

大型隐极发电机定子单相接地故障定位新方法

薛磊, 孙钢虎, 王小辉, 柴琦, 兀鹏越, 贺婷

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:发电机定子单相接地故障在生产过程中时有发生,如不能快速切除,对发电设备和电力系统都有较大的危害。提出了一种大型隐极发电机定子单相接地故障定位新方法,所提方法通过基波零序电压和故障相基波电势确定定子单相接地故障的位置,适用于中性点经高阻接地的发电机以及中性点不接地的发电机,且不依赖于注入式定子接地保护,所需要的故障信息较少,简单易行,可在现场推广应用。仿真数据和实际故障案例验证了所提方法的正确性。

关键词:发电机;定子单相接地故障;故障定位;继电保护

中图分类号:TM 31

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109023

0 引言

发电机定子单相接地故障是较为常见的故障,若定子单相接地故障发生在发电机内部,则可能进一步发展成定子绕组两相、三相接地短路或匝间短路故障,导致发电机严重损坏。发生定子单相接地故障时,应及时停机检修,避免故障进一步发展造成发电机铁芯严重烧损,因此根据DL/T 684—2012《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》,发电机定子绕组单相接地保护经较短延时0.3~1.0 s动作于停机。但是,实际中很多定子单相接地故障发生在发电机机端和发电机外部,比如发电机封闭母线受潮、发电机匝间保护专用电压互感器中性点电缆绝缘破损、发电机封闭母线支撑绝缘子损坏等。目前的发电机定子接地保护方法,即基波零序电压和3次谐波电压组成的100%定子接地保护(下文简称100%定子接地保护)以及注入式定子接地保护仍无法区分定子单相接地故障发生于发电机内部还是外部,当发电机定子接地保护动作于停机后,电厂工作人员需要解开发电机与外部的连接,分别检查发电机内部和外部的绝缘,工作量大、停机时间长。如果能够对发电机定子单相接地故障进行定位,则可以大幅减小工作量,在短时间内发现和排除定子单相接地故障,缩短停电时间。

发电机定子单相接地故障的定位一般需要先测量或计算获得定子接地过渡电阻^[1-4](下文简称过渡电阻)。对于高阻接地方式的发电机,虽然可以采用注入式定子接地保护来获得过渡电阻,并进一步定位定子单相接地故障^[1],但是注入式定子接地保护一般只在特大型机组上应用,该类故障定位方法的应用范围受到了很大限制。对于中性点不接地的发电机,一般只能采用100%定子接地保护。文献[2,4]通过计算最高相和次高相电压平方差与最高相和故

障相电压平方差的比值来获得过渡电阻,从而实现不依赖注入式定子接地保护实现定子单相接地故障的定位。文献[3]提出对于大型水轮发电机,定子绕组的合成电势与相电势间的相位差可忽略,并通过基波零序电压和故障相基波电势之间的相位角计算过渡电阻,进而定位定子单相接地故障。

本文通过分析发电机定子单相接地故障特征,提出一种新的定子单相接地故障定位方法,其不需要通过注入式原理测量过渡电阻,也不需要先计算得到过渡电阻再进行故障定位,且适用于中性点通过高阻接地或不接地的发电机。

1 定子单相接地故障分析

本文以发电机A相定子绕组经过渡电阻 R_g 接地故障为例分析定子单相接地故障的电气特征,其等效电路图如图1所示。图中, R_n 为发电机中性点接地变压器二次侧电阻按接地变压器变比折算到一次侧的电阻值; U_0 为发电机中性点零序电压; E_a 、 E_b 、 E_c 为发电机定子三相电势; C_a 、 C_b 和 C_c 为发电机三相对地电容,三者之和为 C_Σ ; α 为故障点到中性点的绕组匝数占一相总匝数的百分比,表征定子接地故障位置, $0 \leq \alpha \leq 100\%$ 。

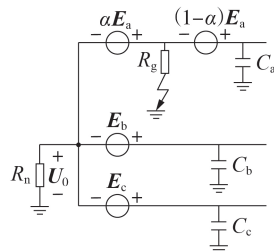


图1 发电机A相定子绕组接地故障等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of phase-A stator winding grounding fault of generator

根据基尔霍夫定律,可得到:

$$\frac{U_0}{R_n} + \frac{\alpha E_a + U_0}{R_g} + j\omega C_a U_{ag} + j\omega C_b U_{bg} + j\omega C_c U_{cg} = 0 \quad (1)$$

式中: U_{ag} 为 A 相机端对地电压, $U_{ag} = E_a + U_0$; U_{bg} 为 B 相机端对地电压, $U_{bg} = E_b + U_0$; U_{cg} 为 C 相机端对地电压, $U_{cg} = E_c + U_0$; ω 为系统角频率。

当发电机定子电动势三相对称时,可得到:

$$U_0 = -\frac{\alpha E_a}{R_g/R_n + 1 + j\omega C_\Sigma R_g} \quad (2)$$

当发电机 A 相定子绕组的点 D 处经 R_g 接地时,故障相电压相量图如图 2 所示。图中, $\overline{GA} = U_{ag}$, $\overline{GB} = U_{bg}$, $\overline{GC} = U_{cg}$, 弧线 OGD 为地电位随 R_g 的变化形成的轨迹, R_g 越小, 地电位越靠近故障点 D。

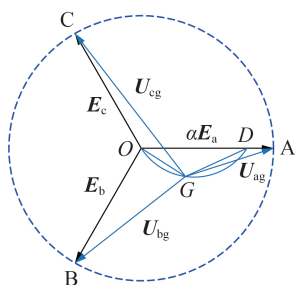


图2 发电机 A 相定子绕组接地故障后的电压相量图

Fig.2 Voltage phasor diagram after phase-A stator winding ground fault of generator

图 2 中的接地三角形 $\triangle OGD$ 如图 3 所示, 图中 $\overline{GO} = U_0$, 则有:

$$|\overline{GO}| = \frac{|\alpha E_a|}{\sqrt{(R_g/R_n + 1)^2 + (\omega C_\Sigma R_g)^2}} \quad (3)$$

$$\tan \theta = \frac{\omega C_\Sigma R_g}{R_g/R_n + 1} \quad (4)$$

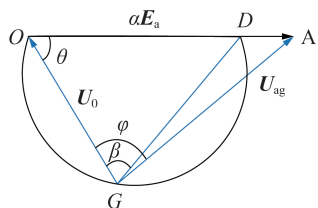


图3 $\triangle OGD$ 示意图

Fig.3 Schematic diagram of $\triangle OGD$

根据余弦定理可以得到 $|\overline{GD}|^2 = |\overline{OD}|^2 + |\overline{GO}|^2 - 2|\overline{OD}||\overline{GO}|\cos \theta$, 则可得到:

$$|\overline{GD}| = \frac{\sqrt{(R_g/R_n)^2 + (\omega C_\Sigma R_g)^2}}{\sqrt{(R_g/R_n + 1)^2 + (\omega C_\Sigma R_g)^2}} |\alpha E_a| \quad (5)$$

根据正弦定理有 $\frac{|\overline{OD}|}{\sin \angle OGD} = \frac{|\overline{GD}|}{\sin \angle GOD}$, 则可以得到:

$$\sin \angle OGD = 1/\sqrt{1 + [1/(\omega C_\Sigma R_n)]^2} \quad (6)$$

定义 $\angle OGD$ 为发电机的特征角 β , 即:

$$\beta = \arccos \left[-1/\sqrt{1 + (\omega C_\Sigma R_n)^2} \right] \quad (7)$$

由式(7)可知, 特征角 β 和发电机定子单相接地故障的位置无关, 也不随过渡电阻的变化而变化, 只与发电机参数有关。对于中性点不接地的发电机, $\beta = 90^\circ$, 即弧 OGD 是以 OD 为直径的半圆。

2 定子单相接地故障定位

2.1 故障相选择

假设发电机 A 相定子绕组经过渡电阻接地, 则 U_{cg} 最大^[2], 可确定 C 相为无故障相, 因此只比较 U_{ag} 和 U_{bg} 。

$$|U_{bg}|^2 - |U_{ag}|^2 = \frac{3\alpha(R_g/R_n + 1) - \sqrt{3}\alpha\omega C_\Sigma R_g}{(R_g/R_n + 1)^2 + (\omega C_\Sigma R_g)^2} |E_a|^2 \quad (8)$$

发电机中性点经过高阻接地的情况下, 通常选取 $R_n \leq 1/(\omega C_\Sigma)$, 则式(8)恒大于 0, 可知在发电机中性点高阻接地方式下, 故障相的机端对地电压最低。

对于中性点不接地的发电机, 则有:

$$|U_{bg}|^2 - |U_{ag}|^2 = \frac{\sqrt{3}\alpha(\sqrt{3} - \omega C_\Sigma R_g)}{1 + (\omega C_\Sigma R_g)^2} |E_a|^2 \quad (9)$$

当 $R_g < \sqrt{3}/(\omega C_\Sigma)$ 时, 故障相的机端对地电压最小; 当 $R_g \geq \sqrt{3}/(\omega C_\Sigma)$ 时, 故障相的机端对地电压并非最小。因此, 当发电机发生定子单相接地故障后, 机端电压幅值最小的一相并不一定是故障相, 文献[5]也有相似的结论。

由式(2)可知, $-U_0$ 始终滞后于故障相电压 θ 角度, 且 $\tan \theta = \omega C_\Sigma / (1/R_n + 1/R_g)$ 。对于中性点经高阻接地的发电机, $R_n \leq 1/(\omega C_\Sigma)$, 因此 θ 通常小于 45° ; 对于中性点不接地的发电机, 虽然 θ 和 R_g 的大小有关, 但不会大于 90° 。因此 $-U_0$ 的相位必定位于 A 相和 B 相之间, C 相机端对地电压在三相中最大, A 相和 B 相机端对地电压较低, 从而滞后于机端对地电压最大相的一相即为故障相。

2.2 故障位置计算

由图 3 可知, 发电机定子单相接地故障后, U_0 超前故障相机端对地电压的角度为 φ , φ 可根据发电机的三相电压计算得到。如果 $\varphi \leq \beta$, 则可判断定子单相接地故障发生在发电机机端或外部; 如果 $\varphi > \beta$, 则可判断定子单相接地故障发生在发电机内部。

如果定子单相接地故障发生在发电机内部, 则可以进一步确定发生故障位置距离发电机机端的绕组匝数与距离发电机中性点的绕组匝数之比 γ , 如式(10)所示。

$$\gamma = \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\sin \beta} \frac{|U_{\text{fault}}|}{|U_0|} \quad (10)$$

式中: U_{fault} 为定子单相接地故障相对地电压。

从而可得到 α 为:

$$\alpha = 1/(1+\gamma) \quad (11)$$

上述故障位置计算过程所需要的故障数据为 U_{ag} 、 U_{bg} 、 U_{cg} 和 U_0 , 虽然这些数据均可直接从故障录波器中获取, 但是经发电机中性点接地变压器二次侧电阻抽头抽取的零序电压与发电机机端电压互感器变比不一致容易导致计算错误, 另外故障录波器测量的零序电压含有 3 次谐波分量, 也会导致计算不准确, 因此在实际应用中, 一般通过计算 U_{ag} 、 U_{bg} 、 U_{cg} 矢量和的方法得到 U_0 。

3 仿真实验

因为目前没有可模拟发电机内部故障的发电机模型, 本文在电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 4 所示的分布参数电路模型^[6], 模型将每分支定子绕组划分成若干个单元, 定子绕组的电感、电阻、对地电容和电势平均分配到每个单元电路中。仿真模型参数为: $|E_a| = |E_b| = |E_c| = 11.547 \text{ kV}$, 每相电感为 $227.05 \mu\text{H}$, 每相电阻为 $5 \text{ m}\Omega$, 每相对地电容为 $1.686 \mu\text{F}$, $R_n = 629.32 \Omega$ 。因此对于发电机仿真模型, 可得 $\omega C_\Sigma R_n = 2\pi \times 50 \times 3 \times 1.686 \times 10^{-6} \times 629.32 \approx 1$, 则其特征角 $\beta = 135^\circ$ 。

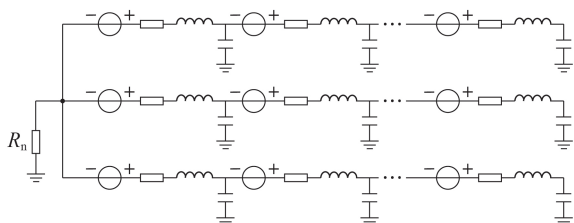


图4 发电机分布参数电路模型

Fig.4 Distributed parameter circuit model of generator

本文分别在发电机内部和机端设置定子 A 相经过渡电阻接地故障进行仿真。

1) 仿真 1: 发电机定子 A 相 $\alpha = 60\%$ 处经 600Ω 过渡电阻接地。仿真结果为 $U_{\text{ag}} = 8.79 \angle -80.86^\circ \text{ kV}$, $U_{\text{bg}} = 12.19 \angle 134.9^\circ \text{ kV}$, $U_{\text{cg}} = 14.30 \angle 37.16^\circ \text{ kV}$, $U_0 = 3.19 \angle 64.02^\circ \text{ kV}$ 。根据仿真结果可知, U_0 超前 U_{ag} 的角度 $\varphi = 144.88^\circ$, 大于特征角 135° , 因此可以判断定子单相接地故障发生在发电机内部。

根据式 (10) 可得:

$$\gamma = \frac{\sin(144.88^\circ - 135^\circ)}{\sin 135^\circ} \times \frac{8.79}{3.19} \approx 0.669 \quad (12)$$

则可知定子单相接地故障点到中性点的绕组匝数占一相总匝数的百分比为 $\alpha = 1/(1+0.669) \approx 0.599$, 与仿真设置基本一致。

2) 仿真 2: 发电机定子 A 相在机端经 600Ω 过渡电阻接地。仿真结果为 $U_{\text{ag}} = 7.16 \angle -71.02^\circ \text{ kV}$,

$U_{\text{bg}} = 13.04 \angle 126^\circ \text{ kV}$, $U_{\text{cg}} = 162.3 \angle 40.54^\circ \text{ kV}$, $U_0 = 5.32 \angle 63.97^\circ \text{ kV}$ 。根据仿真结果可知, U_0 超前 U_{ag} 的角度 $\varphi = 134.99^\circ$, 考虑计算误差, 可认为 $\varphi = \beta$, 因此可以判断定子单相接地故障发生在发电机机端。

4 案例分析

本文对文献[7]提供的发电机定子单相接地事故案例进行接地故障分析。机组相关参数如下: 发电机容量为 630 MW , 每相对地电容为 $0.27 \mu\text{F}$, 发电机侧发电机出口断路器 (GCB) 系统对地电容为 $0.14 \mu\text{F}$, 系统侧 GCB 系统对地电容为 $0.26 \mu\text{F}$, 出口额定电压为 20 kV , 电压互感器变比为 $20 \text{ kV}/100 \text{ V}$, 中性点电阻柜变比为 $20 \text{ kV}/500 \text{ V}$, 接地电阻抽头选取 0.295Ω (总阻值为 0.852Ω)。

1) 事故 1 的数据如下: $U_{\text{ag}} = 54.3 \angle 51.7^\circ \text{ V}$, $U_{\text{bg}} = 57.7 \angle -78.5^\circ \text{ V}$, $U_{\text{cg}} = 64.6 \angle 169.6^\circ \text{ V}$ 。通过计算可得, 事故 1 中 $U_0 = 6.173 \angle 187.03^\circ \text{ V}$ 。可见事故 1 中 U_{cg} 的幅值最大, 则可以确定定子单相接地故障相为 A 相, U_0 超前故障相机端对地电压 U_{ag} 的角度 $\varphi = 135.33^\circ$ 。

根据 DL/T 684—2012《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》, 主变压器低压绕组每相对地电容可取为 $0.02 \mu\text{F}$, 发电机机端其他设备包括封闭母线等每相对地电容可取为 $0.01 \mu\text{F}$, 则 $C_\Sigma = 3 \times (0.27 + 0.14 + 0.26 + 0.02 + 0.01) = 2.1 (\mu\text{F})$, 发电机中性点接地电阻为 0.852Ω , 按接地变压器变比 $20 \text{ kV}/0.5 \text{ kV}$ 折算到一次侧为 $R_n = 0.872 \times \left(\frac{20}{0.5}\right)^2 = 1363.2 (\Omega)$, 则根据式 (10) 可得发电机的特征角 β 为:

$$\beta = \arccos \left[-\frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C_\Sigma R_n)^2}} \right] \approx 138.03^\circ \quad (13)$$

由计算结果可知 $\varphi < \beta$, 则可以判断发电机定子单相接地故障发生于发电机机端或外部。现场经过排查, 事故原因是由于在机组运行期间更换氢冷却器软连接造成漏水, 水滴在发电机出线盒上渗入出线盒内部, 导致发电机 A 相出现绝缘波纹对地放电。现场排查发现的事故原因与本文方法得到的发电机定子单相接地故障的定位结果一致。

2) 事故 2 的数据如下: $U_{\text{ag}} = 60.1 \angle -39^\circ \text{ V}$, $U_{\text{bg}} = 53.5 \angle -160^\circ \text{ V}$, $U_{\text{cg}} = 58.1 \angle 74^\circ \text{ V}$ 。通过计算可得, 事故 2 中 $U_0 = 4.15 \angle -1.24^\circ \text{ V}$ 。可见事故 2 中 U_{ag} 的幅值最大, 则可以确定定子单相接地故障相为 B 相, U_0 超前故障相机端对地电压 U_{bg} 的角度 $\varphi = 158.76^\circ > \beta$, 故可以判断发电机定子单相接地故障位于发电机内部。

进一步采用本文方法可确定 γ 为:

$$\gamma = \frac{\sin(158.76^\circ - 138.03^\circ)}{\sin 138.03^\circ} \times \frac{53.5}{4.15} \approx 6.82$$

现场经过排查,发现发电机汽端26号上层线棒汽侧水盒损毁严重,发电机定子线圈的水电连接图见附录A图A1,其中定子槽数为42,每极每相槽数为7,线圈跨距为1-18,26号上层线棒位于B相的第一分支的1/7处,事故原因与采用本方法对接地故障的定位分析较为一致。

5 结论

本文提出了一种大型隐极发电机定子单相接地故障的定位方法,并通过仿真和实际案例验证了所提方法的正确性。本文方法可直接通过基波零序电压和故障相基波电势确定定子单相接地故障的位置,不需要通过注入式原理测量接地过渡电阻,也不需要计算过渡电阻后再进行故障定位,所需要的故障信息较少,在现场易于使用,具有一定的实用价值。对于发电机中性点附近的定子单相接地故障,可与3次谐波定子接地保护配合进行故障定位。

本文方法未考虑不同定子线圈的分布电势以及同一线圈上层线棒和下层线棒短距系数的影响,笔者将对此继续开展研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 高瑜,季杰,蔡显岗. 发电机定子一点接地故障快速定位法的分析和应用[J]. 水力发电,2016,42(7):93-96.
GAO Yu, JI Jie, CAI Xiangang. Analysis and application on locating method for stator single-phase grounding fault[J]. Water Power, 2016, 42(7): 93-96.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 黄晓鹏,丁永允,赵帅达,等. 同一机组多次定子接地保护事故对比分析[J]. 东北电力技术,2019,40(8):48-51,55.
HUANG Xiaopeng, DING Yongyun, ZHAO Shuaida, et al. Analysis of stator grounding protection for same unit comparison accidents[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(8): 48-51, 55.

作者简介:



薛磊(1987—),男,安徽淮北人,工程师,硕士,主要从事继电保护整定计算相关工作(E-mail: xuelei@126.com)。

(编辑 任思思)

Novel location method for stator single-phase grounding fault of large non-salient pole generator

XUE Lei, SUN Ganghu, WANG Xiaohui, CHAI Qi, WU Pengyue, HE Ting

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Stator single-phase grounding faults of generator often occur in the production process. If the fault cannot be removed quickly, it will bring great harm to power generation equipment and power system. A novel location method for stator single-phase grounding fault of large non-salient pole generator is proposed, which can determine the location of stator single-phase grounding fault by power frequency zero-sequence voltage and power frequency voltage of fault phase. The proposed method is suitable for the generator with neutral point grounding via high resistance and the generator without grounding neutral point, and it does not rely on voltage injection type stator grounding fault protection. Because the proposed method needs less fault information, it is easy to operate and can be widely used in the field. Simulation data and actual fault cases verify the correctness of the proposed method.

Key words: electric generators; stator single-phase grounding fault; fault location; relay protection

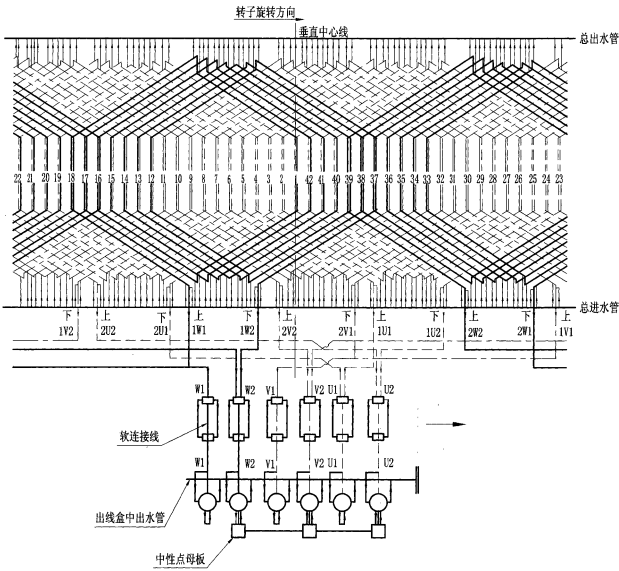


图 A1 发电机定子线圈水电连接图

Fig.A1 Water and electricity connection diagram of generator stator coil