

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

殷林鹏¹, 桂林¹, 张琦雪², 陈俊², 王祥珩¹

(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要:提出一种基于基波电势分布特征的定子接地故障定位方法,该方法按各相各分支定子线圈的实际连接关系,确定发电机中性点至接地故障点的基波电势,建立了该基波电势、机端三相基波电压、基波零序电压、接地过渡电阻阻值之间的数学关系,准确定位定子接地故障,并对波绕组发电机故障定位中的特殊情况进行了分析。采用基于准分布电容参数的定子接地故障仿真模型验证了所提方法的有效性。最后对现场实际故障案例进行分析,进一步验证了所提方法的准确性,其可大幅缩短现场故障检修的时间。

关键词:发电机;定子接地;分布电势;故障定位

中图分类号:TM 772

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.021

0 引言

发电机定子绕组单相接地故障是发电机定子绕组绝缘最常见的故障,可能造成定子铁芯的烧损、接地故障扩大为相间或匝间短路,后果严重。目前,大型发电机通常配备2套不同原理的定子接地保护,即基波零序电压+3次谐波电压保护和注入式定子接地保护^[1-3]。接地故障发生后,先解开发电机与外部的连接,若绝缘检测出是发电机内部故障,则可综合利用各保护装置录波数据实现故障定位,大幅减少了检修工作量。

文献[4]提出一种针对中性点经接地变压器高阻接地故障的发电机定子单相接地故障定位方法,该方法通过注入式接地保护得到接地过渡电阻的阻值,根据保护装置测量到的基波零序电压及其与接地过渡电阻的阻值的数值关系,确定接地故障位置。文献[5]提出一种不依赖注入式定子接地保护实现故障定位的方法,该方法根据发电机机端三相对地基波电压和基波零序电压的大小关系,计算接地过渡电阻,进一步推算出接地故障位置。以上2种方法忽略了发电机定子绕组基波电势的分布特征,计算结果与实际情况有一定的偏差。文献[6]提出一种水轮发电机定子绕组接地故障定位方法,该方法分析了定子绕组基波电势的分布特征,认为大型水轮发电机定子绕组合成电势与相电势间的相位差可以忽略,利用基波零序电压的相位特征得到过渡电阻值,进而计算出接地故障位置。文献[7]分析了大型汽轮发电机的电动势分布特征,将基波电势的相位差考虑在内,给出了新的定子绕组电势表达式,提高了定子绕组单相接地故障定位的准确性。文献[8]利用行波信号对水轮发电机定子绕组单相接地

故障进行定位,行波定位虽已广泛应用于电网单相接地故障的定位,但是在发电机的应用上还未成熟。

传统的发电机定子绕组单相接地故障定位方法经常有定位不准的情况,主要原因是计算模型忽略了基波电势的分布特征。然而,将基波电势分布特征引入定子绕组单相接地故障定位计算模型,虽然提高了故障定位准确性,但可能出现故障定位结果不唯一的情况。本文深入分析了发电机定子绕组基波电势分布特征对定子绕组单相接地故障定位的影响,并针对波绕组发电机故障定位中的特殊问题进行理论与仿真计算,从而完善计算模型,有效提高了定子绕组单相接地故障定位的准确性。

1 发生定子绕组单相接地故障时的基波零序电压

1.1 简单基波零序等值回路

发电机中性点经接地变高阻接地已在实际工程中大量应用,当发电机定子绕组发生单相接地故障时,电路图^[4]如图1所示。

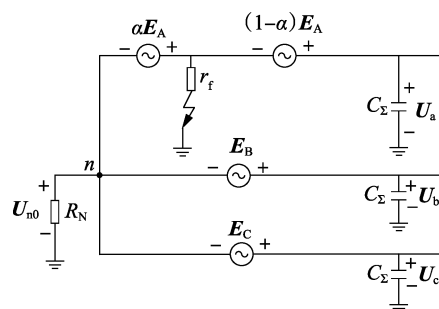


图1 发电机定子绕组单相接地故障电路图

Fig.1 Schematic diagram of stator single-phase grounding fault of generator

图1中, U_0 为基波零序电压; E_A 、 E_B 、 E_C 为发电机三相绕组电动势; U_a 、 U_b 、 U_c 为三相机端对地电压; R_N 为发电机中性点接地电阻一次值; C_Σ 为等效到机端的定子绕组每相对地电容(包括定子绕组本

收稿日期:2018-06-02;修回日期:2019-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277103)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277103)

身对地电容以及与之并联的机端其他设备的对地电容); α 为故障点到定子绕组中性点的线圈匝数占一相总串联匝数的百分比; r_f 为接地点过渡电阻。图 1 的基波零序等值回路如图 2 所示,其中 $-jX_C$ 为定子绕组三相对地总容抗。

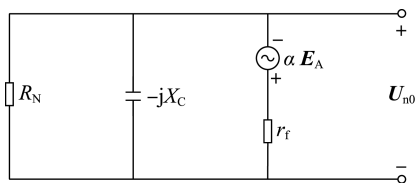


图 2 基波零序等值回路

Fig.2 Fundamental zero-sequence equivalent circuit

1.2 基波零序等值回路的改进

基波零序电压计算的准确性依赖于基波零序等值回路。由于接地变压器非理想变压器,其漏阻抗不可忽略,所以用短路阻抗一次值 $Z_K = R_K + jX_K$ 进行等值,发电机中性点相当于经 $Z_K + R_N$ 接地。计算可得发电机中性点等效接地电阻 R_{Neq} 、定子绕组等效对地容抗 $-jX_{Ceq}$ 分别如式(1)、(2)所示。

$$R_{Neq} = \frac{X_K^2}{R_N + R_K} + R_N + R_K \quad (1)$$

$$X_{Ceq} = \frac{[(R_N + R_K)^2 + X_K^2] X_C}{(R_N + R_K)^2 + X_K^2 - X_C X_K} \quad (2)$$

同时,考虑到发电机基波电势的分布特征,即不再忽略定子绕组各线圈之间的相位差,则故障点到发电机中性点之间的电势变为 $E(\alpha)$ ($E(\alpha) \neq \alpha E_A$)。得到的改进基波零序等值回路如图 3 所示。

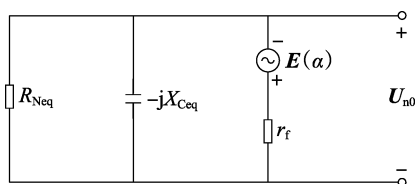


图 3 改进基波零序等值回路

Fig.3 Improved fundamental zero-sequence equivalent circuit

基波零序电压为:

$$U_{n0} = -E(\alpha) \frac{1}{1 + \frac{r_f}{R_{Neq}} + j \frac{r_f}{X_{Ceq}}} \quad (3)$$

对于大型发电机而言,定子绕组形式可选择叠绕组或波绕组^[9-10],相应的基波电势分布特征也不同。在某些条件下,波绕组形式的发电机可能出现定子绕组单相接地故障定位结果不唯一的情况。

2 发电机基波电势分布特征对基波零序电压的影响分析

以某电厂的 1 台 360 MW 波绕组发电机为例,详细分析基波电势分布特征对基波零序电压故障特

征量的影响。

2.1 分支电势的构成

该发电机采用分数槽 ($q = 5/2$) 波绕组(定子绕组节距为 $y_1 = 8, y_2 = 7$),有 72 极,定子槽数为 540,每相 4 个分支,每分支 45 个线圈,其额定功率 $P_N = 360$ MW,额定电压 $U_N = 18$ kV,额定电流 $I_N = 12\,830$ A,功率因数 $\cos \varphi_N = 0.9$,空载励磁电流 $I_{f0} = 1\,613$ A,额定励磁电流 $I_{fN} = 2\,774$ A。该发电机的定子绕组分布如图 4 所示。

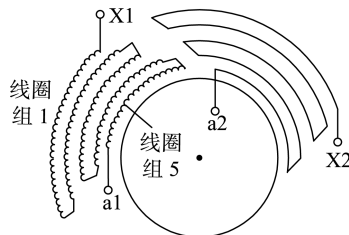


图 4 某 360 MW 发电机定子绕组分布示意图
(a1 和 a2 分支)

Fig.4 Distribution of stator winding of a 360 MW generator (Branch a1 and a2)

该发电机同相 4 个分支连接形式相同,以 a 相第一分支为例,其定子绕组具体连接(机端→中性点,顺转向排号)为:

-442	-457	-472	-487	-502	-517	-532	-7	-22
15	540	525	510	495	480	465	450	435
-428	-443	-458	-473	-488	-503	-518	-533	-8
1	526	511	496	481	466	451	436	421
-414	-429	-444	-459	-474	-489	-504	-519	-534

按线圈上层边编槽号,线圈上层边所在槽号大于下层边所在槽号,正号表示正绕(先到上层边,然后到下层边),负号代表反绕(先到下层边,然后到上层边)。每行 9 个线圈为 1 个线圈组,同一线圈组中各线圈电势同相位;不同线圈组之间的槽间距为 7 槽,槽电角度相差 $7/15 \times 360 = 168(^{\circ})$ 。a1 分支电势构成向量图如图 5 所示。

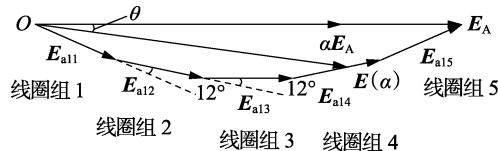


图 5 a1 分支电势

Fig.5 Potential of Branch a1

当 a 相某点发生接地故障时,发电机中性点到故障点的电压为 $E(\alpha)$, $E(\alpha)$ 与相电动势 E_A 之间存在相角差 θ , θ 的大小取决于故障位置 α ,且其幅值与 E_A 幅值的比值不再是 α 。

2.2 基波零序电压轨迹

由式(3)可知,对于确定的机组,基波零序电压由故障位置和过渡电阻决定,即:

$$U_{n0} = f(r_f, \alpha) \quad (4)$$

若不考虑发电机基波电势的分布特征,即 $E(\alpha) = \alpha E_A$, 则正常运行时的基波零序电压 $U_{n0} = 0$; 当定子绕组 a 相中一点发生金属性接地故障时, $U_{n0} = -\alpha E_A$; 若故障点经过渡电阻接地, U_{n0} 会随着过渡电阻在 0 和 $-\alpha E_A$ 之间变化, 其具体变化轨迹是以 αE_A 为弦的圆弧, 如图 6 所示。图中, D 为地电位点。

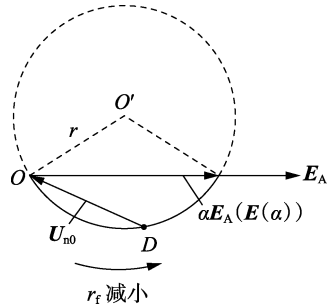


图 6 不考虑基波电势分布的基波零序电压轨迹

Fig.6 Fundamental zero-sequence voltage trajectory without considering distribution of fundamental wave potential

若考虑发电机基波电势的分布特征, 定子绕组各线圈之间的相位差不可忽略。随着过渡电阻的变化, U_{n0} 的轨迹是以 $E(\alpha)$ 为弦的圆弧, 如图 7 所示。

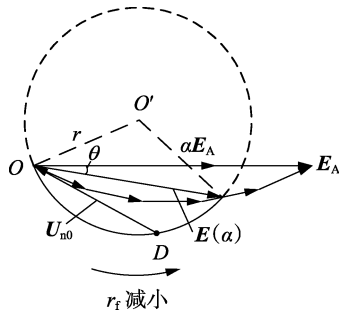


图 7 考虑基波电势分布的基波零序电压轨迹

Fig.7 Fundamental zero-sequence voltage trajectory considering distribution of fundamental wave potential

由式(3)可以推算出, 图 7 中的圆心和半径分别如式(5)、(6)所示。

$$O' \left(\frac{1}{2}, \frac{X_{Ceq}}{2R_{Neq}} \right) |E(\alpha)| \quad (5)$$

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{X_{Ceq}^2}{R_{Neq}^2}} |E(\alpha)| \quad (6)$$

可见, 基波电势的分布特征导致基波零序电压轨迹发生了偏移, 偏移角 θ 和基波分支电势的构成以及故障位置有关。不同故障位置对应的基波零序电压轨迹圆弧不同且唯一确定, 因此只要得到定子绕组各线圈末端到发电机中性点之间的电压, 计算相应的轨迹圆, 在定子绕组单相接地故障发生时判别基波零序电压所属的轨迹圆弧, 即可实现定子绕组单相接地故障定位。

2.3 波绕组发电机存在故障定位结果不唯一情况

由于波绕组发电机同一线圈组中的不同线圈电

势是同相位的, 导致一个线圈组内部不同线圈发生单相接地故障时可能会产生相同的故障特征量。

从基波零序电压轨迹图上看, 同一线圈组内不同位置故障对应的轨迹圆弧相交于同一点。如图 8 所示, 线圈组 4 中 3 个不同线圈发生接地故障, 可能产生相同的 U_{n0} , 此时仅利用基波零序电压轨迹圆弧定位, 会出现故障定位结果不唯一的情况。

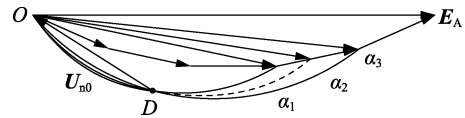


图 8 同一线圈组不同故障位置时基波零序电压轨迹

Fig.8 Fundamental zero-sequence voltage trajectories for different fault positions of same coil group

3 定子绕组单相接地故障定位方法

本文定子绕组单相接地故障方法的步骤如下。

(1) 对于中性点经高阻接地的机组, 可直接根据故障相电压最低^[2]判断故障相。

(2) 根据发电机定子绕组连接形式, 确定基波电势的分布特征; 根据发电机和接地变压器的参数, 确定零序等值回路; 利用式(5)、(6)计算各线圈末端故障时的基波零序电压轨迹圆弧。

(3) 提取现场故障录波数据中的三相对地电压, 计算出基波零序电压, 判断所属的轨迹圆弧。若 U_{n0} 所属圆弧唯一, 可直接得到故障线圈; 若 U_{n0} 属于所得多个圆弧的交点, 计算所得故障位置应为多个线圈, 此时需注入式定子接地保护^[11-12]测量的过渡电阻值协助判断故障线圈, 最终求得故障所在的线圈。

4 仿真计算

前文所述的简化集中参数模型只考虑了基波电势, 同时只是将接地变压器等效为了 1 个短路阻抗, 而实际系统更加复杂。为验证前述简化模型分析的正确性, 还需要搭建与实际系统较为接近的模型, 通过仿真计算, 再进行对比分析, 验证前述方法的可行性和准确性。

第 2 节中 360 MW 发电机及接地变压器的实际参数如表 1 所示。根据表 1 在 PSCAD 中搭建该发电机定子绕组准分布参数模型^[13-16], 仿真电路图见附录 A 中的图 A1。

用多个电压源串联来表征基波电势的分布特征。非故障相多个并联分支合并; 故障相的故障分支单独拿出来, 其他分支合并。以 $E_A = 10.39 \angle 0^\circ$ kV 为基准, a1 分支的电势分为 5 段: $E_{a11} = 2.17 \angle -24^\circ$ kV, $E_{a12} = 2.17 \angle -12^\circ$ kV, $E_{a13} = 2.17 \angle 0^\circ$ kV, $E_{a14} = 2.17 \angle 12^\circ$ kV, $E_{a15} = 2.17 \angle 24^\circ$ kV。B、C 相电压源分别滞后和超前 A 相 120° 。在正常情况下, 发电机

表 1 某 360 MW 发电机及接地变实际参数

Table 1 Parameters of a 360 MW generator and grounding transformer

参数	参数值
接地变压器变比	18 kV/0.865 kV
接地变压器容量/(kV·A)	160
接地变漏阻抗 Z_k (二次值)/ Ω	$0.167+j0.345$
接地变励磁阻抗 Z_m (二次值)/ Ω	$46.53+j226.58$
接地电阻 R_N (二次值)/ Ω	1.13
发电机定子单相相对地电容/ μF	2.17
发电机定子一相绕组电阻/ Ω	0.001 5

电势中存在一定比例的 3 次谐波^[17] (占基波电势的 5%以下),故在中性点侧串入 5%的 3 次谐波电压源,即: $E_{A3}=E_{B3}=E_{C3}=0.52\angle 0^\circ \text{ kV}$ 。

(1) 故障位于不同线圈组。

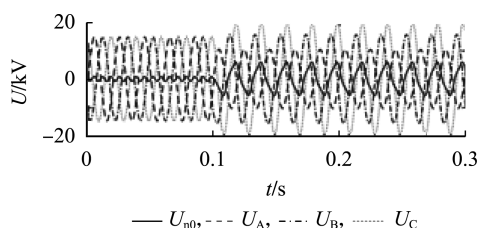
设置故障点为 30%、50%、80%这 3 种情况,对应的故障线圈从中性点起,分别为第 14、23、36 匝线圈,过渡电阻分别为 100、500、2 000 Ω 。对比忽略基波电势分布特征(方法 1)、考虑基波电势分布特征(方法 2)和考虑基波电势分布特征但忽略接地变漏阻抗条件(方法 3)3 种方法所得的故障定位结果,如附录 B 中的表 B1 所示。表中,计算得到的故障位置用故障线圈匝数来表示,即故障点位于从发电机中性点起的第几匝线圈上。

由表 B1 可知,对于故障点到发电机中性点基波电压与相电压相位相差较大的波绕组发电机而言,传统的仅利用三相电压和基波零序电压幅值定位的方法误差极大,无法准确定位故障;而考虑了基波电势分布和接地变漏阻抗后,故障定位误差不超过 1 匝线圈,满足工程实际要求。

(2) 故障位于同一线圈组。

设置故障点位于线圈组 4 的两端,即第 27 和 36 匝线圈末端,过渡电阻分别为 334 Ω 和 580 Ω ,仿真波形分别如图 9、10 所示。由图可见,2 处不同故障得到的三相电压和基波零序电压基本相同。

利用故障波形进行定位计算,计算得到的故障点不唯一,见图 11。从第 27 匝线圈到 36 匝线圈都可能是故障点,且同一线圈不同故障位置对应着不同的过渡电阻,不同故障线圈对应着不同范围的过渡电阻。因此通过故障定位计算可得到一系列的故

图 9 第 27 匝线圈末端故障且 $r_f=334 \Omega$

情况下的仿真波形

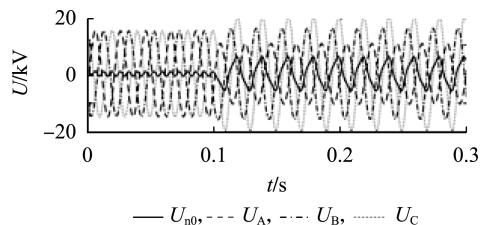
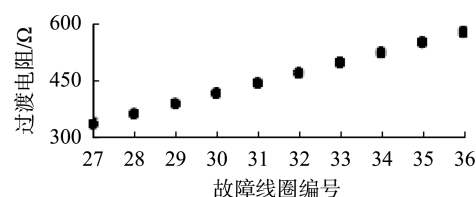
Fig.9 Simulative waveforms when fault occurs on 27th coil's end with $r_f=334 \Omega$ 图 10 第 36 匝线圈末端故障且 $r_f=580 \Omega$ 情况下的仿真波形Fig.10 Simulative waveforms when fault occurs on 36th coil's end with $r_f=580 \Omega$ 

图 11 同一线圈组不同位置故障定位结果

Fig.11 Fault location results of different positions of same coil group

障位置和过渡电阻的组合。此时故障定位只能确定故障线圈组,无法定位到具体线圈,需要结合注入式定子接地保护测量的过渡电阻值^[11-12],才能确定故障线圈。

5 现场事故录波分析

利用本文所提出的方法对现场实际故障进行定位计算。

5.1 故障案例 1

第 2 节中的 360 MW 发电机发生了一次定子单相接地故障,由表 1 计算其改进零序等值回路参数,根据式(1)、(2)可得 $R_{\text{Neq}}=601 \Omega$ 、 $X_{\text{Ceq}}=625 \Omega$ 。

故障发生时刻为 0 s,截取-0.1~0.3 s 的三相电压和零序电压现场故障录波(二次值)数据如图 12 所示。由图可见,故障发生后最初的 2 个周期波动较大,而后趋于稳定;B 相电压明显降低,A、C 两相电压升高,可判断 B 相为故障相。

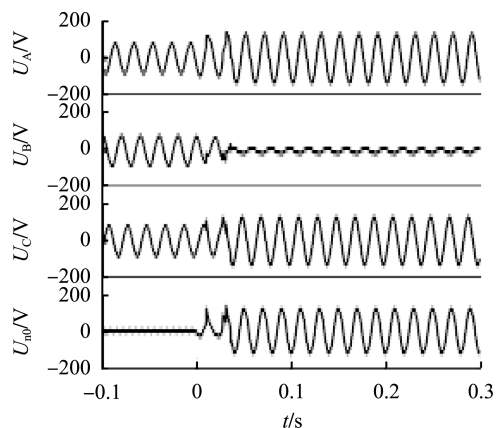


图 12 故障录波

Fig.12 Fault recording waveforms

提取录波中的基波成分,进行故障位置计算。

若不考虑基波电势的分布特征,仅利用基波三相电压和基波零序电压幅值进行定位得到故障位置1,故障稳定在第43匝线圈末端;考虑基波电势分布特征进行定位得到故障位置2,故障稳定在第38匝线圈末端,如图13所示。

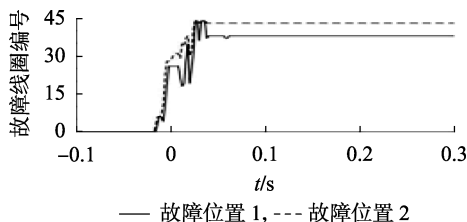


图13 案例1的故障位置计算结果

Fig.13 Calculative results of fault location in Case 1

经现场检修发现,207槽上层线棒绝缘击穿,即故障位于B相,从中性点起第39匝线圈上层线棒,与计算值第38匝线圈下层相棒末端误差不超过1匝,验证了本文所提方法的准确性。

5.2 故障案例2

某电厂的7号和9号770 MW发电机分别发生了单相接地故障。2台机组都采用波绕组,每相每分支24匝线圈,分成8个线圈组,其基波分支电势构成以及2次故障位置如图14所示。

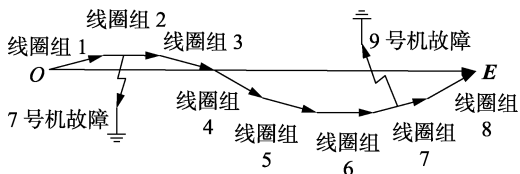


图14 分支电势及故障位置

Fig.14 Branch potential and fault location

利用本文方法对2次故障进行定位计算,结果如图15所示。

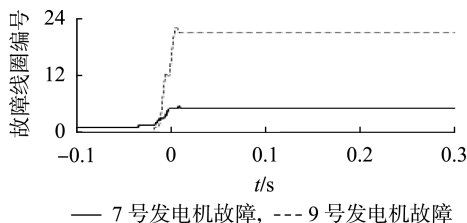


图15 案例2的故障位置计算结果

Fig.15 Calculative results of fault location in Case 2

计算结果与实际故障位置的比较结果如表2所示。由表可见,故障定位误差不超过1匝,进一步验证了本文方法的正确性。

表2 故障位置的计算结果和实际故障位置的对比

Table 2 Comparison between calculative and actual fault locations

实际故障位置	故障位置计算结果	误差
7号机线圈组2 第2匝线圈上层线棒	第5匝线圈	不超过1匝
9号机线圈组7 第3匝线圈下层线棒	第21匝线圈	不超过半匝

6 结语

本文提出了一种基于发电机基波电势分布特征的定子绕组单相接地故障定位方法,深入分析了发电机基波电势分布特征对基波零序电压的影响,根据基波电势随故障位置和过渡电阻变化的圆弧轨迹进行故障定位。对于波绕组发电机可能存在故障定位不唯一的情况,结合注入式定子接地保护测量的过渡电阻值进行故障定位。

仿真和现场实例分析结果验证了本文方法的准确性,其误差不超过1匝线圈,可应用于现场指导故障检修。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2002:223-245.
- [2] 毕大强. 大型水轮发电机定子绕组单相接地故障及保护方案的研究[D]. 北京:清华大学,2003.
BI Daqiang. Studies on stator ground fault and its protection for large-sized hydro-generators[D]. Beijing:Tsinghua University,2003.
- [3] 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.
- [4] 毕大强,王祥珩,李德佳,等. 发电机定子绕组单相接地故障的定位方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(22):55-57,94.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, LI Dejia, et al. Location detection for the stator single-phase ground fault of a generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(22):55-57,94.
- [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] 贾文超,黄少锋. 水轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):134-139.
JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Stator single-phase grounding fault location for hydro-generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):134-139.
- [7] 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.
- [8] 党晓强,刘俊勇,杨可,等. 水轮发电机定子单相接地故障行波定位[J]. 电力系统自动化,2006,30(23):74-78.
DANG Xiaoliang, LIU Junyong, YANG Ke, et al. Location for stator single phase to ground of hydro-generators based on fault traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(23):74-78.
- [9] 桂林,铎良,杨忠国,等. 反思低转速大型水轮发电机定子绕组形式的选择[J]. 大电机技术,2013(4):30-33,37.
GUN Lin, DUO Liang, YANG Zhongguo, et al. Reconsideration of

- the selection of stator winding type for large-sized hydraulic generator with low rotational speed[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2013(4):30-33, 37.
- [10] 桂林,王祥珩,孙宇光,等. 巨型水轮发电机定子绕组设计建议——由发电机主保护定量化设计引出的反思[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4):45-48, 81.
- GUN Lin, WANG Xiangheng, SUN Yuguang, et al. Suggestions on stator winding design of large hydraulic generator-reconsideration on quantitative design method of main protection for generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4):45-48, 81.
- [11] 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 Jiansheng, 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.
- [12] 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 Jiansheng, 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.
- [13] 李汝良,李义翔,王祥珩. 大型发电机定子中性点接地暂态研究[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(4):3-7.
- LI Ruliang, LI Yixiang, WANG Xiangheng. The transient state research of generator stator neutral grounding schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(4):3-7.
- [14] 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其精确定位方法[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.
- [15] WANG Y, YIN X, ZHANG Z. 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.
- [16] 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 zero sequence voltage fault component phase characteristics for generator stator single-phase ground fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):116-121.
- [17] 桑建斌,包明磊,李玉平,等. 大型汽轮发电机3次谐波电压定子接地保护方案的研究与改进[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10):177-183.
- SANG Jianbin, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Research and improvement of stator grounding protection based on third-harmonic voltage for large-scale turbine generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):177-183.

作者简介:



殷林鹏

殷林鹏(1993—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为发电机定子接地故障定位(E-mail: ylp16@mails.tsinghua.edu.cn);

桂林(1974—),男,安徽广德人,副教授,博士,主要研究方向为大机组保护及故障分析;

张琦雪(1974—),男,江苏沭阳人,研究员级高级工程师,博士,主要研究方向为电厂继电保护及自动化装置的研发;

陈俊(1978—),男,江苏姜堰人,研究员级高级工程师,硕士,主要从事电气主设备保护的研究、开发和管理工作;

王祥珩(1940—),男,安徽淮南人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电机分析与控制、电机故障及保护、电气传动及其自动化等。

Stator grounding fault location method based on distribution characteristics of fundamental wave potential

YIN Linpeng¹, GUI Lin¹, ZHANG Qixue², CHEN Jun², WANG Xiangheng¹

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Nanjing NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: A stator grounding fault location method based on potential distribution characteristics of fundamental wave is proposed. The fundamental wave potential between the neutral point of the generator and the grounding fault point is determined according to the actual connection relationship of the stator coils of each branch of each phase. The mathematical relationship of the fundamental wave potential, three-phase fundamental wave voltage of the machine terminal, fundamental wave zero-sequence voltage and grounding transition resistance is established, by which, the stator grounding fault is accurately located. The special situation in the fault location of the wave winding generator is analyzed. Then, a stator grounding fault simulation model based on quasi-distributed capacitance parameters is used to verify the effectiveness of the proposed method. Finally, the actual fault cases in the field are analyzed, and the results further verify the accuracy of the proposed method and that it can greatly shorten the on-site trouble shooting time.

Key words: generators; stator grounding; distribution potential; fault location

附录 A

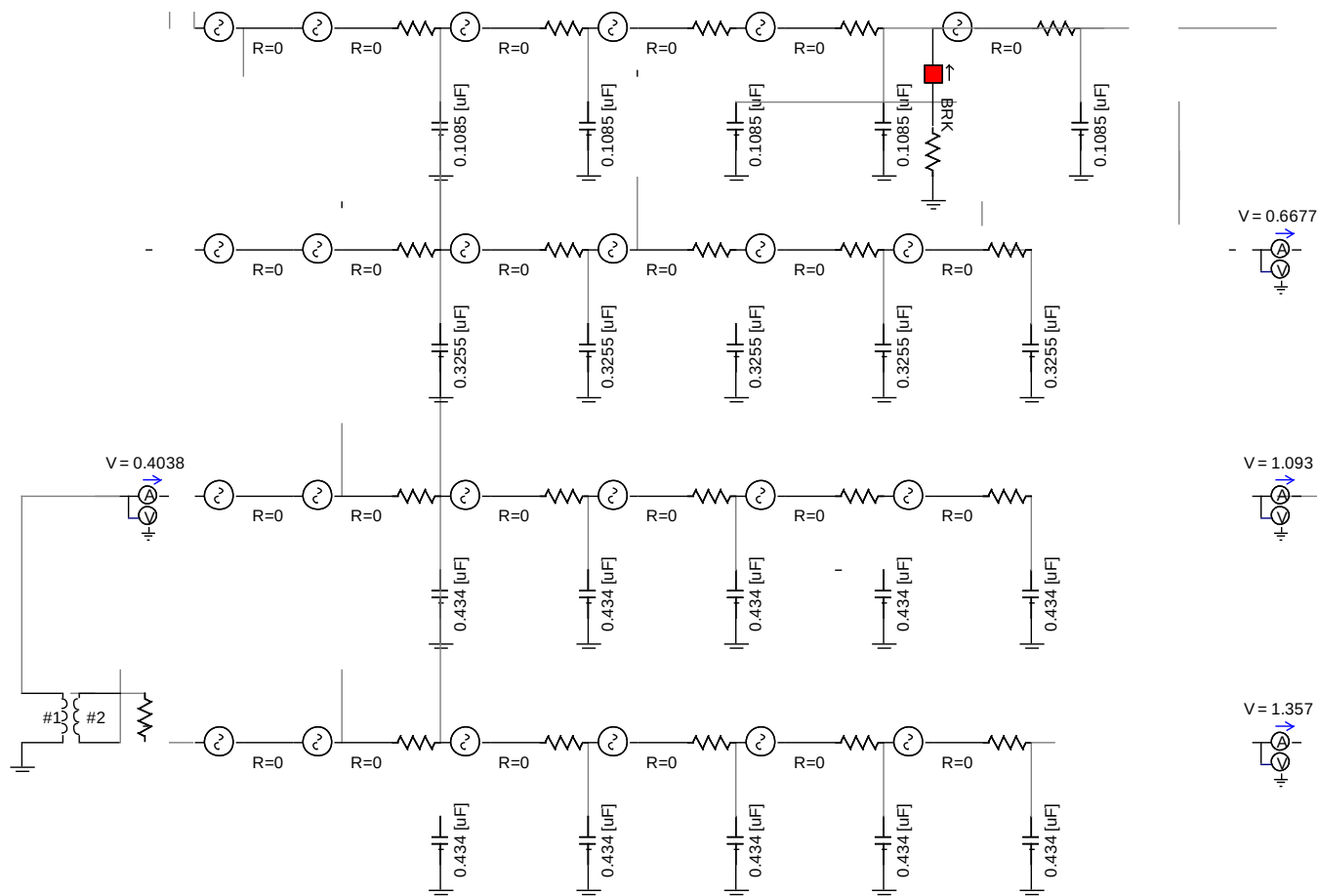


图 A1 仿真电路图

Fig.A1 Schematic diagram of simulation circuit

附录 B

表 B1 故障定位结果

TableB1 Results of fault location						
故障位置 (故障线圈)	过渡电阻 / Ω	U_{n0} 二次值 计算结果/V	$E(\alpha)$ 二次值 计算结果/V	故障定位结果		
				忽略基波 电势分布	考虑基波 电势分布	考虑基波电势分布 忽略接地变漏阻抗
30% (14)	100	26.42 $\angle$ 152.86 $^{\circ}$	31.36 $\angle$ -19.87 $^{\circ}$	34	14	14
	500	15.53 $\angle$ 138.53 $^{\circ}$	31.34 $\angle$ -19.90 $^{\circ}$	45	14	15
	2000	5.81 $\angle$ 126.99 $^{\circ}$	31.34 $\angle$ -19.65 $^{\circ}$	45	14	15
50% (23)	100	43.57 $\angle$ 158.41 $^{\circ}$	51.84 $\angle$ -14.23 $^{\circ}$	39	23	24
	500	25.63 $\angle$ 144.01 $^{\circ}$	52.20 $\angle$ -14.25 $^{\circ}$	45	23	25
	2000	9.6 $\angle$ 132.22 $^{\circ}$	51.54 $\angle$ -14.45 $^{\circ}$	45	23	25
80% (36)	100	68.66 $\angle$ 166.82 $^{\circ}$	79.9 $\angle$ -6.62 $^{\circ}$	42	36	36
	500	40.38 $\angle$ 152.42 $^{\circ}$	80.31 $\angle$ -6.30 $^{\circ}$	45	36	37
	2000	15.12 $\angle$ 140.59 $^{\circ}$	81.73 $\angle$ -6.04 $^{\circ}$	45	37	39