

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

乔健¹, 尹项根¹, 王义凯¹, 谭力铭¹, 徐雯¹, 李伟²

(1. 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;

2. 国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院, 北京 100053)

摘要: 已有的大型发电机定子绕组单相接地故障定位方法一般以线圈匝电势为分析单元, 对于短距绕组的机组存在理论误差。为此, 提出一种以槽电势为分析单元的大型发电机定子单相接地故障定位方法。首先, 基于绕组连接顺序, 以槽电势为单元建立定子绕组电势分布的解析表达式。然后, 针对发电机是否配备注入式定子接地保护采取不同的故障定位方案。若配备注入式定子接地保护, 则基于注入式设备的过渡电阻测量值构造故障评价指标。若未配备注入式定子接地保护, 则引入3次谐波测量值构造不含过渡电阻的故障评价指标。最后, 在故障相人为设置多个虚拟参考点, 结合绕组电势分布计算各虚拟参考点的故障评价指标, 将计算值最小的虚拟参考点视为故障位置, 进而确定故障所在槽编号。利用在PSCAD中搭建的准分布参数仿真模型验证了所提方法的有效性。

关键词: 大型发电机; 定子接地故障; 绕组电势分布; 故障定位

中图分类号: TM 31

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202204003

0 引言

大型发电机作为主力支撑电源, 其安全运行是保障电力系统可靠供电的基础。定子绕组的单相接地故障(定子绕组与铁芯间的绝缘破坏)是发电机最常见的一种故障^[1]。随着发电机单机容量的增大, 相应的单相接地电流也随之增大。若不采取措施, 则会危及定子铁芯, 易演变为匝间或相间短路故障^[2]。目前大型发电机通常配置双频式100%定子接地保护(基波零序电压+3次谐波电压保护)和注入式定子接地保护^[3-4](下文简称注入式保护)。在定子接地保护动作发信号后, 应解开发电机与外部的连接, 利用保护装置的录波数据实现定子绕组的接地故障定位, 以减少故障排除工作量和缩短停机检修时间。

目前, 已有多种基于不同保护装置的录波数据的定子接地故障定位方法。文献[5]提出一种仅使用基频测量信息的故障定位方法, 该方法利用机端三相基波电压和基频零序电压计算接地过渡电阻, 进而推算出故障位置。文献[6]利用回路电流法构建故障后的3次谐波等效电路, 基于中性点和机端处测量的3次谐波电压求解故障位置和过渡电阻。

文献[7]提出一种基于注入式保护的定子接地故障定位方法, 该方法利用注入式设备的低频信息测量过渡电阻, 进而实现故障定位。然而, 上述方法忽略了定子绕组电势分布的相位特征^[8], 计算结果存在理论误差。文献[9]以线圈匝电势为单元分析故障分支的电势分布特征, 利用注入式设备测量过渡电阻, 最终通过查表法定位故障所在线圈。文献[10]利用基波电势的分布特征计算各线圈末端故障时的基频零序电压轨迹圆弧, 通过与故障录波数据进行对比判断故障所在线圈, 在高阻故障时可能存在多解, 需借助注入式设备辅助判断。文献[11]基于绕组电势的相位特征分析首次提出了绕组电势分布的公式表示, 从而实现了故障位置的数值求解。但上述方法均是以线圈匝电势为单元分析绕组的电势分布。对于短距绕组的机组, 忽略了线圈两边槽电势的相位差异。此外, 线圈是由2个跨度较远的槽导体串联组成的。对于故障检修, 将故障定位结果精确到槽编号更有实际意义。因此, 文献[12]提出了一种能够将故障位置精确至槽编号的故障定位方法, 但该方法需在发电机内部安装测量装置, 实现较为困难。

为此, 本文提出一种以槽电势为分析单元的大型发电机定子单相接地故障定位方法。发生定子单相接地故障后, 基于绕组连接顺序在线辨识基波槽电势和3次谐波槽电势, 进而建立绕组基波和3次谐波电势分布的精确解析表达。对于配备了注入式保护的发电机, 利用注入式设备测量过渡电阻, 基于发电机的基频零序等值电路构造故障评价指标。对于未配备注入式保护的发电机, 通过引入3次谐波测量值构造不含过渡电阻的故障评价指标。最后, 在

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2022-02-11

在线出版日期: 2022-04-15

基金项目: 国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院科技项目(52573020000L)

Project supported by the Science and Technology Project of Pumped-Storage Technological & Economic Research Institute of State Grid Xinyuan Company Ltd.(52573020000L)

故障相各分支上设置多个虚拟参考点,计算各虚拟参考点的故障评价指标,将计算值最小的虚拟参考点视为故障位置并将其所在槽编号发送给检修部门。利用在 PSCAD 中搭建的准分布参数模型验证了本文所提方法不受故障位置和过渡电阻的影响,能够满足实际工程的需要。

1 以槽电势为分析单元的绕组电势分析方法

大型汽轮机组和核电机组由于转速较高,多为隐极式结构。以某核电机组为例,该机组采用双层叠绕组的绕线形式,其定子槽数为 48,极对数 p 为 2,极距 τ 为 12,定子每相分支数为 2,槽距电角度为 15° ,定子的基波槽电势相量图见附录 A 图 A1。图中:数字表示槽编号;U 表示槽内上层边导体;L 表示槽内下层边导体。例如,1U 表示槽编号 1 中上层边导体。该发电机每个分支由 2 个极相组串联组成,具体地,A1 分支(A 相第一分支)的连接顺序见附录 A 图 A2。图中:节距为 10,是短距绕组形式; O 为中性点; H 为 A1 分支的中点(2 个极相组的连接处);每个极相组由 4 个线圈串联组成,相邻线圈的匝电势相差 15° ,构成 2 个 60° 相带分布,见附录 A 图 A3; F_1 和 F_2 是 2 个可能发生的单相接地故障,分别位于 2 个极相组上。

由线圈匝电势组成的极相组电势分布近似为 60° 相带的圆弧。因此,文献[13-15]基于该相位特征提出了一种绕组电势的公式解析法。当故障位置位于中性点侧的极相组上时,以故障 F_1 为例,故障绕组(故障点至中性点的绕组)的基波电势 $E(\alpha_1)$ 为:

$$E(\alpha_1) = E_{OF1} = E_{OA1} \sin \frac{\alpha_1 \pi}{3} \angle \frac{(1-2\alpha_1)\pi}{6} \quad (1)$$

式中: α_1 为绕组 OF_1 与绕组 OA_1 的长度比值; E_{OA1} 为 A1 分支的合成基波电势; E_{OF1} 为故障 F_1 所在位置至中性点的绕组电势。

当故障位于机端侧的极相组上时,以故障 F_2 为例,故障绕组的基波电势 $E(\alpha_2)$ 为:

$$E(\alpha_2) = E_{OF2} = \frac{E_{OA1}}{2} + E_{OA1} \sin \frac{(2\alpha_2-1)\pi}{6} \angle \frac{(1-\alpha_2)\pi}{3} \quad (2)$$

式中: α_2 为绕组 OF_2 与绕组 OA_1 的长度比值; E_{OF2} 为故障 F_2 所在位置至中性点的绕组电势。

由于短距绕组具有端接连线较短、成本较低的优势,大型发电机组普遍采用短距的绕线形式。该绕线形式下,线圈两边槽导体的感应电势存在相位差异。实际的绕组电势分布应以槽电势为单元进行分析,见附录 A 图 A4。对比图 A3、A4 可以发现,短距绕组的机组的实际绕组电势分布与圆弧分布存在一定差异。为更直观地展示该差异,采用故障绕组在该分支绕组中的占比 α 表示故障位置,令 α 由 0 变化至 1(从中性点到机端),以线圈匝电势和槽电

势为分析单元的分析方法得到的故障绕组的基波电势 $E(\alpha)$ 的幅值和相位变化情况如图 1 所示。图中: $\alpha=0$ 和 $\alpha=1$ 分别表示中性点和机端。由图可见,2 种分析方法得到的 $E(\alpha)$ 幅值几乎相等,在各匝线圈的中点存在少许差异;但 $E(\alpha)$ 相位的差异较大,尤其在靠近中性点侧发生定子接地故障时,相位差异超过 20° ,可能导致故障定位结果出现较大误差。因此,对于短距绕组的机组应以槽电势为单元进行分析计算,不能直接套用式(1)、(2)计算绕组电势分布。

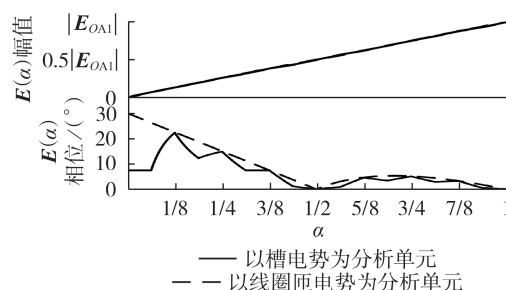


图 1 不同故障位置下 $E(\alpha)$ 的幅值和相位

Fig.1 Amplitude and phase of $E(\alpha)$ with different values of α

发电机转速恒定时,可认为所有槽导体的感应电势幅值相等。普遍地,假设定子 S 相($S=A, B, C$)某分支的绕组共由 i 匝线圈串联组成,其连接顺序为: $(x_1U, x_2L) \rightarrow (x_3U, x_4L) \rightarrow \dots \rightarrow (x_{2i-1}U, x_{2i}L)$ 。其中, $x_1 \sim x_{2i}$ 为槽编号。槽电势的相位见图 A1,分别记为 $\beta_{x_1} \sim \beta_{x_{2i}}$,则有:

$$E_S = E_O + E_X \angle \beta_{x_1} - E_X \angle \beta_{x_2} + E_X \angle \beta_{x_3} + \dots + (-1)^{j+1} E_X \angle \beta_{x_j} + \dots - E_X \angle \beta_{x_{2i}} \quad (3)$$

式中: $j=1, 2, \dots, 2i$; E_O 和 E_S 分别为在分支的中性点和机端处测量得到的基波电势; E_X 为基波槽电势, E_X 的相位是槽电势的参考相位与测量电势的参考相位的夹角。因此,可对基波槽电势进行在线辨识,如式(4)所示。

$$E_X = \frac{E_S - E_O}{\angle \beta_{x_1} - \angle \beta_{x_2} + \dots + (-1)^{j+1} \angle \beta_{x_j} + \dots - \angle \beta_{x_{2i}}} \quad (4)$$

由于以槽电势为分析单元得到的绕组电势分布特征复杂,故障绕组的基波电势 $E(\alpha)$ 无法如式(1)、(2)那样用一个简单的解析式表达,但可以根据绕组连接顺序以槽导体为单元进行分段,构造分段函数解析式为:

$$E(\alpha) = \begin{cases} 2i\alpha E_X \angle \beta_{x_1} & 0 < \alpha \leq 1/(2i) \\ E(1/(2i)) - (2i\alpha - 1)E_X \angle \beta_{x_2} & 1/(2i) < \alpha \leq 2/(2i) \\ \vdots & \\ E(j/(2i)) + (-1)^j (2i\alpha - j)E_X \angle \beta_{x_{j+1}} & j/(2i) < \alpha \leq (j+1)/(2i) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $j=0, 1, \dots, 2i-1$ 。则 $E(\alpha)$ 是被分为 $2i$ 段的分段函数。

2 定子接地故障定位方法

2.1 配备注入式保护

定子接地故障的基频零序等效电路如图2所示^[6]。图中: C_g 为定子绕组的每相对地电容; C_z 为机端外部等效的每相对地电容; C_Σ 为总体的等效对地电容; R_N 为发电机的中性点接地电阻一次值; Z_k 为接地变压器短路阻抗一次值^[10]; R_k 为短路电阻; L_k 为短路电感; R_f 为定子接地故障的过渡电阻。根据基尔霍夫电流定律可得:

$$E_o \left(\frac{1}{R_N + R_k + j\omega L_k} + j\omega C_\Sigma \right) + (E_o + E(\alpha)) \frac{1}{R_f} = 0 \quad (6)$$

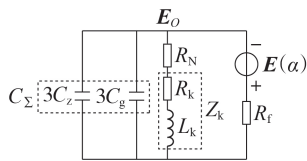


图2 基频零序等效电路

Fig.2 Fundamental frequency zero-sequence equivalent circuit

大型发电机为实现定子接地故障的双重化保护,通常会配置100%定子接地保护和注入式保护。注入式保护能够测量 R_f ^[16],若故障定位程序能够获取 R_f 的测量值,则式(6)中仅含有 $E(\alpha)$ 这1个未知量。联立式(5)、(6)可对 α 进行数值求解。然而,式(5)是一个多分段的非线性复数函数,求解过程困难,计算耗时较长,直接进行数值求解不可取。

因此,为了简化求解计算量,基于式(6)构造故障评价指标 $f(E(\alpha))$ 如式(7)所示。

$$f(E(\alpha)) = \left| E_o \left(\frac{1}{R_N + R_k + j\omega L_k} + j\omega C_\Sigma \right) + (E_o + E(\alpha)) \frac{1}{R_f} \right| \quad (7)$$

由于不同位置的 $E(\alpha)$ 是唯一的,只有真实故障点的故障评价指标 $f(E(\alpha))$ 为0,而其他位置的 $f(E(\alpha))$ 必定不为0,且距离真实故障点越远,对应的 $f(E(\alpha))$ 越大。考虑到故障检修时是对定子槽内的整根导体进行排查,将故障定位结果精确至槽编号就能满足工程需要,无需得到 α 的数值解。因此,在每根槽导体上设置3个虚拟参考点 R_i ,分别位于槽导体的1/6处、1/2处和5/6处,即相邻虚拟参考点相差1/3个槽导体长度,见附录A图A5。

根据式(5)可计算每个虚拟参考点对应的基波电势 $E(R_i)$ 。进一步地,利用式(7)计算各虚拟参考点对应的 $f(E(R_i))$ 并互相对比,将 $f(E(R_i))$ 计算值

最小的虚拟参考点视为故障参考点,进而确定故障所在槽编号,该求解方式本质上是穷举法,无需考虑求解约束条件。以图A5中的虚拟参考点 R_4 为例,若 $f(E(R_4))$ 的计算值最小,则认为定子接地故障位于定子11槽中。

2.2 未配备注入式保护

对于未配备注入式保护或配备了注入式保护但无法获取过渡电阻测量值的发电机,由于式(7)中存在 $E(\alpha)$ 和 R_f 这2个未知量,2.1节所提方法不再适用。考虑到发电机运行时定子绕组存在较大的3次谐波电势,可结合3次谐波信息进行定子接地故障定位。

类似于基波电势的分析,以3次谐波槽电势为分析单元可得到定子绕组的3次谐波电势分布见附录A图A6。由于中性点处和机端处的3次谐波电势 E_{3-0} 和 E_{3-S} 是实时测量值,因此,可实时在线辨识3次谐波槽电势 E_{3-X} 。在不同的运行工况下能够自适应地计算当前时刻的3次谐波槽电势,类似于式(4)有:

$$E_{3-X} = \frac{E_{3-S} - E_{3-0}}{1 \angle \beta_{3-x_1} + \dots + (-1)^{j+1} \angle \beta_{3-x_j} + \dots - 1 \angle \beta_{3-x_{2i}}} \quad (8)$$

式中: $j=1, 2, \dots, 2i$; $\beta_{3-x_j} = 3\beta_{x_j}$ 。同理,故障绕组的3次谐波电势 $E_3(\alpha)$ 的解析式为:

$$E_3(\alpha) = \begin{cases} 2i\alpha E_{3-X} \angle \beta_{3-x_1} & 0 < \alpha \leq 1/(2i) \\ -(2i\alpha - 1)E_{3-X} \angle \beta_{3-x_2} + E_3(1/(2i)) & 1/(2i) < \alpha \leq 2/(2i) \\ \vdots & \\ (-1)^j (2i\alpha - j)E_{3-X} \angle \beta_{3-x_{j+1}} + E_3(j/(2i)) & j/(2i) < \alpha \leq (j+1)/(2i) \end{cases} \quad (9)$$

定子接地故障的3次谐波等效电路如图3所示^[7]。根据基尔霍夫电流定律可得到:

$$E_{3-0} \left(\frac{1}{R_N + R_k + j3\omega L_k} + \frac{9}{2} j\omega C_g \right) + (E_{3-0} + E_3(\alpha)) \frac{1}{R_f} + E_{3-S} \frac{9}{2} j\omega (C_g + 2C_z) = 0 \quad (10)$$

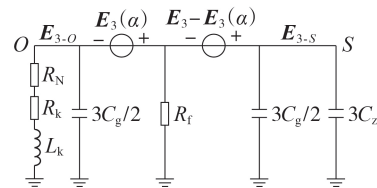


图3 3次谐波等效电路

Fig.3 Third harmonic equivalent circuit

联立式(6)和式(10)可得:

$$A(E_o + E(\alpha)) - B(E_{3-0} + E_3(\alpha)) = 0 \quad (11)$$

式中: A 和 B 不含有未知量,可由测量值得到,具体如式(12)所示。

$$\begin{cases} A = E_{3.0} \left(\frac{1}{R_N + R_k + j3\omega L_k} + \frac{9}{2} j\omega C_g \right) + \\ E_{3.5} \frac{9}{2} j\omega (C_g + 2C_z) \\ B = E_o \left(\frac{1}{R_N + R_k + j\omega L_k} + j\omega C_\Sigma \right) \end{cases} \quad (12)$$

式(11)中仅含有 $E(\alpha)$ 和 $E_3(\alpha)$ 这2个未知量,可构造不含过渡电阻 R_t 的故障评价指标 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$,如式(13)所示。

$$f(E(\alpha), E_3(\alpha)) = |A(E_o + E(\alpha)) - B(E_{3.0} + E_3(\alpha))| \quad (13)$$

基于式(5)和式(9)可分别计算每个虚拟参考点对应的基波电势 $E(R_i)$ 和3次谐波电势 $E_3(R_i)$ 。利用式(13)计算各虚拟参考点对应的 $f(E(R_i), E_3(R_i))$ 并互相对比,将故障评价指标计算值最小的虚拟参考点视为故障参考点,进而确定故障所在槽编号。

2.3 故障定位流程

本文所提的定子接地故障定位方法的实现流程如图4所示。对于中性点经高阻接地的发电机,可直接根据故障相电压最低^[16]判断故障相。因此,只需在故障相的各分支上设置虚拟参考点,而无需在所有分支上设置虚拟参考点。

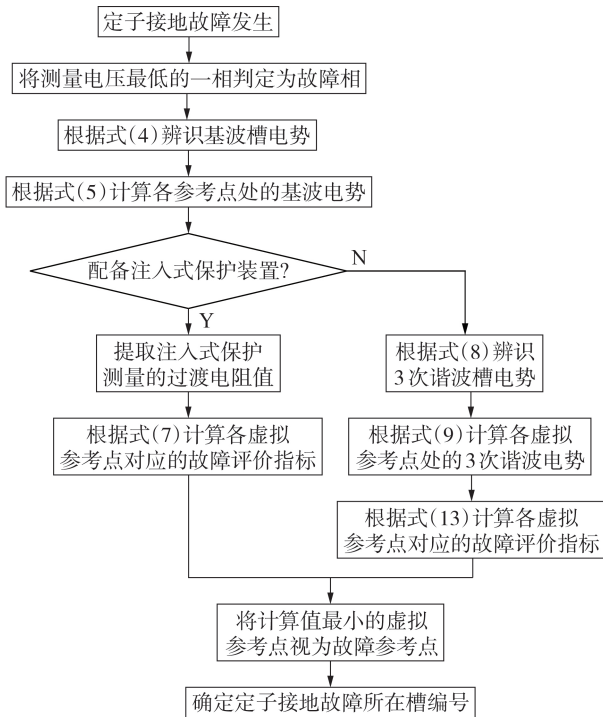


图4 本文所提故障定位方法的实现流程图

Fig.4 Flowchart of proposed fault location method

3 仿真分析与验证

3.1 仿真模型

准分布参数模型是常用的发电机定子接地故障

仿真模型^[9,17-19],根据定子绕组连接顺序及感应电势分布特征将定子各分支分为若干个单元组成的电路。现有的准分布参数模型均以线圈为单元进行建模,忽略了线圈两边槽导体的感应电势的相位差异。为此,本文以槽导体为分析单元在PSCAD中搭建更精确的准分布参数模型,具体的1个单元示意图见附录A图A7。当保护装置的测量值均为理想值时,由式(4)和式(8)辨识得到的槽电势满足:

$$\begin{cases} |E_x| = |E_1| \\ |E_{3-x}| = |E_3| \end{cases} \quad (14)$$

式中: E_1 和 E_3 分别为实际的基波槽电势和3次谐波槽电势。

考虑到实际的故障位置可能发生在线圈导体上的任意位置,为了仿真这种情况,在仿真模型中将故障位置所在的单元电路拆分成两部分,并根据故障位置的占比确定这两部分的电气参数,见附录A图A8。

仍以上述核电机组为例,该机组的基本参数如附录A表A1所示。由于各分支均由8匝线圈组成,1个分支上设置48个虚拟参考点。该机组A1分支由中性点到机端的绕组连接顺序为:(1U,11L)→(2U,12L)→(3U,13L)→(4U,14L)→(25U,35L)→(26U,36L)→(27U,37L)→(28U,38L)。

在A1分支上的6个位置设置定子单相接地故障,具体如下: f_1 为第1匝线圈的下层边导体11L的中点,即故障位置为虚拟参考点 R_5 ; f_2 为第3匝线圈的下层边导体12L的末端1/6处,即故障位置为虚拟参考点 R_{12} ; f_3 为第4匝线圈的上层边导体4U的首端1/6处,即故障位置为虚拟参考点 R_{19} ; f_4 为第5匝线圈的下层边导体35L的首端1/3处,即故障位置为虚拟参考点 R_{28} 和 R_{29} 的中点; f_5 为第6匝线圈的下层边导体36L的中点,即故障位置为虚拟参考点 R_{35} ; f_6 为第8匝线圈的上层边导体28U的首端1/4处,即故障位置介于虚拟参考点 R_{43} 和 R_{44} 之间且更靠近虚拟参考点 R_{43} 。

根据式(4),利用故障前一周期的录波数据对基波槽电势大小进行在线辨识。基波槽电势的实际大小为936.2041V,辨识结果为936.3610V,相对误差为0.0168%。

3.2 配备注入式保护时故障定位方法的性能分析

当 f_1 — f_6 处发生过渡电阻为50Ω的定子接地故障时,A相电压最低,被判断为故障相。计算A1分支和A2分支上所有虚拟参考点的故障评价指标 $f(E(\alpha))$,A1和A2分支各有1个 $f(E(\alpha))$ 计算值最小的虚拟参考点,而实际的故障位置一定是二者中 $f(E(\alpha))$ 计算值更小的虚拟参考点。为量化展示不同分支的区分度,各故障情况下两分支上 $f(E(\alpha))$

计算值最小的虚拟参考点及其 $f(E(\alpha))$ 见表1。表中: $R_{\min}$ 为 $f(E(\alpha))$ 计算值最小的虚拟参考点; $f_{\min}$ 为对应的 $f(E(\alpha))$ 计算值最小值。由表可见,不同分支的 $f(E(\alpha))$ 计算值最小值的区分度至少为1个数量级,不会出现故障分支误判的情况,故障定位结果见附录A图A9和表2。可以发现:在不同故障位置下本文所提方法的故障定位结果误差均不超过1个虚拟参考点间距,能够将故障位置精确到槽编号;当故障恰好位于虚拟参考点上时,该虚拟参考点的故障评价指标最小, $f(E(\alpha))$ 几乎为0;当故障位于2个虚拟参考点之间时,更靠近真实故障的虚拟参考点的故障评价指标最小,其 $f(E(\alpha))$ 略微增大,但仍接近于0。

表1 不同分支的 $f(E(\alpha))$ 区分度

Table 1 Differentiation of $f(E(\alpha))$ between different branches

故障位置	$R_{\min}$		$f_{\min}$	
	A1分支	A2分支	A1分支	A2分支
f_1	R_5	R_3	2.50×10^{-4}	5.28×10^{-1}
f_2	R_{12}	R_{14}	3.56×10^{-4}	4.78×10^{-1}
f_3	R_{19}	R_{21}	4.51×10^{-4}	1.43×10^{-1}
f_4	R_{29}	R_{29}	1.89×10^{-2}	1.11×10^{-1}
f_5	R_{35}	R_{33}	6.68×10^{-4}	1.47×10^{-1}
f_6	R_{43}	R_{45}	6.91×10^{-3}	5.69×10^{-2}

表2 配备注入式保护时,不同故障位置下的故障定位结果

Table 2 Fault location results under different fault positions when injection protection is equipped

故障位置	故障槽编号	$R_{\min}$	$f_{\min}$	故障定位结果
f_1	11	R_5	2.50×10^{-4}	11L
f_2	12	R_{12}	3.56×10^{-4}	12L
f_3	4	R_{19}	4.51×10^{-4}	4U
f_4	35	R_{29}	1.89×10^{-2}	35L
f_5	36	R_{35}	6.68×10^{-4}	36L
f_6	28	R_{43}	6.91×10^{-3}	28U

为了验证本文所提方法在不同过渡电阻下的性能,假设启动判据能够动作,对过渡电阻为100 Ω 、1 k Ω 、5 k Ω 和10 k Ω 这4种情况分别进行验证。计算故障分支A1上的所有虚拟参考点的故障评价指标,故障定位结果见附录A图A10。可以发现,当过渡电阻的测量值准确无误时,本文所提方法的性能不受过渡电阻变化的影响,故障定位误差不超过1个虚拟参考点间隔(1/3个槽导体长度),具有较高的定位精度。

在实际工程中,基于注入式设备的过渡电阻测量值存在一定的误差,试验结果表明测量误差与接地过渡电阻呈线性相关,随着过渡电阻阻值的增大,相对误差由负到正增大。但在一定的阻值范围内(0~10 k Ω),该相对误差可控制在 $\pm 5\%$ 之内^[20-21]。

以 f_2 和 f_3 处发生故障为例,当实际过渡电阻为50 Ω 时,对过渡电阻测量值分别施加 -5% 和 -10% 的测量误差;当实际过渡电阻为10 k Ω 时,对过渡电阻测量值分别施加 5% 和 10% 的测量误差。计算故障分支A1上的所有虚拟参考点的故障评价指标,故障定位结果见附录A图A11和表3。可以发现:当过渡电阻较小且存在较大测量误差时,本文所提方法仍能准确定位故障位置;当过渡电阻较大且存在较大测量误差时,本文所提方法存在一定的故障定位误差,但故障定位误差不超过2个虚拟参考点间隔(2/3个槽导体长度)。因此,对故障定位结果按绕线顺序两侧临近的槽导体一同进行故障排查一定能准确找到故障点。

表3 过渡电阻存在测量误差时的故障定位结果

Table 3 Fault location results of transition resistance with measurement error

故障位置	实际过渡电阻	过渡电阻测量误差 / %	$R_{\min}$	$f_{\min}$	故障定位结果
f_2	50 Ω	-5	R_{12}	2.24×10^{-3}	12L
		-10	R_{12}	4.37×10^{-3}	12L
	10 k Ω	5	R_{12}	4.44×10^{-2}	12L
		10	R_{13}	5.94×10^{-2}	3U
f_5	50 Ω	-5	R_{35}	2.35×10^{-3}	36L
		-10	R_{35}	4.43×10^{-3}	36L
	10 k Ω	5	R_{36}	1.27×10^{-2}	36L
		10	R_{37}	3.47×10^{-2}	27U

3.3 未配备注入式保护时故障定位方法的性能分析

对于未配备注入式保护或无法获取注入式保护的过渡电阻测量值的发电机,根据式(8),利用故障前一周期的录波数据对3次谐波槽电势进行在线辨识。3次谐波槽电势的实际大小为312.0680 V,辨识结果为309.2826 V,相对误差为 -0.89% 。

假设 f_1 — f_6 处发生过渡电阻为50 Ω 的故障,计算A1、A2分支上所有虚拟参考点的故障评价指标 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$,A1、A2分支上 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 最小的虚拟参考点以及 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 的计算值见表4。表中: $R'_{\min}$ 为 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 计算值最小的虚拟参考点; $f'_{\min}$ 为对应的 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 计算值最小值。由表可见,不同分支的 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 计算值最小值的区分度至少为1个数量级,不会出现故障分支误判的情况。故障定位结果见附录A图A12和表5,可见本文方法的故障定位结果误差均不超过1个虚拟参考点间距,能够将故障位置精确到槽编号。对比表2、5可以发现,表5中 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 的计算结果整体较大。这一方面是因为式(7)和式(13)中评价指标的量纲不同,另一方面是因为3次谐波槽电势的辨识结果存在更大的误差。但图A12中所有虚拟参考点的故障评价指标整体变大,因此不影响故障参考点的准确判断。

表 4 不同分支的 $f(E(\alpha)), E_3(\alpha)$ 区分度Table 4 Differentiation of $f(E(\alpha)), E_3(\alpha)$

between different branches

故障位置	$R'_{\min}$		$f'_{\min}$	
	A1 分支	A2 分支	A1 分支	A2 分支
f_1	R_5	R_3	8.74×10^0	3.06×10^3
f_2	R_{12}	R_9	2.27×10^1	6.94×10^3
f_3	R_{19}	R_{21}	2.77×10^1	2.88×10^3
f_4	R_{29}	R_{26}	4.72×10^2	3.18×10^3
f_5	R_{35}	R_{33}	6.03×10^1	7.02×10^3
f_6	R_{43}	R_{48}	1.82×10^2	3.02×10^3

表 5 未配备注入式保护时,不同故障位置下的故障定位结果

Table 5 Fault location results under different fault positions when injection protection is not equipped

故障位置	故障槽编号	$R'_{\min}$	$f'_{\min}$	故障定位结果
f_1	11	R_5	8.74×10^0	11L
f_2	12	R_{12}	2.27×10^1	12L
f_3	4	R_{19}	2.77×10^1	4U
f_4	35	R_{29}	4.72×10^2	35L
f_5	36	R_{35}	6.03×10^1	36L
f_6	28	R_{43}	1.82×10^2	28U

以 f_1 、 f_3 、 f_4 和 f_6 处发生故障为例,若启动判据能够动作,对过渡电阻为 $5 \text{ k}\Omega$ 和 $10 \text{ k}\Omega$ 这 2 种情况分别进行验证。A1 分支上各虚拟参考点的 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 计算结果如附录 A 图 A13 和表 6 所示。可见,随着过渡电阻的增大,虚拟参考点的 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$ 整体变小,故障参考点与非故障参考点的差异性不再明显,本文所提方法的性能逐渐变差。当过渡电阻为 $5 \text{ k}\Omega$ 时,不同故障位置的定位误差均不超过 3 个虚拟参考点间隔(半匝线圈),能够满足应用要求。当过渡电阻达到 $10 \text{ k}\Omega$ 时, f_1 、 f_3 和 f_4 处发生故障时,本文所提方法的故障定位误差均不超过 3 个虚拟参考点间隔。但 f_6 处发生故障时,本文所提方法将故障位置误判为 36L,与实际故障位置相差 7 个虚拟参考点间隔(1.17 匝线圈长度)。考虑到过渡电阻达 $10 \text{ k}\Omega$ 的定子接地故障发生频率较低,且 1.17 匝线圈的故障定位误差仍对故障排查有指示作用。因

表 6 未配备注入式保护时,不同过渡电阻下的故障定位结果

Table 6 Location results under different transition resistances when injection protection is not equipped

故障	过渡电阻 / $\text{k}\Omega$	$R'_{\min}$	$f'_{\min}$	故障定位结果
f_1	5	R_5	8.25×10^1	11L
	10	R_5	8.10×10^1	11L
f_3	5	R_{17}	9.04×10^1	13L
	10	R_{16}	1.11×10^2	13L
f_4	5	R_{30}	1.60×10^2	35L
	10	R_{30}	1.86×10^2	35L
f_6	5	R_{40}	1.42×10^2	37L
	10	R_{36}	2.07×10^1	36L(误判)

此,当启动判据动作后,本文所提方法在定子经高阻接地故障下仍具有一定的工程应用价值,且对于过渡电阻小于 $5 \text{ k}\Omega$ 的定子接地故障具有高可靠性。

考虑到发电机机端和中性点处的 3 次谐波电压受运行工况影响变化范围较大^[22-23],应考虑机端 3 次谐波电压 E_{3-S} 和中性点 3 次谐波电压 E_{3-0} 存在测量误差时本文所提方法的工作性能。对 E_{3-S} 和 E_{3-0} 施加 $-3\% \sim 3\%$ 的测量误差,3 次谐波槽电势的辨识结果见附录 A 表 A2。以 f_3 和 f_4 处发生故障为例,假设故障过渡电阻为 $5 \text{ k}\Omega$,计算故障分支 A1 上的所有虚拟参考点的 $f(E(\alpha), E_3(\alpha))$,故障定位结果见附录 A 图 A14。可以发现,此时本文所提方法的最大定位误差不超过 4 个虚拟参考点间隔(不超过 1 匝线圈),说明本文所提方法在 3 次谐波电压存在少量测量误差时,其故障定位结果仍具有一定的指示性。但能够预见,若测量误差进一步增大,本文所提方法可能将不再适用。

4 结论

精确的大型发电机定子接地故障定位方法能够有效减少故障排除工作量和停机检修时间,具有显著的经济效益。本文提出一种以槽电势为分析单元的大型发电机定子单相接地故障定位方法,并得出以下结论。

1) 提出以槽电势为单元分析定子绕组的电势分布,该分析方法不对绕组电势分布进行任何简化,能够适应短距绕组形式的大型发电机。

2) 针对配备注入式保护的发电机,基于注入式保护过渡电阻测量值构造故障评价指标。在故障相上布置多个虚拟参考点,计算各虚拟参考点的故障评价指标,将计算值最小的虚拟参考点视为故障参考点。该方法具有较高的故障定位精度,且对于注入式保护的过渡电阻测量误差具有鲁棒性。

3) 针对未配备注入式保护的发电机,提出结合 3 次谐波测量值构造不含过渡电阻的故障评价指标,并计算故障相所有虚拟参考点的评价指标,进而确定故障参考点和故障所在槽编号。该方法在 3 次谐波电压存在少量测量误差时仍然适用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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, 2020, 35(3): 1402-1410.
- [2] WU A Y. MV generator ground fault arcing power damage assessment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 912-915.
- [3] 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.
- [4] AL JAAFARI K, NEGAHDARI A, TOLYAT 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 林成, 王媛媛, 曾祥君, 等. 基于分级绝缘的高压发电机定子单相接地故障保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7052-7060.
LIN Cheng, WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, et al. Stator single phase ground fault protection of powerformers based on grading insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7052-7060.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] DAVARPANA M, KERAVAND 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.
- [13] WANG Yuanyuan, HUANG Xiancheng, ZENG Xianjun. 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: 1-7.
- [14] 贾文超. 发电机定子单相接地保护及故障定位的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
JIA Wenchao. Research on protection and fault location of generator stator single-phase earth fault[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [15] 王育学. 适应智能电网韧性电源需求的大型发电机保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- WANG Yuxue. Study on large generator protection adapted to requirements of tough power source in the smart grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [16] 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.
- [17] 王育学, 尹项根, 张哲, 等. 基于接地电流的大型发电机定子接地保护及精确定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 147-154.
WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A novel protection and precise location method based on grounding currents for stator ground faults of large generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 147-154.
- [18] WANG Yuanyuan, GUO Yongsheng, ZENG Xiangjun. 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] 薛磊, 孙钢虎, 王小辉, 等. 大型隐极发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 221-224.
XUE Lei, SUN Ganghu, WANG Xiaohui, et al. Novel location method for stator single-phase grounding fault of large non-salient pole generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 221-224.
- [20] 刘亚东, 王增平, 苏毅, 等. 注入式定子接地保护的现场试验、整定和分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 150-154.
LIU Yadong, WANG Zengping, SU Yi, et al. Field test, setting and analysis of injecting source-based stator grounding protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 150-154.
- [21] 张琦雪, 席康庆, 陈佳胜, 等. 大型发电机注入式定子接地保护的现场应用及分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 103-107.
ZHANG Qixue, XI Kangqing, CHEN Jiasheng, et al. Field application and analysis of the stator earth fault protection with voltage injection for large-sized generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 103-107.
- [22] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996: 149-167.
- [23] 王义凯, 尹项根, 乔健. 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. 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.

作者简介:



乔健

乔健(1997—),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 906982507@qq.com);

尹项根(1954—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制(E-mail: xgyin@hust.edu.cn);

王义凯(1996—),男,博士研究生,通信作者,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 742657004@qq.com)。

(编辑 任思思)

(下转第217页 continued on page 217)

Consistency testing technology of autonomous and controllable substation control level service protocol for service-oriented substations

ZHENG Mingzhong¹, BU Qiangsheng¹, GAO Lei¹, PENG Zhiqiang¹, ZHANG Qibing², SHENG Fu³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

3. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, China)

Abstract: The CMS (Communication Message Specification) protocol for substation secondary system defines a method of directly mapping the abstract communication service interface of IEC 61850 standard to TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) for data exchange, and realizes the replacement of MMS (Manufacturing Message Specification). In order to realize the popularization and application of CMS protocol for substation secondary system, it is necessary to carry out consistency testing. Based on the deep understanding of CMS protocol coding rules of secondary system, the differences between CMS protocol and MMS protocol are analyzed, test cases are designed for extended services, and a consistency testing method of CMS protocol for substation secondary system based on protocol plugins is proposed. Based on the proposed consistency testing method, a consistency testing tool is developed and applied to the factory acceptance of secondary equipment in the autonomous and controllable substation, which improves the efficiency of consistency testing and ensures the accuracy and reliability of consistency testing.

Key words: IEC 61850 standard; substations; substation control level service protocol; consistency testing; MMS; CMS

(上接第 210 页 continued from page 210)

Slot potential based stator grounding fault location method for large generator

QIAO Jian¹, YIN Xianggen¹, WANG Yikai¹, TAN Liming¹, XU Wen¹, LI Wei²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Pumped-Storage Technological & Economic Research Institute of State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: The current stator grounding fault location methods for large generators often take the coil potential as the analysis unit, and there are theoretical errors for the short-distance winding generators. Therefore, a slot potential based stator grounding fault location method for large generator is proposed. Firstly, based on the winding connection sequence, the analytical expression of stator winding potential distribution is established with slot potential as unit. Then, different fault location schemes are adopted for whether the generator is equipped with injection stator grounding protection. If the injection stator grounding protection is equipped, the fault evaluation index is constructed based on the measured transition resistance of the injection equipment. If the injection stator grounding protection is not equipped, the third harmonic measurement value is used to construct the fault evaluation index without transition resistance. Finally, multiple virtual reference points are artificially set in the fault phase. Combined with the winding potential distribution, the fault evaluation index of each virtual reference point is calculated. The virtual reference point with the smallest calculation value is regarded as the fault location, and the slot number of the fault is determined. A quasi distributed parameter simulation model is built in PSCAD to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: large generator; stator grounding fault; winding potential distribution; electric fault location

附录 A

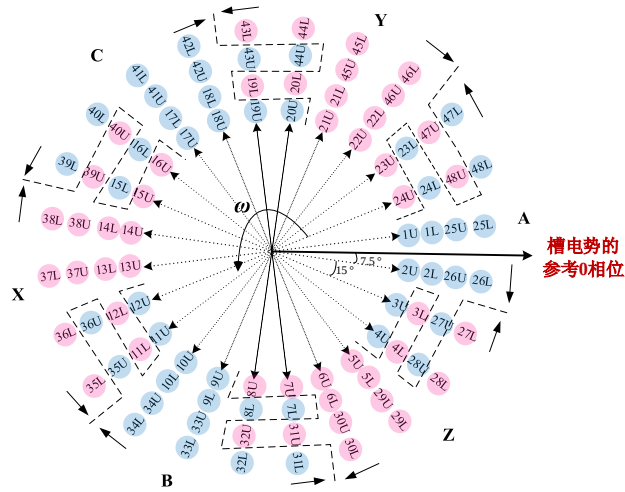


图 A1 定子槽电势分布相量图

Fig.A1 Phasor diagram of stator slot potential distribution

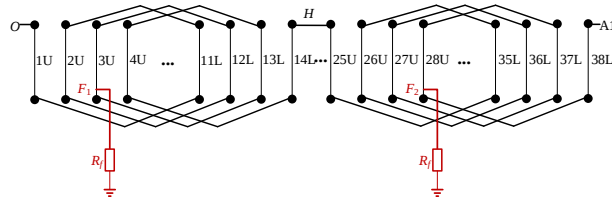


图 A2 A1 分支绕组的连接顺序

Fig.A2 Winding connection sequence of Branch A1

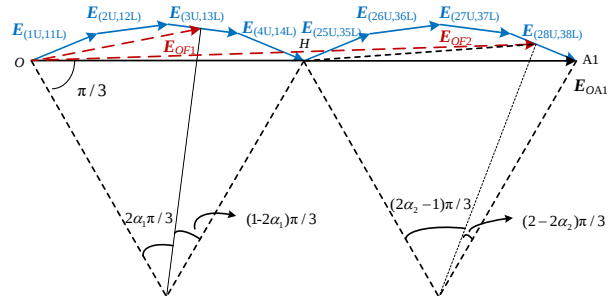


图 A3 以线圈匝电势为单元的绕组电势图

Fig.A3 Winding potential diagram based on coil potential

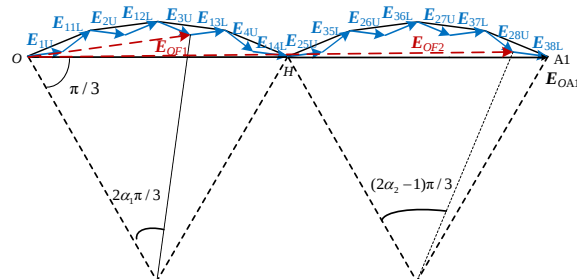


图 A4 以槽电势为单元的绕组电势图

Fig.A4 Winding potential diagram based on slot potential

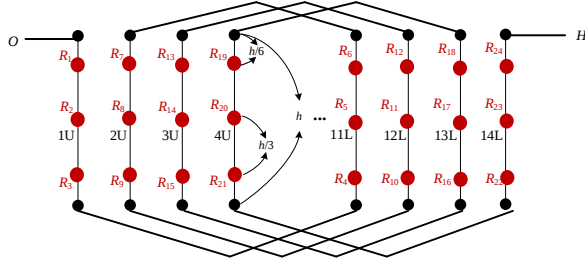
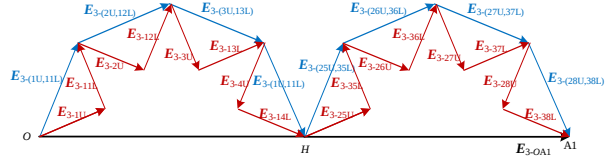


图 A5 虚拟参考点位置示意图

Fig.A5 Schematic diagram of virtual reference point location



→ 以线圈匝电势为分析单元得到的绕组3次谐波电势分布

→ 以槽电势为分析单元得到的实际绕组3次谐波电势分布

图 A6 绕组 3 次谐波电势图

Fig.A6 Winding third harmonic potential diagram

一匝线圈的上层边导体



C_x —槽导体的对地电容； L_x —槽导体的对地电感； R_x —槽导体的对地电阻

图 A7 准分布参数模型的单元结构

Fig.A7 Unit structure of quasi-distributed parameter model

一匝线圈的上层边导体

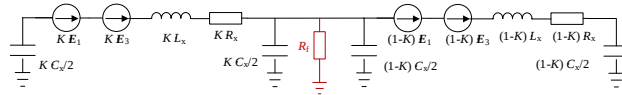


图 A8 故障设置示意图

Fig.A8 Schematic diagram of fault setting

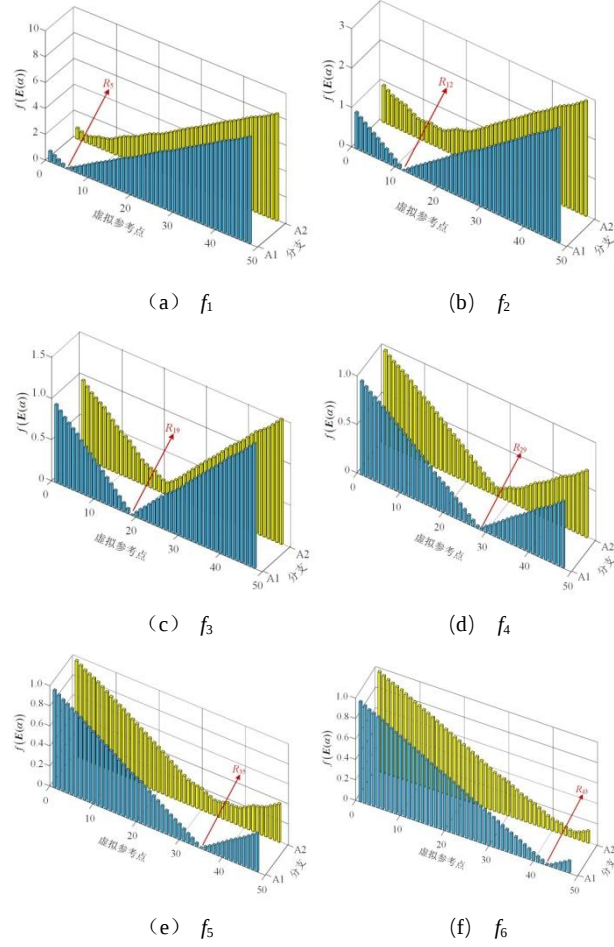


图 A9 配备注入式保护时, 不同故障位置下的故障定位结果

Fig.A9 Fault location results under different fault positions when injection protection is equipped

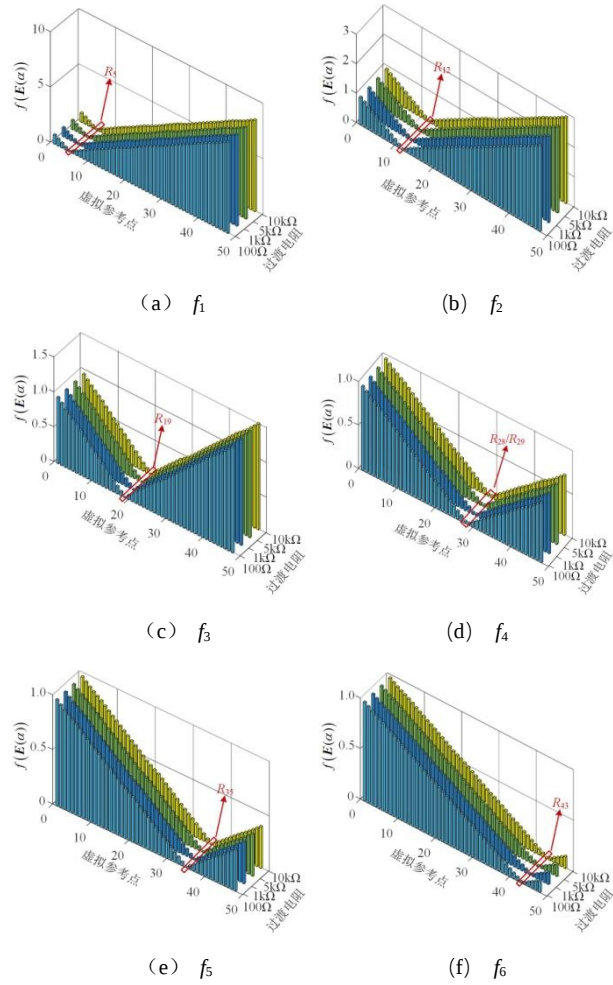


图 A10 配备注入式保护时，不同过渡电阻下的故障定位结果

Fig.A10 Fault location results under different transition resistances when injection protection is equipped

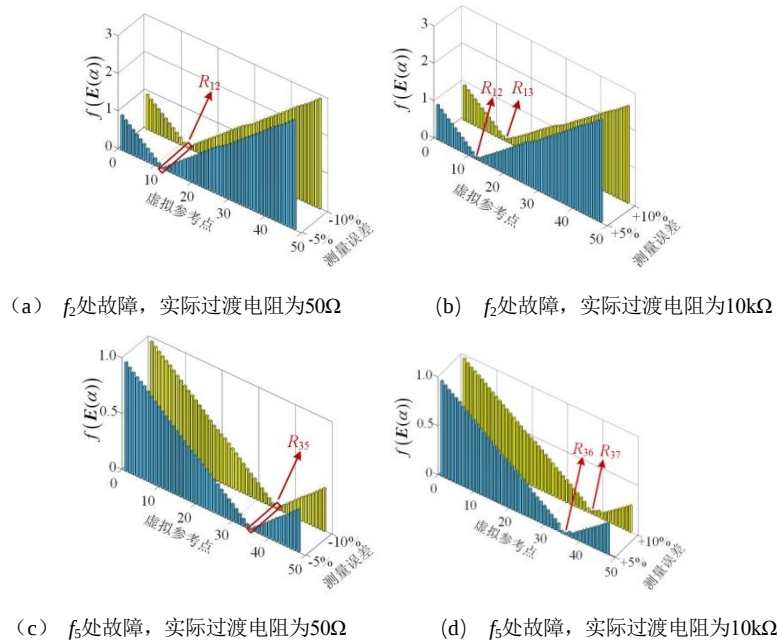


图 A11 配备注入式保护的情况下，过渡电阻存在测量误差时的故障定位结果

Fig.A11 Fault location results of transition resistance with measurement error when injection protection is equipped

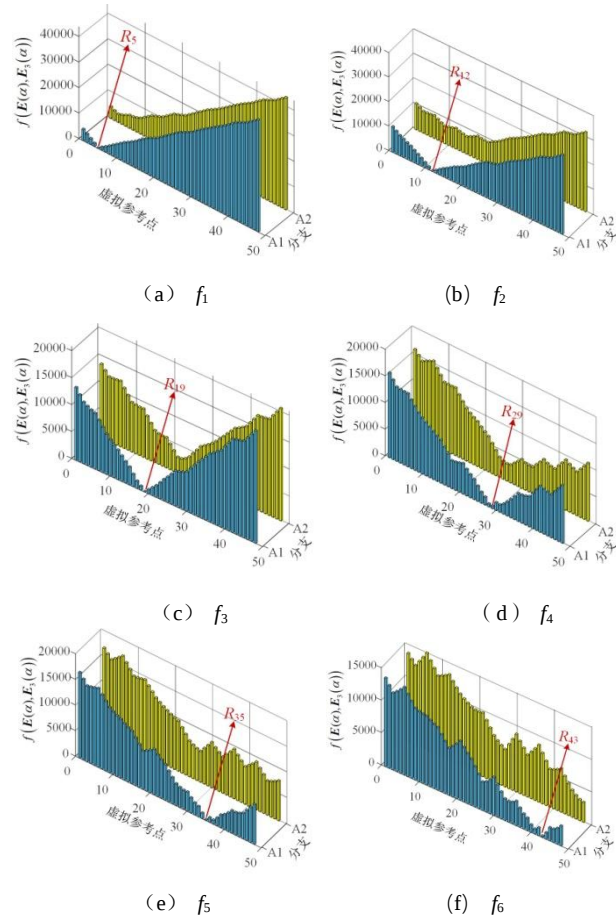


图 A12 未配备注入式保护时, 不同故障位置下的故障定位结果

Fig.A12 Fault location results under different fault positions when injection protection is not equipped

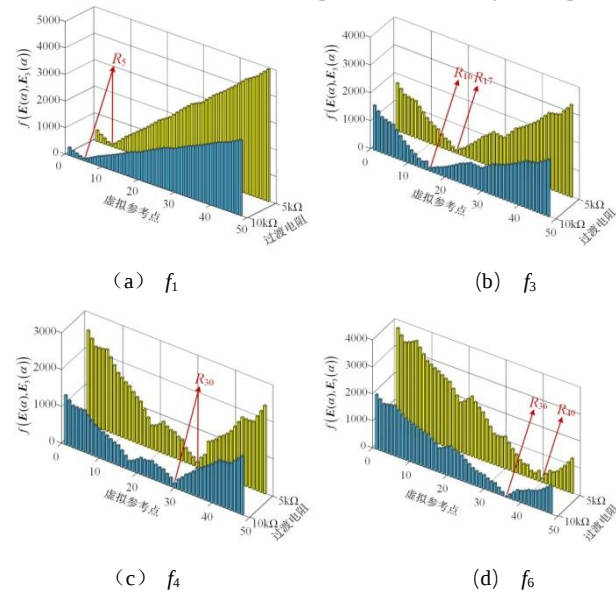


图 A13 未配备注入式保护时, 不同过渡电阻下的故障定位结果

Fig.A13 Fault location results under different transition resistances when injection protection is not equipped

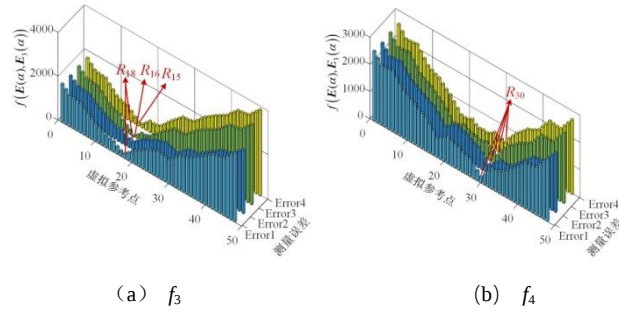


图 A14 3 次谐波电压存在测量误差时的故障定位结果

Fig.A14 Fault location results when third harmonic voltages have measurement errors

表 A1 仿真机组的基本参数

Table A1 Basic parameters of simulation unit

参数	参数值	参数	参数值
额定相电压/kV	26.76	定子槽数	48
每相绕组电感值/mH	29.39	极对数	2
每相绕组电阻值/m Ω	15.28	每相分支数	2
每相对地电容值/ μ F	0.397	每分支匝数	8
机端每相等效电容值/ μ F	0.405	极相组数	2
中性点接地电阻一次值/ Ω	1652	节距	10
基波电角度/($^\circ$)	15	短距系数	0.966
接地变短路阻抗一次值/ Ω	118.26+j244.29		

表 A2 存在测量误差时 3 次谐波槽电势的辨识结果

TableA2 Identification results of third harmonic slot potential with measurement error

序号	$E_{3,O}$ 的误差/%	$E_{3,S}$ 的误差/%	实际槽电势/V	辨识的槽电势 $ E_{3,x} $ /V	相对误差/%
1	3	0	312.0680	316.5957	1.45
2	3	-3		314.6405	0.82
3	0	3		311.2581	-0.26
4	-3	3		303.9658	-2.60