

基于组合波工程化测量消除引线互感的 接地阻抗测量方法

张云¹, 李谦², 胡晓晖³, 肖云¹

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东惠州 516003;

2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080;

3. 武汉市康达电气有限公司, 武汉 430070)

摘要:以正弦波电流为激励信号测量接地网接地阻抗时, 由于电压线、电流线之间不可避免的存在平行共线, 由此产生的互感耦合会导致接地阻抗测量结果偏高, 影响接地网安全性能评估; 为解决此问题, 提出了一种基于组合波工程化测量消除引线互感的接地阻抗测量方法, 用方波电流测量接地阻抗电阻分量, 用正弦波测量接地阻抗模值, 在测量现场通过改变平行共线距离获得不同互感耦合强度的测量值, 解析剔除互感耦合分量后, 获得准确的接地阻抗测量值; 在 110 kV 变电站现场通过夹角法、反向法测量, 并与土壤分层的接地网模型仿真结果对比, 组合波工程化测量结果与接地阻抗仿真值误差仅为 1%。

关键词: 接地网; 接地阻抗; 互感耦合; 组合波

Ground Impedance Measurement Method based on Combined Wave Field Measurement to Eliminate Mutual Inductance

ZHANG Yun¹, LI Qian², HU Xiaohui³, XIAO Yun¹

(1. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Huizhou 516003, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

3. Wuhan Kangda Electric Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: Due to the inevitable parallel co-linearity between voltage lines and current lines, sine wave current signal is excited to measure the grounding impedance of grounding grid, the resulting mutual inductance will lead to the high grounding impedance, and the safety performance evaluation of grounding grid is affected. In order to solve this problem, a grounding impedance measurement method based on combined the wave measurement to eliminate the lead mutual inductance is proposed. The grounding impedance resistance component is measured with the square wave current, and the grounding impedance modulus is measured with the sine wave current. The measured values of different mutual inductance coupling strength are obtained by changing the parallel co-linear distance for the field measurement. After the mutual inductance coupling component is analytically eliminated, the accurate grounding impedance measurements can be obtained. Comparing the grounding grid measurement results at the 110 kV substation site by the angle method, and the reverse method with the simulation results based on the layered soil model, the error between the combined wave method measurement results and the simulation value of grounding impedance is only 1%.

Keywords: grounding grid; ground impedance; mutual coupling; combined wave

0 引言

随着电网向特高压、大容量和远距离方面的发展, 电力系统的安全运行日益重要, 为了提高电网的可靠性保证正常供电, 变电站接地装置对于保证电力系统的可靠运行起着至关重要的作用^[1-2]。接地参数测量是电力系统接地工程

竣工验收的重要环节。接地测量值的准确与否关系到电力工程能否如期投运, 以及后期是否需要采取降阻措施以改善接地参数。变电站接地阻抗测量中, 由于试验方法和地形的局限性, 电压线和电流线的布线经常并行, 电流线与电压线之间的互感耦合是不可避免^[3-4]且不可忽略的^[5-6]。

对于接地阻抗测试中的互感耦合影响研究由来已久,

收稿日期:2021-09-16; 修回日期:2021-11-02。

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20185511)。

作者简介:张云(1980-),男,福建寿宁人,硕士,高级工程师,主要从事电气试验、输变电设备状态监测及故障诊断方向的研究。

李谦(1965-),男,广西南宁人,博士,教授级高级工程师,主要从事过电压与绝缘配合、防雷接地方向的研究。

肖云(1973-),男,安徽淮北市人,硕士,高级工程师,主要从事电气试验及输变电一次设备状态监测方向的研究。

通讯作者:胡晓晖(1981-),男,湖北武汉人,博士,高级工程师,主要从事绝缘、防雷、接地工程测试与测量仪器开发方向的研究。

引用格式:张云,李谦,胡晓晖,等. 基于组合波工程化测量消除引线互感的接地阻抗测量方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 74-80.

对其做过很多试验与研究。除了现场采取注意电流电压线放线方式上尽量远离避免互感影响外,学者们还提出了不同的方法^[7-11]。公式补偿法^[12]通过构建电流电压线的互感计算模型,通过土壤电阻率可以计算出由于互感耦合引起的电阻分量实部误差以及电抗分量虚部误差,但该方法不具备现场操作性。由于现场环境复杂多样,土壤分布不均匀,实际土壤电阻率无法准确测量估算,导致估算的互感抗误差比较大,甚至会出现互感分量估算值大于感抗分量测量值的情况。

另有基于异频法测量值修正的方法^[13],通过观察每次移动后不同位置时测量值的变化,即可得到单位长度对应的电压线和电流线之间的互感变化量。用测试点对应的电感量减去互感变化量与并线长度的乘积,即可得地网自感抗。此方法的一个前提条件是异频法测量的接地阻抗实部 R 不受互感耦合影响。由于异频法测试仪使用交流正弦电流作为激励信号,且测试仪的直接测量值为电流幅值 I_m 、电压幅值 U_m 以及电流电压之间的相角 θ ,因此接地阻抗模值 Z 、实部 R 和虚部 X 都是通过电压、电流幅值和相角间接计算得到的。基于以上测量原理,测试线间的互感耦合分量 M 不仅会引起电压测量误差 ΔU ,还会引起相角测量误差 $\Delta\theta$,所以间接计算的阻抗模值 Z 、实部 R 和虚部 X 都会含有与互感 M 相关的误差,导致基于异频测量值修正的方法在现场并不可行。

因而,如何在测量方法中剔除互感成分,真实保留接地网接地阻抗电感分量,并获得接地阻抗准确结果,成为迫切需要解决的问题。

针对以上问题,本文提出了基于组合波的工程化测量方法解决互感耦合分量对接地阻抗测量结果的影响。首先向接地网施加方波电流激励,以克服互感耦合影响准确获得接地阻抗阻性分量测量值 R 。然后向接地网施加正弦波电流激励获得接地阻抗模值测量值 Z ,并计算得到含有互感耦合分量的接地阻抗的感抗分量 X 。在测量现场改变电压线和电流线并行距离,得到在不同互感耦合强度情况下的组合波接地阻抗测量值,并建立测量值与测试线并行长度的方程组,解析剔除互感耦合分量,即可得到接地网接地阻抗的准确测量值。仿真计算及现场测试结果表明,本文提出的基于组合波的工程化测量方法能准确地获得不受互感耦合影响的接地阻抗测量值,对提高电力系统的安全运行水平具有重要的理论和工程意义。

1 基于组合波消除互感分量的接地阻抗测量方法

1.1 基于组合波的接地阻抗测量方法

目前常用的接地阻抗测量方法,无论是工频法还是异频法均使用正弦波电流作为激励信号,当现场电流电压线平行共线有互感耦合时不可避免会产生测量误差。为避免互感耦合的影响,《DL/T 475—2017 接地装置特性参数测量导则》^[14]推荐使用交变直流的方波电流测量土壤电阻率,特别是测量深层土壤时,电流线和电压线平行共线距

离可长达数百米,使用方波电流可以有效克服互感耦合对接地电阻测量的影响。

方波电流不仅可以用来测量土壤电阻率的视在接地电阻,而且研究表明^[15],用在工频附近频率的方波电流测量的电阻值与工频接地阻抗的实部是等效的。基于此思路,本文提出基于方波和正弦波的组合波电流测量接地网接地阻抗的方法。该方法按一定顺序给接地网注入交变直流的方波电流和异频正弦波电流,首先在方波电流激励下持续一段时间,测量响应电压的稳态信号,从而计算得到接地阻抗的电阻分量测量值 R ;然后在正弦波电流激励下持续一段时间,测量相应电压的稳态信号,从而计算得到接地阻抗的模值 Z ;最后基于接地阻抗的电阻分量和模值,计算得到接地阻抗的电抗分量 X 和相角 θ 。基于组合波的接地阻抗测量流程如图1所示。

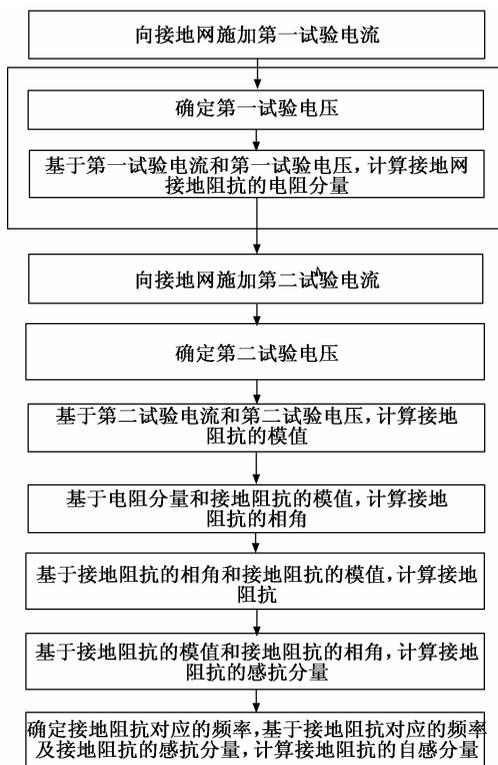


图1 基于组合波的接地阻抗测量流程

此方法与异频法的差异在于,接地阻抗参数中独立测量值是接地阻抗电阻分量 R 和接地阻抗模值 Z ,由于电阻分量是基于方波电流测量得到的,从原理上不受现场互感耦合的影响,可以保证接地电阻分量测量是准确的。进一步,接地阻抗的模值 Z 和电抗分量 X 测量值中虽然包含互感耦合分量,但由于 R 测量值不受互感耦合分量影响,可以建立互感耦合分量与现场共线距离的关系,为从接地阻抗测量值中剔除互感耦合分量提供了一种可能性。

1.2 基于工程化测量消除互感耦合分量的方法

现场工程化测量消除互感耦合分量的方法如下:首先给接地网施加交变直流,可实现接地网接地阻抗的电阻性

分量的准确测量。基于不受互感影响的参数 R ，再施加正弦波电流激励进行感性分量测量，通过改变多组电位线和电流线并行长度，得到测量响应，可获得到包含互感耦合分量和地网自感分量的接地阻抗模值测量值 Z 和感抗分量 X 。

感抗分量测量值 X 中包含接地网的自感抗和互感耦合分量。通过改变现场平行共线长度，可以建立感抗分量测量值与测试线平行共线距离的方程组。进一步对方程组解析，可以实现对感抗测量结果进行“拆解”，将互感耦合分量计算出来，从而得到剔除测量引线互感耦合影响的接地阻抗的真实值。工程化测量剔除互感耦合分量的接地阻抗测量原理示意图如图 2 所示。

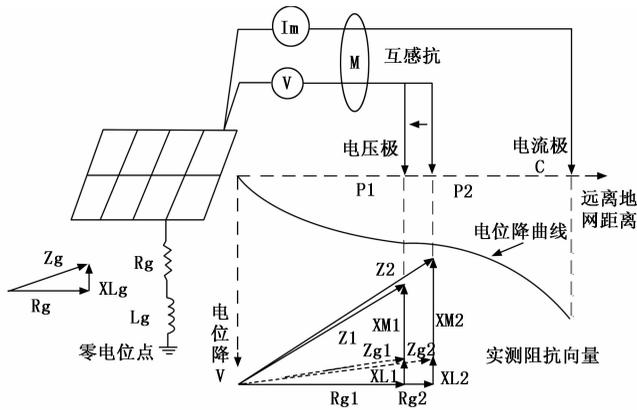


图 2 工程化剔除互感分量的接地阻抗测量示意图

基于组合波接地阻抗测量值剔除互感耦合分量的实施过程为：使用激励正弦波电流信号，可在电流极距离的 0.618 倍附近布置至少两个电压极，对应的两个测量点互感耦合强度不同且测试仪可分辨。在相同频率下，通过组合波测量接地阻抗可获得两个接地阻抗视在测量值 Z_1 与 Z_2 。通过 Z 和 R ，可以计算出接地阻抗视在测量值的电抗分量 X_1 与 X_2 ，实际测量中得到接地阻抗的感抗分量 X 来源于两部分^[16-17]，(1) 地网接地阻抗本身的电感分量 X_L (Ω)；(2) 电压、电流引线的平行互感 X_M (Ω)，则有：

$$X_1 = X_{L1} + X_{M1} \quad (1)$$

$$X_2 = X_{L2} + X_{M2} \quad (2)$$

由平行共线引起的单位长度的电感分量为^[18]：

$$\Delta X_M = 4\pi f l n \frac{80\sqrt{\rho}}{d} \times 10^{-7} (\Omega/m) \quad (3)$$

由于两个电压极距离不远，从布线的整体区域来看，电压线、电流线的等效间隔距离 d 基本不变，两个测量点对应的整体等效土壤电阻率 ρ 基本不变，测量的频率 f 不变， ΔX_M 可简化为一个常数。设电压极与电流极平行共线距离 l_1 、 l_2 ，则有：

$$X_{M1} = \Delta X_M \cdot l_1 \quad (4)$$

$$X_{M2} = \Delta X_M \cdot l_2 \quad (5)$$

自感抗与接地网的拓扑结构相关，不受布线距离影响，是个常量，则有：

$$X_{L1} = X_{L2} \quad (6)$$

而互感耦合分量则随测试线并行长度呈线性函数关系，因此，互感耦合分量 X_{M1} 、 X_{M2} 与电压极与电流极平行共线距离 l_1 、 l_2 成正比，则有：

$$\frac{X_{M1}}{X_{M2}} = \frac{l_1}{l_2} \quad (7)$$

综上得到解析剔除互感耦合的方程组如下：

$$\begin{cases} X_1 = X_{L1} + X_{M1} \\ X_2 = X_{L2} + X_{M2} \\ \frac{X_{M1}}{X_{M2}} = \frac{l_1}{l_2} \\ X_{L1} = X_{L2} \end{cases} \quad (8)$$

通过解析计算得到接地网互感抗 X_{M1} 、 X_{M2} 以及自感抗 X_L 。

$$X_{M1} = (X_2 - X_1) \frac{l_1}{l_2 - l_1} \quad (9)$$

$$X_{M2} = (X_2 - X_1) \frac{l_2}{l_2 - l_1} \quad (10)$$

$$X_L = X_{L1} = X_{L2} = \left(X_1 \frac{l_2}{l_1} - X_2 \right) \frac{l_1}{l_2 - l_1} \quad (11)$$

不受互感耦合影响的接地阻抗的电阻分量为 $R_G = (R_{G1} + R_{G2}) / 2$ 。最终便可计算得到剔除互感耦合分量的接地阻抗测量值 Z_G 。

$$Z_G = R_G + X_L \quad (12)$$

2 变电站现场测量案例

2.1 测量方案

为了验证基于组合波法的接地阻抗测试仪实测变电站接地网的有效性，以及基于组合波工程化测量方法剔除接地阻抗互感耦合分量的有效性，在某新建 110 kV 变电站进行了接地网接地阻抗的现场对比测试。测量依据为《DL/T 475-2017 接地装置特性参数测量导则》，对比测试的设备是基于组合波法研制的接地阻抗测试仪和澳大利亚红相 8 000 接地阻抗测量系统。

该 110 kV 变电站是即将投产的室内 GIS 变电站，占地面积小，主体建筑均有自身的接地网，各接地网互连接，构成变电站的接地网系统，根据变电站的卫星定位得出，110 kV 变电站地网对角线长度为 80 m。变电站的线路尚未进入变电站，无需考虑避雷线分流的影响。为了降低变电站接地阻抗，从变电站内往外打了数口斜井。考虑到斜井增大了地网对角线，相应地增大布线距离，为简化试验，暂时将斜井断开。

变电站外是一大片已经完成平整的工厂用空地，土壤较为均匀。为了验证测量接地阻抗的准确性，采用了 30° 夹角法和远离夹角法两种布线方法。场外空地最远点的距离变电站边缘为 300 m，是变电站主接地网对角线的 3 倍，将电流极、电压极布置在此片空地满足 30° 夹角法的布线要求。另外，为了验证互感耦合对实际测量的影响，在空旷的场地上通过人为布置不同耦合强度的测试线，可以获

得不同共线距离下接地阻抗和互感分量的定量测量数据, 并验证通过工程化测量消除互感耦合分量方法的效果。具体布线方案如图 3 所示。

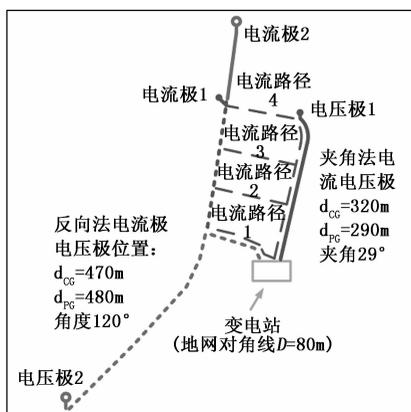


图 3 某变电站接地网测试布线路径示意图

30°夹角法的电压极布置在变电站正对面场地边缘的电压极 1 位置, 电压线沿为变电站到电压极 1 的实线路径布置。30°夹角法的电流极布置在场地靠近路边的电流极 1 位置。为了避免互感耦合的影响, 电流线从变电站出去之后, 沿红虚线所示的电流路径 1 布置。通过 GPS 测绘, 电流极 1 距离变电站 320 m, 电压极 1 距离变电站 290 m, 实际夹角为 29°, 满足布线要求。

远离夹角法的电流极为电流极 2 位置, 电流线沿电流路径 4 布置, 电压极位置为电压极 2, 电压线沿密虚线路径布置。通过 GPS 测绘, 远离夹角法的电流极 2 距离变电站 470 m, 电压极 2 距离变电站 480 m, 为地网对角线的 6 倍, 实际夹角为 120°, 满足布线要求。

基于 30°夹角法的电流极 1 和电压极 2, 除了电流路径 1 之外, 还布置了电流路径 2、3、4。电流路径 1 与电压路径先垂直, 再远距离平行, 可以认为无互感耦合, 电流路径 2~4 分别与电压路径平行一段距离, 再垂直远离至与电流路径 1 融合。通过 GPS 测绘, 电流路径 1~4 与电压路径平行的距离分别为 0 m, 126 m, 200 m, 300 m。电流线与电压线间隔距离为 2 m 左右。

2.2 接地阻抗测量数据分析

按以上方案完成现场布线后, 使用异频法红相测试仪和基于组合波的接地阻抗测试仪变换不同电流电压极和测试线路径对变电站接地网接地阻抗进行了测试。异频法和组合波法测试仪现场试验电流均为 3A, 测量数据如表 1 所示。

首先分析 30°夹角法情况下异频法和组合波法的测量数据。电流路径 1 对应是没有互感耦合的情况, 可以看到异频法与组合波法对应的 R, X, Z, θ 等测量数据是一样的。说明在没有互感耦合情况下, 组合波法测试仪的测量数据与异频法是等效的, 30°夹角法对应的接地网无互感耦合影响的测量值为 $Z_1=0.752+j0.020=0.752\angle 1.5^\circ$ 。随着电流

表 1 接地阻抗现场测量数据

布线方法及路径	测量方法	频率 / Hz	R/Ω	X/Ω	Z/Ω	θ/(°)	测试线平行距离/m
30°夹角法电流路径 1	异频法	45	0.752	0.018	0.752	1.4	0
		55	0.754	0.021	0.754	1.6	
	组合波法	0.752	0.020	0.752	1.5		
30°夹角法电流路径 2	异频法	45	0.746	0.066	0.749	5.1	126
		55	0.756	0.068	0.759	5.1	
	组合波法	0.753	0.067	0.756	5.1		
30°夹角法电流路径 3	异频法	45	0.745	0.092	0.751	7.0	200
		55	0.756	0.102	0.763	7.7	
	组合波法	0.752	0.097	0.758	7.3		
30°夹角法电流路径 4	异频法	45	0.762	0.120	0.771	8.9	300
		55	0.784	0.138	0.796	10.0	
	组合波法	0.754	0.129	0.765	9.7		
远离夹角法电流路径 4	异频法	45	0.653	0.017	0.653	1.5	0
		55	0.653	0.021	0.653	1.8	
	组合波法	0.650	0.019	0.650	1.7		

路径中平行共线距离的增加, 异频法测试仪测量数据中 R 和 Z 有少许增加, R 增加了 20 mΩ, 并且在不同频率下异频法测量的 R 并不完全相同; Z 增加了 31 mΩ, X 增加的幅度比较大, 从 20 mΩ 增加到 129 mΩ; θ 从 1.5° 增加到 9.5°。现场测量数据印证了互感耦合对异频法测试仪阻抗各分量都有影响, 而且对阻抗虚部 X 影响最大。对于组合波法测试仪, 测量数据中 R 在 4 种路径下几乎无变化, 说明使用方波测量接地阻抗的实部的确可以不受互感耦合影响。组合波法使用正弦波测量的 X, Z 值与异频法测量数据基本一致, 测量的阻抗相角比异频法偏大一点, 这是因为组合波法测量值的实部比异频法实部小所致。通过以上数据分析可以看到, 在不同互感耦合强度情况下, 基于组合波的接地阻抗测量值实部不受互感耦合影响, 但是异频法测量值的所有阻抗分量都会受互感耦合影响, 尤其是感抗部分增加幅度最大。以上现象与理论分析是一致的。

再分析远离夹角法测量数据。由于远离夹角法布线路径避免了互感耦合影响, 组合波法测量值与异频法测量值一致, $Z_2=0.650+j0.019=0.650\angle 1.7^\circ$ 。依据 DL/T 475 测量导则, 远离夹角法测量数据需要用公式 (13) 进行补偿换算得到修正之后的接地阻抗测量值。远离夹角法的电流极 2 距离变电站 470 m, 电压极 2 距离变电站 480 m, 夹角为 120°, 带入公式 (13) 可以计算得到修正系数为 0.885。

$$Z = \frac{Z}{1 - \frac{D}{2} \left[\frac{1}{d_{PG}} + \frac{1}{d_{CG}} - \frac{1}{\sqrt{d_{PG}^2 + d_{CG}^2 - 2d_{PG}d_{CG}\cos\theta}} \right]} \quad (13)$$

修正之后的远离夹角法接地阻抗测量值为 $Z_2'=0.734\Omega$ 。此修正值与 30°夹角法测量值 ($Z_1=0.752\Omega$) 相差仅为 2.4%, 说明本次接地阻抗现场布线合理, 测量值也是可信的。

2.3 接地阻抗仿真对比分析

为了进一步研究接地阻抗测量值的准确性，将测量数据与变电站接地阻抗理论计算值进行对比分析。

对变电站周围不同深度的土壤电阻率进行了测试。考虑空置场地的最大尺寸只有 300 m，温纳四极法的最大测量间距取为 100 m。这个测量间距，与接地网尺寸（对角线长度 80 m）相当，满足反映深层土壤结构的要求。土壤电阻率测量结果见表 2。根据表 2 的实测结果，利用 CDEGS 软件进行土壤反演仿真。由于变电站较小，而且周围土壤较为均匀，使用水平分层模型进行土壤电阻反演，发现变电站场区土壤可以用 4 层水平分层土壤来描述，仿真结果详见表 3。

表 2 土壤电阻率测量数据

a/m	1	2	3	5	10
R/Ω	204.00	115.20	36.00	11.50	3.42
$\rho/(\Omega \cdot m)$	1 281.12	1 446.91	678.24	36.1.10	214.78
a/m	20	40	60	80	100
R/Ω	2.66	1.54	0.86	0.52	0.50
$\rho/(\Omega \cdot m)$	334.10	386.85	324.80	261.25	312.12

表 3 水平多层土壤反演值

层数	土壤电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	厚度/m
1	146.14	0.22
2	200.65	0.18
3	234.32	5.34
4	287.02	∞

根据接地网设计图纸以及斜井施工图斜井虽然未与变电站接地网直接相连，但由于斜井与接地网之间存在土壤，也会对地网散流起到一些作用。接地网设计图如图 4 所示，考虑斜井的接地网 CDEGS 模型如图 5 所示。接地网长度为 74 m，宽度为 40 m，以水平接地体为主，以垂直接地体为辅组成复合主接地网。水平接地网采用 150 mm² 铜绞线，以约 5.5 m×5.5 m 方格敷设，水平接地网埋深离地面 -0.8 m，垂直接地极为铜镀锌钢棒，顶部埋深为 -0.8 m。

将土壤电阻率反演结果代入接地网仿真模型进行计算，得到该变电站接地阻抗的仿真结果为：接地电阻 $Z=0.765 \Omega$ ，相角 $\theta=2.1^\circ$ 与实测数据 $Z=0.752 \Omega$ ，相角 $\theta=1.5^\circ$ 非常接近，相对误差为 1%，说明了无互感情况下基于组合波法的接地阻抗测量值是准确的。

3 变电站场区互感耦合实测数据与仿真与分析

3.1 基于工程化测量值的互感分量计算与剔除

本文在第 1 节提出了基于组合波的互感耦合分量工程化测量与剔除方法，本节利用变电站现场基于组合波法的实测数据进行分析，获得互感耦合分量和接地阻抗的实测值。

基于组合法在不同电流路径情况下的测量数据，可以用感抗分量 X 的变化计算得到实测的互感耦合分量。电回路

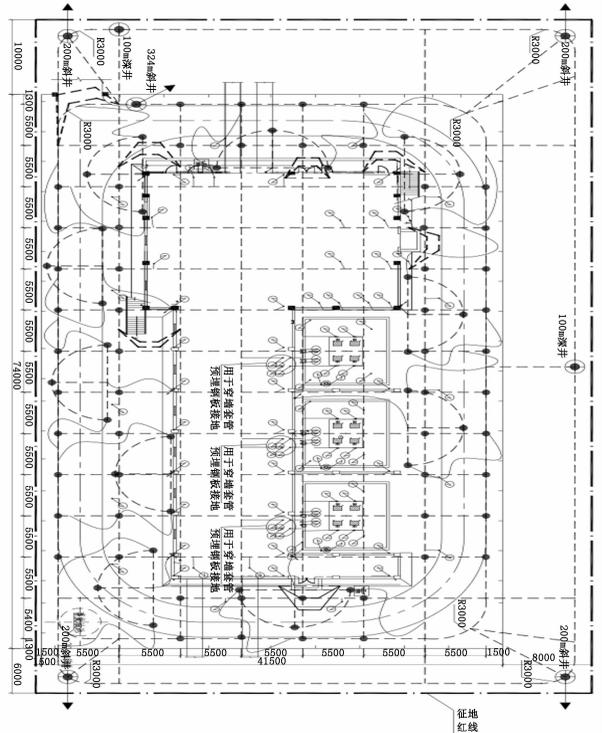


图 4 接地网设计图

无标签[ID:guixiang1@f=50.0000Hz]

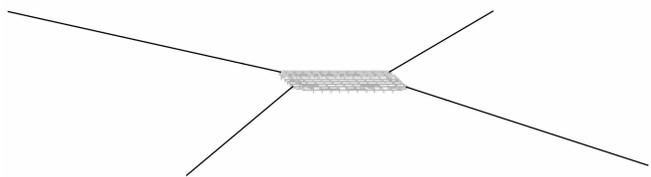


图 5 CDEGS 软件中的接地网模型

径 1 对应无互感耦合，电流路径 2~4 互感耦合逐渐增加，则对应 X 测量值的增量即为实测的互感耦合分量 X_M ，再除以平行共线距离 l 可以得到互感耦合系数。相关数据见表 4。

表 4 实测互感耦合值

路径	X/Ω	X_M/Ω	平行距离 l/m	互感耦合系数 / $(m\Omega/100 m)$
电流路径 1	0.020	0	0	/
电流路径 2	0.067	0.047	126	37.3
电流路径 3	0.097	0.070	200	35.0
电流路径 4	0.129	0.109	300	36.3

从表 4 数据可以看到，现场单位长度的引线互感耦合系数为 36~38 m Ω /100 m，基本上呈现为一个固定值。

假设现场互感耦合无法避免，布线只能按路径 2~4 实施，那么基于组合波测量值和公式 (9)~(11) 可以计算任意两个测量点的接地阻抗和互感耦合系数。当测量点为 3 个或者更多时，可以基于多点测量数据进行线性拟合得到更准确的互感耦合系数。基于本次测试的 3 个布线路径，将对应路径的感抗分量测量值与平行共线距离进行线性拟

合, 可以得到如图 6 所示的拟合结果。线性拟合参数的增益值为互感耦合系数, 为 $0.354 \text{ m}\Omega/\text{m}$, 初始值即为剔除互感后的地网自感分量 $X=23.7 \text{ m}\Omega$ 。

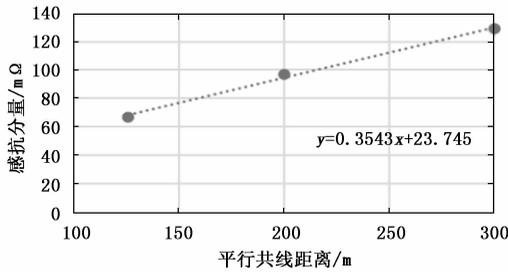


图 6 感抗分量测量值线性拟合

基于 3 个路径的实部测量值, 可以得到接地电阻分量均值为 $R=0.753 \Omega$ 。因此, 基于组合波工程化测量的接地阻抗测量值为 $Z=0.753+j0.0237=0.753 \angle 1.8^\circ$ 。此数据与路径 1 无互感情况下的测量值几乎一致, 说明基于组合波工程化测量方法可以有效剔除测量值中的互感耦合分量, 提高接地阻抗测量的准确性。

3.2 基于仿真的互感耦合分量对比分析

使用 CDEGS 可以建立考虑引线互感耦合的接地阻抗测量模型。在辅助电极布置位置采用 0.5 m 长的等效短导体模拟电极接地极, 采用地表上的绝缘导线模拟电极引线, 电流线将注流导体和电流极连通形成回路, 注流导体和电压极分别注入 $\pm 3 \text{ A}$ 的电流, 电压线将电压极连接至距离注流导体水平间隔 0.5 m 处的位置, 因电压表内阻非常大, 直接选择将电压线端点悬空模拟通过高内阻电压表与注流导线连接。电流线和电压线之间在靠近部分的平行段间距取为 2 m 。

以夹角法中的电流路径 1 布线方案为例, 读取注流点导体和悬空导体的电位值, 以两者做差并除以测试电流值, 即可计算得到接地阻抗测量值。其中接地阻抗测量值的虚部 X 包括地网接地阻抗本身电感分量 X_L 和电压、电流引线的平行互感分量 X_M , 用该虚部值减去接地阻抗计算值的虚部, 即可得到电压、电流引线的互感耦合仿真计算值。考虑实际布线长度和互感耦合的仿真模型, 如图 7 所示。最终可以得到不同布线方案下接地阻抗测量仿真计算值, 如表 5 所示。

表 5 互感分量仿真值

路径	X/Ω	X_M/Ω	平行距离 l/m	互感耦合系数 $/(\text{m}\Omega/100 \text{ m})$
电流路径 1	0.024	0.014	0	/
电流路径 2	0.057	0.047	126	26.2
电流路径 3	0.079	0.069	200	27.5
电流路径 4	0.109	0.099	300	28.3

由表 5 中的仿真结果可以看到, 路径 1 虽然电流线和电压线间隔距离比较远, 但仍有 $14 \text{ m}\Omega$ 的互感分量。路径 2~4 随着近间隔距离的平行共线长度增加, 互感耦合分量显著

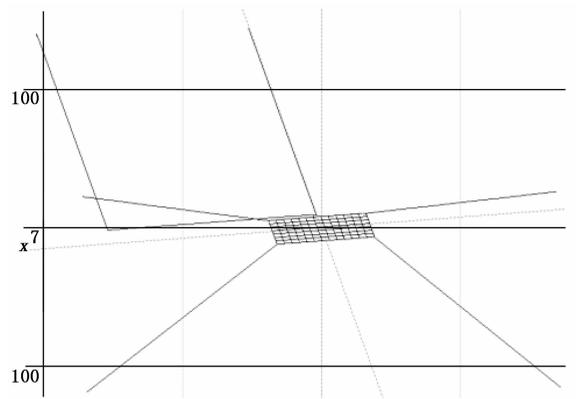


图 7 考虑互感耦合的 CDEGS 仿真模型

增大, 而且互感耦合分量与现场测量的互感耦合值非常接近。用路径 2~4 的互感抗值减去路径 1 的互感抗值除以平行共线长度, 即可得到仿真的单位长度互感耦合系数, 为 $26\sim 28 \text{ m}\Omega/100 \text{ m}$ 的一个固定值。仿真的互感耦合系数比实测的互感耦合系数小约 $10 \text{ m}\Omega/100 \text{ m}$, 也主要是因为路径 1 实测值处理为没有互感分量的原因。

从以上数据可以看到, 实测和仿真的互感耦合数据变化规律相同, 互感耦合系数相差不大, 说明基于组合波法和共线距离测绘的工程化测量方法可以准确获得比较准确的场区真实互感耦合系数测量值。此方法可以省去对现场土壤电阻率分层测绘和复杂的反演计算, 获得互感耦合定量测量值, 再对接地阻抗视在测量值进行修正, 即可实现消除互感耦合影响的接地阻抗准确测量值。

4 结束语

1) 本文提出了一种基于组合波工程化测量消除引线互感的接地阻抗测量方法, 首先利用交变直流方波激励, 获得准确的不受互感影响的电阻分量数据, 再用正弦波电流激励, 获得含有互感耦合分量的接地阻抗模值, 进而计算得到接地阻抗感抗分量和角度。在此基础上, 通过构建不同耦合路径, 实现接地阻抗值和互感耦合系数的工程化测量, 通过方程组解析可从现场测量值中分离出互感耦合分量与地网感抗分量, 获得接地网接地阻抗真实值。

2) 通过现场与异频法对比试验, 采用 30° 夹角法与远离夹角法测量的接地阻抗误差为 2.4% ; 基于变电站实测的土壤电阻率和土壤分层反演, 在 CDEGS 软件中建模, 仿真计算得到接地阻抗值与实测数据误差仅为 1% , 说明基于组合波的接地阻抗测量方法是准确有效的。进一步基于现场布线路径在 CDEGS 软件中建立互感耦合模型, 互感耦合系数仿真计算值和实测值误差为 $10 \text{ m}\Omega/100 \text{ m}$, 进一步说明基于组合波的工程化测量方法能很好的将现场实际互感耦合系数定量测量出来, 并可将互感耦合分量从接地阻抗测量值中剔除, 大幅提高了接地阻抗测量的准确性。

参考文献:

[1] 谢广润. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 水利电力出版社,

1991.

[2] 何金良, 曾 嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[3] 徐 华, 刘 黎, 陈 斌. 变电站接地网的精确测量探讨 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (10): 2205-2208.

[4] 舒廉甫, 文习山, 许 军. 三峡水利枢纽接地技术的研究 [J]. 电网技术, 2002, 26 (12): 37-40.

[5] 杨晓玲. 大型水电站接地网接地电阻测试 [J]. 机电工程技术, 2013 (12): 58-61.

[6] 何金良, 张 波, 曾 嵘. 1000 kV 特高压变电站接地系统的设计 [J]. 中国电机工程学报, 2009 (7): 7-12.

[7] 方 瑜. 四极法测量地网接地电阻的分析 [J]. 高电压技术, 1989 (4): 41-44.

[8] 李忠国. 四极法测量大型地网接地电阻的误差分析 [J]. 高电压技术, 1989 (1): 77-79.

[9] 李汝彪, 邱毓昌. 用附加串联电阻法消除接地电阻测量中的互感影响 [J]. 中国电力, 1994 (4): 64-66.

[10] 鲁志伟, 常树生, 李 越, 等. 大型变电站接地网接地阻抗与

根据式 (1), 计算得电机驱动端轴承温度的功率温升第二类警戒值为 0.868 9。对电机非驱动端轴承温度和绕组温度、减速箱温度等进行相同算法处理。在今年试验台维护运行过程中, 发现减速器温度范围正常, 功率温升 (0.747) 高于警戒值 (0.548)。检查减速箱发现其润滑油进油量较小、调整进油量, 再运行, 各项参数正常。

6 结束语

本文以 $\Phi 2$ 米共轴试验台为例, 就直升机旋翼模型风洞试验动力系统安全监测保护的整体架构、数据通讯、运行状态分级评价及风险分析, 软件设计等进行了详细论述。该设计通过多种方式打通了试验台各子系统之间的联系, 根据运行数据为状态评估提供了多种评判依据, 为动力系统的安全状态分级及试验风险评估提供了科学、准确的数据依据, 保证了安全保护的可靠性和科学性。目前该设计已广泛应用到直升机旋翼模型风洞试验动力系统控制, 试验应用效果表明该设计状态监测评估准确、实时, 安全保护可靠, 有利于提前对设备健康状态进行预警, 充分满足了直升机旋翼模型风洞试验对安全性的需求。

参考文献:

[1] 彭先敏, 黄明其. 风洞试验中旋翼的智能控制技术 [J]. 南京航空航天大学学报, 2019 (2): 251-256.

[2] Peng Xianmin, Zhang Guichuan. Research on Safety Control Strategy of Driving System for the Helicopter Wind Tunnel Test [C] // ICSGEA2020, 2020: 94-101.

[3] 尹欣繁, 车兵辉. 直升机风洞试验振动监控系统 [J]. 兵器装备工程学报, 2020 (4): 172-175.

[4] 贾召会, 邓 磊. 风洞油源控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 112-116.

[5] 余世刚, 赵 宇. 基于无线通信的 LNG 气瓶液位监测系统设

接地电阻的差异 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (1): 14-16.

[11] 应顺潮. 接地电阻测量中引线互感误差的消除 [J]. 高电压技术, 1992 (2): 71-73.

[12] 杨放南, 李 军, 董立文, 等. 引线间的互感对大型地网接地阻抗测量的影响 [J]. 青海电力, 2012, 30 (4): 4-6.

[13] 马御棠, 张博成, 周仿荣, 等. 消除引线互感影响的地网接地阻抗测量方法 [J]. 电磁避雷器, 2017, 4: 73-77.

[14] 国家能源局. 接地装置特性参数测量导则: DL/T 475-2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

[15] 张 云, 董玉玺, 黄晓波, 等. 基于方波电流的接地阻抗电阻分量的测量方法 [J]. 电子设计工程, 2021, 29 (14): 111-115

[16] 李进扬. 大型地网接地电阻的测量 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (10): 141-142.

[17] 张 婷, 张小亮. 接地网网内压降的仿真分析 [J]. 中国电力, 2014, 47 (3): 111-115.

[18] 袁 培, 何智强, 胡晓晖, 等. 考虑大地影响的直线法测量大型地网的接地阻抗 [J]. 中国电力, 2018, 51 (7): 36-42.

[19] 李 穆, 卢文华, 向东东. 输变电设备智能化运维系统研究与应用 [J]. 电气工程学报, 2015 (7): 71-77.

[20] 毕志霖. 基于 PLC 与无线传感网络的煤矿安全生产监控系统设计 [J]. 机电工程技术, 2020 (3): 23-123.

[21] 徐小力. 机电系统状态监测与及故障预警的信息化技术综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016 (3): 325-330.

[22] 汪益兵, 杨燕斌. 基于 CBM 的船舶设备健康管理系统 [J]. 船舶工程, 2017 (10): 70-74.

[23] 凌建华. 关于上位机和西门子 PLC 通信的研究 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2014 (20): 305-306.

[24] 周全座. 连铸拉矫机智能监控与故障报警功能实现 [J]. 电工技术, 2019 (9): 49-55.

[25] 刘 康, 肖 娜. 基于堆叠稀疏自编码神经网络的航空发动机剩余寿命预测方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 29-33.

[26] 王建军, 向永清, 何正文. 航天器试验大数据系统实现与典型应用 [J]. 计算机测量与控制, 2019 (4): 254-262.

[27] 胡 毅, 李飞敏, 杨胜学. 基于试飞数据的故障率预测及预警监控 [J]. 兵器装备工程学报, 2020 (7): 224-227

[28] 张 芳, 张随平, 张 萍. 电站设备运行风险分析 [J]. 甘肃科技, 2014 (9): 56-58.

[29] 梁 塑, 秦丽文. 基于风险评估的配电设备状态检修决策方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019 (1): 47-52.

[30] 张飞飞, 樊锐轶. 大数据环境下变电站智能监控方案研究 [J]. 陕西电力, 2016 (6): 72-76.

[31] 刘保果, 黄雅琳. 船用燃气轮机状态趋势预测算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (6): 1718-1721.

[32] 蒋向东, 魏 伟. 基于 PLC 的船舶安全报警系统设计 [J]. 舰船科学技术, 2015 (5): 204-208.

[33] 陈 智, 王贵峰. 模糊 PID 算法的双闭环直流电机调速系统 [J]. 电子科技, 2017 (7): 33-36.