

多次同步异频法测量地网接地电阻

贾 超^{1,2}, 胡志坚^{1,2}, 方佳丞^{1,2}

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 使用异频法测量地网工频接地电阻时, 电流极引线中的异频电流会在电压极引线上同时感应出感性电压和阻性电压。当测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路时, 架空线路与测量回路间的异频电磁耦合效应也会对测量结果产生影响。因此提出利用多次同步异频法测量大型地网接地电阻, 该方法能够减少电压极引线上的异频感应电压对测量结果的影响。仿真结果表明多次同步异频法在各种不同的工况下均能得到准确的接地电阻值。

关键词: 大型地网; 接地电阻; 异频法; 平行架空线路; 多次同步测量; 测量

中图分类号: TM 751

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.026

0 引言

变电站的接地网在保证设备安全工作和现场人员人身安全方面起着重要作用^[1-6], 接地电阻值是衡量接地网是否合格的重要依据。大型地网占地面积大, 测量时电流极、电压极位置距变电站较远, 布线很不方便, 通常停运一回架空线路并利用架空线路的两相分别作为电流极引线和电压极引线。

异频法用于测量地网接地电阻, 能够很好地克服地中工频干扰电流对测量结果的影响, 因此得到了广泛应用, 基于异频法的接地电阻测量设备也非常成熟^[7-8]。但是在如何消除引线间的感应电压对测量结果的影响这一问题上, 学者们提出了不同方法。文献[9]通过电压和电流间的相位差消除影响, 前提是接地电阻为纯阻性, 但是大型地网接地电阻的电抗分量不容忽视^[10-11]; 文献[12]建议利用 180° 、 90° 布线消除影响, 但实际测量中有时限于现场条件, 这一条件很难满足; 文献[13-14]使用理论计算公式计算出引线间的互阻抗^[15-16]来消除影响, 但电流极引线和电压极引线相对大地的几何位置并非在引线全长一致, 计算中使用的土壤模型也不能保证与实际情况相同。

现有异频测量方法在考虑电压极引线上的干扰电压时, 只考虑了电流极引线中的异频电流在电压极引线上的感性感应电压, 并未考虑电流极引线中的异频电流在电压极引线上的阻性感应电压。此外, 当

测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路时, 测量回路与平行架空线路之间的异频电磁耦合效应也会对测量结果产生影响。

本文给出了使用异频法测量地网接地电阻时, 测量回路周围无架空线路和有中性点接地系统的平行架空线路这 2 种情况下, 电压测量点测得电压的准确表达式。在此基础上, 本文提出利用多次同步异频测量法来消除电流极引线和中性点接地系统的平行架空线路在电压极引线上的异频感应电压对测量结果的影响, 并可同时求得接地电阻的阻性分量和感性分量, 仿真结果表明该方法正确有效。

1 电压极引线上的干扰电压

1.1 测量回路周围无架空线路

图 1 给出了利用直线三极法测量接地电阻的接线方式。

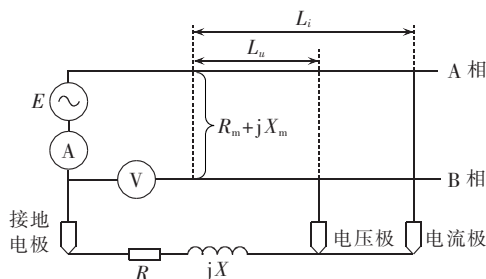


图 1 直线三极法接地电阻测量接线方式

Fig.1 Wiring mode of three straight leads method for grounding resistance measuring

图 1 中, 使用停运线路的 A 相和 B 相分别作为电流极引线和电压极引线; L_i 、 L_u 分别为电流极引线和电压极引线的长度; E 为异频电源, 记异频电源的频率为 f ; R 、 X 分别为异频频率 f 下接地电阻 R_g 的阻性分量和感性分量, 记 $R_g = R + jX$ (实际上应为接地阻抗, 考虑到表述的一致性, 仍采用接地电阻一词,

收稿日期: 2014-03-18; 修回日期: 2015-01-04

基金项目: 国家教育部博士点基金资助项目(20110141110032); 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室资助项目(EIPE13205)

Project supported by the Doctoral Fund of Ministry of Education of China(20110141110032) and State Key Laboratory of Electrical Insulation of Power Equipment, Xi'an Jiaotong University(EIPE13205)

下文同); R_m 、 X_m 分别为异频频率 f 下 A 相、B 相单位长度的互电阻和互电抗,记 $Z_m=R_m+jX_m$ 。

测量时,电压测量点测得的电压如式(1)所示。

$$U=IR_g+IZ_mL_u=U_g+U_m \quad (1)$$

其中, $U_g=IR_g$; $U_m=IZ_mL_u$; U 、 I 分别为同步采样得到的电压数据和电流数据经过滤波处理后的异频电压相量和异频电流相量。

由式(1)知,电压表测得的电压由两部分组成:第一部分为异频电流在异频接地电阻上的电压降;第二部分为电流极引线中的异频电流在电压极引线上的感应电压,即电压极引线上的干扰电压,如式(2)所示。

$$U_m=IZ_mL_u=I(R_m+jX_m)L_u \quad (2)$$

由式(2)可知,电流极引线对电压极引线的干扰电压由互电阻 R_mL_u 和互电抗 jX_mL_u 产生。

测量大型地网的工频接地电阻时,通常停运 1 回低压线路作为测量回路,低压输电线路电气参数中电阻的占比较大,如果不考虑电流极引线和电压极引线间的互电阻,可能对接地电阻的测量带来较大误差。

1.2 测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路

电压极引线、电流极引线所在测量回路周围存在平行架空线路,且该线路所在系统为中性点接地系统时(本节中架空线路均指中性点接地系统的平行架空线路),平行架空线路与测量回路间的异频电磁耦合效应也会对测量结果产生影响。

以存在单回平行架空线路为例,记 Z_s 为异频频率 f 下架空线路每相导线的自阻抗, Z_{m1} 为异频频率 f 下电流极、电压极引线与架空线路每相导线间的互阻抗, Z_{m2} 为异频频率 f 下架空线路任意两相导线间的互阻抗,则有:

$$\begin{cases} I_1Z_sL+I_2Z_{m2}L+I_3Z_{m2}L+IZ_{m1}L_i=0 \\ I_1Z_{m2}L+I_2Z_sL+I_3Z_{m2}L+IZ_{m1}L_i=0 \\ I_1Z_{m2}L+I_2Z_{m2}L+I_3Z_sL+IZ_{m1}L_i=0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为 A、B、C 相架空线路中感应的异频电流; L 为架空线路长度。

测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路时,图 1 中电压测量点测得电压如式(4)所示。

$$U=IR_g+IZ_mL_u+I_1Z_{m1}L_u+I_2Z_{m1}L_u+I_3Z_{m1}L_u \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得:

$$U=IR_g+IL_uZ_m+kIL_u^2Z'_m=U_g+U_m \quad (5)$$

$$U_g=IR_g, \quad U_m=IL_uZ_m+kIL_u^2Z'_m$$

$$k=\frac{L_i}{L_u}, \quad Z'_m=-\frac{3Z_{m1}^2}{(Z_s+2Z_{m2})L}$$

由式(5)可知,测量接地电阻时,测量回路周围存在平行架空线路的情况下,图 1 电压测量点测得

的电压由三部分组成:第一部分为异频电流在异频接地电阻上的电压降;第二部分为电流极引线中的异频电流在电压极引线上的感应电压;第三部分为架空线路中的异频电流在电压极引线上的感应电压。第二部分和第三部分共同组成了电压极引线上的干扰电压。

由式(1)、(5)可知,在测量回路周围无平行架空线路和有平行架空线路这 2 种情况下,图 1 中电压测量点测得的电压便有了统一的形式。

2 多次同步异频测量法

工程中测量地网接地电阻时,引线长度为几百米至几千米,这种短线路的数学模型可以用 Π 型线等效。使用异频法测量接地电阻时,所加异频电压非常小,线路的电容效应可以忽略不计。

2.1 测量回路周围无架空线路

测量回路周围无架空线路时,可通过 2 次同步异频测量得到的测量数据计算异频频率下地网的异频接地电阻。

第 1 次同步异频测量时,利用温纳四极法测得的视在电阻率、地网结构、电流极位置等数据计算得到电压极补偿位置^[13]。记电压极引线长度为 L_{u1} ,从电压测量点和电流测量点同步测得电压数据和电流数据,经信号处理后,求出异频频率下的电压相量 U_1 、电流相量 I_1 ,且存在如下关系:

$$U_1=I_1R_g+I_1Z_mL_{u1} \quad (6)$$

第 2 次同步异频测量时,接线方式仍如图 1 所示。改变电流极位置,采用新的电流极位置数据计算得到新的电压极补偿位置。记电压极引线长度为 L_{u2} ,测量方法和第 1 次测量时的方法相似,则异频频率下的电压相量 U_2 、电流相量 I_2 的关系如式(7)所示。

$$U_2=I_2R_g+I_2L_{u2}Z_m \quad (7)$$

由式(6)、(7)即可解得异频接地电阻 R_g 如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} R_g \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & I_1L_{u1} \\ I_2 & I_2L_{u2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2 测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路

测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路时,可通过 3 次异频同步测量得到的数据计算得到异频频率下地网的异频接地电阻。

3 次同步异频测量的方法与 2.1 节中相似。记 3 次测量中,电压极引线的长度分别为 L_{u1} 、 L_{u2} 、 L_{u3} ,电流极引线长度分别为 k_1L_{u1} 、 k_2L_{u2} 、 k_3L_{u3} ,则 3 次测量得到的电压相量、电流相量的关系如式(9)所示。

$$\begin{cases} U_1=I_1R_g+I_1L_{u1}Z_m+k_1I_1L_{u1}^2Z'_m \\ U_2=I_2R_g+I_2L_{u2}Z_m+k_2I_2L_{u2}^2Z'_m \\ U_3=I_3R_g+I_3L_{u3}Z_m+k_3I_3L_{u3}^2Z'_m \end{cases} \quad (9)$$

其中, U_1 、 U_2 、 U_3 和 I_1 、 I_2 、 I_3 分别为 3 次测量中从电压测量点和电流测量点同步测得的电压数据和电流数据经信号处理后得到的异频频率下的电压相量和电流相量。由式(9)可解得异频接地电阻 R_g 如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} R_g \\ Z_m \\ Z'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & I_1L_{u1} & k_1I_1L_{u1}^2 \\ I_2 & I_2L_{u2} & k_2I_2L_{u2}^2 \\ I_3 & I_3L_{u3} & k_3I_3L_{u3}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

在求解式(8)、式(10)时,为了保证系数矩阵为满秩阵,可以在改变电流极、电压极引线长度时,同时改变异频电源的输出电流。

求得 2 种异频频率(异频频率宜在 40~60 Hz 范围内^[17])下的接地电阻后,可以利用插值方法计算得到地网的工频接地电阻。

3 仿真实验

在 PSCAD 中搭建仿真模型,对提出的多次同步异频法计算接地电阻的方法进行验证。仿真时,接地电阻使用图 1 所示电阻、电抗的形式;异频接地电阻设定值为: $f=45\text{ Hz}$ 时, $R_g=0.29+j0.135\text{ }\Omega$; $f=55\text{ Hz}$ 时, $R_g=0.31+j0.1650\text{ }\Omega$ 。取 2 个异频接地电阻的平均值为工频接地电阻,即工频接地电阻设定值为 $0.3+j0.15\text{ }\Omega$ 。

大地中的工频干扰电流为 20 A 的情况下^[18-20],测量回路周围无架空线路时,利用本文所提方法得到的仿真数据及其计算结果如表 1 所示;测量回路周围存在长度为 10 km 的平行架空线路,且平行架空线路与测量回路的水平间距为 10 m 时,利用本文所提方法得到的仿真数据及其计算结果如表 2 所示。

从表 1、2 中可以看出,在大地工频干扰电流为异

频电流的 4~5 倍的情况下,利用本文方法计算得到的工频接地电阻,与对应频率下的设定值的实部误差和虚部误差均在 1% 以内,这说明本文所提多次同步异频测量方法在测量回路周围无架空线路和存在中性点接地系统的平行架空线路这 2 种情况下都是正确的。

仅改变平行架空线路与测量回路水平间距,其他仿真条件与表 2 中相同的情况下,本文方法与传统方法(利用公式计算消去互阻抗的方法^[15-16],下同)的计算结果如表 3 所示。

表 3 平行架空线路与测量回路的水平间距不同时,本文方法和传统方法的仿真计算结果

Table 3 Results of simulative calculation by proposed and traditional methods for different horizontal distances between overhead line and measuring circuit

水平间距/m	接地电阻计算值/ Ω	
	本文方法	传统方法
10	0.3017+j0.1493	0.2637+j0.0804
15	0.2985+j0.1482	0.2661+j0.0939
20	0.3016+j0.1493	0.2682+j0.1025
30	0.3026+j0.1482	0.2711+j0.1132
40	0.2994+j0.1486	0.2731+j0.1201
50	0.3010+j0.1480	0.2746+j0.1251
70	0.3002+j0.1503	0.2769+j0.1319
100	0.2976+j0.1508	0.2792+j0.1382
150	0.2972+j0.1508	0.2816+j0.1442
200	0.2989+j0.1478	0.2833+j0.1477

由表 3 可知,在测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路时,在不同的架空线路与测量回路的水平间距下,本文所提方法计算得到的工频接地电阻实部、虚部误差均在 1% 以内。图 2 给出了传统方法的计算结果与设定工频接地电阻的模值误差、实部误差和虚部误差随架空线路与测量回路的水平间距的变化。

从图 2 可以看出,当平行架空线路的长度固定不变时,传统方法计算得到的工频接地电阻值与设

表 1 测量回路周围无架空线路时的仿真计算结果

Table 1 Results of simulative calculation without overhead lines around measuring circuit

测量 次数	L_i/L_u	L_u/km	$f=45\text{ Hz}$		$f=55\text{ Hz}$	
			电流相量/A	电压相量/V	电流相量/A	电压相量/V
第 1 次	5/3	1.8	$4.6689\angle 133.3^\circ$	$4.1927\angle -166.9^\circ$	$4.6143\angle 132.5^\circ$	$4.3103\angle -167.8^\circ$
第 2 次	5/3	2.1	$4.2024\angle 131.0^\circ$	$4.2207\angle -167.4^\circ$	$4.1576\angle 130.3^\circ$	$4.3257\angle -168.3^\circ$
异频接地电阻计算值/ Ω			0.2901+j0.1350		0.3097+j0.1650	
工频接地电阻计算值/ Ω			0.2999+j0.1500			

表 2 测量回路周围存在平行架空线路时的仿真计算结果

Table 2 Results of simulative calculation with overhead lines around measuring circuit

测量 次数	L_i/L_u	L_u/km	$f=45\text{ Hz}$		$f=55\text{ Hz}$	
			电流相量/A	电压相量/V	电流相量/A	电压相量/V
第 1 次	5/3	1.8	$9.8055\angle 135.0^\circ$	$7.8613\angle -167.2^\circ$	$9.6852\angle 134.2^\circ$	$8.1157\angle -168.1^\circ$
第 2 次	5/3	2.1	$8.9323\angle 133.1^\circ$	$7.7914\angle -167.8^\circ$	$8.8315\angle 132.4^\circ$	$8.0234\angle -168.7^\circ$
第 3 次	5/3	2.4	$8.2138\angle 131.6^\circ$	$7.7033\angle -168.3^\circ$	$8.1277\angle 130.9^\circ$	$7.9172\angle -169.1^\circ$
异频接地电阻计算值/ Ω			0.2916+j0.1344		0.3118+j0.1642	
工频接地电阻计算值/ Ω			0.3017+j0.1493			

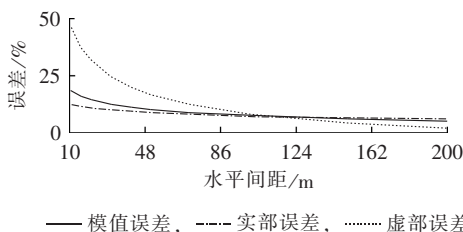


图 2 平行架空线路与测量回路的水平间距不同时,传统方法的误差

Fig.2 Curves of error vs. horizontal distance between overhead line and measuring circuit for traditional method

定值的模值误差、实部误差和虚部误差均随着水平间距的增大呈减小的趋势,其中虚部误差减小速度快,模值误差和实部误差减小速度较慢。仿真结果表明,长度为 10 km 的平行架空线路,当其距离测量回路的水平间距为 200 m 时,利用传统方法计算得到的工频接地电阻实部误差为 5.6%,虚部误差为 1.5%。这一仿真结果与式(5)中, Z_{m1} 减小后,电压极引线上干扰电压的第三部分变小是一致的。

仅改变平行架空线路长度,其他仿真条件与表 2 中相同的情况下,本文方法与传统方法的仿真计算结果如表 4 所示。由表 4 可知,本文方法在不同的平行架空线路长度下,均能得到准确的异频接地电阻值,且其实部、虚部误差均在 1% 以内。

表 4 不同的平行架空线路长度下,本文方法和传统方法的仿真计算结果

Table 4 Results of simulative calculation by proposed and traditional methods for different lengths of parallel overhead line

平行架空线路 长度/km	实部计算结果/ Ω		虚部计算结果/ Ω	
	本文方法	传统方法	本文方法	传统方法
10	0.3017	0.2637	0.1493	0.0804
20	0.3004	0.2693	0.1517	0.1211
30	0.3014	0.2725	0.1461	0.1349
40	0.2984	0.2743	0.1440	0.1419
50	0.3028	0.2755	0.1483	0.1460

图 3 给出了表 4 中传统方法计算得到的工频接地电阻与设定值的模值误差、实部误差和虚部误差随平行架空线路长度的变化。

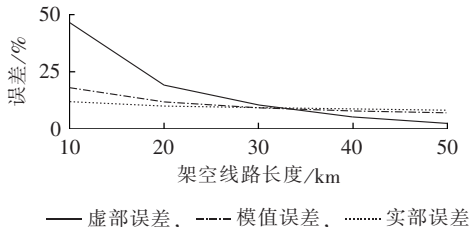


图 3 不同的平行架空线路长度下,传统方法的误差

Fig.3 Curves of error vs. overhead line length for traditional method

从图 3 可知,当平行架空线路与测量回路间的水平间距固定不变时,传统方法计算的工频接地电

阻值与设定值的模值误差、实部误差和虚部误差均随着架空线路长度的增大呈减小的趋势,其中虚部误差减小速度快,模值误差和实部误差减小速度较慢;平行架空线路的长度为 50 km 时,传统方法计算得到的工频接地电阻实部误差为 8.1%、虚部误差为 2.6%。这一仿真结果与式(5)中, L 增大后,电压极引线上干扰电压的第三部分变小是一致的。

图 4 给出了平行架空线路与测量回路的水平间距不同时,传统方法计算得到的工频接地电阻值与设定值的虚部和实部误差随平行架空线路长度的变化。

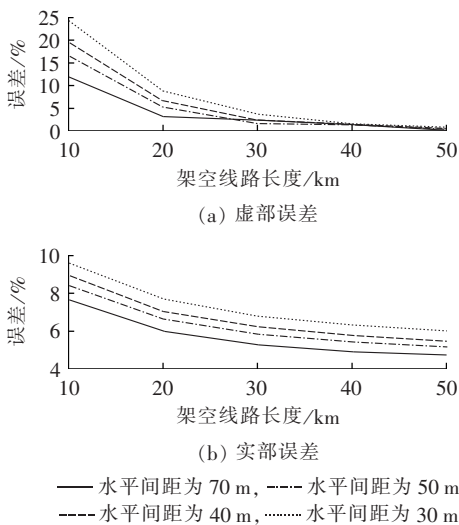


图 4 平行架空线路与测量回路的水平间距不同时,传统方法的误差随平行架空线路长度的变化

Fig.4 Curves of error of traditional method vs. overhead line length for different horizontal distances between overhead line and measuring circuit

从图 4 可知,平行架空线路长度为 50 km 时,在不同的水平间距下,利用传统方法计算得到的工频接地电阻的虚部误差均已下降到 1% 以内;实部误差随架空线路长度以及水平间距的增大而下降的速度较慢,70 m 的水平间距下,平行架空线路长度为 50 km 时,实部误差仍有 5%。

上述仿真结果说明,测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路时,架空线路与测量回路间的异频电磁耦合会对测量结果会产生影响。传统方法只考虑了电压极引线和电流极引线间的异频电磁耦合效应对测量结果的影响,并没有考虑平行架空线路与测量回路间的电磁耦合效应。传统方法计算得到的工频接地电阻误差随着架空线路长度的增大以及水平间距的增大呈减小的趋势,当平行架空线路的长度大于 50 km 时,可以不考虑平行架空线路与测量回路间的异频电磁耦合效应对接地电阻虚部计算值造成的影响,但是这种异频电磁耦合效应对接地电阻实部计算值造成的影响不能忽略。

4 结论

a. 使用异频法测量地网工频接地电阻时,当测量回路周围存在中性点接地系统的平行架空线路时,架空线路与测量回路间的异频电磁耦合效应对测量结果产生影响。

b. 提出了测量回路周围无架空线路和存在架空线路这2种情况下,能够准确测量计算地网接地电阻的多次同步异频法及其计算公式。

c. 仿真结果表明,在不同的平行架空线路与测量回路水平间距下,当架空线路的长度大于50 km时,可以不考虑平行架空线路与测量回路间的异频电磁耦合效应对接地电阻虚部计算值产生的影响,但是这种异频电磁耦合效应对接地电阻实部计算值产生的影响不能忽略。

d. 提出的多次同步异频测量法同时考虑了电流极引线 and 测量回路周围中性点接地系统平行架空线路在电压极引线上的异频感应电压,仿真结果表明该方法测量结果准确。

参考文献:

- [1] 陈仕龙,束洪春,甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换向失败及控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):128-133.
CHEN Shilong,SHU Hongchun,ZHEN Ying. Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):128-133.
- [2] 雷将锋,彭敏放,沈美娥,等. 基于云遗传算法的接地网优化设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):119-123.
LEI Jiangfeng,PENG Minfang,SHEN Meie,et al. Optimal design of grounding grid based on cloud genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):119-123.
- [3] 杨鑫,李卫国,李景禄. 变电站内短路时架空地线分流系数的计算方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):107-110.
YANG Xin,LI Weiguo,LI Jinglu. Calculation of overhead ground line shunt coefficient for substation grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):107-110.
- [4] 罗隆福,向博,许加柱,等. 10 kV 小电阻接地系统单相接地故障时的跨步电压仿真与试验研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):21-26.
LUO Longfu,XIANG Bo,XU Jiazhuzhu,et al. Simulation and test of step voltage caused by single-phase grounding fault of 10 kV system earthed with low resistance[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):21-26.
- [5] 何智强,文习山,张科,等. 基于遗传算法的变电站接地网优化[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):27-31.
HE Zhiqiang,WEN Xishan,ZHANG Ke,et al. Optimization of substation grounding grid design base on genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):27-31.
- [6] 刘杰,何为,杨帆. 基于DDS技术的可调频调幅激励源的设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):146-149.
LIU Jie,HE Wei,YANG Fan. Design of exciting source with adjustable frequency and amplitude based on DDS technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):146-149.
- [7] 张晓东,丁峰. 一种实用的接地电阻测量方法[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):60-62.
ZHANG Xiaodong,DING Feng. A practical grounding resistance measurement method[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(8):60-62.
- [8] 倪伟,张粤. 多功能接地电阻测量装置设计[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):120-123.
NI Wei,ZHANG Yue. Multi-functional grounding resistance measuring equipment[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):120-123.
- [9] 周文俊,汪广武. 有效消除地网干扰的接地电阻变频测量法[J]. 高电压技术,1998,24(3):51-53.
ZHOU Wenjun,WANG Guangwu. An effective method of removing grounding grid interference-grounding resistance frequency conversion measurement[J]. High Voltage Engineering,1998,24(3):51-53.
- [10] 鲁志伟,常树生,李越,等. 大型变电站接地网接地阻抗与接地电阻的差异[J]. 高电压技术,2005,31(1):14-16.
LU Zhiwei,CHANG Shusheng,LI Yue,et al. Difference between the grounding impedance and grounding resistance of large substation grounding grids[J]. High Voltage Engineering,2005,31(1):14-16.
- [11] 张波,蒋愉宽,杨建军,等. 接地材料对大型水电站接地阻抗的影响[J]. 高电压技术,2013,39(4):964-969.
ZHANG Bo,JIANG Yukuan,YANG Jianjun,et al. Influence of the ground material on the ground impedance of large scale hydropower plant [J]. High Voltage Engineering,2013,39(4):964-969.
- [12] 李谢森. 异频法测量大型地网接地电阻的研究[J]. 高电压技术,2000,26(3):37-39.
LI Shusen. The research of the large scale grids resistance measurement[J]. High Voltage Engineering,2000,26(3):37-39.
- [13] 黄锐锋,李琳,张波,等. 变电站接地网接地电阻近距离测法与系统开发[J]. 高电压技术,2005,30(9):27-29.
HUANG Ruifeng,LI Lin,ZHANG Bo,et al. Novel method for measuring the grounding resistance of the substation grid with short leads and system development[J]. High Voltage Engineering,2005,30(9):27-29.
- [14] ZENG R,HE J,GUAN Z. Novel measurement system for grounding impedance of substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(2):719-725.
- [15] DERI A,TEVAN G,SEMLYEN A,et al. The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1981(8):3686-3693.
- [16] ROGERS E J,WHITE J F. Mutual coupling between finite lengths of parallel or angled horizontal earth return conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(1):103-113.
- [17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T475—2006 接地装置特性参数测量导则[S]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [18] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京:中国电力出版社,1991:176-177.
- [19] 田宝江,张太升,陈军,等. 不平衡零序电流对纵联零序保护的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化,2013,37(19):132-135.
TIAN Baojiang,ZHANG Taisheng,CHEN Jun,et al. Analysis of influence of unbalanced zero-sequence current on pilot zero-

sequence protection and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 132-135.

- [20] 王建成, 张涛, 王奇文, 等. 秦山第二核电厂 500 kV 出线三相电流不平衡现象的测试及分析[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 76-80. WANG Jiancheng, ZHANG Tao, WANG Qiwen, et al. Testing and analysis of three phase current unbalance at 500 kV outlet of the 2nd Qinshan nuclear power plant[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 76-80.

作者简介:

贾 超(1988—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向



贾 超

为输电线路参数测量、电力系统继电保护 (E-mail: chao_jia@whu.edu.cn);

胡志坚(1969—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源接入与分布式发电、输电线路参数带电测量等 (E-mail: zhijian_hu@163.com);

方佳丞(1987—), 男, 湖北咸宁人, 博士研究生, 研究方向为分布式电源的配电网优化重构 (E-mail: jiacheng_fang@126.com)。

Repeated synchronous non-power-frequency method for measuring grounding resistance of grounding grid

JIA Chao^{1,2}, HU Zhijian^{1,2}, FANG Jiacheng^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation of Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: When the non-power-frequency method is applied to measure the grounding resistance of grounding grid, the induced reactive voltage and resistive voltage will be generated on the voltage electrode lead due to the non-power-frequency current in the current electrode lead. When there are parallel overhead lines of neutral grounding system around the measuring circuit, the measurement is influenced due to the electromagnetic coupling effect between the overhead lines and the measuring circuit. The repeated synchronous non-power-frequency method is proposed to measure the grounding resistance of grounding grid, which reduces the influence of the induced non-power-frequency voltage of voltage electrode lead on the measurement. Simulative results show that the accurate measurement can be obtained under different operational conditions.

Key words: large grounding grid; grounding resistance; non-power-frequency method; parallel overhead lines; repeated synchronous measuring; measurements

(上接第 166 页 continued from page 166)

Improved principle of LC detuning protection for static blocking filter

ZHANG Qixue¹, XU Baoli¹, CAO Tianzhi², HUANG Tianxiao², LI Xuan²,

ZHANG Xiaoyu³, NIU Pengfei³

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China;

3. Inner Mongolia Datang International Tuoketuo Power Generation Co., Ltd., Hohhot 010206, China)

Abstract: The CR(Current Ratio) of reactor current to capacitor current is adopted as the criterion of LC detuning protection for static blocking filter, which may fluctuate when the currents contains SSO (SubSynchronous Oscillation) or non-periodic components. Analysis shows that, the difference between reactor current fluctuation and capacitor current fluctuation causes CR fluctuation. An improved algorithm is proposed for CR calculation, which applies the difference operation to convert the reactor current to the equivalent capacitor current and then calculates CR. Simulative results show that the CR calculated by the improved algorithm is lightly influenced by SSO or non-periodic components, which improves the sensitivity of LC detuning protection and makes the time delay setting reduced from 10~20 s to 0.5~2.0 s.

Key words: steam turbines; subsynchronous oscillation; static blocking filter; detuning protection; relay protection; current ratio; differential algorithm