

## (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局

(43) 国际公布日  
2016 年 8 月 11 日 (11.08.2016)



(10) 国际公布号  
WO 2016/124014 A1

- (51) 国际专利分类号:  
G01R 19/00 (2006.01) G01R 17/20 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2015/093106
- (22) 国际申请日: 2015 年 10 月 28 日 (28.10.2015)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:  
201510060719.9 2015 年 2 月 5 日 (05.02.2015) CN  
201510060736.2 2015 年 2 月 5 日 (05.02.2015) CN
- (71) 申请人: 国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。河南平高电气股份有限公司 (HENAN PINGGAO ELECTRIC CO., LTD) [CN/CN]; 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。平高集团有限公司 (PINGGAO GROUP CO., LTD) [CN/CN]; 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。
- (72) 发明人: 钟建英 (ZHONG, Jianying); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。张一茗 (ZHANG, Yiming); 中国河南省平顶山市南环东

路 22 号, Henan 467001 (CN)。孙银山 (SUN, Yinshan); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。尹军华 (YIN, Junhua); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。王振 (WANG, Zhen); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。郝莎 (HAO, Sha); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。宋亚凯 (SONG, Yakai); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。高群伟 (GAO, Qunwei); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。李少华 (LI, Shaohua); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。张文涛 (ZHANG, Wentao); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。寇新民 (KOU, Xinmin); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。刘逸凡 (LIU, Yifan); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。毛志宽 (MAO, Zhikuan); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。马东岭 (MA, Dongling); 中国河南省平顶山市南环东路 22 号, Henan 467001 (CN)。

- (74) 代理人: 郑州睿信知识产权代理有限公司 (ZHENGZHOU RUIXIN INTELLECTUAL PROP-

[见续页]

(54) Title: METHOD OF CALCULATING STEP VOLTAGE AND MAXIMUM CONTACT VOLTAGE IN GAS-INSULATED SUBSTATION

(54) 发明名称: 用于气体绝缘变电站的跨步电压和最大接触电压计算方法

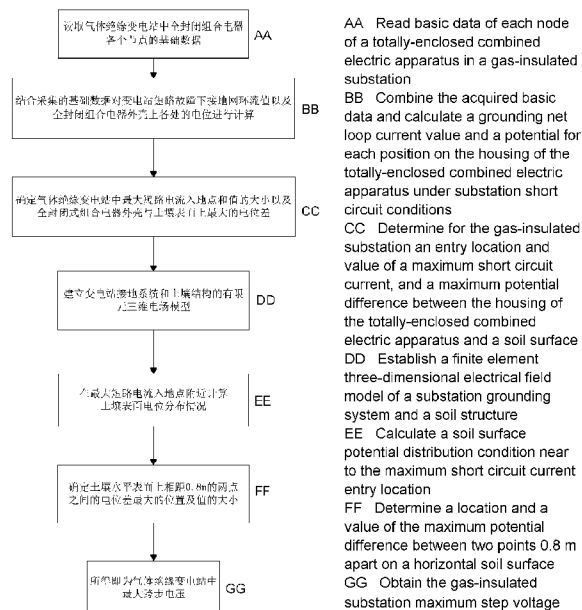


图1

(57) Abstract: A method of calculating a step voltage and a maximum contact voltage in a gas-insulated substation, comprising: upon precisely calculating a housing loop current condition, a grounding condition and a housing potential distribution condition of a totally-enclosed combined electric apparatus, obtaining a potential distribution condition of a soil surface, thereby obtaining, on the basis of the above, distribution conditions of the substation step voltage and a maximum contact voltage. The method greatly increases calculation precision, more precisely performs calculations with respect to a problem at the substation, and performs targeted and effective prevention and maintenance with respect to problems resulting from faults at the substation. The method is economically favorable, and reduces unnecessary economic losses by targeted prevention.

(57) 摘要: 一种用于气体绝缘变电站的跨步电压和最大接触电压计算方法, 在对全封闭式组合电器的外壳环流情况、接地情况, 以及壳体电位分布情况进行精确计算的前提下, 得到土壤表面的电位分布情况, 从而在此基础上得到变电站

内跨步电压和最大接触电压的分布情况, 该方法不仅计算精度大大提高, 可以对变电站中的问题进行更为精确的计算, 还可以有针对性的对变电站中故障情况下的问题进行有效的预防和维护。该方法还具有一定的经济性, 在有针对性的预防下, 减少不必要的经济损失。



ERTY AGENCY CO., LTD); 中国河南省郑州市郑州高新区科学大道 57 号中原广告产业园 2 幢 17 层 275 号, Henan 450001 (CN)。

- (81) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

**本国际公布:**

- 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

## 说明书

---

### 用于气体绝缘变电站的跨步电压和最大接触电压计算方法

#### 技术领域

本发明涉及一种用于气体绝缘变电站内跨步电压的计算方法和最大接触电压计算方法，属于电力系统运行分析和安全控制领域。

#### 背景技术

电力设备发生接地故障时，接地故障电流流过接地装置，在大地表面形成分布电位，地面上水平距离 0.8m 的两点间的电位差，称为跨步电位差，人体两脚接触该两点时所承受的电压，称为跨步电压。

随着电力系统电压等级的不断提高，气体绝缘变电站中，由于全封闭组合电器的应用，各种电力设备被封装在金属外壳中，电力设备发生接地故障时，外壳上会产生巨大的故障电流，该故障电流经过接地装置流入土壤中，造成变电站内跨步电压升高，严重威胁变电站的正常稳定运行，以及操作人员的人身安全。因此，准确的计算和预测变电站中跨步电压的值的大小是变电站安全稳定运行的必要前提。

通常变电站中常铺设一层厚度为 5~20cm 的砾石路面，这层高土壤电阻率的路面提高了人体允许的接触电位差和跨步电位差，但是目前我国所用的计算方法，夸大了砾石层的作用，从而使计算结果偏于不安全侧。

#### 发明内容

本发明的目的是提供用于气体绝缘变电站的跨步电压计算方法，以及一种用于气体绝缘变电站内最大接触电压的计算方法，用以解决现有计算方法不够准确的问题。

为实现上述目的，本发明的方案包括：

一种用于气体绝缘变电站的跨步电压计算方法，步骤如下：

- 1) 根据母线、三相壳体和母线的电气参数, 以及接地网回路电流关系, 确定接地网环流值;
- 2) 根据所确定的接地网整体的环流值和变电站中整个的电气布置情况, 建立回路电流关系, 确定变电站发生短路故障时, 各个接地体中接地回路中的电流值以及气体绝缘组合电器外壳上各处的电位值;
- 3) 根据变电站土壤情况和地网分布情况, 应用有限元分析法对变电站地网模型进行分析, 建立气体绝缘变电站地网模型的三维电位分析模型, 计算得到的各个接地回路中的短路电流值, 确定最大跨步电压发生地点以及其值的大小。

进一步的, 所述步骤 1) 包括: 根据被测的气体绝缘变电站的三相母线电流值和频率值获得每个母线的阻抗值, 包括母线的电阻值, 电容值和电感值计算每个母线的阻抗值、每个壳体的阻抗值、母线与壳体之间的互感值; 利用气体绝缘变电站中三相壳体之间的电气联系, 获得每个壳体的阻抗值; 根据母线壳体的半径, 每条母线与每个壳体之间的距离, 母线和壳体的长度, 二者的介电常数电气参数, 确定母线与壳体之间的互感值; 根据测得变电站内的电气参数, 确定全封闭组合开关的短接线和接地线的阻抗值; 根据母线电流, 三相壳体和母线的电气参数, 获得三相壳体的环流值; 接地网环流值  $I_w$  公式为

$$I_w = \frac{I_k Z_{Mk}}{Z_{Mk} + 2Z_j + Z_w};$$

$I_k$  表示壳体环流值,  $Z_{Mk}$  表示壳体与母线间的互阻抗,  $Z_j$  表示接地线的阻抗值,  $Z_w$  表示接地网的阻抗值,  $w$  表示接地网,  $j$  表示虚部。

进一步的, 所述步骤 3) 包括: 根据计算得到的整个变电站接地情况的结果, 确定最大短路电流入地点的位置和最大短路入地电流值的大小; 根据变电站土壤情况和地网分布情况, 应用有限元分析法对变电站地网模型进行分析, 建立气体绝缘变电站地网模型的三维电位分析模型; 由最大短路电流入地点的位置, 以及土壤表面的电位分布情况, 确定最大跨步电压的位置。

本发明还提供了一种用于气体绝缘变电站内最大接触电压的计算方法，步骤如下：

- 1) 读取变电站中各个节点的基础数据，结合采集的三相母线电流值和频率值，确定变电站气体绝缘组合电器内部接地网的环流值；
- 2) 根据所确定的接地网的环流值，以及变电站中整个的电气布置情况，建立回路电流关系，确定变电站发生短路故障时，各个接地体中接地回路中的电流值以及气体绝缘组合电器外壳上各处的电位值；
- 3) 根据气体绝缘组合电器外壳上各处的电位，确定最大接触电压的位置和值的大小。

进一步的，所述步骤 1) 包括：根据被测的气体绝缘变电站的三相母线电流值和频率值获得每个母线的阻抗值，包括母线的电阻值，电容值和电感值计算每个母线的阻抗值、每个壳体的阻抗值、母线与壳体之间的互感值；利用气体绝缘变电站中三相壳体之间的电气联系，获得每个壳体的阻抗值；根据母线壳体的半径，每条母线与每个壳体之间的距离，母线和壳体的长度，二者的介电常数电气参数，确定母线与壳体之间的互感值；根据测得变电站内的电气参数，确定全封闭组合开关的短接线和接地线的阻抗值；根据母线电流，三相壳体和母线的电气参数，获得三相壳体的环流值；接地网环流值  $I_w$  公式为

$$I_w = \frac{I_k Z_{Mk}}{Z_{Mk} + 2Z_j + Z_w};$$

$I_k$  表示壳体环流值， $Z_{Mk}$  表示壳体与母线间的互阻抗， $Z_j$  表示接地线的阻抗值， $Z_w$  表示接地网的阻抗值， $w$  表示接地网， $j$  表示虚部。

进一步的，所述步骤 3) 包括：根据气体绝缘组合电器外壳上各处的电位，确定其壳体对地最大电位差的位置以及值的大小，确定最大电压的接地线，在所确定的拥有最大电压的接地线的纵截面内，计算沿设备外壳的垂直方向，地面与距离地面 1.8m 处的两点间的电位差为接触电压。

跨步电压计算方法的主要思路是在对气体绝缘变电站故障情况下，在对全

封闭式组合电器的外壳环流情况、接地情况，以及壳体电位分布情况进行精确计算的前提下，对变电站中的土壤情况和接地系统建立其有限元分析下的三维电场模型。进而得到土壤表面的电位分布情况，从而在此基础上得到变电站内跨步电压的分布情况，本发明的方法不仅计算精度大大提高，可以对变电站中的问题进行更为精确的计算，还可以有针对性的对变电站中故障情况下的问题进行有效的预防和维护。该方法还具有一定的经济性，在有针对性的预防下，减少不必要的经济损失。

最大接触电压计算方法直观和准确的对变电站中短路故障情况进行了计算和分析，得到封闭式组合电器外壳上各处的电位分布情况，进而对计算变电站中的接触电压情况有了更加直观的表述。该方法具有简单直观，精确度高，对变电站的整体情况表述清晰等明显特点。

## 附图说明

图1是计算跨步电压的实施例流程图；

图2是实施例的变电站全封闭气体绝缘组合电器的布置图；

图3中，（a）是简单回路三相GIS模型图；（b）是（a）的等效电路图；

图4是壳体环流以及壳体电位计算的等效电路图；

图5是土壤结构模型图；

图6是土壤表面电位分布图；

图7是土壤表面最大跨步电压附近电位分布图；

图8是接触电压计算流程图；

图9是最大电位差的纵截面内接触电压位置示意图。

## 具体实施方式

下面结合附图对本发明做进一步详细的说明。

跨步电压计算方法实施例

用于气体绝缘变电站的跨步电压计算方法，步骤如下：

1) 根据母线、三相壳体和母线的电气参数, 以及接地网回路电流关系, 确定接地网环流值;

2) 根据所确定的接地网整体的环流值和变电站中整个的电气布置情况, 建立回路电流关系, 确定变电站发生短路故障时, 各个接地体中接地回路中的电流值以及气体绝缘组合电器外壳上各处的电位值;

3) 根据变电站土壤情况和地网分布情况, 应用有限元分析法对变电站地网模型进行分析, 建立气体绝缘变电站地网模型的三维电位分析模型, 计算得到的各个接地回路中的短路电流值, 确定最大跨步电压发生地点以及其值的大小。

下面结合附图 1-7, 详细进行说明, 包括步骤 1)、2)、3)。

1、读取变电站中各个节点的基础数据, 结合采集的三相母线电流值和频率值对变电站全封闭气体绝缘组合电器内部接地网的环流值进行预测。具体的, 包括:

1.1、根据被测的气体绝缘变电站的三相母线电流值和频率值获得每个母线的阻抗值, 包括母线的电阻值, 电容值和电感值。每个母线的阻抗值  $z_M$ , 公式如下:

$$Z_M = r_M + j(\omega L_M - \frac{1}{\omega C_M}) \quad (4)$$

其中,  $r_M$  为母线电阻,  $Z_M$  为母线等效阻抗,  $\omega$  为角频率,  $L_M$  为母线等效电感,  $C_M$  为母线等效电容,  $j$  表示虚部,  $M$  表示母线。

1.2、利用气体绝缘变电站中三相壳体之间的电气联系, 获得每个壳体的阻抗值。其计算公式如下:

$$Z_{kA} = Z_{kC} = R_k + j\omega L_{kA} \quad (5)$$

$$Z_{kB} = R_k + j\omega L_{kB} \quad (6)$$

其中,  $Z_{kA}$  表示 A 相壳体的阻抗,  $Z_{kC}$  表示 C 相壳体的阻抗,  $R_k$  表示壳体的电阻,  $\omega$  为角频率,  $L_{kA}$  表示 A 相壳体的电感,  $Z_{kB}$  表示 B 相壳体的阻抗,  $L_{kB}$  表示 B 相壳体的电感,  $k$  表示壳体。

1.3、确定母线与壳体之间的互感值, 具体如下:

三相壳体与三相母线之间的互阻抗值, 公式如下:

$$Z_{MkA} = j\omega M_A \quad (7)$$

$$Z_{MkB} = j\omega M_B \quad (8)$$

$$Z_{MkC} = j\omega M_C \quad (9)$$

$$M_A = M_C = \frac{\mu_0 l_k}{4\pi} \ln \frac{[(a+h)^2 + s_1^2] \times (a+h)^2 \times [(a+h)^2 + s_2^2]}{(a^2 + s_1^2) \times (a^2 + s_2^2) \times a^2} \quad (10)$$

$$M_B = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{[(a+h)^2 + s_1^2] \times (a+h)}{(a^2 + s_1^2) \times a} \quad (11)$$

其中,  $Z_{MkA}$  表示 A 相壳体与三相母线之间的互阻抗值,  $M_A$  表示 A 相壳体与三相母线之间的互感值,  $Z_{MkB}$  表示 B 相壳体与三相母线之间的互阻抗值,  $M_B$  表示 B 相壳体与三相母线之间的互感值,  $Z_{MkC}$  表示 C 相壳体与三相母线之间的互阻抗值,  $M_C$  表示 C 相壳体与三相母线之间的互感值,  $s_1$  为相邻两相壳体间的距离,  $s_2$  为不相邻两相壳体间的距离,  $l_k$  为壳体长度,  $a$  为壳体半径,  $h$  为壳体高度,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\omega$  为角频率,  $j$  表示虚部。

1.4、确定全封闭组合开关的短接线和接地线的阻抗值。将短接板当作薄片形短导体, 往返导体构成一对, 计算二者互感。

接地线等效为集中电感, 可表示为:

$$L = \frac{\mu_0 l_j}{2\pi} \left( \ln \frac{2l_j}{b+t} + 0.5 \right) \quad (12)$$

式中,  $l_j$  是接地线的长度;  $b$  是接地线的宽度;  $t$  为厚度。

1.5、根据母线电流, 三相壳体和母线的电气参数, 获得三相壳体的环流值, 公式如下:

$$I_k = \frac{I_M (Z_M - Z_h)}{Z_h} + I_M \quad (13)$$

其中,  $I_k$  为壳体环流值,  $I_M$  为母线电流,  $z_h$  为壳体与母线间的互阻抗,  $z_M$  为母线等效阻抗,  $M$  表示母线。根据所确定的接地网整体的环流值和变电站中整个的电气布置情况, 建立回路电流关系, 确定变电站发生短路故障时, 各个接地体中接地回路中的电流值以及封闭式组合电器的外壳上各处的电位值。确定接地网环流值  $I_w$  公式如下:

$$I_w = \frac{I_k Z_{Mk}}{Z_{Mk} + 2Z_j + Z_w}$$

其中,  $I_k$  表示壳体环流值,  $z_{Mk}$  表示壳体与母线间的互阻抗,  $z_j$  表示接地线的阻抗值,  $z_w$  表示接地网的阻抗值,  $w$  表示接地网,  $j$  表示虚部。

2、根据所确定的接地网整体的环流值和变电站中整个的电气布置情况, 建立回路电流关系, 确定变电站发生短路故障时, 各个接地体中接地回路中的电流值以及封闭式组合电器的外壳上各处的电位值。图 3 为一段三相 GIS 与短接线接地线构成的回路, (a) 为三相 GIS 回路的模型示意图, (b) 为计算中各个支路的示意图。

其中,  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  表示短接线上的环流值;  $I_{jdA}$ ,  $I_{jdB}$ ,  $I_{jdc}$  表示接地线上的环流值;  $U_{n1}$ ,  $U_{n2}$ ,  $U_{n3}$ ,  $U_{n4}$  ... 表示各节点电压值。列写节点电压方程即可得到各个数值的解。

3、根据计算得到的各个接地回路中的短路电流值, 确定最大跨步电压发生

地点以及其值的大小。具体的，包括：

3.1、根据计算得到的整个变电站接地情况的结果，确定最大短路电流入地点的位置和最大短路入地电流值的大小。图 4 为化简后计算短路入地电流的位置及大小的电路图。电路分两部分，一部分为地上部分，有等效后的三相壳体环流的电流组成，各部分参数由上面两步骤计算并简化后得到；另一部分为地网部分，主要考虑地网对电流的吸收作用，故而将其等效为不同阻值的电阻。

3.2、根据变电站土壤情况和地网分布情况，应用有限元分析法对变电站地网模型进行分析，建立气体绝缘变电站地网模型的三维电位分析模型。图 5 为变电站地网建模图。变电站地网一般分为两层，土层表面以下覆有一定厚的混凝土层，以下为土壤层，变电站地网采用一定截面的铜网，位于土层以下 2.5m 处。不同的土壤层具有不同的电阻率，对短路电流的吸收能力也不尽相同。

电磁场的有限元分析公式由麦克斯韦方程组导出，在静电场中电场特性用电场强度来描述为：

$$\nabla^2 \cdot \phi = 0 \quad (14)$$

其中， $\phi$  表示电势， $\nabla$  表示微分算子。

对变电站模型进行网格划分，采用最常用的四面体单元剖分。设剖分得离散节点总量为  $N_0$ ，单元总量为  $G_0$ ，定义单元  $g$  内的插值函数为：

$$f^g = c_1 + c_2x + c_3y + c_4v = \sum_{s=1,j,m} f_s N_s^g = [N]_g [f]_g \quad (15)$$

其中， $c_1, c_2, c_3, c_4$  表示未知数的系数； $x, y, v$  表示未知数； $N_s^g$  为单元  $g$  上的线性插值的基函数，它取决于单元的形状及相应的节点的配置。

设定模型的边界条件，构造等价变分问题，待求微分方程为：

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial v^2} = 0 \quad (16)$$

同时给定边界条件，即边界面上的数值为常数且法向导数为零。

在各个短路入地电流处分别加载计算得到相应大小的电流，确定土壤表面电位的分布情况。图 6 为计算得到的土壤表面各处电位的分布情况。不同颜色代表电位的不同大小，可以看到变电站内的土壤表面的电位分布情况是不规则的。同时，结合上面步骤中计算得到的最大的短路入地电流的值进行分析。

3.3、由最大短路电流入地点的位置，以及土壤表面的电位分布情况，确定最大跨步电压的位置，由变电站土壤表面水平距离 0.8m 的两点间的电位差均为该变电站的跨步电位差的定义，得到相距 0.8m 电场线最为密集的区间，确定跨步电位差的最大值。图 7 为计算得到的最大跨步电压位置处的电位分布。图中 1、2、.....、8 为距离最大短路入地电流点 1.8m 处 8 个不同位置的点，与中心点上电位差最大的点即为所求的跨步电压。

最大接触电压计算方法实施例（步骤、公式与跨步电压实施例分别进行编号）

如图 8 所示，一种用于气体绝缘变电站内最大接触电压的计算方法，步骤如下：1）读取变电站中各个节点的基础数据，结合采集的三相母线电流值和频率值，确定变电站气体绝缘组合电器内部接地网的环流值；2）根据所确定的接地网的环流值，以及变电站中整个的电气布置情况，建立回路电流关系，确定变电站发生短路故障时，各个接地体中接地回路中的电流值以及气体绝缘组合电器外壳上各处的电位值；3）根据气体绝缘组合电器外壳上各处的电位，确定最大接触电压的位置和值的大小。

具体的，下面给出一种具体实施方式，对上述步骤说涉及的技术手段进行详细说明。

1，读取变电站中各个节点的基础数据，结合采集的三相母线电流值和频率值对变电站全封闭气体绝缘组合电器内部接地网的环流值进行预测。其具体步骤如下：

1.1、根据被测的气体绝缘变电站的三相母线电流值和频率值获得每个母线的阻抗值，包括母线的电阻值，电容值和电感值。每个母线的阻抗值  $Z_M$ ，公式如下：

$$Z_M = r_M + j(\omega L_M - \frac{1}{\omega C_M}) \quad (4)$$

其中， $r_M$  为母线电阻， $Z_M$  为母线等效阻抗， $\omega$  为角频率， $L_M$  为母线等效电感， $C_M$  为母线等效电容， $j$  表示虚部， $M$  表示母线。

1.2、利用气体绝缘变电站中三相壳体之间的电气联系，获得每个壳体的阻抗值。其计算公式如下：

$$Z_{kA} = Z_{kC} = R_k + j\omega L_{kA} \quad (5)$$

$$Z_{kB} = R_k + j\omega L_{kB} \quad (6)$$

其中， $Z_{kA}$  表示 A 相壳体的阻抗， $Z_{kC}$  表示 C 相壳体的阻抗， $R_k$  表示壳体的电阻， $\omega$  为角频率， $L_{kA}$  表示 A 相壳体的电感， $Z_{kB}$  表示 B 相壳体的阻抗， $L_{kB}$  表示 B 相壳体的电感， $k$  表示壳体。

1.3、确定母线与壳体之间的互感值，具体如下：

三相壳体与三相母线之间的互阻抗值，公式如下：

$$Z_{MkA} = j\omega M_A \quad (7)$$

$$Z_{MkB} = j\omega M_B \quad (8)$$

$$Z_{MkC} = j\omega M_C \quad (9)$$

$$M_A = M_C = \frac{\mu_0 l_k}{4\pi} \ln \frac{[(a+h)^2 + s_1^2] \times (a+h)^2 \times [(a+h)^2 + s_2^2]}{(a^2 + s_1^2) \times (a^2 + s_2^2) \times a^2} \quad (10)$$

$$M_B = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{[(a+h)^2 + s_1^2] \times (a+h)}{(a^2 + s_1^2) \times a} \quad (11)$$

其中， $Z_{MkA}$  表示 A 相壳体与三相母线之间的互阻抗值， $M_A$  表示 A 相壳体与

三相母线之间的互感值,  $z_{MkB}$  表示 B 相壳体与三相母线之间的互阻抗值,  $M_B$  表示 B 相壳体与三相母线之间的互感值,  $z_{MkC}$  表示 C 相壳体与三相母线之间的互阻抗值,  $M_C$  表示 C 相壳体与三相母线之间的互感值,  $s_1$  为相邻两相壳体间的距离,  $s_2$  为不相邻两相壳体间的距离,  $l_k$  为壳体长度,  $a$  为壳体半径,  $h$  为壳体高度,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\omega$  为角频率,  $j$  表示虚部。

1.4、确定全封闭组合开关的短接线和接地线的阻抗值。将短接板当作薄片形短导体, 往返导体构成一对, 计算二者互感。

接地线等效为集中电感, 可表示为:

$$L = \frac{\mu_0 l_j}{2\pi} \left( \ln \frac{2l_j}{b+t} + 0.5 \right) \quad (12)$$

式中,  $l_j$  是接地线的长度;  $b$  是接地线的宽度;  $t$  为厚度。

1.5、根据母线电流, 三相壳体和母线的电气参数, 获得三相壳体的环流值, 公式如下:

$$I_k = \frac{I_M (Z_M - Z_h)}{Z_h} + I_M \quad (13)$$

其中,  $I_k$  为壳体环流值,  $I_M$  为母线电流,  $z_h$  为壳体与母线间的互阻抗,  $z_M$  为母线等效阻抗,  $M$  表示母线。根据所确定的接地网整体的环流值和变电站中整个的电气布置情况, 建立回路电流关系, 确定变电站发生短路故障时, 各个接地体中接地回路中的电流值以及封闭式组合电器的外壳上各处的电位值。确定接地网环流值  $I_w$  公式如下:

$$I_w = \frac{I_k Z_{Mk}}{Z_{Mk} + 2Z_j + Z_w} \quad (3)$$

其中,  $I_k$  表示壳体环流值,  $z_{Mk}$  表示壳体与母线间的互阻抗,  $z_j$  表示接地线的阻抗值,  $z_w$  表示接地网的阻抗值,  $w$  表示接地网,  $j$  表示虚部。

2, 根据所确定的接地网整体的环流值和变电站中整个的电气布置情况, 建立回路电流关系, 确定变电站发生短路故障时, 各个接地体中接地回路中的电流值以及封闭式组合电器的外壳上各处的电位值。图 3 为一段三相 GIS 与短接线接地线构成的回路, (a) 为三相 GIS 回路的模型示意图, (b) 为计算中各个支路的示意图。

其中,  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  表示短接线上的环流值;  $I_{jdA}$ ,  $I_{jdB}$ ,  $I_{jdB}$  表示接地线上的环流值;  $U_{n1}$ ,  $U_{n2}$ ,  $U_{n3}$ ,  $U_{n4}$  等表示各节点电压值。列写节点电压方程即可得到各个数值的解。

3, 根据计算得到的气体绝缘变电站中封闭组合电器外壳上各处的电位, 确定最大接触电压的位置和值的大小。具体步骤如下:

3.1、根据计算得到的整个变电站中封闭组合电器外壳上的电位分布情况, 确定其壳体对地最大电位差的位置以及值的大小。

3.2、在封闭式组合电器外壳与地面最大电位差的纵截面内, 利用变电站的空气介质的介电常数, 建立其分布参数模型。

3.3、在所确定的拥有最大电压的接地线的纵截面内, 计算沿设备外壳的垂直方向, 地面与距离地面 1.8m 处的两点间的电位差为接触电压, 如图 9 所示。

以上给出了具体的实施方式, 但本发明不局限于所描述的实施方式; 例如, 上述实施方式中涉及的步骤中的具体实现, 可以根据基本方案进行调整和变型, 对本领域普通技术人员而言, 根据本发明的教导, 设计出各种变形的模型、公式、参数并不需要花费创造性劳动。在不脱离本发明的原理和精神的情况下对实施方式进行的变化、修改、替换和变型仍落入本发明的保护范围内。

## 权利要求书

---

1. 一种用于气体绝缘变电站的跨步电压计算方法，其特征在于，步骤如下：

- 1) 根据母线、三相壳体和母线的电气参数，以及接地网回路电流关系，确定接地网环流值；
- 2) 根据所确定的接地网整体的环流值和变电站中整个的电气布置情况，建立回路电流关系，确定变电站发生短路故障时，各个接地体中接地回路中的电流值以及气体绝缘组合电器外壳上各处的电位值；
- 3) 根据变电站土壤情况和地网分布情况，应用有限元分析法对变电站地网模型进行分析，建立气体绝缘变电站地网模型的三维电位分析模型，计算得到的各个接地回路中的短路电流值，确定最大跨步电压发生地点以及其值的大小。

2. 根据权利要求 1 所述的一种用于气体绝缘变电站的跨步电压计算方法，其特征在于，所述步骤 1) 包括：

根据被测的气体绝缘变电站的三相母线电流值和频率值获得每个母线的阻抗值，包括母线的电阻值，电容值和电感值计算每个母线的阻抗值、每个壳体的阻抗值、母线与壳体之间的互感值；

利用气体绝缘变电站中三相壳体之间的电气联系，获得每个壳体的阻抗值；

根据母线壳体的半径，每条母线与每个壳体之间的距离，母线和壳体的长度，二者的介电常数电气参数，确定母线与壳体之间的互感值；

根据测得变电站内的电气参数，确定全封闭组合开关的短接线和接地线的阻抗值；

根据母线电流，三相壳体和母线的电气参数，获得三相壳体的环流值；

接地网环流值  $I_w$  公式为 
$$I_w = \frac{I_k Z_{Mk}}{Z_{Mk} + 2Z_j + Z_w};$$
  $I_k$  表示壳体环流值,  $Z_{Mk}$  表示壳体与母线间的互阻抗,  $Z_j$  表示接地线的阻抗值,  $Z_w$  表示接地网的阻抗值,  $w$  表示接地网,  $j$  表示虚部。

3. 根据权利要求 1 所述的一种用于气体绝缘变电站的跨步电压计算方法, 其特征在于, 所述步骤 3) 包括:

根据计算得到的整个变电站接地情况的结果, 确定最大短路电流入地点的位置和最大短路入地电流值的大小;

根据变电站土壤情况和地网分布情况, 应用有限元分析法对变电站地网模型进行分析, 建立气体绝缘变电站地网模型的三维电位分析模型;

由最大短路电流入地点的位置, 以及土壤表面的电位分布情况, 确定最大跨步电压的位置。

4. 一种用于气体绝缘变电站内最大接触电压的计算方法, 其特征在于, 步骤如下:

1) 读取变电站中各个节点的基础数据, 结合采集的三相母线电流值和频率值, 确定变电站气体绝缘组合电器内部接地网的环流值;

2) 根据所确定的接地网的环流值, 以及变电站中整个的电气布置情况, 建立回路电流关系, 确定变电站发生短路故障时, 各个接地体中接地回路中的电流值以及气体绝缘组合电器外壳上各处的电位值;

3) 根据气体绝缘组合电器外壳上各处的电位, 确定最大接触电压的位置和值的大小。

5. 根据权利要求 4 所述的一种用于气体绝缘变电站内最大接触电压的计算方法, 其特征在于, 所述步骤 1) 包括:

根据被测的气体绝缘变电站的三相母线电流值和频率值获得每个母线的阻抗值, 包括母线的电阻值, 电容值和电感值计算每个母线的阻抗值、每个壳体的阻抗值、母线与壳体之间的互感值;

利用气体绝缘变电站中三相壳体之间的电气联系，获得每个壳体的阻抗值；

根据母线壳体的半径，每条母线与每个壳体之间的距离，母线和壳体的长度，二者的介电常数电气参数，确定母线与壳体之间的互感值；

根据测得变电站内的电气参数，确定全封闭组合开关的短接线和接地线的阻抗值；

根据母线电流，三相壳体和母线的电气参数，获得三相壳体的环流值；

接地网环流值  $I_w$  公式为 
$$I_w = \frac{I_k Z_{Mk}}{Z_{Mk} + 2Z_j + Z_w}$$
； $I_k$  表示壳体环流值， $Z_{Mk}$  表示壳体与母线间的互阻抗， $Z_j$  表示接地线的阻抗值， $Z_w$  表示接地网的阻抗值， $w$  表示接地网， $j$  表示虚部。

6. 根据权利要求4所述的一种用于气体绝缘变电站内最大接触电压的计算方法，其特征在于，所述步骤3)包括：根据气体绝缘组合电器外壳上各处的电位，确定其壳体对地最大电位差的位置以及值的大小，确定最大电压的接地线，在所确定的拥有最大电压的接地线的纵截面内，计算沿设备外壳的垂直方向，地面与距离地面 1.8m 处的两点间的电位差为接触电压。

## 说明书附图

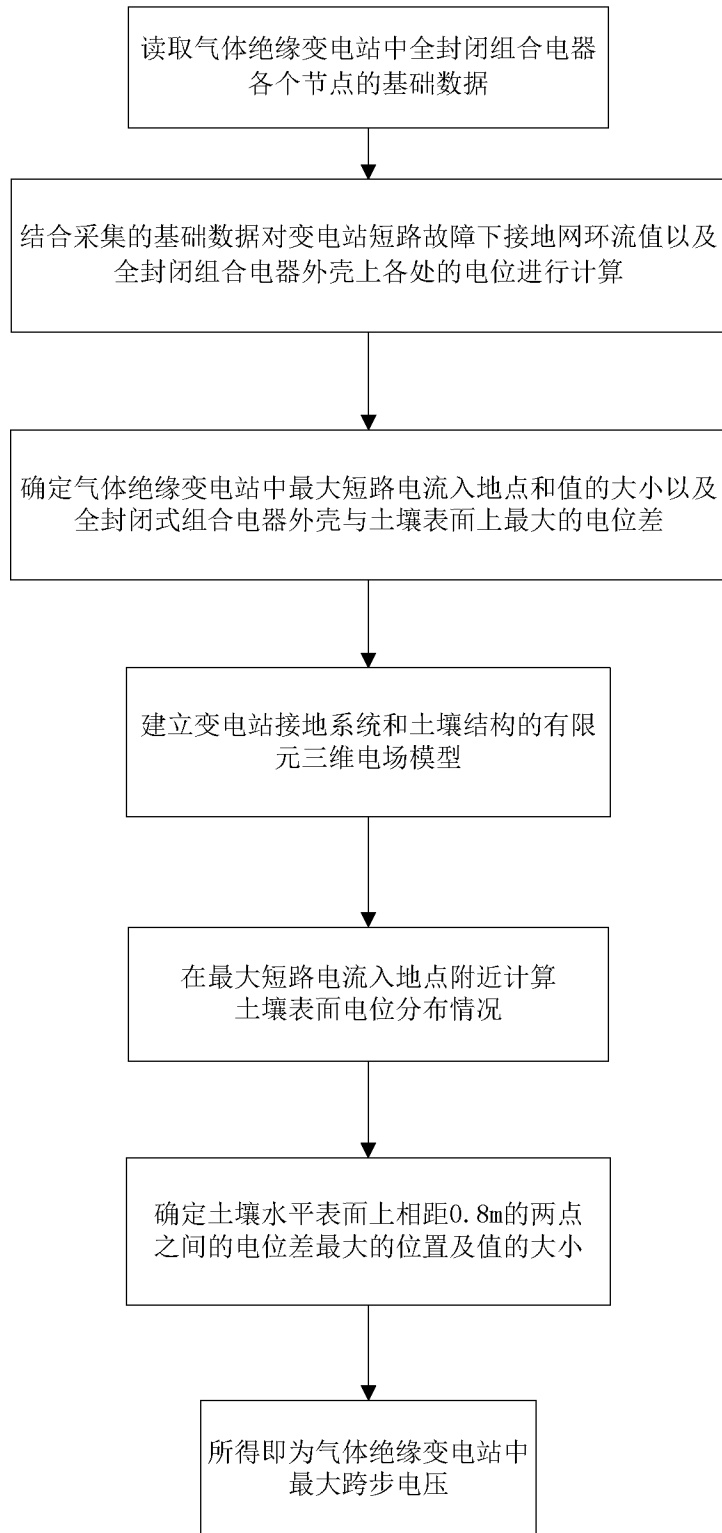


图1

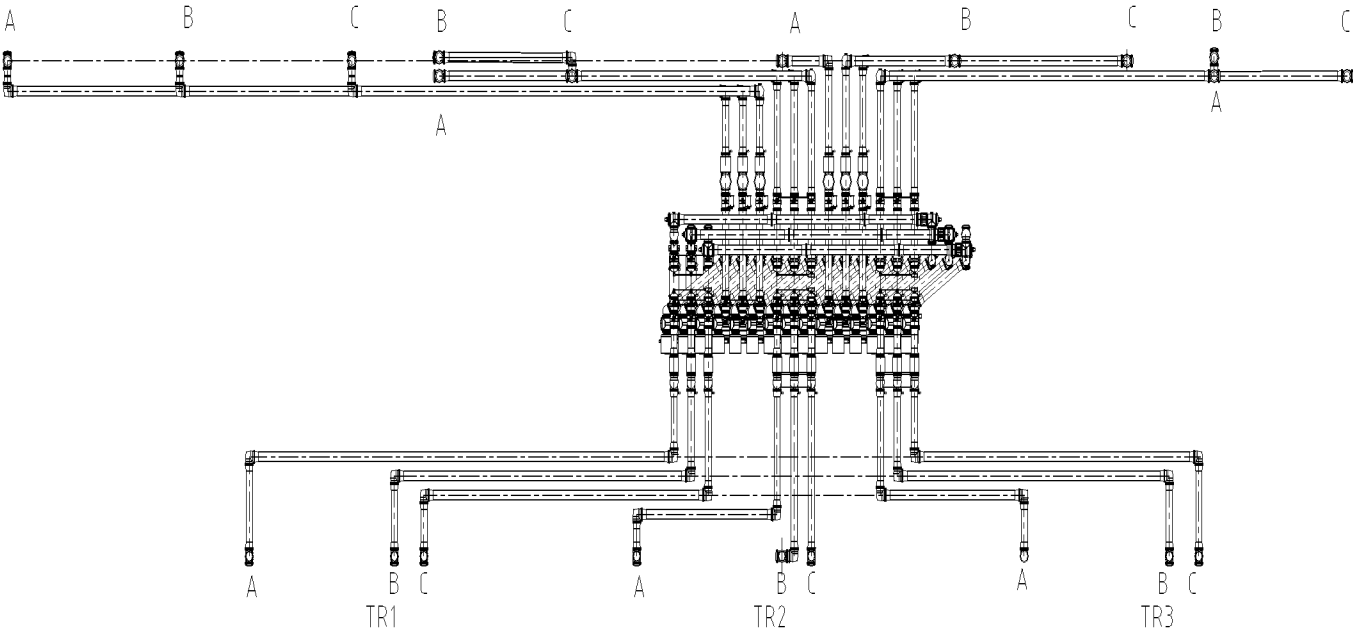


图2

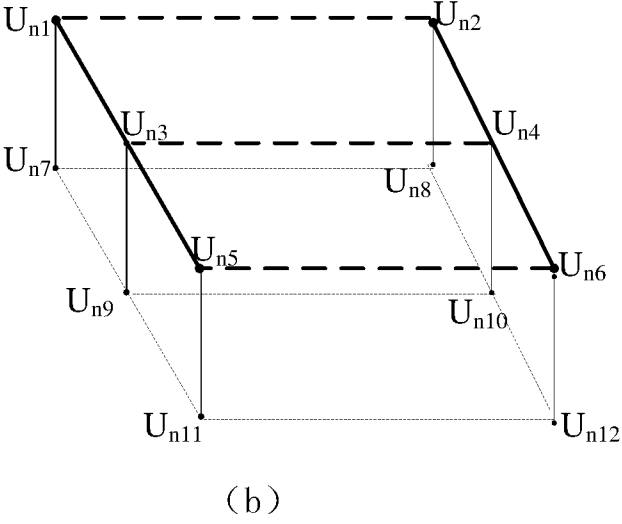
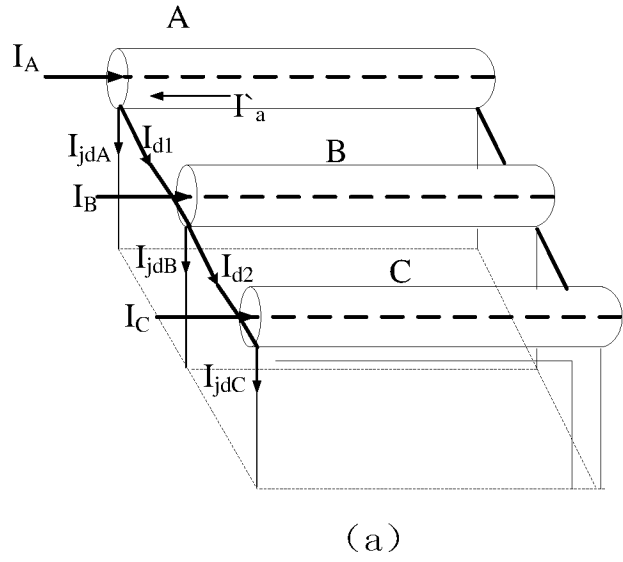


图3

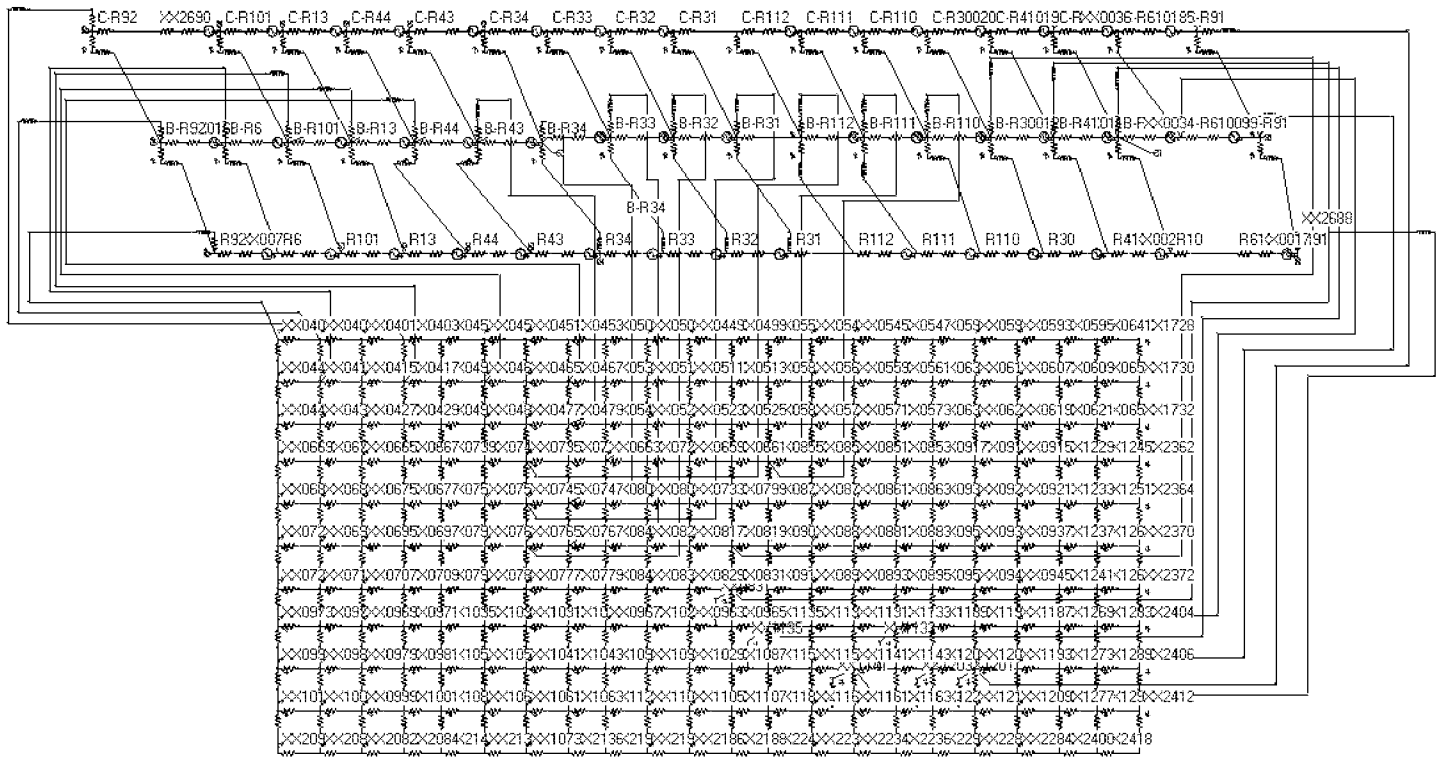


图4

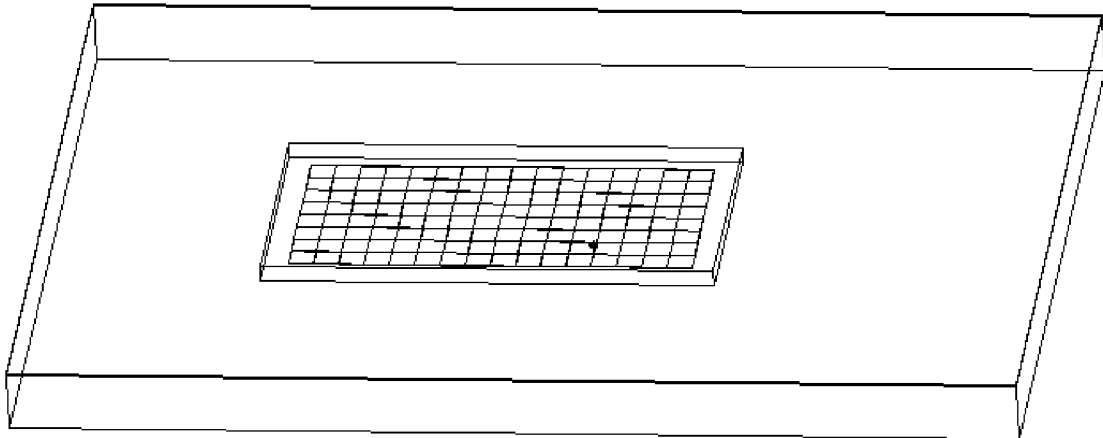


图5

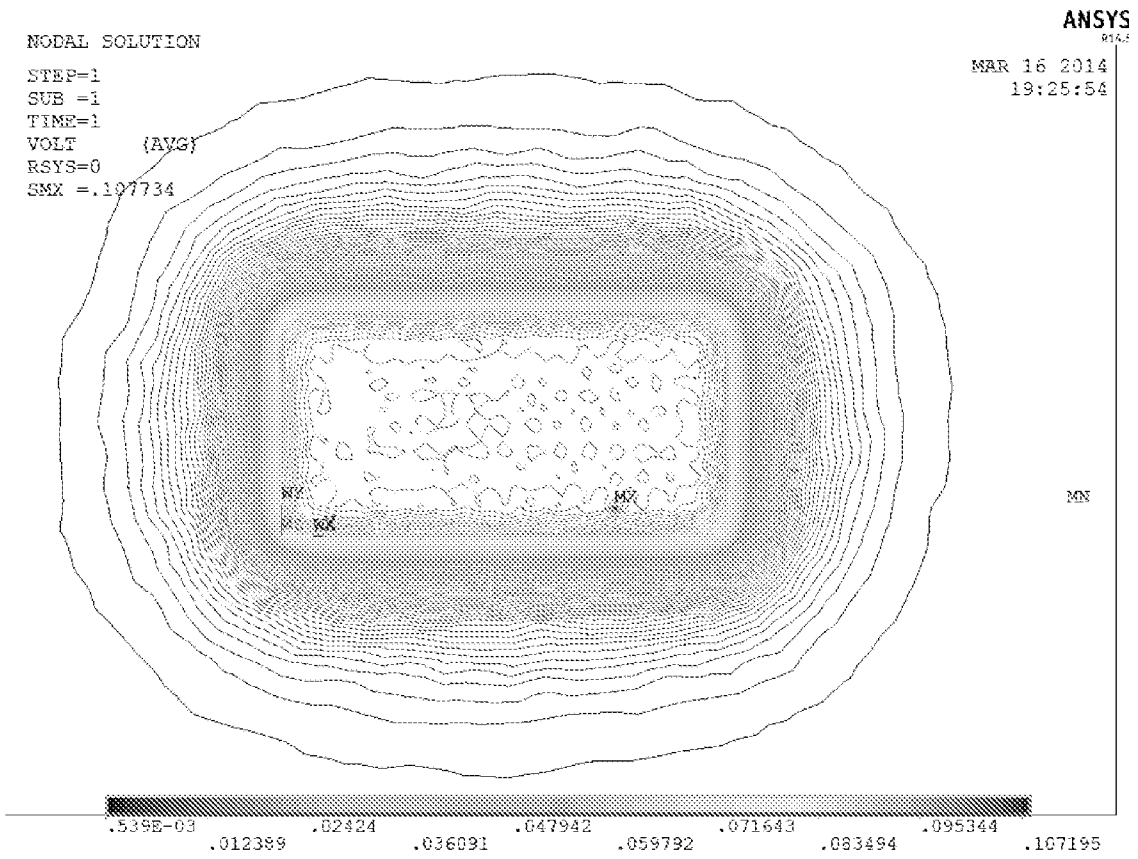


图6

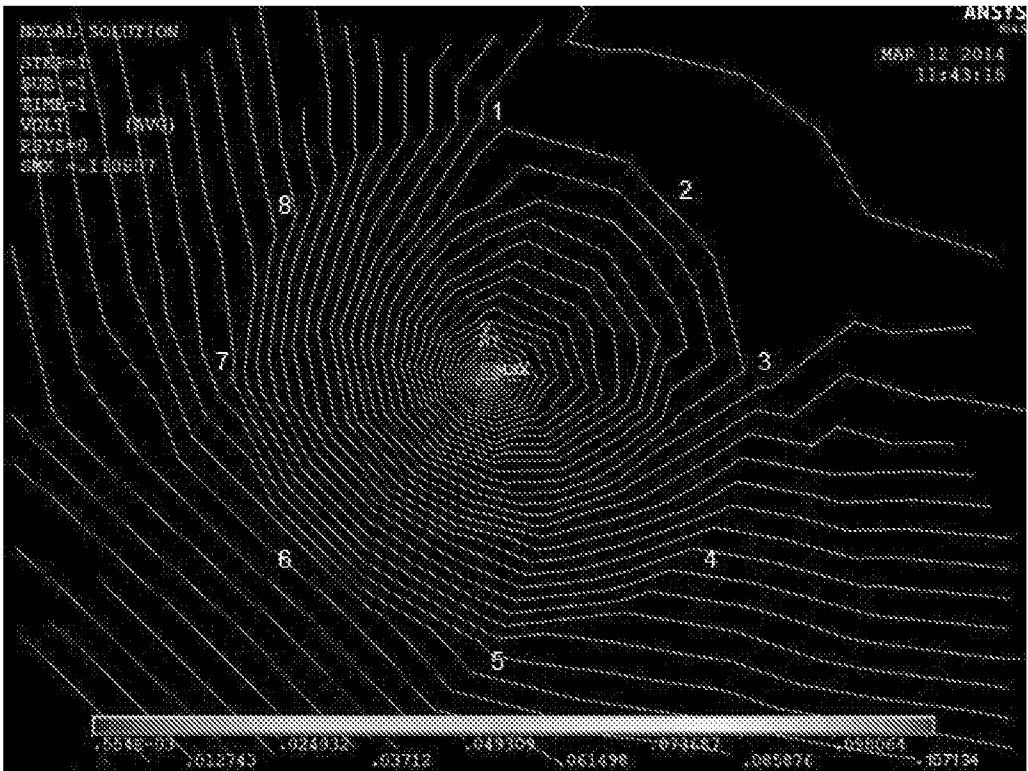


图7

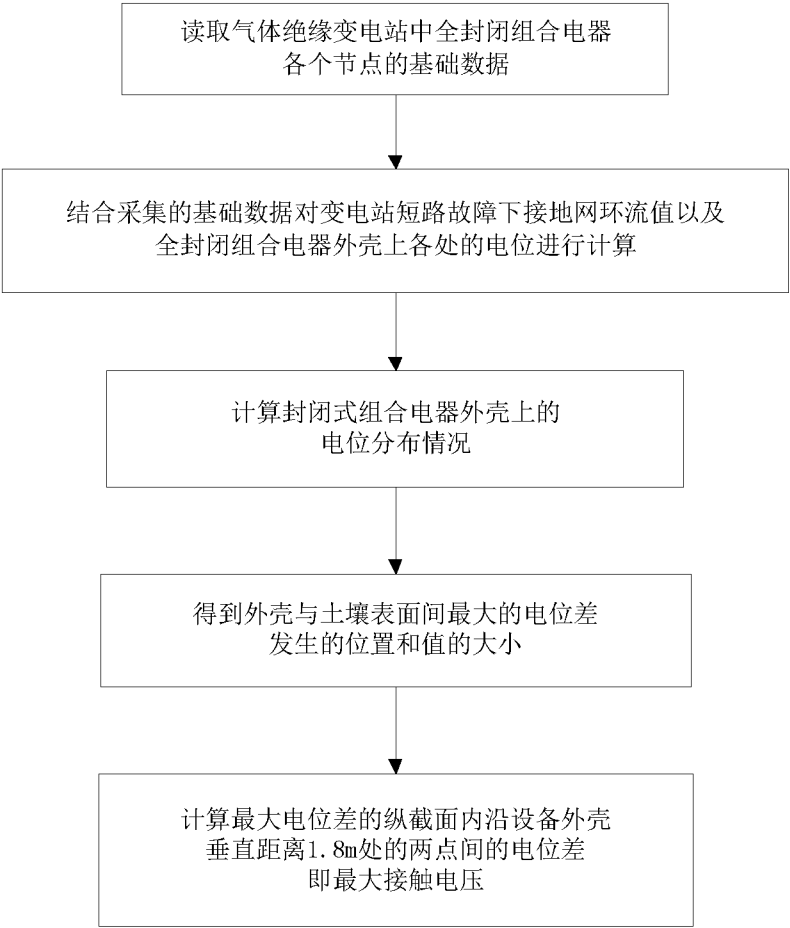


图8

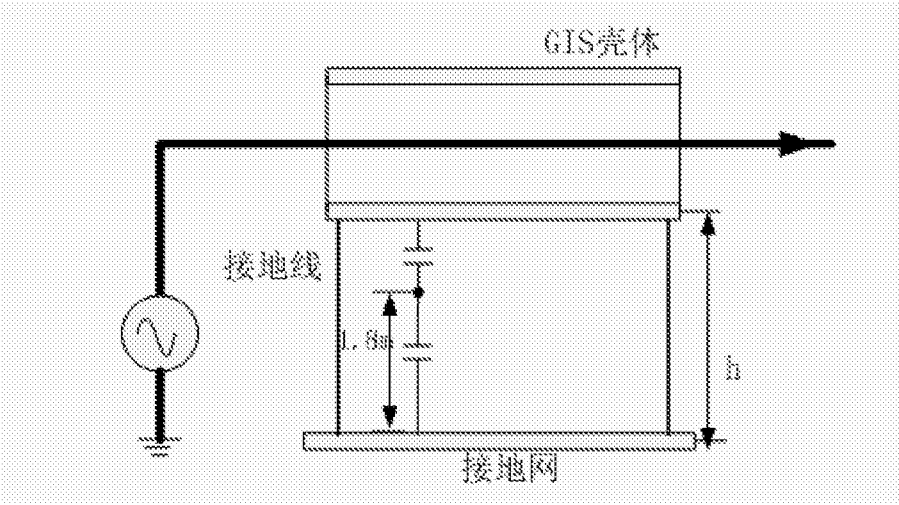


图9

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/CN2015/093106**

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 19/00 (2006.01) i; G01R 17/20 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01R

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, CJFD, VEN: step voltage, contact voltage, circulating current, potential, short circuit, STEP, CONTACT, PACE, VOLTAGE, LOOP, GROUND, EARTH, SHORT, MODEL

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                           | Relevant to claim No. |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| PX        | CN 104678147 A (HENAN PINGGAO ELECTRIC CO., LTD. et al.), 03 June 2015 (03.06.2015), claims 1-3                                                              | 4-6                   |
| PX        | CN 104833835 A (HENAN PINGGAO ELECTRIC CO., LTD. et al.), 12 August 2015 (12.08.2015), claims 1-3                                                            | 1-3                   |
| Y         | CN 102495327 A (ZHUHAI POWER SUPPLY BUREAU OF GUANGDONG POWER GRID CORP.), 13 June 2012 (13.06.2012), figures 1-3, and description, paragraphs [0028]-[0088] | 1-6                   |
| Y         | CN 103427354 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.), 04 December 2013 (04.12.2013), description, paragraphs [0017]-[0057]                                | 1-6                   |
| Y         | CN 104111376 A (WANG, Hanyu), 22 October 2014 (22.10.2014), figures 1-6, and description, paragraphs [0016]-[0034]                                           | 1-6                   |
| A         | CN 102221644 A (ZHUHAI WEIHAN TECHNOLOGY DEVELOPMENT CO., LTD. et al.), 19 October 2011 (19.10.2011), the whole document                                     | 1-6                   |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * Special categories of cited documents:                                                                                                                                | “T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention                                              |
| “A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance                                                                | “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone                                                                     |
| “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date                                                                               | “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | “&” document member of the same patent family                                                                                                                                                                                                    |
| “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Date of the actual completion of the international search<br>23 December 2015 (23.12.2015)                                                                                                                         | Date of mailing of the international search report<br><b>21 January 2016 (21.01.2016)</b> |
| Name and mailing address of the ISA/CN:<br>State Intellectual Property Office of the P. R. China<br>No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao<br>Haidian District, Beijing 100088, China<br>Facsimile No.: (86-10) 62019451 | Authorized officer<br><b>WANG, Xiaoping</b><br>Telephone No.: (86-10) <b>62085739</b>     |

International application No.  
**PCT/CN2015/093106**

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2015/093106

## A. 主题的分类

G01R 19/00(2006.01)i; G01R 17/20(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

## B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01R

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS, CNTXT, CJFD, VEN:跨步电压, 接触电压, 环流, 接地, 电位, 短路, 模型, STEP, CONTACT, PACE, VOLTAGE, LOOP, GROUND, EARTH, SHORT, MODEL

## C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                      | 相关的权利要求 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| PX   | CN 104678147 A (河南平高电气股份有限公司等) 2015年 6月 3日 (2015 - 06 - 03)<br>权利要求1-3                 | 4-6     |
| PX   | CN 104833835 A (河南平高电气股份有限公司等) 2015年 8月 12日 (2015 - 08 - 12)<br>权利要求1-3                | 1-3     |
| Y    | CN 102495327 A (广东电网公司珠海供电局) 2012年 6月 13日 (2012 - 06 - 13)<br>图1-3, 说明书第【0028】—【0088】段 | 1-6     |
| Y    | CN 103427354 A (国家电网公司等) 2013年 12月 4日 (2013 - 12 - 04)<br>说明书第【0017】—【0057】段           | 1-6     |
| Y    | CN 104111376 A (王涵宇) 2014年 10月 22日 (2014 - 10 - 22)<br>图1-6, 说明书第【0016】—【0034】段        | 1-6     |
| A    | CN 102221644 A (珠海威瀚科技发展有限公司等) 2011年 10月 19日 (2011 - 10 - 19)<br>全文                    | 1-6     |

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

## \* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&amp;” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2015年 12月 23日

国际检索报告邮寄日期

2016年 1月 21日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)  
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

王晓萍

电话号码 (86-10)62085739

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2015/093106

| 检索报告引用的专利文件 |           |   | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 |           |   | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|-----------|---|----------------|------|-----------|---|----------------|
| CN          | 104678147 | A | 2015年 6月 3日    | 无    |           |   |                |
| CN          | 104833835 | A | 2015年 8月 12日   | 无    |           |   |                |
| CN          | 102495327 | A | 2012年 6月 13日   | CN   | 102495327 | B | 2013年 10月 30日  |
| CN          | 103427354 | A | 2013年 12月 4日   | 无    |           |   |                |
| CN          | 104111376 | A | 2014年 10月 22日  | 无    |           |   |                |
| CN          | 102221644 | A | 2011年 10月 19日  | CN   | 102221644 | B | 2013年 3月 27日   |