

变速抽蓄机组转子绕组接地故障保护及定位方法

乔健^{1,2}, 尹项根^{1,2}, 王义凯^{1,2}, 卢庆辉^{1,2}, 谭力铭^{1,2}, 朱凌进^{1,2}

(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. 华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:变速抽蓄机组转子绕组采用三相交流励磁的特殊结构,导致现有的转子接地保护方法不再适用。为此,提出一种变速抽蓄机组转子绕组接地故障的保护及定位方法。通过在转子滑环外经限流电阻接入式装置构成转子接地保护的方案。基于注入式原理,提出对地电容参数和故障电阻的在线计算方法,根据接地故障电阻大小判断是否发生接地故障并确定保护出口方式。根据转子转向和转速大小考虑转子绕组电势的相位分布,将故障相绕组各槽导体连接处视为虚拟故障点并计算其对应的参考电势比值。比较实际电势比值与各虚拟故障点的参考电势比值,将差异最小的虚拟故障点视为故障位置,实现接地故障定位。PSCAD/EMTDC仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:变速抽蓄机组;转子绕组接地故障;注入式原理;故障定位

中图分类号:TM31;TM77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209027

0 引言

相较于定速抽蓄技术,变速抽蓄技术在水动性能、功率调节能力、系统经济性等方面更有优势^[1-2],可为实现碳达峰、碳中和目标提供坚实保障^[3]。转子接地故障是大型机组常见的一种故障类型,相关规程明确规定大容量机组必须装设转子接地保护^[4]。目前,现有转子接地保护根据原理主要分为注入式和非注入式2类^[5]。注入式保护以方波电压注入式保护应用最为广泛^[6],非注入式保护以乒乓式转子接地保护应用最为广泛^[7]。但二者均是针对传统的单相直流励磁式的转子绕组^[8],变速抽蓄机组的显著特点是转子绕组采用三相交流励磁结构,即由单相结构变为三相结构、由直流励磁变为交流励磁,其结构的特殊性导致现有的转子接地保护难以适用,需采取针对性的改进措施^[9]。

文献[10]根据变速抽蓄机组的三相结构特点,借鉴传统的零序电压定子接地故障保护,提出根据绕组端口处的零序电压大小判断是否发生转子接地故障。虽然该方法难以反映转子绕组中性点附近的接地故障,但其解决问题的思路是正确的。变速抽蓄机组的转子绕组结构与传统的定子绕组结构相似,应参考定子接地故障保护。注入式定子接地保护是最常见的定子保护方法,不受故障位置的影响,能够覆盖100%的绕组范围^[11]。对于注入式定子接

地保护,注入电源通常由中性点接地变压器副方接入或由机端电磁式电压互感器的开口三角绕组接入^[12],2种方式均是二次侧注入量经电磁感应作用于一次侧。然而,这2种方式不能直接应用于变速抽蓄机组的转子绕组接地保护。主要原因是转子侧工作频率极低,易使接地变压器或电磁式电压互感器饱和,存在较大传变误差而难以进行准确测量^[13]。此外,其转子绕组的中性点固定为不接地形式,不具备在中性点处增加注入电源的前提条件。因此,转子绕组的注入电源只能接在滑环引出外部,且受其自身电气量的超低频特征影响,注入电源只能由一次侧接入。文献[14]首次提出一种在转子绕组端口处人为构造中性点的注入式转子接地保护思路,但对元件参数的选取缺乏必要的说明。

接地故障保护动作后,若能够定位故障所在位置,将有助于提高故障排查和检修的效率^[15]。传统转子接地保护中,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^[4-8]。而定子绕组接地故障定位则更加复杂,需要考虑绕组电势的相位分布特征^[16-18]。文献[19]通过分析定子侧电枢反应电流对绕组电势的影响提出相应的故障定位方法。文献[20]基于绕组60°相带分布假设提出接地故障位置解析求解方法,但该方法在发生高阻故障时易产生多解现象。变速抽蓄机组转子绕组结构虽然与规定子绕组结构类似,但其运行工况更多,相位分布规律受工况影响更加复杂且不满足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定位方法无法直接适用。

针对现有方法难以适用于变速抽蓄机组的问题,本文提出了一种转子绕组接地故障保护及定位

收稿日期:2022-04-07;修回日期:2022-07-01

在线出版日期:2022-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877089);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(YCJJ202202020)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877089) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(YCJJ202202020)

新方法。首先,结合变速机组的结构特点,提出一种注入式转子接地保护的实施方案及其关键参数的选择方法;然后,基于注入等效电路提出对地等效电容参数和接地故障电阻参数的在线计算方法,根据接地电阻计算结果决定保护出口方式;最后,根据转子转向和转速大小判断转子槽导体感应电势的相互相位关系。在故障相绕组的各槽导体连接处设置虚拟故障点,计算其对应的参考电势比值并与故障后的实际电势比值相比较,将差异最小的虚拟故障点视为故障位置,实现故障定位。仿真结果表明,本文方法的故障电阻计算精度较高、定位结果误差较小,能够满足变速抽蓄机组的需要。

1 注入式转子绕组接地保护原理

1.1 注入式装置接线及参数选取

一种可行的注入式转子绕组接地保护接线如图1所示^[14],该接线方式受常规机组的电桥式励磁回路一点接地保护启发得到。图中: I 为注入电流; E 为注入电压; R_v 为压敏非线性电阻,用于限制故障后注入式装置被施加的电压水平。由于转子绕组的中性点 O_1 处无法安装注入式装置,故在三相绕组端口经限流电阻 R_z 人为构造一个新的中性点 O_2 ,在 O_2 处外接注入电源。其中,方波电源的幅值为25 V、频率为20 Hz。受变流器耐压性能影响,变速抽蓄机组转差率 s 的范围要求为-0.1~0.1(即机组调速范围为 $\pm 10\%$),对应的转子绕组的工作频率在-5~5 Hz范围内。因此,注入电源的频率能够有效避开转子绕组的工作频率。利用霍尔式电压、电流互感器能够准确测量低频电压、电流。

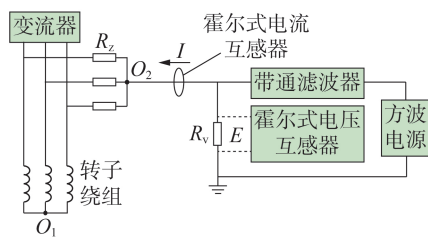


图1 注入式转子绕组接地保护接线图

Fig.1 Wiring diagram of injection rotor grounding protection

注入式转子绕组接地保护的等效电路见附录A图A1。图中: L 和 C 分别为带通滤波器的滤波电感和滤波电容;电阻 R_0 和 R_1 用于调节滤波器的输出增益和品质因数,为确保滤波器有较大的品质因数, R_0 和 R_1 的阻值较小,均小于 $10\ \Omega$ ^[21-22]; C_g 为转子绕组单相等效对地电容; C_z 为变流器侧等效对地电容; R_f 为接地故障电阻。

正常运行时, R_1 的阻值远小于压敏非线性电阻、限流电阻和绕组对地容抗,故分析带通滤波器传递

函数时,可忽略图A1中 R_1 右侧的部分,滤波器等效电路见附录A图A2。

定义 $R=R_0+R_1$,将滤波器的输入电压记为 U_{in} ,将滤波器的输出电压记为 U_{out} ,则滤波器的传递函数 $G(j\omega)$ 为:

$$G(j\omega) = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{1+jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \frac{R_1}{R} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q = \frac{\omega_0}{R} L = \frac{1}{\omega_0 RC} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为转子电流工作频率对应的角频率; ω_0 为谐振角频率; Q 为品质因数。

品质因数与带宽成反比,若想得到一个通带很窄的带通滤波器,则其品质因数要尽可能得大。但高 Q 值对 L 和 C 的耐压水平提出较高要求,在谐振点时, L 和 C 上的电压是输入电压 U_{in} 的 Q 倍。参考20 Hz注入式定子接地保护的带通滤波器设计经验^[22],当 $Q=20$ 时,选取 $L=630\text{ mH}$, $C=99\ \mu\text{F}$, $R=4\ \Omega$ 。 $G(j\omega)$ 由两部分相乘得到,右侧部分 R_1/R 影响滤波器的输出增益,左侧部分则影响滤波器的滤波特性,根据所选的电路元件参数绘制传递函数左侧部分的伯德图,见附录A图A3。由图可知:其中心频率为20 Hz(126 rad/s),对于注入频率分量没有放大或衰减;对于二倍频(40 Hz,即252 rad/s)分量,衰减幅度为-29.4 dB;对于高倍频分量,衰减幅度更大。因此,该带通滤波器能够有效地从方波电源中提取基频分量。

由式(1)可知, R_0 和 R_1 的分压决定注入电源施加在人为中性点 O_2 上的电压幅值,其幅值不宜过大或过小,过大会影响转子正常运行,过小会对注入信号的精确检测造成不利影响。根据注入式定子接地保护的运行经验,注入电压有效值不应超过电机绕组额定相电压的1%^[23]。方波电源的峰值为25 V,其基频有效值为22.5 V。以丰宁电站的实际300 MW级变速抽蓄机组为例,其转子额定线电压为3.3 kV,额定相电压为1.9 kV。当 $R_0=1\ \Omega$ 且 $R_1=3\ \Omega$ 时,注入电压有效值为转子额定相电压的0.89%,能够满足设计要求。

从限制限流电阻的功耗角度出发,其阻值越大越好。但由图A1可知, $R_z/3$ 与等效总对地容抗串联,限流电阻还应起辅助辨识对地等效电容参数 $3C_g+C_z$ 的作用, $R_z/3$ 与等效总对地容抗保持相同数量级有利于提高注入式装置的计算精度。考虑到300 MW级变速抽蓄机组的转子绕组等效对地电容通常为 μF 级,当注入频率为20 Hz时,其对应容抗

通常为数 kΩ 至数十 kΩ。因此,将限流电阻选择为 30 kΩ,即 $R_z/3$ 为 10 kΩ,与对地容抗相近。正常运行时,对于转子工作频率分量,转子三相电压对称,故中性点 O_2 处的工作频率电压为 0。限流电阻上的功耗 P_z 为:

$$P_z = 3 \left(\frac{3\ 300}{\sqrt{3}} \right)^2 / 30\ 000 = 363\ (\text{W}) \quad (3)$$

丰宁电站实际机组的额定功率为 300 MW,限流电阻上的功耗约为额定功率的 0.000 12%,功耗较小,可以接受。

发生接地故障后,中性点 O_2 处的工作频率电压不再为 0,需要考虑注入式装置是否能够安全运行。考虑最不利的接地故障情况,以转子绕组 C 相端口处发生金属性接地故障为例,根据叠加定理,故障后转子工作频率分量的等效电路见附录 A 图 A4。故障后 A 相和 B 相端口电压增大至线电压大小,相位相差 60° 。压敏非线性电阻 R_v 未被击穿时阻值极大,近似为开路。此时,中性点 O_2 处工作频率电压大小 U_{O2} 为:

$$U_{O2} = \sqrt{3} \times 3\ 300 \frac{R_z // R_1 // Z_n}{R_z // R_z + R_z // R_1 // Z_n} \quad (4)$$

式中: Z_n 为滤波电感 L 、滤波电容 C 和电阻 R_0 组成的等效阻抗。

转子工作频率较低, Z_n 表现为容抗,且频率越低,容抗越大。但是由于 $R_1 \ll R_z$,即使将容抗 Z_n 视为无穷大,由式(4)计算得到的最大工作电压 U_{O2} 也仅为 1.14 V,远小于注入式装置的耐压水平,注入式装置的安全运行能够得到保障。而压敏非线性电阻 R_v 起保险作用,当电阻 R_1 回路断线时,能够避免 U_{O2} 迅速增大导致注入式装置损毁的问题。

1.2 对地等效电容和接地故障电阻的计算方法

对地等效电容由转子绕组对地电容和变流器侧对地电容组成,该参数的准确度直接影响后续接地故障定位的计算精度,需要在机组正常运行时对其在线辨识。电压 E 和电流 I 分别由霍尔式电压、电流互感器测量。正常运行时,经傅里叶变换提取的 20 Hz 相量记为 E_1 和 I_1 ,则对地等效电容 C_Σ 为:

$$C_\Sigma = 3C_g + C_z = -\frac{1}{\text{Im}(E_1/I_1)\omega_{20}} \quad (5)$$

式中: ω_{20} 为 20 Hz 对应的角频率; $\text{Im}()$ 表示取虚部。

发生转子绕组接地故障后,接地电阻与对地容抗并联,注入回路的阻抗变小。故障后,将电压 E 和电流 I 经傅里叶变换提取的 20 Hz 相量记为 E_2 和 I_2 。利用导纳法可在线计算接地故障电阻 R_f ,如式(6)所示。

$$R_f = 1/\text{Re}\left(\frac{I_2}{E_2 - (R_z/3)I_2}\right) \quad (6)$$

式中: $\text{Re}()$ 表示取实部。

经上述分析,该方法能够准确计算转子接地故障的过渡电阻值,不受故障位置影响,可反映 100% 的转子绕组接地故障。

类似于注入式定子接地保护,应根据接地故障电阻的计算结果决定保护出口方式。当接地故障电阻 R_f 小于低定值段时,保护出口为延时跳闸;当接地故障电阻 R_f 大于低定值段且小于高定值段时,保护出口为发出报警信号。2 种保护出口均带有一定延时,在继续运行的短暂时间内,可对接地故障位置进行定位,为后续故障排查和检修提供指示,有利于缩短机组恢复工作所需的时间。

2 转子绕组接地故障定位方法

进行接地故障定位前,首先需要确定故障所在相。对于最常见的中性点经高阻接地的定子绕组,通常认为机端对地电压最小相为接地故障相。但变速抽蓄机组的转子绕组为中性点不接地形式,故障特征更为复杂^[24]。以 C 相发生接地故障为例,当接地故障电阻小于 $\sqrt{3}$ 倍对地容抗时,故障相(C相)的对地电压最小;当接地故障电阻大于 $\sqrt{3}$ 倍对地容抗时,滞后相(A相)的对地电压最小。此外,除金属性接地故障情况,超前相(B相)的对地电压一直是最大的。可根据上述规律进行故障选相。

对定子绕组接地故障进行定位时,需要考虑绕组电势的相位分布规律。同样地,变速抽蓄机组的转子绕组电势也存在类似的相位分布规律,该现象可利用槽导体感应电势的产生机理进行解释。

对于变速抽蓄机组,定、转子磁动势的转速和转向相同,在气隙中产生空间正弦分布且同步旋转的合成磁动势 F 。该磁动势切割转子各槽导体,产生频率为转差频率的感应电势,相邻槽感应电势相位的绝对差值等于槽距电角度。而具体的相邻槽电势相位的相互大小关系与转子旋转方向(发电工况或水泵工况)和转速大小(次同步状态或超同步状态)有关。

以最简单的机组(见附录 A 图 A5)为例进行说明。当转子逆时针旋转且运行在次同步状态时,合成磁动势 F 相对转子铁芯的转向为逆时针,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,合成磁动势 F 相对转子铁芯的转向为顺时针,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,当转子顺时针旋转时,根据转速 n 的大小也存在 2 种情况。因此,对转子绕组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分布的影响。

借鉴文献[18]中对槽电势的定义和表示形式,对于绕组某分支,将其中性点至端口的槽导体连接顺序

记为 $(x_1U, x_2L) \rightarrow (x_3U, x_4L) \rightarrow \dots \rightarrow (x_{2i-1}U, x_{2i}L)$, 将槽导体感应电势幅值记为 E_c , 则编号为 $x_k (1 \leq k \leq 2i)$ 的槽导体电势可记为 $E_c \angle \beta_{xk}$, 其中 $\beta_{xk} = \pm x_k \theta$, θ 为槽距电角度, 前文分析的槽号大的槽导体相位超前、滞后于槽号小的槽导体时分别取“+”、“-”。

假设在槽导体 x_k 和 x_{k+1} 的连接处发生绕组接地故障, 则故障点至中性点的绕组电势 U_1 为:

$$U_1 = E_c \angle \beta_{x1} - E_c \angle \beta_{x2} + \dots + (-1)^{k+1} E_c \angle \beta_{xk} \quad (7)$$

类似地, 端口至故障点的绕组电势 U_2 为:

$$U_2 = (-1)^{k+2} E_c \angle \beta_{xk+1} + \dots + (-1)^{2i+1} E_c \angle \beta_{x2i} \quad (8)$$

二者间的比值为参考电势比值 d , 如式(9)所示。

$$d = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1 \angle \beta_{x1} - 1 \angle \beta_{x2} + \dots + (-1)^{k+1} \angle \beta_{xk}}{(-1)^{k+2} \angle \beta_{xk+1} + \dots + (-1)^{2i+1} \angle \beta_{x2i}} \quad (9)$$

d 仅与故障点两侧绕组的槽导体连接顺序有关。因此, 对于一台已知其转子绕组连接顺序的变速抽蓄机组, 可事先将各槽导体连接处视为虚拟故障点, 计算各虚拟故障点对应的电势比值。在接地故障发生后, 计算故障点至中性点、端口至故障点的绕组电势(具体计算方法见下文), 求解实际电势比值, 并与各处虚拟故障点处的电势比值比较, 将差异最小的虚拟故障点视为故障位置。由于电势比值与故障位置呈单调关系, 在单个分支上只存在1个可能的故障位置。

以转子C相绕组发生接地故障为例, 故障后转子工作频率分量的电路示意图如图2所示。图中: U_A 、 U_B 和 U_C 分别为三相端口对地电压, E_A 、 E_B 和 E_C 分别为转子三相绕组电势, $E_A + E_B + E_C = 0$, U_f 为故障点对地电压, 上述参数仅有 U_A 、 U_B 和 U_C 是由端口处的霍尔式电压互感器直接测量得到的, 无需额外对转子绕组内部电压或电流进行测量; I_3 为电流 I 的工作频率相量, 可由傅里叶变换分离得到。

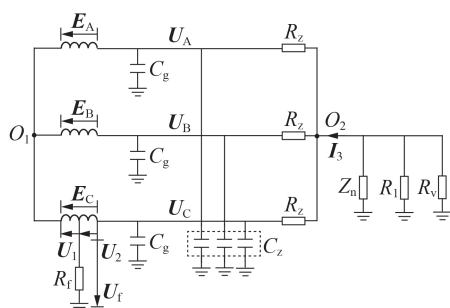


图2 转子绕组接地故障示意图

Fig.2 Schematic diagram of rotor winding grounding fault

根据基尔霍夫电压定律可知:

$$\begin{cases} U_A = U_f - U_1 + E_A \\ U_B = U_f - U_1 + E_B \\ U_C = U_f - U_1 + E_C \end{cases} \quad (10)$$

故障点至中性点的绕组电势 U_1 为:

$$U_1 = U_f - (U_A + U_B + U_C)/3 = U_f - U_0 \quad (11)$$

式中: U_0 为端口零序电压。

端口至故障点的绕组电势 U_2 为:

$$U_2 = U_C - U_f \quad (12)$$

由式(11)、(12)可知, 得到准确的 U_1 和 U_2 的前提是准确计算故障点对地电压 U_f 。图2的零序等值回路见附录A图A6, 图中 I_f 为接地故障电阻上流经的电流。由于故障电阻 R_f 已由式(6)计算得到, 因此只需计算 I_f 即可得到 U_f 。

根据基尔霍夫电流定律可知:

$$I_f = -j\omega C_\Sigma U_0 + I_3 \quad (13)$$

式中: C_Σ 由式(5)计算得到。

联立式(13)—(15), 可得故障后的实际电势比值 d' 为:

$$d' = \frac{U_{A,B,C} - [-j\omega C_\Sigma (U_A + U_B + U_C)/3 + I_3] R_f}{[-j\omega C_\Sigma (U_A + U_B + U_C)/3 + I_3] R_f - (U_A + U_B + U_C)/3} \quad (14)$$

式中: $U_{A,B,C}$ 为故障相对地电压。

3 转子绕组接地故障保护及定位方法的实现流程

变速抽蓄机组转子绕组接地故障保护及故障定位方法的实现步骤如下。

1) 在机组正常运行, 根据式(5)在线计算转子绕组对地电容与变流器侧对地电容之和, 得到对地等效电容 C_Σ 。

2) 利用式(6)实时计算接地故障电阻 R_f , 设置2段接地电阻定值, 高定值段作用于报警, 低定值段作用于延时跳闸。根据计算结果决定保护出口方式, 实现实时监测转子绕组绝缘状况的功能。

3) 利用霍尔式电压互感器测量转子绕组端口处三相对地电压。根据步骤2)中接地故障电阻 R_f 的计算结果和三相对地电压测量结果判断接地故障相。

4) 根据发生故障时转子的旋转方向及转速相对同步转速的大小确定转子各槽导体感应电势的相互相位关系。根据式(9)计算故障相各槽导体连接处的参考电势比值。假设单一分支共有 k 根槽导体, 则该分支由中性点到绕组端口所有虚拟故障点的参考电势比值序列为 $(d_1, d_2, \dots, d_k)$ 。

5) 根据式(14)得到故障后的实际电势比值 d' 。计算 d' 与步骤4)各参考电势比值的绝对差值, 即: $|d' - d_1|$ 、 $|d' - d_2|$ 、 $|d' - d_k|$ 。将其中最小值对应的参考点视为接地故障位置, 实现接地故障定位。对于转子每相单分支结构的变速机组, 不存在接地故障定位多解的问题。而对于转子每相两分支结构的变速机组, 定位结果存在2个解。虽然存在多解现象,

但能够将定位结果筛选至2处,实际故障位置是2处中的一处,这也能起到提高检修效率的目的。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

仍以前述实际变速抽蓄机组为例,其转子绕组为每相两分支结构,每分支由98个槽导体正反交替串联组成($k=98$),极对数为7,铁芯总槽数为298,槽距电角度 $\theta=8.46^\circ$ 。额定线电压为3.3 kV,转子绕组单相电阻为5.56 m Ω ,单相漏电感为7.92 mH,单相对地电容为0.64 F,变流器侧对地等效电容为0.93 μ F,对地等效总电容为2.85 μ F。转差率为0.05,转子侧工作频率为2.5 Hz。在PSCAD/EMTDC软件中,以槽导体为单元建立转子绕组的准分布参数模型;对变流器建模进行适当简化,认为其直流母线电压稳定,仅对其DC/AC的转子侧逆变部分详细建模;注入电源采用受控电压源模拟,带通滤波器参数采用1.1节的分析结果,压敏非线性电阻的伏安特性见附录A图A7和表A1,整体仿真模型见附录A图A8。

变流器作为电力电子器件会产生谐波电压,但该谐波电压不会对注入频率信号的精确检测造成不利影响。主要原因是变流器产生的谐波频率以开关频率为主,本文所建模型的开关频率为2.5 kHz,远大于注入频率和转子工作频率。此外,变流器机侧出口处会接滤波电容,用于滤除开关频率这样的高频谐波。对正常运行时变流器产生的A相电压进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),变换结果见附录A图A9。其中,2.5 Hz分量的峰值为 $e^{0.991\ 203}$ kV(约为2.694 kV,对应相电压有效值为1.905 kV,线电压有效值为3.300 kV)。而20 Hz分量的峰值仅有 $e^{-23.200\ 8}$ kV(约为 8.39×10^{-11} kV),远小于注入电源的注入电压。因此,谐波电压不会对注入式保护产生不利影响。

以槽号大的槽导体感应电势相位滞后于槽号小的槽导体的情况为例,该机组转子三相绕组电势分布见附录A图A10。可以发现,每相两分支绕组电势几乎重合且三相绕组电势对称。因此,对于这台机组,6个分支由中性点到绕组端口的参考电势比值序列($d_1, d_2, \dots, d_{98}$)是相同的。任选其中一个分支,根据其绕组连接顺序即可得到参考电势比值序列($d_1, d_2, \dots, d_{98}$)。

以A1分支为例,由中性点至端口的绕组连接见附录A图A11。根据式(9)计算参考电势比值序列($d_1, d_2, \dots, d_{98}$),结果见附表A表A2。需要注意的是,表A2中的计算结果对应槽号大的槽导体感应电势相位滞后于槽号小的槽导体的情况。若槽号大的槽导体感应电势相位超前于槽号小的槽导体,则表A2中各虚拟故障点的参考电势比值的幅值保持不变,而相角应取相反数。

4.2 对地等效电容计算和接地故障电阻计算

机组正常运行时,注入电压信号经带通滤波器滤波前后的波形见附录A图A12,注入电流波形见附录A图A13,注入电流为mA级,常用的霍尔式直流漏电流互感器即可准确测量mA级的小电流。可以发现,滤波后的注入电压 E 和注入电流 I 在仿真开始后,是逐渐增大至稳定的。这是因为带通滤波器为LC结构,电感和电容需要充放电一段时间后达到稳态。

利用式(5)在线计算对地等效电容参数,计算结果附录A图A14。对地电容的计算结果为2.857 μ F,相对误差仅为0.24%,具有较高的计算精度。可以发现,对地电容的计算结果在仿真开始的短时间内波动幅度极大,该现象是由2个原因导致的。一方面是由注入电压逐渐上升至稳态导致的,另一方面是由绕组准分布式参数模型中绕组电势升压的暂态过程导致的,与机组升压启动过程类似。在实际工程中,正常稳定运行的机组不会出现由上述2个原因导致的对地等效电容计算结果波动较大的现象。

以A1分支中性点侧第7匝线圈末端(槽导体51L和31U的连接处)发生过渡电阻为10 Ω 的接地故障为例,故障时刻为第4 s。故障前后注入式电压波形基本没有变化,因为无论是否发生接地故障,电阻 R_1 均远小于转子侧的对地阻抗,式(1)所示的传递函数不会发生变化。但故障前后的注入电流会发生较大变化,见附录A图A15。故障后注入电流中增加了转子工作频率分量电流,与 I_3 对应。在注入式定子接地保护中,也会出现类似特征。因为接地故障发生后定子中性点对地电压不再为0,接地变二次侧也会产生50 Hz分量电流。

利用式(6)实时计算接地过渡电阻,计算结果见附录A图A16。在仿真开始的短时间内接地电阻计算结果存在较大抖动,其产生原因与前文中分析对地电容计算结果抖动的原因一致,在实际工程中不会出现该现象。机组正常运行时,计算得到的绕组对地电阻超过200 k Ω ,反映出转子绕组良好的对地绝缘情况。发生接地故障后,接地过渡电阻的计算结果迅速减小,最终在10.132 Ω 达到稳定,计算误差为1.32%,具有较高的计算精度。

4.3 故障定位分析

在A1分支的以下6处位置设置接地故障:故障 f_1 ,位于槽导体51L和31U的连接处,对应的参考电势比值为 d_{14} ;故障 f_2 ,位于槽导体53L和33U的连接处,对应的参考电势比值为 d_{28} ;故障 f_3 ,位于槽导体55L和35U的连接处,对应的参考电势比值为 d_{42} ;故障 f_4 ,位于槽导体56U和76L的连接处,对应的参考电势比值为 d_{56} ;故障 f_5 ,位于槽导体54U和74L的连接处,对应的参考电势比值为 d_{70} ;故障 f_6 ,位于槽导体52U和72L的连接处,对应的参考电势比值为 d_{84} 。

在上述6处位置各设置接地故障电阻为100、1000和5000 Ω 的3种故障。

上述故障场景下,根据式(6)在线计算接地故障电阻的结果见附表A表A3,最大计算误差不超过5%,具有较高的计算精度。其中,接地电阻为100 Ω 的误差偏大,但对绕组电势 U_1 、 U_2 和故障定位影响有限,仍能够可靠反映接地故障。

对于不同故障位置的 $f_1 \sim f_6$,当故障电阻均为1000 Ω 时,绕组电势 U_1 、 U_2 和电势比值 d' 的计算结果见表A3。计算电势比值 d' 与参考电势比值序列的绝对差值 $|d'-d_1|$ 、 $|d'-d_2|$ 、 $|d'-d_{98}|$ 。由于绝对差值 $|d'-d_1|$ 、 $|d'-d_2|$ 、 $|d'-d_{98}|$ 相互之间差异较大,为便于数值图片化展示,在不改变其数值特征的基础上,将其转化为增益形式^[25],记为 d'' ,具体为:

$$\begin{cases} d''_k = \lg(|d'-d_k|/d_{\min}) & 1 \leq k \leq 98 \\ d_{\min} = \min(|d'-d_1|, |d'-d_2|, \dots, |d'-d_{98}|) \end{cases} \quad (15)$$

经变换,各虚拟故障点对应的 d''_k 计算结果见附录A图A17,其中计算值最小的虚拟故障点为故障定位结果。可以发现,不同故障位置下,故障定位误差均不超过一根槽导体长度,小于分支绕组总长的1.020%。

对于不同的接地故障电阻,当故障电阻为100 Ω 和5000 Ω 时, $f_1 \sim f_6$ 的绕组电势 U_1 、 U_2 和电势比值 d' 计算结果见表A3。以 f_3 为例,经式(15)变换,各虚拟故障点对应的 d''_k 计算结果如图3所示,最大故障定位误差小于一根槽导体长度。

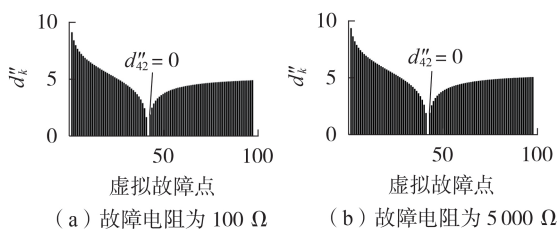


图3 不同故障电阻下的故障定位结果

Fig.3 Fault location results under different fault resistances

上述分析验证了本文所提方法具有较高的接地故障电阻计算精度,对不同故障位置、不同故障电阻的故障场景均具有较高的定位精度。

在实际工程中,对地电容的测量误差会比仿真中的误差要大,导致实际定位误差增大。但考虑到故障定位结果主要起到指示故障检修的目的,用于帮助检修人员尽快找到接地故障位置。在实际工程中,检修人员在寻找接地故障点时会对故障定位结果附近的几匝线圈进行重点排查。因此,即使故障定位结果存在一些误差,只要在排查定位结果附近几匝线圈能够找到故障即可满足工程应用的需要。

5 结论

本文提出了一种变速抽蓄机组转子绕组接地故障保护及定位方法,并得到了以下结论。

1)结合变速抽蓄机组转子绕组的结构特点和工作频率特点,提出在滑环外经限流电阻接入式装置构成转子绕组接地保护的方案,并对其关键参数的合理选择提供指导。

2)基于注入式原理,提出对地等效电容和接地故障电阻的计算方法。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,提出根据绕组电势比值进行转子绕组接地故障定位的实现方法。

3)仿真结果表明本文所提方法对对地等效电容和接地故障电阻具有较高的计算精度,能够可靠反映接地故障。此外,对于不同位置、故障电阻的接地故障,故障定位结果均不超过一根槽导体长度,故障定位精度较高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] DENG Y W, WANG P F, MORABITO A, et al. Dynamic analysis of variable-speed pumped storage plants for mitigating effects of excess wind power generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107453.
- [2] 张占安, 蔡兴国. 考虑可变速抽水蓄能机组运行特性的低碳调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊1): 51-60. ZHANG Zhan'an, CAI Xingguo. Low-carbon dispatch considering operating characteristics of variable speed pumped storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(Supplement 1): 51-60.
- [3] 韩晓言, 丁理杰, 陈刚. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2711-2722. HAN Xiaoyan, DING Lijie, CHEN Gang. Key technologies and research prospects for cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2711-2722.
- [4] 李华忠, 陈俊, 张琦雪. 直流起励过程中绝缘监测系统对转子接地保护的影响及对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 170-174. LI Huazhong, CHEN Jun, ZHANG Qixue. Influences of insulation monitoring system on rotor grounding protection during DC excitation process and countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 170-174.
- [5] 朱宇聪, 王树刚, 桑建斌, 等. 抗干扰算法改进的发电机转子接地保护[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 189-195. ZHU Yucong, WANG Shugang, SANG Jianbin, et al. Generator rotor grounding protection improved by anti-interference algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 189-195.
- [6] 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.
- [7] 李玉平, 桑建斌, 朱宇聪. 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. 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.
- [8] 李哲, 季学军, 仇新宏. 双周期可调节的变极性方波电压注入式转子接地保护[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 98-101.
LI Zhe, JI Xuejun, QIU Xinhong. Injecting variable polarity square wave voltage with adjustable two periods for generator rotor ground fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 98-101.
- [9] 陈俊, 叶宏, 李华忠, 等. 变速抽水蓄能机组转子绕组内部短路故障保护[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 121-127, 136.
CHEN Jun, YE Hong, LI Huazhong, et al. Internal short circuit protection for rotor winding of variable speed pumped-storage generator-motor[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 121-127, 136.
- [10] 梁廷婷, 王凯, 陈俊, 等. 变速抽水蓄能机组继电保护方案研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(5): 62-67.
LIANG Tingting, WANG Kai, CHEN Jun, et al. Study on relay protection scheme of variable speed pumped-storage unit[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(5): 62-67.
- [11] 陈佳胜, 张琦雪, 郭自刚, 等. 核电机组注入式定子接地保护若干问题探讨[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 172-175.
CHEN Jiasheng, ZHANG Qixue, GUO Zigang, et al. Discussion on injection-type stator grounding protection of nuclear power generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 172-175.
- [12] 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.
- [13] 桂林, 陈俊, 王凯, 等. 基于柔性光学TA的发电电动机主保护优化设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 132-138.
GUI Lin, CHEN Jun, WANG Kai, et al. Optimal design of main protection for generator-motor based on flexible optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 132-138.
- [14] ALSTOM Technology Ltd.. Rotor earth fault protection for an electrical variable speed doubly fed induction machine: EP2727770B1[P]. 2014-03-09.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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(16): 5203-5213.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 贾文超, 黄少锋, 焦利霞. 双频注入式定子单相接地保护方案[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 158-161.
JIA Wenchao, HUANG Shaofeng, JIAO Lixia. Stator single-phase grounding protection with double-frequency injecting source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 158-161.
- [22] 汪世平, 夏雨, 周华良, 等. 适用于注入式定子接地保护的数字电源设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 101-104.
WANG Shiping, XIA Yu, ZHOU Hualiang, et al. Design and implementation of digital power supply suitable for source injection type stator earth fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 101-104.
- [23] 高磊. 20 Hz注入式定子接地保护在700 MW水轮发电机组中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2009, 33(6): 47-50, 86.
GAO Lei. Application of 20 Hz injected stator grounding protection in 700 MW hydro-turbine generator sets[J]. Hydro power Automation and Dam Monitoring, 2009, 33(6): 47-50, 86.
- [24] 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.
- [25] QIAO Jian, YIN Xianggen, WANG Yikai. A multi-terminal traveling wave fault location method for active distribution network based on residual clustering[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131: 1-13.

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,博士研究生导师,博士,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(1999—),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)

Protection and location method of rotor winding grounding fault for variable speed pumping storage unit

QIAO Jian^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, WANG Yikai^{1,2}, LU Qinghui^{1,2}, TAN Liming^{1,2}, ZHU Lingjin^{1,2}

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

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

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory,

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

Abstract: The rotor winding of variable speed pumping storage unit adopts the special structure of three-phase AC excitation, so the existing rotor grounding protection method is no longer applicable. Aiming at this problem, a protection and location method of rotor winding grounding fault for variable speed pumping storage unit is proposed. The rotor grounding protection scheme is constructed by connecting the current limiting resistance to the injection device outside the rotor slip ring. Based on the principle of injection, an online calculation method of grounding capacitance parameters and fault resistance is proposed. Whether the grounding fault occurs or not is judged according to the grounding resistance, and the protection outlet mode is determined. The phase distribution of rotor winding potential is considered according to rotor turning and rotating speed. The conductor connection of each slot in the fault phase winding is regarded as the virtual fault point and the corresponding reference potential ratio is calculated. The actual potential ratio is compared with the reference potential ratio of each virtual fault point, and the virtual fault point with the least difference is regarded as the fault location, so as to realize the grounding fault location. Results of PSCAD/EMTDC simulation verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: variable speed pumping storage unit; rotor winding grounding fault; injection principle; electric fault location

(上接第195页 continued from page 195)

Two-stage planning method of power emergency resources for major social events

HAN Jianpei¹, XI Yanna², LIU Nian¹, ZHANG Silu¹, WANG Shu²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: Major social events integrate cyber, physical and social information, increasing the difficulty and complexity of traditional power emergency resource planning, for which, a two-stage planning method of power emergency resources for major social events is proposed. The cyber, physical and social coupling factors of power emergency resource planning are analyzed, load importance degree is introduced to quantify the impact of major social events on emergency resource planning, and a two-stage planning framework integrating emergency service depot planning and emergency resource allocation is presented. A power outage risk quantification indicator is introduced considering load importance degree, a multi-objective planning model of multiple emergency service depots is constructed comprehensively considering the load outage risk, investment cost of service depots and emergency service time constraints, and a solving method of multi-objective model is proposed based on ε constraint. Considering the uncertainty of emergency resource demand, an optimal allocation model of emergency resources is proposed based on interval optimization, and the original interval optimization model is transformed into optimistic optimization problem and pessimistic optimization problem for solution. The effectiveness of the proposed two-stage planning method is verified by case simulation results.

Key words: major social events; power emergency resources; two-stage planning; multi-objective optimization; interval optimization

附录 A

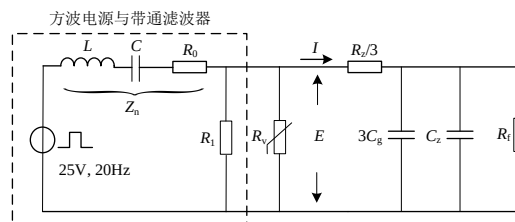


图 A1 注入式转子绕组接地保护等效电路

Fig.A1 Equivalent circuit for injection rotor winding grounding protection

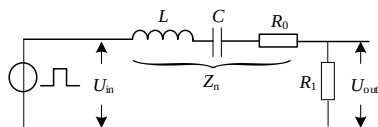


图 A2 滤波器的等效电路

Fig.A2 Equivalent circuit of filter

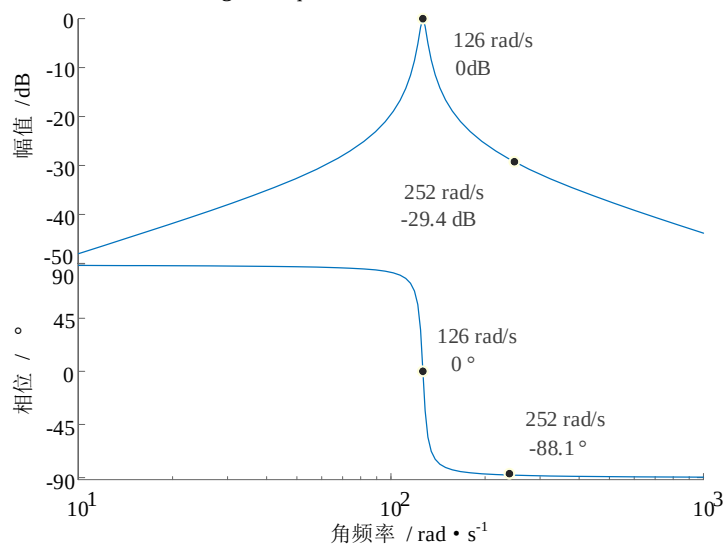


图 A3 滤波器的伯德图

Fig.A3 Bode diagram of the filter

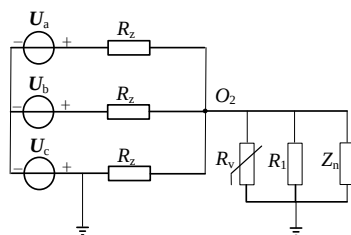


图 A4 转子工作频率分量的等效电路

Fig.A4 Equivalent circuit of rotor working frequency component

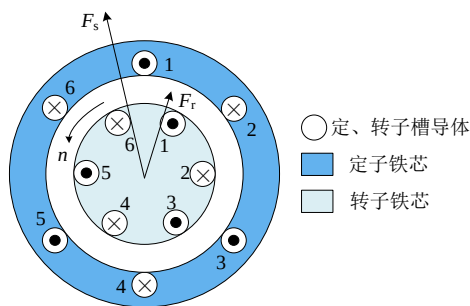


图 A5 电机结构图

Fig.A5 Motor structure drawing

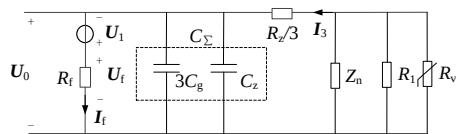


图 A6 转子工作频率的零序等值回路

Fig.A6 Zero sequence equivalent circuit of rotor working frequency

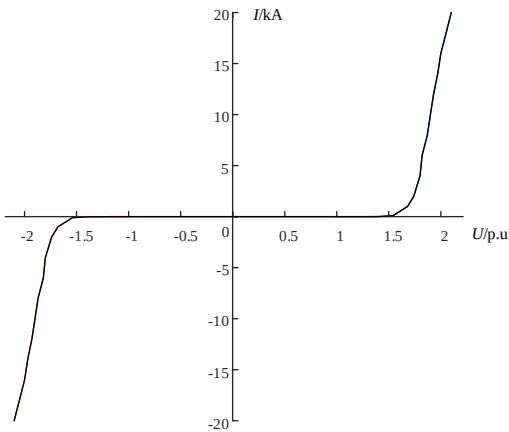


图 A7 压敏电阻的伏安特性

Fig.A7 Voltammetric characteristics of a varistor

表 A1 压敏电阻的伏安特性

Table A1 Voltammetric characteristics of a varistor

I/kA	U	I/kA	U
0.000001	0.97	6	1.82
0.00001	1.06	8	1.87
0.0001	1.17	10	1.9
0.001	1.28	12	1.93
0.01	1.4	14	1.97
0.1	1.54	16	2
1	1.68	18	2.05
2	1.74	20	2.1
4	1.8		

注：U 为标么值。

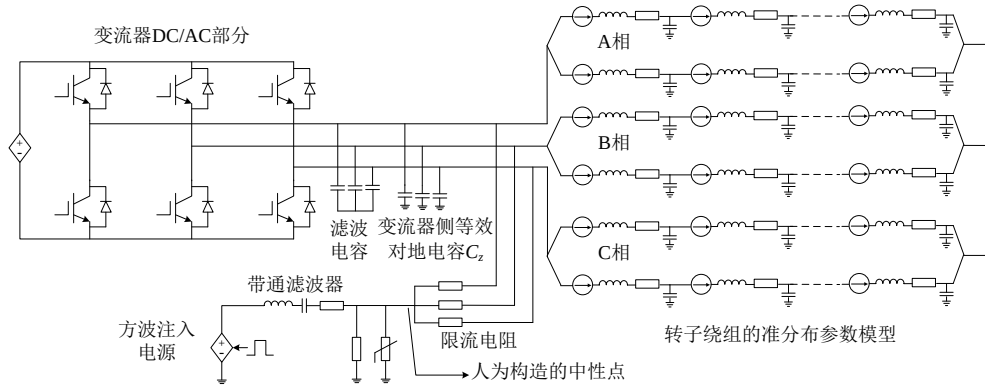


图 A8 整体仿真模型

Fig.A8 Overall simulation model

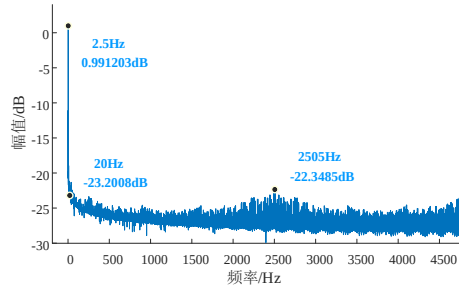


图 A9 正常运行时 A 相电压的 FFT 结果

Fig.A9 FFT results of phase-A voltage in normal operation

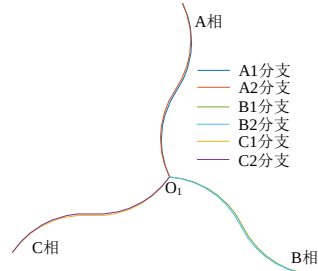


图 A10 转子三相绕组电势分布

Fig.A10 Potential distribution of rotor three-phase winding

(29U,8L),(281U,260L),(239U,218L),(198U,177L),(156U,135L),(114U,93L),(72U,51L),(31U,10L),(283U,262L),(241U,220L),(200U,179L),(158U,137L),(116U,95L),(74U,53L),(33U,12L),(285U,264L),(243U,222L),(202U,181L),(160U,139L),(118U,97L),(76U,55L),(35U,14L),(287U,266L),(245U,224L),(203L,224U),(245L,266U),(287L,14U),(35L,56U),(76L,97U),(118L,139U),(160L,181U),(201L,222U),(243L,264U),(285L,12U),(33L,54U),(74L,95U),(116L,137U),(158L,179U),(199L,220U),(241L,262U),(283L,10U),(31L,52U),(72L,93U),(114L,135U),(156L,177U),(197L,218U),(239L,260U),(281L,8U),(29L,50U)

图 A11 A1 分支绕组连接顺序

Fig.A11 Winding connection sequence of Branch A1

表 A2 参考电势比值序列计算结果

Table A2 Reference potential ratio sequence calculation results

d	电势比值	d	电势比值	d	电势比值	d	电势比值	d	电势比值
d_1	$92.770 \angle -25.982^\circ$	d_{21}	$3.549 \angle -20.875^\circ$	d_{41}	$1.363 \angle -7.253^\circ$	d_{61}	$0.619 \angle 12.758^\circ$	d_{81}	$0.216 \angle 23.853^\circ$
d_2	$45.936 \angle -26.255^\circ$	d_{22}	$3.347 \angle -20.197^\circ$	d_{42}	$1.308 \angle -6.478^\circ$	d_{62}	$0.594 \angle 13.654^\circ$	d_{82}	$0.201 \angle 24.386^\circ$
d_3	$30.326 \angle -26.534^\circ$	d_{23}	$3.161 \angle -19.584^\circ$	d_{43}	$1.258 \angle -5.374^\circ$	d_{63}	$0.568 \angle 14.206^\circ$	d_{83}	$0.186 \angle 25.014^\circ$
d_4	$22.521 \angle -26.818^\circ$	d_{24}	$2.990 \angle -19.028^\circ$	d_{44}	$1.210 \angle -4.283^\circ$	d_{64}	$0.543 \angle 14.784^\circ$	d_{84}	$0.172 \angle 25.755^\circ$
d_5	$17.838 \angle -27.108^\circ$	d_{25}	$2.832 \angle -18.523^\circ$	d_{45}	$1.164 \angle -3.202^\circ$	d_{65}	$0.519 \angle 15.391^\circ$	d_{85}	$0.158 \angle 25.883^\circ$
d_6	$14.717 \angle -27.403^\circ$	d_{26}	$2.686 \angle -18.063^\circ$	d_{46}	$1.120 \angle -2.129^\circ$	d_{66}	$0.496 \angle 16.030^\circ$	d_{86}	$0.144 \angle 26.080^\circ$
d_7	$12.496 \angle -26.393^\circ$	d_{27}	$2.550 \angle -17.644^\circ$	d_{47}	$1.078 \angle -1.063^\circ$	d_{67}	$0.474 \angle 16.703^\circ$	d_{87}	$0.131 \angle 26.361^\circ$
d_8	$10.824 \angle -25.691^\circ$	d_{28}	$2.424 \angle -17.261^\circ$	d_{48}	$1.037 \angle 0^\circ$	d_{68}	$0.452 \angle 17.415^\circ$	d_{88}	$0.117 \angle 26.752^\circ$
d_9	$9.520 \angle -25.198^\circ$	d_{29}	$2.309 \angle -16.494^\circ$	d_{49}	$0.998 \angle 1.061^\circ$	d_{69}	$0.431 \angle 18.168^\circ$	d_{89}	$0.105 \angle 27.286^\circ$
d_{10}	$8.475 \angle -24.851^\circ$	d_{30}	$2.202 \angle -15.771^\circ$	d_{50}	$0.960 \angle 2.123^\circ$	d_{70}	$0.411 \angle 18.968^\circ$	d_{90}	$0.092 \angle 28.013^\circ$
d_{11}	$7.619 \angle -24.614^\circ$	d_{31}	$2.101 \angle -15.087^\circ$	d_{51}	$0.924 \angle 3.188^\circ$	d_{71}	$0.391 \angle 19.389^\circ$	d_{91}	$0.080 \angle 27.705^\circ$
d_{12}	$6.906 \angle -24.460^\circ$	d_{32}	$2.005 \angle -14.440^\circ$	d_{52}	$0.889 \angle 4.258^\circ$	d_{72}	$0.371 \angle 19.849^\circ$	d_{92}	$0.068 \angle 27.403^\circ$
d_{13}	$6.302 \angle -24.372^\circ$	d_{33}	$1.916 \angle -13.825^\circ$	d_{53}	$0.856 \angle 5.336^\circ$	d_{73}	$0.352 \angle 20.354^\circ$	d_{93}	$0.056 \angle 27.108^\circ$
d_{14}	$5.785 \angle -24.336^\circ$	d_{34}	$1.831 \angle -13.239^\circ$	d_{54}	$0.823 \angle 6.422^\circ$	d_{74}	$0.333 \angle 20.909^\circ$	d_{94}	$0.044 \angle 26.818^\circ$
d_{15}	$5.340 \angle -23.673^\circ$	d_{35}	$1.754 \angle -12.306^\circ$	d_{55}	$0.792 \angle 7.521^\circ$	d_{75}	$0.315 \angle 21.519^\circ$	d_{95}	$0.033 \angle 26.534^\circ$
d_{16}	$4.950 \angle -23.114^\circ$	d_{36}	$1.681 \angle -11.403^\circ$	d_{56}	$0.762 \angle 8.633^\circ$	d_{76}	$0.298 \angle 22.190^\circ$	d_{96}	$0.022 \angle 26.255^\circ$
d_{17}	$4.604 \angle -22.642^\circ$	d_{37}	$1.611 \angle -10.528^\circ$	d_{57}	$0.732 \angle 9.420^\circ$	d_{77}	$0.281 \angle 22.418^\circ$	d_{97}	$0.011 \angle 25.982^\circ$
d_{18}	$4.296 \angle -22.243^\circ$	d_{38}	$1.544 \angle -9.678^\circ$	d_{58}	$0.702 \angle 10.223^\circ$	d_{78}	$0.264 \angle 22.691^\circ$	d_{98}	0
d_{19}	$4.020 \angle -21.907^\circ$	d_{39}	$1.481 \angle -8.851^\circ$	d_{59}	$0.673 \angle 11.046^\circ$	d_{79}	$0.248 \angle 23.016^\circ$		
d_{20}	$3.771 \angle -21.625^\circ$	d_{40}	$1.421 \angle -8.043^\circ$	d_{60}	$0.646 \angle 11.890^\circ$	d_{80}	$0.232 \angle 23.401^\circ$		

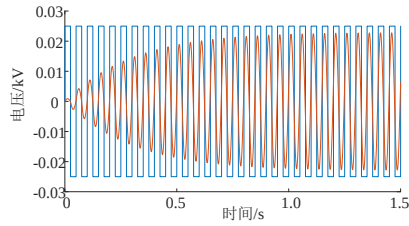


图 A12 正常运行时的注入电压波形

Fig.A12 Injection voltage waveform during normal operation

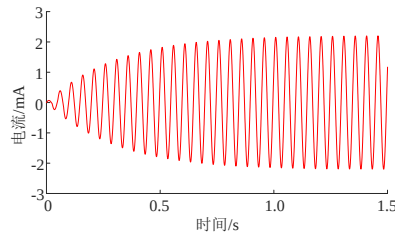


图 A13 正常运行时的注入电流波形

Fig.A13 Injection current waveform during normal operation

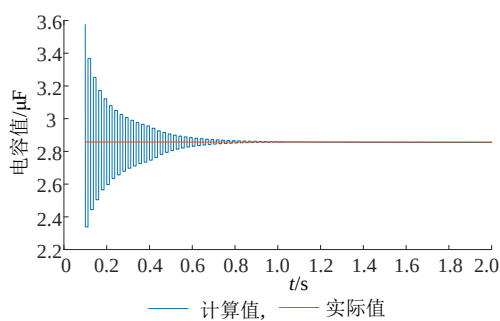


图 A14 对地等效电容的计算结果

Fig.A14 Calculation results of equivalent capacitance to earth

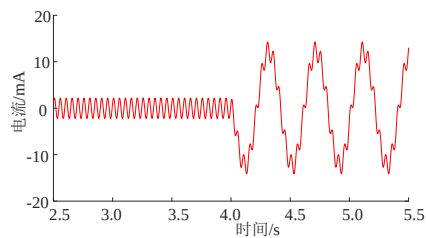


图 A15 故障前后的注入电流波形

Fig.A15 Injection current waveform before and after fault

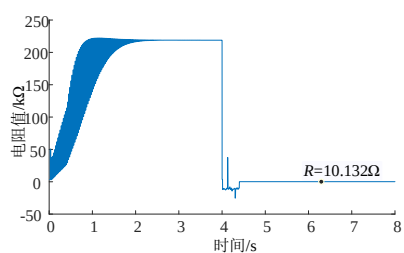


图 A16 接地故障电阻的计算结果

Fig.A16 Calculation result of grounding fault resistance

表 A3 不同故障场景下的接地故障电阻计算结果和故障定位结果

Table A3 Grounding fault resistance calculation results and fault location results under different fault scenarios

故障场景		接地故障电阻计算结果和故障定位结果							
故障位置	故障电阻/ Ω	故障电阻/ Ω	相对误差	U_1/kV	相对误差	U_2/kV	相对误差	d'	定位结果
d_{14}	100	98.746	-1.254%	$0.281 \angle 6.162^\circ$	2.391%	$1.644 \angle -19.354^\circ$	0.007%	$5.856 \angle -25.516^\circ$	d_{14}
	1000	1004.411	0.441%	$0.281 \angle 6.159^\circ$	2.360%	$1.644 \angle -19.356^\circ$	0.005%	$5.852 \angle -25.515^\circ$	d_{14}
	5000	5059.652	1.193%	$0.282 \angle 6.135^\circ$	2.210%	$1.643 \angle -19.365^\circ$	0.056%	$5.831 \angle -25.499^\circ$	d_{14}
d_{28}	100	97.164	-2.836%	$0.558 \angle -3.060^\circ$	1.214%	$1.363 \angle -20.846^\circ$	0.011%	$2.444 \angle -17.786^\circ$	d_{28}
	1000	1003.426	0.343%	$0.557 \angle -3.061^\circ$	1.186%	$1.363 \angle -20.850^\circ$	0.010%	$2.443 \angle -17.790^\circ$	d_{28}
	5000	5054.332	1.086%	$0.560 \angle -3.059^\circ$	1.038%	$1.361 \angle -20.875^\circ$	0.151%	$2.431 \angle -17.816^\circ$	d_{28}
d_{42}	100	98.174	-1.826%	$0.822 \angle -11.842^\circ$	0.826%	$1.083 \angle -18.642^\circ$	0.013%	$1.317 \angle -6.800^\circ$	d_{42}
	1000	1012.507	1.251%	$0.823 \angle -11.832^\circ$	0.761%	$1.082 \angle -18.656^\circ$	0.079%	$1.314 \angle -6.824^\circ$	d_{42}
	5000	5052.352	1.047%	$0.826 \angle -11.831^\circ$	0.656%	$1.079 \angle -18.671^\circ$	0.292%	$1.307 \angle -6.840^\circ$	d_{42}
d_{56}	100	97.995	-2.005%	$1.079 \angle -19.347^\circ$	0.635%	$0.827 \angle -10.955^\circ$	0.025%	$0.767 \angle 8.393^\circ$	d_{56}
	1000	1008.873	0.887%	$1.080 \angle -19.340^\circ$	0.574%	$0.826 \angle -10.954^\circ$	0.098%	$0.765 \angle 8.386^\circ$	d_{56}
	5000	5062.656	1.253%	$1.083 \angle -19.331^\circ$	0.428%	$0.823 \angle -10.931^\circ$	0.517%	$0.759 \angle 8.401^\circ$	d_{56}
d_{70}	100	98.851	-1.149%	$1.361 \angle -21.158^\circ$	0.502%	$0.562 \angle -2.401^\circ$	0.027%	$0.413 \angle 18.756^\circ$	d_{70}
	1000	1004.922	0.492%	$1.362 \angle -21.150^\circ$	0.444%	$0.561 \angle -2.379^\circ$	0.186%	$0.412 \angle 18.771^\circ$	d_{70}
	5000	5059.434	1.189%	$1.367 \angle -21.139^\circ$	0.331%	$0.556 \angle -2.262^\circ$	0.966%	$0.407 \angle 18.876^\circ$	d_{70}
d_{84}	100	97.772	-2.228%	$1.641 \angle -19.402^\circ$	0.424%	$0.284 \angle 6.144^\circ$	0.126%	$0.173 \angle 25.546^\circ$	d_{84}
	1000	1004.587	0.459%	$1.643 \angle -19.393^\circ$	0.363%	$0.283 \angle 6.236^\circ$	0.447%	$0.172 \angle 25.692^\circ$	d_{84}
	5000	5058.118	1.162%	$1.648 \angle -19.378^\circ$	0.307%	$0.278 \angle 6.631^\circ$	2.322%	$0.169 \angle 26.009^\circ$	d_{84}

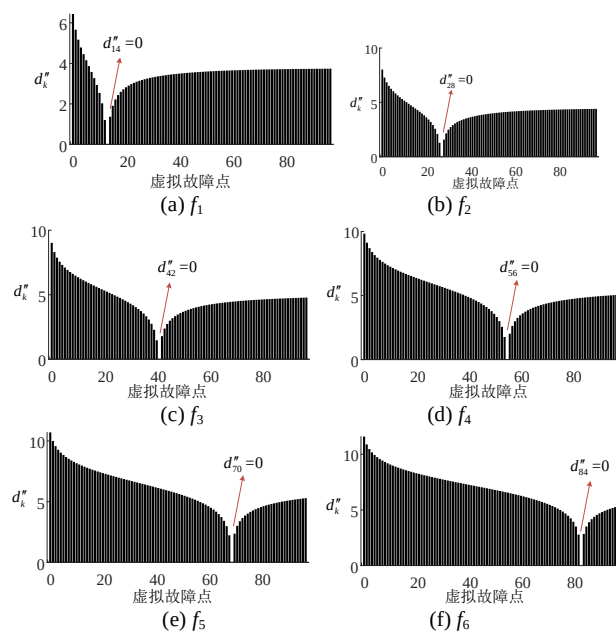


图 A17 不同故障位置下的定位结果

Fig.A17 Location results in different fault positions