

# 发电机中性点接地装置等效电路的分析

毕大强,王祥珩,王维俭

(清华大学电机系,北京 100084)

**摘要:** 分析了发电机中性点经配电变压器二次侧接电阻和消弧线圈两种方式接地的等效电路对外加电源型单相接地保护导纳判据的影响,指出忽略配电变压器或消弧线圈的激磁阻抗和漏抗降低了判据的准确性。考虑相应参数的影响因素能够提高接地故障过渡电阻值的计算准确度,进一步提高保护的灵敏度。试验结果验证了接地装置参数的影响。

**关键词:** 配电变压器; 消弧线圈; 外加信号; 单相接地

**中图分类号:** TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)01-0012-05

## 1 引言

目前大型发电机的中性点主要采用配电变压器二次侧接电阻或消弧线圈方式接地。中性点接地方式的选择与定子绕组单相接地保护密切相关。定子单相接地保护通常采用基波零序电压与三次谐波电压判据组合实现定子绕组 100% 保护,但基波零序电压保护在中性点附近存在死区,三次谐波电压判据在高阻情况下灵敏度不高<sup>[1]</sup>。随着对接地保护的要求不断提高(如灵敏度要求很高,在起停机过程中也要有接地保护等),不受故障位置影响、灵敏度高、在起停机过程中也能起到一定保护作用的外加电源(12.5 Hz或20 Hz)单相接地保护方案得到应用,其中外加20 Hz电源方式以判据相对简单而得到更广泛地应用。这里主要分析外加20 Hz电源保护判据。

文献[2~3]分析了外加电源内阻对传统电流型保护判据的影响,指出接地过渡电阻只有在一定范围才能满足故障后的20 Hz电流大于故障前的值。但目前文献[2~4]中分析电流型判据和导纳判据计算时,都没有考虑接地装置(配电变压器和消弧线圈)的影响。而导纳判据中计算的接地故障过渡电阻是单相接地保护中监测绝缘水平的主要依据,准确地计算是很有必要的。本文分析了忽略与考虑接地装置等效参数对导纳型判据中由二次侧测量的电流和电压计算一次侧接地故障电阻值的影响,通过对导纳型判据进行修正,提高了故障电阻计算的准确度,进一步提高检测的灵敏度。

## 2 经配电变压器接地的等效电路分析

### 2.1 简化等效电路

发电机中性点经配电变压器高阻接地(二次侧

接电阻)时,外加20 Hz电源单相接地保护的接法如图1所示。过去分析外加电源型单相接地保护的等效电路时,认为配电变压器的漏阻抗很小可以忽略不计,激磁阻抗很大认为开路,这样得到相应的等效电路如图2所示。

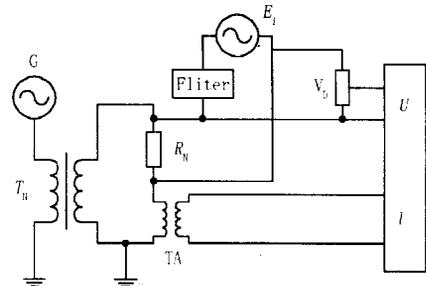


图1 中性点经配电变压器二次侧并电阻接地  
Fig. 1 Neutral grounded via distribution transformer

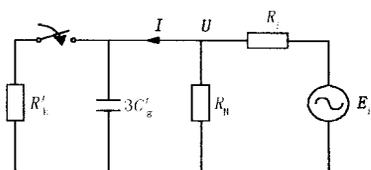


图2 中性点经配电变压器接地的简化等效电路  
Fig. 2 Simplified equivalent circuit for neutral grounded via distribution transformer

图中  $3C_g$  为发电机三相对地电容(折合到  $T_N$  二次侧);  $R_k$  为定子接地故障过渡电阻(折合到  $T_N$  二次侧);  $R_N$  为配电变压器二次侧所接电阻;  $R_l$  为20 Hz电源内阻;  $E_i$  为外加20 Hz电源;  $I$  为二次侧测量的零序电流;  $U$  为二次侧测量的零序电压。

由图2中二次侧测量量计算的定子对地导纳为

$$Y = I / U = 1 / R_k + j3 C_g$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 3.14 \times 20 = 125.6 \text{ rad/s}$$

折算到一次侧的接地过渡电阻值为

$$R_k = n^2 \frac{1}{\text{Re}(Y)} \quad (n \text{ 为配电变压器的变比})。$$

### 2.2 计入漏阻抗和激磁阻抗的等效电路

实际上,变压器的激磁阻抗并非无穷大,漏抗也会产生压降,忽略它们按图2计算一次侧接地电阻的准确度将受到影响。根据单相变压器的T型和型等效电路,图3和图4分别给出了相应的外加电源定子单相接地保护的等效电路。对于变压器来说,根据T型和型等效电路的计算结果十分接近。

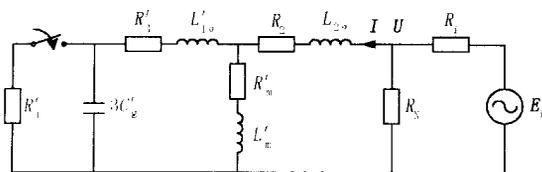


图3 考虑配电变压器参数的T型等效电路

Fig.3 T-equivalent circuit considering the parameters of distribution transformer

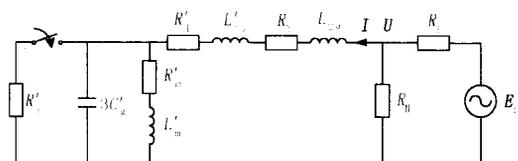


图4 考虑配电变压器参数的型等效电路

Fig.4 Pi-equivalent circuit considering the parameters of distribution transformer

图中: $R_1$ 为折算到二次侧的一次侧绕组电阻; $L_1$ 为折算到二次侧的一次侧绕组漏感; $R_2$ 为二次侧绕组电阻; $L_2$ 为二次侧绕组漏感; $R_m$ 为折算到二次侧的激磁电阻; $L_m$ 为折算到二次侧的激磁电感。

### 2.3 算例分析

选用三峡发电机的一种设计数据,发电机额定电压20 kV,每相绕组对地电容为1.81  $\mu\text{F}$ ,机端附加电容为0.2  $\mu\text{F}$ ,中性点接地变压器的变比  $n = (20/\sqrt{3}) \text{ kV}/0.48 \text{ kV}$ ,二次侧接地电阻  $R_N = 0.9 \Omega$ 。取外加电源的内阻为8  $\Omega$ 。

按发生定子一点接地时流经配电变压器的最大故障电流(在机端发生金属性接地)  $I_E$  计算接地变压器的容量  $S_N$ ,  $I_E = U_N/(\sqrt{3} n^2 R_N) = 22.17 \text{ A}$ (电容电流为21.86 A),考虑1.1倍裕度时接地变压器的容量  $S_N = 1.1 U_N I_E/\sqrt{3} = 281.6 \text{ kVA}$ ,取接地变压器短

时电流过载能力5倍,则最终取接地变压器的容量为60 kVA。

根据《电力工程师应用手册》容量在10~200 kVA范围内的接地变压器空载电流  $I_0\% = 2\% \sim 3\%$ ,阻抗电压  $u_k\% = 4\% \sim 6\%$ ;按国标GB6451-86空载损耗  $P_0 = 10 S_N^{0.75}$  ( $S_N$ 的单位为kVA,  $P_0$ 的单位为W);负载损耗  $P_k = (4.5 \sim 6.5) P_0^{[5]}$ 。取  $I_0\% = 2.2\%$ ,  $u_k\% = 4\%$ ,  $P_0 = 216 \text{ W}$ ,  $P_k = 4.5 \times 216 = 972 \text{ W}$ ,计算得到折算到二次侧的变压器等效电路参数值(假设一、二次侧绕组的参数相等):  $R_k = R_1 + R_2 = 0.062 \Omega$ ,  $L_k = L_1 + L_2 = 4.46 \times 10^{-3} \text{ H}$ ,  $R_m = 28.56 \Omega$ ,  $L_m = 0.548 \text{ H}$ 。

根据图4中的型等效电路图,在不考虑变压器激磁电流(激磁回路)的影响下,忽略漏抗压降时二次侧计算的定子对地导纳为

$$Y = I/U \quad (1)$$

计入漏抗压降时二次侧计算的定子对地导纳为

$$Y = \frac{I}{U - I(R_k + j L_k)} \quad (2)$$

折算到一次侧的接地过渡电阻视在值为

$$R_{ki} = n^2 \frac{1}{\text{Re}(Y)}$$

表1中给出了不同接地电阻,在不计激磁阻抗的条件下,比较忽略与计入变压器漏抗压降时一次侧接地电阻的计算结果对比。从表中可知,忽略变压器的漏阻抗时,随着接地电阻的增大,计算的误差增大得很快;而考虑漏抗压降时,计算结果的误差较小。从此可以看出,接地变压器的漏抗压降对接地电阻的测量和计算结果影响较大,通过计入漏阻抗的影响,计算结果的精度提高很大,其它误差主要来源于变压器的激磁回路。从表1中还可以得出,漏抗压降比激磁电流的影响大,这主要是因为当发电机的对地电容很大时,折算到二次侧的容抗较小,这样在等效电路中与其串联的变压器漏阻抗产生的压降相对会有较大的影响。

三峡机组在对外招标中,定子单相接地保护的灵敏度要求各点达到8 kV,这样高的灵敏度要求使通常的基波零序电压和三次谐波电压保护方案很难达到,需依靠外加电源型接地保护判据完成。由以上分析可知,当不考虑配电变压器的漏抗压降时,计算的接地过渡电阻有较大偏差,接地过渡电阻越大时偏差越大,使得在较大接地电阻时不能给出准确的报警信息。所以为使保护判据能够较准确地给出报警信息,应该考虑接地变压器的漏抗压降和激磁

电流的影响。

变压器不饱和时的激磁阻抗要比饱和时的大,为了分析发电机激磁阻抗的影响,进一步增大激磁阻抗到正常时的5倍。表2中给出了认为激磁回路开路,忽略和计入漏抗压降在二次侧计算的一次侧接地电阻值。从表中可以看出,随着激磁阻抗的增加,激磁回路的影响变小,而主要是漏抗的影响,这时忽略激磁阻抗的影响也能满足工程需要。由于变压器漏抗基本不随变压器的饱和程度变化,这将有利于保护判据的补偿实现。

表1 忽略与计入变压器原副边漏抗时的计算结果对比  
Tab. 1 Comparison of calculation results between neglecting and considering the leakage reactance

过渡阻值( )	忽略漏抗压降		计入漏抗压降	
	计算值/	相对误差/ %	计算值/	相对误差/ %
500	508.9	1.75	497.2	0.56
1000	964.4	3.69	989.9	1.03
2000	1839.6	8.72	1961.8	1.95
3000	2668.8	12.41	2916.3	2.87
4000	3455.3	15.76	3853.8	3.79
5000	4202.4	18.98	4774.8	4.72
6000	4912.8	22.13	5679.6	5.64
7000	5589.3	24.24	6568.8	6.56
8000	6234.3	28.32	7442.8	7.49

表2 增大变压器激磁阻抗后的计算结果对比

Tab. 2 Comparison of calculation results between neglecting and considering the leakage reactance for the excitation impedance increased

过渡阻值( )	忽略漏抗压降		计入漏抗压降	
	计算值/	相对误差/ %	计算值/	相对误差/ %
500	510.3	2.02	499.4	0.11
1000	970	3.09	998	0.21
2000	1861.4	7.44	1992.2	0.39
3000	2715.9	10.46	2982	0.57
4000	3535.6	13.13	3969.9	0.76
5000	4322.5	15.67	4953.3	0.94
6000	5078.6	18.14	5933.1	1.13
7000	5805.6	20.57	6909.3	1.31
8000	6505.1	22.98	7882	1.49

### 3 经消弧线圈接地的等效电路分析

当发电机定子绕组对地电容较大,故障时的电容电流远超过发电机的安全接地电流时,中性点经

配电变压器高阻接地只能增加故障电流,所以中性点应采用消弧线圈接地,利用接地故障时消弧线圈提供的感性电流补偿电容电流,将故障电流降低到安全接地电流范围内。

#### 3.1 简化等效电路

图5、图6分别是中性点经消弧线圈接地的外加电源保护接线图和相应的简化等效电路,图中 $L_N$ 为折算到二次侧的消弧线圈电感值。

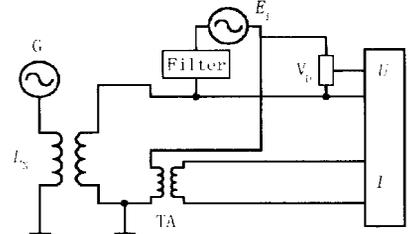


图5 中性点经消弧线圈接地

Fig. 5 Neutral grounded via arc-extinguishing coil

二次侧计算的定子对地导纳为:

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{R_k} + j3 C_g + \frac{1}{j L_N} \quad (3)$$

折算到一次侧的接地过渡电阻视在值为

$$R_{ki} = n^2 \frac{1}{\text{Re}(Y)}$$

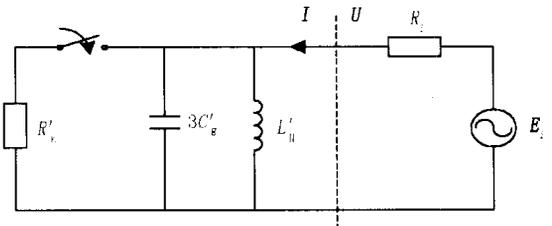


图6 中性点经消弧线圈接地的简化等效电路

Fig. 6 Simplified equivalent circuit for neutral grounded via arc-extinguishing coil

#### 3.2 漏抗与主电抗分开的等效电路

消除持续接地故障电流的消弧线圈是一种带气隙的铁心电抗器,其磁路是一个带气隙的铁心,带气隙的铁心柱外面套有绕组,其电抗值基本上不随电流的大小变化(特别是磁通密度取得不太高时),但消弧线圈运行时有较大的漏磁通。

消弧线圈的电感值由主电感和漏电感两部分组成,即 $L_N = L_m + L_1$  ( $L_m$ 为折算到二次侧的主电感, $L_1$ 为折算到二次侧的一次侧绕组漏感值),消弧线圈的漏感较大,通常占20%左右,把消弧线圈的整个电感值都作为主电感考虑,将引起较大的误差。如果中性点经消弧线圈接地,外加电源由消弧线圈

的二次侧线圈注入,假设二次侧绕组的漏感  $L_2$  等于一次侧的漏电感  $L_1$ 。因为消弧线圈的漏电感较大,若采用变压器的 T 型等效电路,计算将带来较大误差。图 7 给出了考虑漏抗压降,但忽略激磁电阻和绕组电阻的 T 型等效电路。

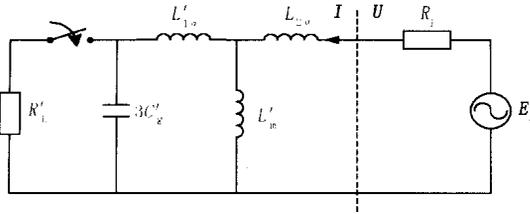


图 7 漏感与主电感分开的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit considering the main inductance and leakage inductance separately

3.3 算例分析

同样以上面的三峡发电机设计为例,选取补偿系数  $k = 1.1$ ,则消弧线圈的电感值取为  $L_N = 1.1 \times \frac{1}{3 \times 3.14^2 \times 2.01 \times 10^{-6}} = 1.85 \text{ H}$ (一次侧值),取漏电感占 20%,选择消弧线圈变比与上面配电变压器的相同。

表 3 中给出了在漏抗与主电抗分开的等效电路中,用简化公式(3)计算的一次侧不同接地电阻时二次侧计算值。可以看出,计算相对误差很大,如果再考虑一、二次绕组的电阻影响,偏差还会加大。

从计算分析可以看出,由二次侧测量值计算一次侧的接地故障电阻值时,应该考虑消弧线圈漏电感和主电感的影响。因为消弧线圈漏抗较大,在补偿修正时如果仅仅考虑漏感或主电感某一方面可能得不到较好的补偿结果,应该同时考虑漏感和主电感的影响。

表 3 经消弧线圈接地时按简化电路计算的结果

Tab. 3 Calculation results according to the simplified equivalent circuit for neutral grounded via arc extinguishing coil

过渡阻值/	忽略漏抗压降		过渡阻值/	忽略漏抗压降	
	计算值/	相对误差/ %		计算值/	相对误差/ %
500	707.2	29.30	1000	1381.5	27.60
2000	2746.7	27.18	3000	4115.5	27.10
4000	5485.1	27.08	5000	6855.2	27.06
6000	8225.4	27.05	7000	9595.8	27.05
8000	10966.2	27.04			

表 4 经配电变压器接地的试验结果

Tab. 4 Experimental results for neutral grounded via distribution transformer

试验过渡阻值( )	120	542	2000	8300	
忽略漏抗压降	计算值( )	100.6	290.3	479.7	582.0
	相对误差( %)	19.30	86.72	314	1326
计入漏抗压降	计算值( )	100.1	289.9	479.5	582.0
	相对误差( %)	19.95	86.98	317	1326
计入漏抗压降和激磁阻抗	计算值( )	119.1	538.5	2025.6	7915.3
	相对误差( %)	0.75	0.66	1.27	4.86

4 试验验证

为了验证以上分析,本文在一台实验发电机上做了外加 20 Hz 电源的试验,发电机额定电压 400 V,机端并联电容 0.11 μF。发电机的中性点经配电变压器电阻接地,变压器的变比为 1:1,二次侧接地电阻 3554 Ω,外加 20 Hz 电源 20 V 时,变压器的参数为  $R_m = 235 \Omega$ ,  $X_m = 304 \Omega$ ,  $R_1 = R_2 = 0.266 \Omega$ ,  $X_1 = X_2 = 0.101 \Omega$ 。表 4 中给出了忽略与计入变压器漏抗和激磁阻抗影响时,由二次侧测量的电流和电压计算的一次侧接地电阻。

从表中可以看出,只计入漏抗压降的影响,计算结果并没有改善,这与前面分析的有所不同,原因在于试验中一次侧的电容较小,容抗较大,变压器漏抗压降的影响很小,激磁阻抗对计算的影响很大。在同时计入漏抗压降和激磁阻抗的影响时计算结果较准确。所以,在处理实际工作中,漏抗和激磁阻抗哪一个影响更大,不但与它们之间的大小关系有关,而且还与发电机的绕组对地电容大小有关。

5 保护方案的补偿

从以上的仿真和试验说明,配电变压器和消弧线圈的漏阻抗和激磁阻抗对外加电源的导纳判据计算一次侧接地电阻的影响较大,实际计算中应根据图 3 和图 5 所示的等效电路,考虑它们的影响。

在实际工作中,变压器和消弧线圈的漏阻抗和激磁阻抗的取值是很重要的,选择不当对补偿的准确度影响较大。因为磁化曲线是非线性的,随铁心饱和程度的提高,磁导率  $\mu_{Fe}$  和激磁电抗将减小。对于激磁电阻,铁心的饱和程度越高,激磁电流越大,波形越尖,铁心损耗亦愈大。根据  $P_{Fe} = P_{V50} B_m^2 \cdot (f/50)^{1.3}$ ,  $B = \mu H$ ,  $H = I$ ,  $r_m = P_{Fe} / I_m^2$ ,可推知随着饱和程度的增加激磁电阻减小。由于空气的磁导率

很小且基本为一常数,变压器和消弧线圈的漏抗与饱和程度基本无关,为一常数。

在确定变压器或消弧线圈参数时,可以将50 Hz下的漏抗值换算到20 Hz,一、二次侧绕组的电阻值不变。对于激磁阻抗,由于不同饱和程度下的值差别较大,最好利用保护提供的外加20 Hz电源在保护投运前做一下接地装置的空载试验,实测出相应的激磁阻抗。如果能够分别测量出一、二次侧的20 Hz电流,那么就可以实时计算出变压器或消弧线圈的激磁电流或激磁阻抗,这样补偿起来就更加准确。

## 6 结论

对于外加电源型单相接地保护的导纳型判据,要准确计算一次侧接地故障电阻值,需要考虑变压器和消弧线圈的漏阻抗和激磁阻抗的影响。当发电机对地电容较大时,接地变压器的漏阻抗比激磁阻抗影响大;当发电机对地电容很小时,激磁阻抗的影响因素比漏阻抗大。对于消弧线圈,由于漏抗占总电抗的比重较大,两者对接地电阻的计算准确度都有较大地影响,补偿时需要同时考虑它们的影响。

### Analysis on the equivalent circuit of grounding equipments at the neutral of power generator

BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper analyzes the effect of different equivalent circuits of grounding equipment at the neutral on the protection of ground fault by injecting signal, and points out that the accuracy of protection scheme using admittance is reduced if the leakage reactance and exciting impedance of grounding transformer or extinguishing coil ignored. The accuracy of calculating transient resistance and the sensitivity of protection can be improved by considering these parameters. The experimental results verify the influence of parameters of grounding equipment.

**Key words:** grounding transformer; extinguishing coil; injecting signal; ground fault

## 参考文献:

- [1] 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, 1998.
- [2] 邵能灵, 尹相根, 胡玉峰, 等. 注入式定子单相接地保护的应用分析[J]. 继电器, 2000, 28(6): 15-18.
- [3] Bi Daqiang, Wang Xiangheng, Xu Zhenyu, Wang Weijian. Analysis and improvement on the stator earthfault protection by injecting 20Hz Signal [C]. Proceedings of the fifth international conference on electrical machines and systems, Shenyang, 2001: 301~304.
- [4] 王维俭, 徐振宇, 张振华. 大型发电机定子单相接地保护的研讨[J]. 继电器, 1999, 27(4): 6-9.
- [5] 朱杰民, 陈宝海, 沈锦娟. 发电机中性点接地变压器阻抗不宜忽略[J]. 东北水利水电, 2000, 18(5): 10-12.

收稿日期: 2002-09-10

作者简介:

毕大强(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事电气主设备继电保护研究;

王祥珩(1940-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电机分析和控制、电机故障及保护;

王维俭(1930-), 男, 教授, 长期从事电气主设备继电保护的教学和科研工作。

## 厂网分开 打破垄断 中国国家电力公司拆分重组成 11 家

中国电力新组建(改组)公司成立大会 2002 年 12 月 29 日上午在人民大会堂召开。中共中央政治局委员、国家计委主任曾培炎出席大会并作了讲话。

曾培炎说,中国电力新组建(改组)的 11 家公司正式宣告成立,实现了厂网分开,引入了竞争机制,这是我国电力体制改革的重要成果,它标志着电力工业在建立社会主义市场经济体制,加快社会主义现代化建设的宏伟事业中,进入了一个新的发展时期。

新成立的电力公司包括:国家电网公司、中国南方电网有限公司、中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司、中国电力投资集团公司、中国电力工程顾问集团公司、中国水电工程顾问集团公司、中国水利水电建设集团公司和中国葛洲坝集团公司。