics of zero-sequence voltage for generator stator single-phase grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 116-121.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] JAAFARI K A, 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, 35(3): 1402-1410.
- [25] TANG Yaojing, CHANG Yongle, TANG Jinrui. A novel faulty phase selection method for single-phase-to-ground fault in distribution system based on transient current similarity measurement[J]. Energies, 2021, 14(15): 4695.

作者简介:

乔健(1997—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: qiaojian@ncepu.edu.cn);

尹昕(1986—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: leoxinyin@qq.com);

王义凯(1996—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: wangyikai@ncepu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Accurate location method of rotor grounding fault of variable speed pumped storage unit

QIAO Jian¹, YIN Xin², WANG Yikai¹, YIN Xianggen³, LIU Zhichang³, DAI Zhihui¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The rotor winding of variable speed pumped storage unit (VSPSU) is a special three-phase winding structure, which not only makes the traditional rotor grounding fault location method no longer applicable, but also increases the problem of grounding fault phase selection. Therefore, a grounding fault location method for rotor winding of VSPSU is proposed. The generation mechanism of the induced potential of the rotor slot conductor is analyzed, and the relationship between the phase characteristics of the rotor winding potential and the operating conditions is summarized. The piecewise function is used to accurately analyze the amplitude and phase variation of the winding potential. On this basis, a reliable phase selection method for rotor grounding fault is proposed based on phasor trajectory analysis. Furthermore, according to the geometric relationship of neutral point-to-ground voltage phasor, fault point-to-ground voltage phasor and fault winding potential phasor, the optimization model of ground fault location is constructed, and the precise location of rotor grounding fault can be realized by solving. Results of simulation and experiment verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: variable speed pumped storage unit; rotor grounding fault; fault phase selection; fault location; winding potential distribution

附录 A

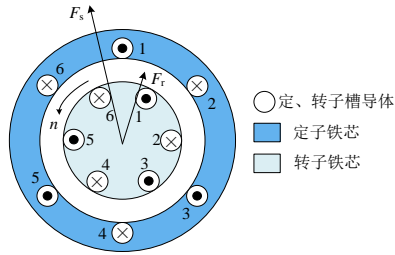


图 A1 电机结构图

Fig.A1 Motor structure drawing

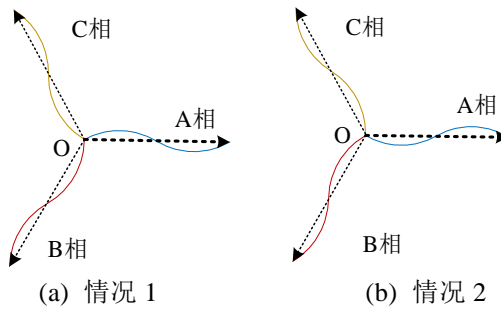


图 A2 转子绕组的电势分布

Fig.A2 Phase distribution characteristics of rotor winding potential in Case 1 and Case 2

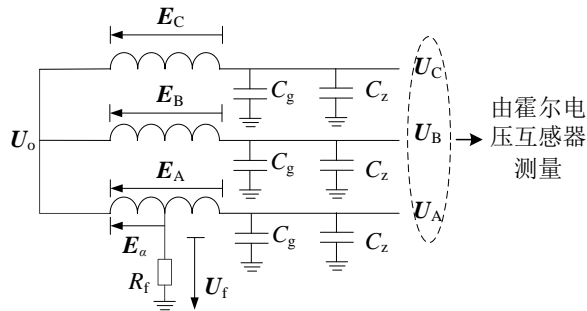


图 A3 转子绕组接地故障示意图

Fig.A3 Diagram of rotor ground fault

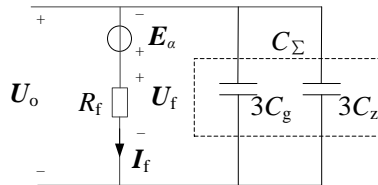


图 A4 接地故障的零序等值回路

Fig.A4 Zero-sequence equivalent circuit of the ground fault

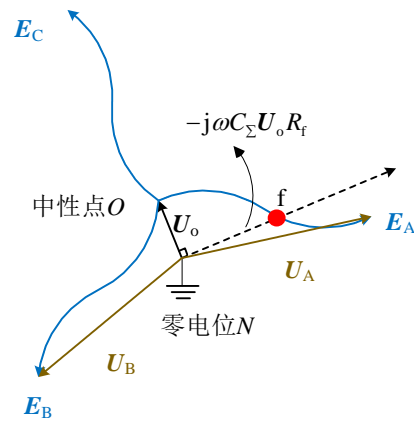


图 A5 接地故障电阻为 $\sqrt{3}/(\omega C_{\Sigma})$ 时的相量图
Fig.A5 Phasor diagram when grounding fault resistance is $\sqrt{3}/(\omega C_{\Sigma})$

附录 B

表 B1 仿真机组的基本参数

Table B1 Basic parameters of simulation unit

参数	数值	参数	数值
转子额定相电压/kV	1.91	转子槽数	294
每相绕组电感值/mH	7.92	极对数	7
每相绕组电阻值/mΩ	5.56	每相分支数	2
每相对地电容值/μF	0.64	每分支匝数	49
机端每相等效电容值/μF	0.31	极相组数	2
基波电角度/°	17.14	节距	21

表 B2 不同故障条件下的转子接地故障定位结果

Table B2 Location results of rotor grounding faults under different fault conditions

故障信息		测量结果			故障定位结果		
位置	R_f/Ω	U_A/kV	U_B/kV	U_C/kV	U_o/kV	定位 α'	$\delta /%$
f_1 , $\alpha=0.1429$	10	1.643 \angle -7.81°	2.133 \angle -129.10°	1.951 \angle 123.80°	0.281 \angle 197.76°	0.1439	4.90
	100	1.643 \angle -7.79°	2.133 \angle -129.11°	1.952 \angle 123.79°	0.281 \angle 197.65°	0.1437	3.92
	1000	1.641 \angle -7.61°	2.130 \angle -129.23°	1.957 \angle 123.75°	0.281 \angle 196.54°	0.1441	5.88
	10000	1.630 \angle -5.75°	2.091 \angle -130.21°	2.002 \angle 122.98°	0.275 \angle 185.63°	0.1412	8.33
f_2 , $\alpha=0.2857$	10	2.323 \angle -14.34°	2.135 \angle -109.55°	1.347 \angle 109.89°	0.568 \angle -50.78°	0.2850	3.43
	100	2.323 \angle -14.36°	2.136 \angle -109.57°	1.346 \angle 109.91°	0.568 \angle -50.89°	0.2821	17.64
	1000	2.316 \angle -14.57°	2.145 \angle -109.72°	1.343 \angle 110.37°	0.568 \angle -51.98°	0.2908	24.99
	10000	2.236 \angle -16.33°	2.222 \angle -111.64°	1.337 \angle 114.89°	0.556 \angle -62.70°	0.2894	18.13
f_3 , $\alpha=0.4286$	10	2.374 \angle 14.14°	1.084 \angle -128.01°	2.453 \angle 99.47°	0.825 \angle 60.15°	0.4226	29.40
	100	2.375 \angle 14.11°	1.084 \angle -127.93°	2.452 \angle 99.44°	0.825 \angle 60.04°	0.4279	3.43
	1000	2.386 \angle 13.87°	1.082 \angle -127.10°	2.442 \angle 99.16°	0.825 \angle 58.95°	0.4316	14.70
	10000	2.475 \angle 10.87°	1.108 \angle -119.15°	2.323 \angle 96.81°	0.807 \angle 48.18°	0.4264	10.78
f_4 , $\alpha=0.5714$	10	0.827 \angle 0.63°	2.575 \angle -146.46°	2.644 \angle 135.51°	1.079 \angle 172.19°	0.5733	9.31
	100	0.827 \angle 0.77°	2.574 \angle -146.49°	2.646 \angle 135.47°	1.079 \angle 172.08°	0.5731	8.33
	1000	0.831 \angle 2.18°	2.560 \angle -146.83°	2.658 \angle 135.11°	1.078 \angle 170.98°	0.5704	4.90
	10000	0.929 \angle 13.72°	2.398 \angle -149.66°	2.746 \angle 131.24°	1.055 \angle 160.17°	0.5716	0.98
f_5 , $\alpha=0.7143$	10	2.766 \angle -30.74°	2.911 \angle -101.65°	0.541 \angle 127.80°	1.368 \angle -69.21°	0.7212	33.81
	100	2.764 \angle -30.79°	2.912 \angle -101.71°	0.542 \angle 128.07°	1.368 \angle -69.32°	0.7181	18.62
	1000	2.747 \angle -31.21°	2.926 \angle -102.14°	0.551 \angle 130.64°	1.368 \angle -70.41°	0.7223	39.20
	10000	2.553 \angle -34.79°	3.021 \angle -106.71°	0.723 \angle 147.83°	1.337 \angle -81.17°	0.7231	43.12
f_6 , $\alpha=0.8571$	10	3.126 \angle 21.74°	0.284 \angle -103.41°	3.004 \angle 86.22°	1.642 \angle 51.95°	0.8580	4.41
	100	3.128 \angle 21.68°	0.285 \angle -102.83°	3.002 \angle 86.17°	1.642 \angle 51.84°	0.8581	4.90
	1000	3.143 \angle 21.18°	0.301 \angle -97.48°	2.984 \angle 85.68°	1.642 \angle 50.74°	0.8612	20.09
	10000	3.249 \angle 16.02°	0.559 \angle -74.06°	2.768 \angle 81.33°	1.607 \angle 39.97°	0.8609	18.62

表 B3 实验机组在不同故障位置、负载水平和功率因数情况下的故障定位结果

Table B3 Location results of the unit under different fault locations, load levels and power factors

故障条件					测量结果			故障定位结果		
故障点	R_f/Ω	故障位置	负载水平/kW	功率因数	U_A/V	U_B/V	U_C/V	U_o/V	定位结果	$\delta /%$
f_1	3.6	0.4667	空载	/	65 \angle -49°	155 \angle 174°	154 \angle 90°	55 \angle 133°	0.4556	16.65
f_2	3.6	0.8000	6.3	0.76	27 \angle 162°	187 \angle 19°	187 \angle -48°	95 \angle -14°	0.7805	29.25
f_3	3.6	1.0000	10.2	0.92	0.2 \angle 63°	205 \angle -47°	206 \angle -107°	119 \angle -77°	0.9985	2.25
f_1	50.0	0.4667	7.2	0.85	66 \angle -91°	155 \angle 131°	155 \angle 48°	55 \angle 90°	0.4540	19.05
f_2	50.0	0.8000	空载	/	26 \angle 71°	185 \angle -72°	187 \angle -140°	94 \angle -106°	0.7797	30.45
f_3	50.0	1.0000	4.9	0.77	0.1 \angle 151°	204 \angle 56°	207 \angle -4°	119 \angle 27°	0.9993	1.05

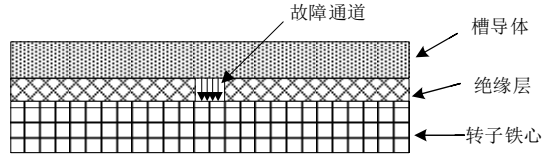


图 B1 转子接地故障通道
Fig.B1 Fault channel of the rotor ground fault

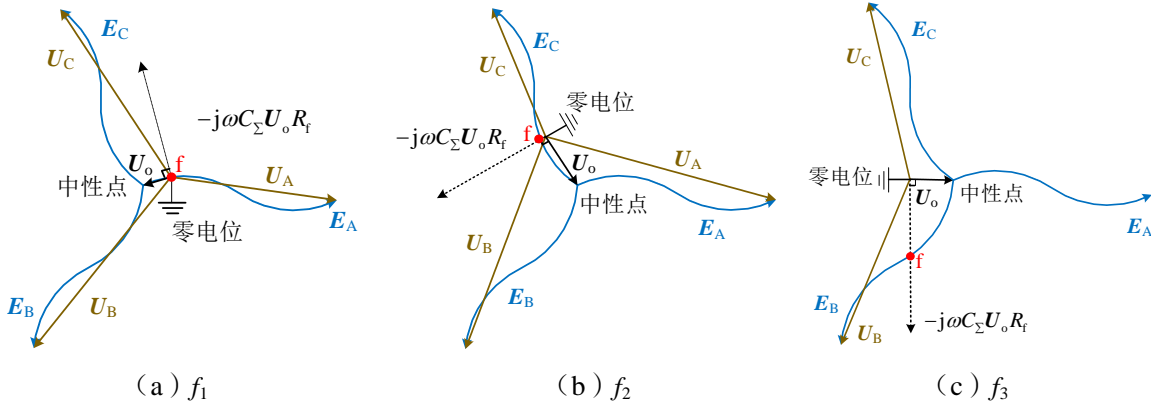


图 B2 不同接地故障电阻下的故障选相结果
Fig.B2 Performance of proposed faulty phase selection method under different grounding fault resistance s

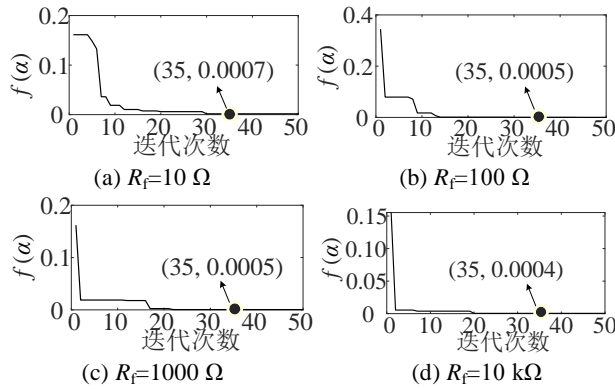


图 B3 优化模型的求解过程
Fig.B3 Solving process of grounding faults

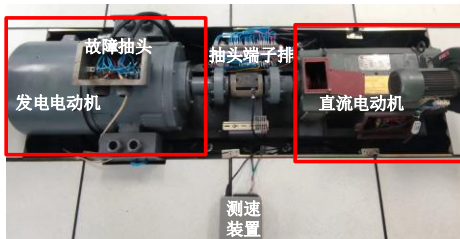


图 B4 实验机组的实物图
Fig.B4 Physical diagram of test unit

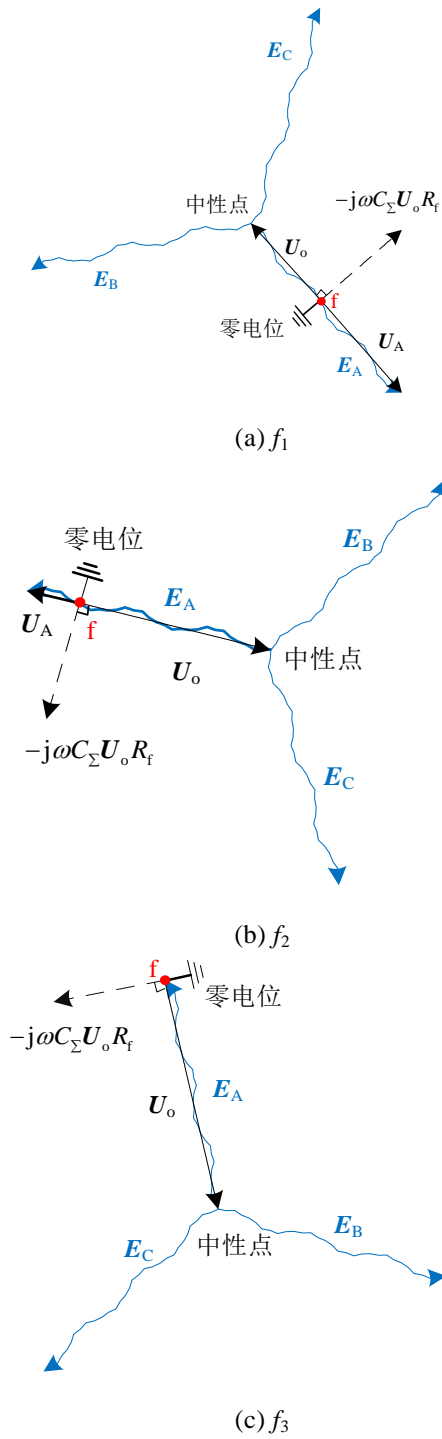


图 B5 实验机组在不同故障位置、负载水平和功率因数情况下的基频相量图
Fig.B5 Fundamental frequency phasor diagram of test unit under different fault locations, load levels and power factors