

谐波干扰下接地网阻抗计算方法研究

谐波干扰下变电站接地网的实际阻抗与工频下测量的接地网阻抗是有区别的,尤其是在强谐波干扰下,实际阻抗与测量得到的工频阻抗相比,会出现明显的偏差。提出了一种方法,通过测量工频下接地网阻抗值,来计算接地网模型中的参数,再来计算谐波干扰下的接地网阻抗值。该方法可以解决目前无法测量谐波下运行变电站的实际接地阻抗值问题,并用仿真计算验证了该方法的可行性。该方法修正的接地阻抗值模值误差小于在2%,阻抗角误差小于10%,可推广至变电站谐波干扰下接地阻抗的测量分析。

刘康 胡春江 温定筠/国网甘肃省电力公司电力科学研究院 陈颖/西南交通大学电气工程学院 李亚军/安徽正广电电力技术有限公司 王海璐/国网甘肃省电力公司经济技术研究院

0 引言

目前,接地阻抗的测量方法大多针对的是工频下接地阻抗的测量,然而由于实际工况的复杂性,很多情况下变电站在强谐波下运行,此时的接地阻抗值与工频下的接地阻抗值是有区别的。尤其在直流换流站等具有强谐波入地电流时,强谐波会对测量信号造成很大的干扰,使测量信号发生畸变,严重影响了测量结果的准确性^[1-4]。而且,由于现场测量需要制作谐波源等原因限制,难以直接测试得到谐波下的接地阻抗值。因此,寻求一种谐波下大型地网接地阻抗计算方法是十分有必要的。

1 计算思路与模型

1.1 基本思路

注入到接地网中的电流在沿导体轴向流动的同时会向大地中泄漏,采用恒定电流场来进行接地网模拟计算,不等位计算模型需要同时考虑大地区域和导

体区域,同时考虑漏电流和轴向电流以及导体的阻抗^[5]。

将接地网用集中参数模型表示,将每段接地网导体通过导体段的等效阻抗 Z 和泄漏电阻 R_d 组成的T型单元等效^[6-7],其中导体段的等效阻抗 Z 所在支路用于等效入地电流在接地网中的分流支路,泄漏电阻 R_d 所在的支路用于等效从接地网中散流到土壤中的泄漏电流支路,单个接地网导体段的等效模型如图1所示。

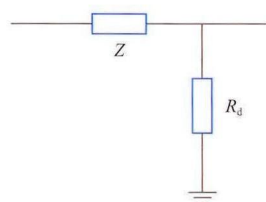


图1 单个接地网导体段的等效模型

一个由 $m \times n$ 个网孔构成的接地网的等效模型,每个网孔用4个首尾相连的T型单元等效^[8],如图2所示。

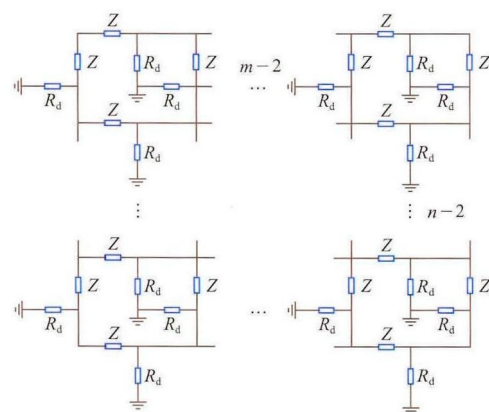


图2 $m \times n$ 个网孔构成的接地网的等效模型

对于强谐波下大型地网接地阻抗值测量,通过建立接地网的等效模型,运用现场测量得到工频下的接地阻抗进行仿真计算来确定模型参数,进而通过模



刘康/工程师

关键词/Keywords

接地网 ·
谐波干扰 ·
接地阻抗 ·
谐波阻抗 ·

型求取各次谐波下的接地阻抗值。首先按照规程测量工频下的接地阻抗值,然后确定接地网的等效模型,根据测量得到的工频下的接地阻抗值,求取模型中的泄漏电阻值,最后根据接地网的等效模型求取各次谐波下的接地阻抗值。

1.2 模型参数计算

(1) 等效阻抗计算

导体段的等效阻抗 Z 可根据接地网导体的基本参数计算得到,包括导体段的自阻抗 Z_0 和等效的互阻抗 Z_M ,即 $Z=Z_0+Z_M$ 。其中自阻抗为

$$Z_0 = R_{ac} + j\omega(L_{ac} + L_{ext}) \quad (1)$$

由于趋肤效应的影响,导体段的交流电阻会大于直流电阻,导体段的交流电阻为

$$R_{ac} = \frac{a}{2\delta} R_{dc} \quad (2)$$

式中, a 为导体等效半径, $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}}$,为趋肤深度;

$R_{dc} = \frac{\rho l}{\pi a^2}$,为直流电阻; ρ 为导体电导率; l 为导体长度。

考虑趋肤效应,导体段的交流内自感为

$$L_{ac} = \frac{2\delta}{a} L_{dc} \quad (3)$$

直流内自感 L_{dc} 可以根据安培环路定律得到

$$L_{dc} = \frac{\mu}{8\pi} l \quad (4)$$

式中, μ 为导体磁导率; l 为导体长度。

导体段的外自感等于处于导体段轴线的细线段与处于导体段表面的细线段之间的互感,即

$$L_{ext} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{1}{r} dl_1 dl_2 \approx \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad (5)$$

式中, l_1 和 l_2 分别为处于导体段轴线的细线段与处于导体段表面的细线段的路径; r 为源点与场点之间的距离。

两导体段间的互感计算公式为

$$M_{ab} = \frac{\mu_0 l}{4\pi} \int_{l_a} \left(\int_{l_b} \frac{1}{r} dl_b \right) dl_a \quad (6)$$

式中, l_a 、 l_b 分别为积分路径; r 为a段导体的细导

线和b段导体上的细导线之间的距离; μ_0 为土壤的磁导率。

(2) 泄漏电阻 R_d 计算

频率对土壤泄漏电阻的影响微乎其微,可将其视为纯电阻,所以根据测量得到的工频下的接地阻抗值,通过对等效模型进行仿真计算得到泄漏电阻值 R_d 。具体实现过程如图3所示。给 R_d 赋一个初始值 R_{di} ,将其运用到接地网等效模型中,对等效模型进行仿真计算,得到一个工频下的接地阻抗仿真值,将其与测量得到的工频下的接地阻抗实测值比较,若其模值和相位角均在误差范围之内,则认为 $R_d = R_{di}$;反之,再回到赋值步骤,循环计算,便可得到泄漏电阻 R_d 值。

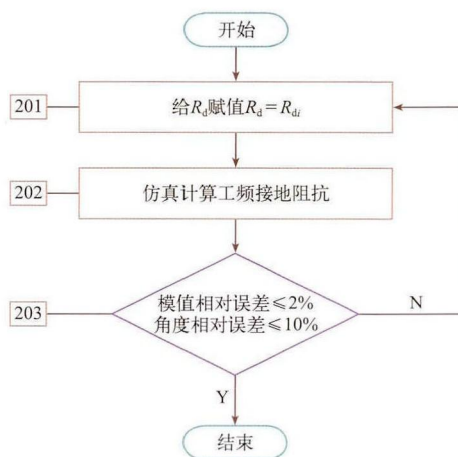


图3 泄漏电阻求解流程图

2 接地网模型搭建

为了研究变电站接地网谐波下接地阻抗的测量,以面积为100 m×100 m的正方形,均压带间距为10 m的接地网和“七字形”接地网分别作为研究对象,计算谐波干扰下的接地阻抗值。根据接地网的结构运用Matlab搭建等效模型如图4、图5所示。此两种模型能代表大部分变电站接地网结构。图4为当电流注入点在接地网边角上时的等效模型,每个网孔对应于实际接地网的网孔。

3 仿真对比分析

以图4、图5所示的接地网结构为例,通过与接地分析软件包CDEGS的计算结果进行对比分析

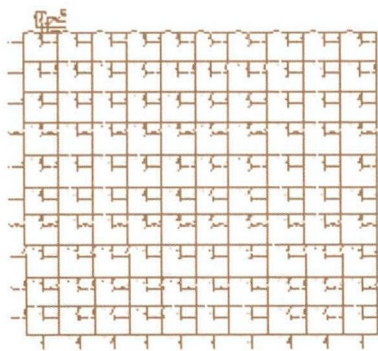


图4 规则地网等效模型

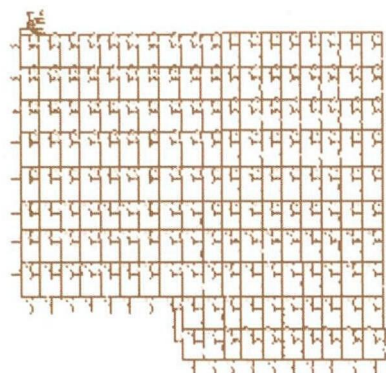


图5 “七字”接地网等效模型

析，分别针对不同土壤结构下的各次谐波下接地阻抗以及不同电流注入点时各次谐波下接地阻抗的测量结果与CDEGS仿真结果进行了对比分析。

3.1 不同土壤结构下仿真对比分析

以CDEGS计算得到的工频下的接地阻抗值代替所述的现场测量的工频接地阻抗值，针对不同土壤结构进行了仿真计算。以三层土壤结构为例，并分为两种类型，类型1：50 Ω·m/10 m、100 Ω·m/ 30 m和1 000 Ω·m/∞ 三层；类型2：30 Ω·m/10 m、200 Ω·m/30 m和1 000 Ω·m/∞ 三层。首先得到不同工况下的工频接地阻抗值，再通过仿真计算得到不同工况下的泄漏电阻值 R_d 。两种典型的接地网结构模型计算出的阻抗值和泄漏电阻值如下表所示。从表中可以看出，不同土壤结构计算得到的 R_d 值有明显的区别。

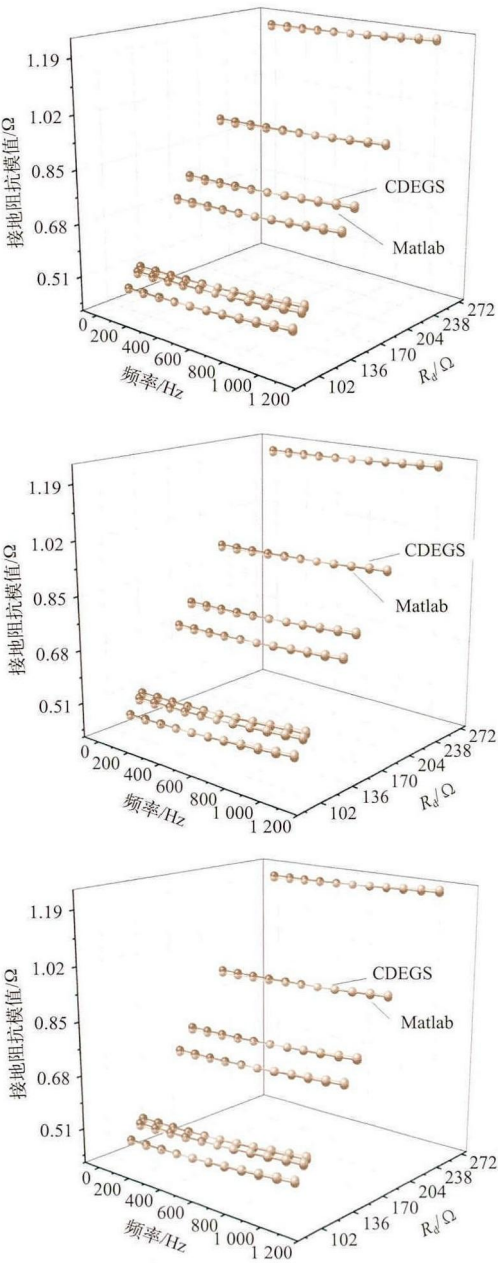
确定了接地网参数，运用所搭建的模型仿真计算得到各次谐波下的接地阻抗值，并将之与CDEGS仿真得到的结果进行对比分析，发现接地阻抗模值误差范围很小，其相对误差的绝对值不大于2%。在不同土壤电阻率的情况下，运用搭建

表 三层土壤结构下模型参数计算

土壤类型	规则地网工频 接地阻抗值/Ω	规则地网 R_d 计算值/Ω	“七字”地网工频 接地阻抗值/Ω	“七字”地网 R_d 计算值/Ω
1	0.699 8∠0.777 2°	155	0.685 9∠0.966 2°	148.5
2	0.517 3∠1.025 0°	115	0.514 8∠1.272 2°	109.6

的模型计算得到的不同泄漏电阻对应的各次谐波下的接地阻抗模值的曲线与CDEGS仿真结果对比如图6所示。

通过对比可以发现，运用所搭建的模型计算



(a) 规则接地网模型曲线

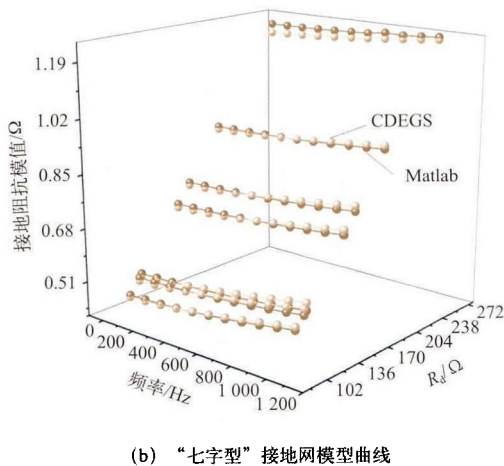


图6 不同泄漏电阻对应的各次谐波下的接地阻抗模值的曲线对比
得到谐波频率下的接地阻抗模值与CDEGS软件包的计算结合非常吻合。

图7为在不同土壤电阻率的情况下，运用搭建的模型计算得到的不同泄漏电阻对应的各次谐

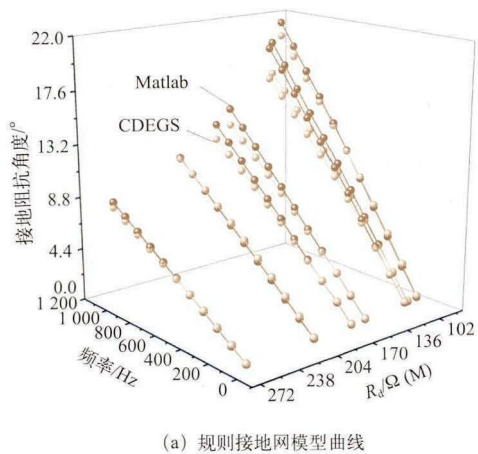
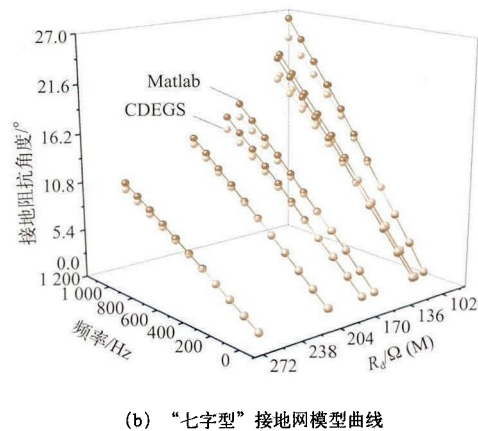


图7 不同泄漏电阻对应的各次谐波下的接地阻抗阻抗角的曲线对比

波下的接地阻抗阻抗角曲线与CDEGS仿真结果对比。随着谐波次数的增大，阻抗角的误差有所增大，但在21次谐波以内，其相对误差值小于10%，该方法可以推广到一般的变电站谐波下的接地阻抗测量分析。

3.2 不同电流注入点时仿真对比分析

以CDEGS计算得到的工频下的接地阻抗值代替所述的现场测量的工频接地阻抗值，运用所搭建的模型仿真计算了电流注入点沿接地网对角线变化时各次谐波下的接地阻抗值，并将之与CDEGS仿真得到的结果进行对比分析。图8为随着电流注入点变化，两种模型情况测量得到的各次谐波下的接地阻抗模值与CDEGS仿真对比图。

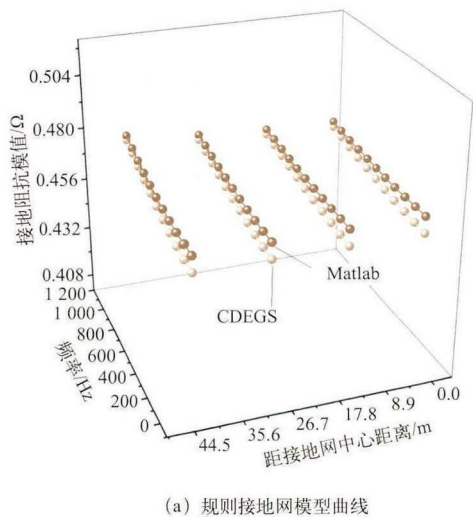
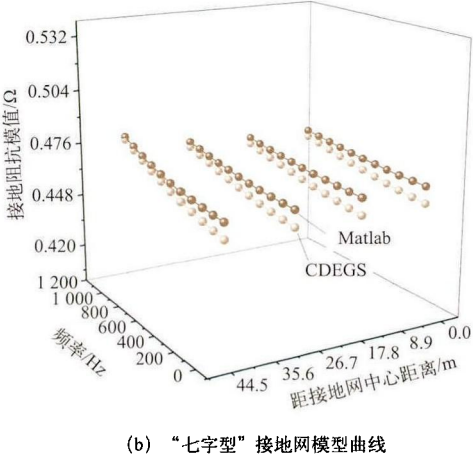
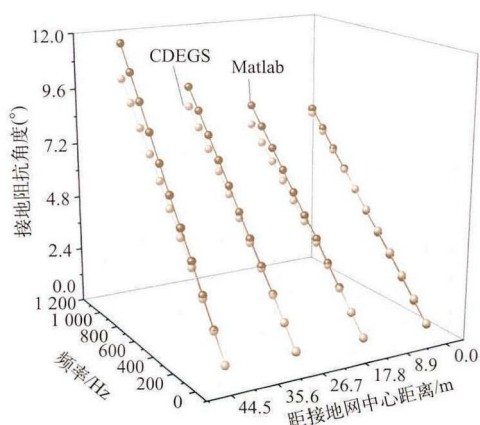
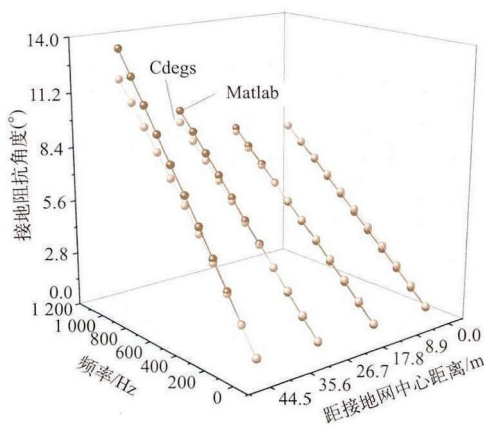


图8 不同电流注入点对应的各次谐波下的接地阻抗模值的曲线对比

对比发现,随着电流注入点距离地网中心的距离的增大,仿真得到的各次谐波下的接地阻抗值的误差也逐渐增大,这是由于当电流注入点在地网边角的时候,模型中没有考虑接地网的边角效应带入的误差,而当电流注入点在地网中心时,误差较小。



(a) 规则接地网模型曲线



(b) “七字型”接地网模型曲线

图9 不同电流注入点对应的各次谐波下的接地阻抗阻抗角的曲线对比

图9为随着电流注入点变化,两种模型测量得到的各次谐波下的接地阻抗阻抗角与CDEGS仿真对比图。对比发现,对于“七字形”接地网,与规则接地网相同,随着电流注入点距离接地网中心的距离的增大,仿真得到的各次谐波下的接地阻抗值的误差也逐渐增大,这是由于当电流注入点在接地网边角的时候,模型中没有考虑接地网的边角效应带入的误差,而当电流注入点在接地网中心时,误差较小。

4 结束语

1) 通过建立接地网等效模型,运用现场测量得到工频下的接地阻抗进行仿真计算,来确定模型参数,进而通过模型求取各次谐波下的接地阻抗值,解决了现场难以测量得到强谐波下接地阻抗值的问题。运用提出的方法,以规则地网、“七字型”接地网为对象,进行了谐波下接地阻抗测量建模与仿真,验证了该方法可以保证修正后的接地网阻抗与仿真得到接地阻抗的模值相对误差小于2%,阻抗角相对误差小于10%。

2) 对不同土壤分层情况和不同电流注入点的情况进行计算,发现在测量工频接地阻抗时,选择电流注入点为接地网中心位置时,计算得到的谐波下接地阻抗值与实际接地阻抗值误差最小。

参考文献

- [1] 李景禄, 李卫国. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 金祖山, 胡文堂, 张一军, 等. 提高大型接地网接地阻抗测量准确性的方法和措施 [J]. 水电能源科学, 2005 (5): 76-85.
- [3] 李谦, 邵健康, 张波, 等. 基于无线传输相位差比较的变电站接地网地线分流向量及接地阻抗准确测量 [J]. 高电压技术, 2014, 40 (8): 2271-2278.
- [4] 李既明, 张瀚钦, 朱焰明, 等. 采用两种方法测量某抽水蓄能电站接地阻抗的结果分析 [J]. 电磁避雷器, 2013 (1): 39-43.
- [5] 司文荣, 傅晨钊, 卞晓亮, 等. 变电站接地网缺陷诊断无损评价方法综述 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (8): 14-21.
- [6] 李谦, 张波, 蒋榆宽, 等. 地线分流对变电站接地阻抗测量的影响 [J]. 高电压技术, 2014, 40 (3): 15-20.
- [7] 李景禄, 李卫国. 关于大型接地网降阻措施探讨 [J]. 电磁避雷器, 2003 (1): 46-48.
- [8] 刘渝根, 徐峰, 刘小二, 等. 拓扑结构改变对接地网故障诊断的影响分析 [J]. 高压电器, 2010, 46 (12): 59-62.

(收稿日期: 2016-10-09) EA