



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107846013 A

(43)申请公布日 2018.03.27

(21)申请号 201710925370.X

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2017.10.04

H02J 3/00(2006.01)

G06F 17/50(2006.01)

(71)申请人 国网山东省电力公司淄博供电公司

地址 255000 山东省淄博市张店区北北京路67号

申请人 国家电网公司

(72)发明人 刘兴华 吕学宾 于芑 裴英
孙学锋 王涛 宁尚元 王世坤
杨磊 李思毛 巩方伟 李鑫
郑春旭 陈文栋 魏建莉 王军
陈泰羽

(74)专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

代理人 张勇

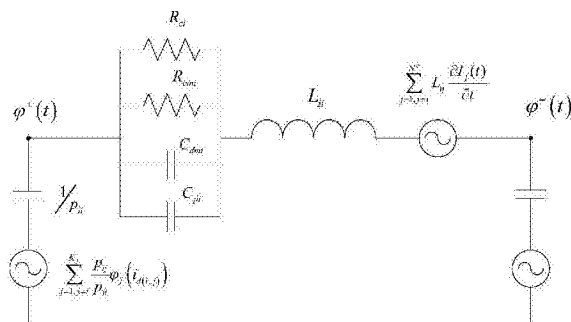
权利要求书1页 说明书10页 附图4页

(54)发明名称

基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,基于GIS系统中的环流和暂态对地电位升高的产生机理的基础上,采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型,进而构建等值模型,进行仿真,得到GIS相间环流和地网环流的幅值与接地点之间的关系曲线,根据关系曲线确定外壳环流和TGPR的影响因素。本发明有利于电网保护和控制调节。



1. 一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:基于GIS系统中的环流和暂态对地电位升高的产生机理的基础上,采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型,进而构建等值模型,进行仿真,得到GIS相间环流和地网环流的幅值与接地点之间的关系曲线,根据关系曲线确定外壳环流和TGPR的影响因素。

2. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:GIS系统中的快速暂态过电压的波形由电弧的形成时间决定,即触头间隙从开始发生电荷游离到完全击穿导通所需要的时间,该时间数值越小,快速暂态过电压的波形越陡。

3. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:减小相间距离、增加外壳半径或/和增加接地点数量能够有效抑制外壳环流。

4. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:调整接地点位置、降低接地电感值、增加接地点数或/和加装避雷器能够有效抑制TGPR。

5. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型时,将被研究对象分割成足够小的微元,计算各个微元的自、互电感和自、互电容,根据物体的实际结构构建出具体的电路模型,使用电路分析的方法计算等效电路,从而实现对研究对象电磁耦合关系的分析。

6. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:将把PEEC法构建的模型视为一个多端口电路模型,与传统电路模型相连接,从而实现把PEEC模型的适用范围由微型电路扩展到多导体大尺寸电磁系统的目标。

7. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:构建GIS外壳的PEEC模型时,将外壳划分为长方体元胞,依次计算长方体元胞的自感值,视不同元胞的空间位置为空间平行,以计算出互感值,将自感值与互感值相加,得到GIS外壳的电感值。

8. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:构建GIS母线的PEEC模型时,母线在通过交流电信号时,在母线中会出现趋肤效应,电荷集中在母线外表面位置,利用空心导电杆代替实心的导线,进而计算趋肤深度,在对母线进行PEEC法等效时,选取高小于趋肤深度的长方形元胞作为单位元胞,在这些元胞中,认为电荷密度是均匀的,计算出单位元胞的自感值,在母线的元胞划分中,不同元胞的空间位置为空间平行,以计算出互感值,将自感值与互感值相加,得到GIS母线的电感值。

9. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:构建接地体模型,根据接地网由多根接地体连接成网络状,忽略接地体之间的耦合,形成接地体的 Π 型等效电路。

10. 如权利要求1所述的一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,其特征是:在GIS套管处安装接地装置对接地点以及各点的TGPR有抑制作用。

基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法。

背景技术

[0002] 近年来,气体绝缘组合电器(Gas Insulated Switchgear,GIS)凭借结构紧凑、体积小、占地少、运行可靠、维护任务轻及对环境污染少等显著优点,成为了电力系统中不可或缺的一部分。但是GIS系统组成部件之间距离较近,各元件之间的电磁耦合强烈,当隔离开关、断路器等进行断开和闭合操作时,GIS中会存在快速暂态过程。在GIS内产生的这种暂态波,具有短时延和高频率的特征,这些暂态波的上升时间为纳秒级,频率可以达到上百兆赫兹,通过电磁感应作用,表现为母线套管上幅值和频率极高的过电压,在GIS金属外壳上产生陡度很大的暂态环流,而且含有频率极高的谐波分量。

[0003] 除此之外,由于GIS中产生的暂态环流具有高频、超高频分量,而GIS的布置不可能与接地电流注入点的距离一致,会引起GIS的TGPR(Transient Grounding Potential Rise)效应,可能对二次侧的监控、测量设备产生电磁干扰,造成系统误动作,成为电力系统正常稳定运行的巨大隐患。

发明内容

[0004] 本发明为了解决上述问题,提出了一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,本发明采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型,根据构建的模型进行分析,能够有效抑制外壳环流和有效抑制TGPR。

[0005] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0006] 一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法,基于GIS系统中的环流和暂态对地电位升高的产生机理的基础上,采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型,进而构建等值模型,进行仿真,得到GIS相间环流和地网环流的幅值与接地点之间的关系曲线,根据关系曲线确定外壳环流和TGPR的影响因素。

[0007] 进一步的,GIS系统中的快速暂态过电压的波形由电弧的形成时间决定,即触头间隙从开始发生电荷游离到完全击穿导通所需要的时间,该时间数值越小,快速暂态过电压的波形越陡。

[0008] 进一步的,GIS系统中的TGPR产生原因主要包括:一是由GIS内的SF₆介质相比于空气来说电气强度很高,但是一旦被击穿,其电气强度将会瞬间下降,电压急剧上升,极易在整个系统内引发高频振荡,引起暂态接地电位升高现象;二是母线上的电压较高,离地间隙较短,导致空气间隙的击穿,从而引起电位升高;三是当进行断路器或隔离开关操作时,电弧重燃导致两触头间的气体被击穿;四是用于无功补偿或电压调整的外部集中电容器放电所引起暂态接地电位升高;最后一种是高频电流波在外壳断口处产生多次反射,从而引起很高的电压。

[0009] 进一步的,采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型时,将被研究对象分割成足够小的微元,计算各个微元的自、互电感和自、互电容,根据物体的实际结构构建出具体的电路模型,使用电路分析的方法计算等效电路,从而实现对研究对象电磁耦合关系的分析。

[0010] 进一步的,将把PEEC模型视为一个多端口电路模型,与传统电路模型相连接,从而实现把PEEC模型的适用范围由微型电路扩展到多导体大尺寸电磁系统的目标。

[0011] 进一步的,构建GIS母线的PEEC模型时,母线在通过交流电信号时,在母线中会出现趋肤效应,电荷集中在母线外表面位置,利用空心导电杆代替实心的导线,进而计算趋肤深度,在对母线进行PEEC法等效时,选取高小于趋肤深度的长方形元胞作为单位元胞,在这些元胞中,认为电荷密度是均匀的,计算出单位元胞的自感值,在母线的元胞划分中,不同元胞的空间位置为空间平行,以计算出互感值,将自感值与互感值相加,得到GIS母线的电感值。

[0012] 进一步的,构建GIS外壳的PEEC模型时,将外壳划分为长方体元胞,依次计算长方体元胞的自感值,视不同元胞的空间位置为空间平行,以计算出互感值,将自感值与互感值相加,得到GIS外壳的电感值。

[0013] 进一步的,构建接地体模型,根据接地网由多根接地体连接成网络状,忽略接地体之间的耦合,形成接地体的 Π 型等效电路。

[0014] 进一步的,在GIS金属外壳上按相同间隔取多个接地点,计算每一相接地段的感应电流值与接地位置的关系,得到地网环流值与接地位置之间的关系呈现U型曲线,在中间的接地位置取得最小值。

[0015] 进一步的,减小相间距离、增加外壳半径或/和增加接地点数量能够有效抑制外壳环流。

[0016] 进一步的,GIS母线的外壳至少有一点是接地的,且该接地线与地网相连接,以降低壳体上的暂态电位。

[0017] 进一步的,调整接地点位置、降低接地电感值、增加接地点数或/和加装避雷器能够有效抑制TGPR。

[0018] 进一步的,在GIS套管处安装接地装置对接地点以及各点的TGPR有抑制作用。

[0019] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0020] 1. 本发明构建模型的过程简单,且构建出的模型能够反映电力系统的真实情况,对建立安全、智能电网有重要作用;

[0021] 2. 本发明采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型,并以此为基础进行仿真、分析,得到了有效抑制外壳环流和有效抑制TGPR的措施,为电网保护和控制调节提供了支持。

附图说明

[0022] 构成本申请的一部分的说明书附图用来提供对本申请的进一步理解,本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请,并不构成对本申请的不当限定。

[0023] 图1为本发明单元PEEC模型示意图;

[0024] 图2为本发明中GIS母线划分示意图;

[0025] 图3为本发明中集GIS外壳划分示意图;

[0026] 图4为本发明接地体等效电路示意图;

- [0027] 图5为本发明的GIS外壳环流等效电路示意图；
- [0028] 图6为本发明的接地位置与环流值关系示意图；
- [0029] 图7为本发明的接地位置与相间环流关系示意图；
- [0030] 图8为本发明的相间距离与环流关系示意图；
- [0031] 图9为本发明的外壳半径与环流关系示意图；
- [0032] 图10为本发明的接地间距与环流关系示意图。

具体实施方式：

- [0033] 下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。
- [0034] 应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解的相同含义。
- [0035] 需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本申请的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。
- [0036] 在本发明中，术语如“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”、“竖直”、“水平”、“侧”、“底”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，只是为了便于叙述本发明各部件或元件结构关系而确定的关系词，并非特指本发明中任一部件或元件，不能理解为对本发明的限制。
- [0037] 本发明中，术语如“固接”、“相连”、“连接”等应做广义理解，表示可以是固定连接，也可以是一体地连接或可拆卸连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连。对于本领域的相关科研或技术人员，可以根据具体情况确定上述术语在本发明中的具体含义，不能理解为对本发明的限制。
- [0038] 正如背景技术所介绍的，现有技术中存在GIS系统组成部件之间距离较近，各元件之间的电磁耦合强烈，当隔离开关、断路器等进行断开和闭合操作时，GIS中会存在快速暂态过程。在GIS内产生的这种暂态波，具有短时延和高频率的特征，这些暂态波的上升时间为纳秒级，频率可以达到上百兆赫兹，通过电磁感应作用，表现为母线套管上幅值和频率极高的过电压，在GIS金属外壳上产生陡度很大的暂态环流，而且含有频率极高的谐波分量。除此之外，由于GIS中产生的暂态环流具有高频、超高频分量，而GIS的布置不可能与接地电流注入点的距离一致，会引起GIS的TGPR (Transient Grounding Potential Rise) 效应，可能对二次侧的监控、测量设备产生电磁干扰，造成系统误动作，成为电力系统正常稳定运行的巨大隐患的不足，为了解决如上的技术问题，本申请提出了一种基于PEEC法的GIS外壳环流和暂态地电位升高建模与分析方法。
- [0039] 快速暂态过程产生机理
- [0040] VFTO的产生机理
- [0041] VFTO (Very fast transient overvoltage) 的产生主要源于GIS内部隔离开关、断路器等各种高压开关设备开合闸时产生的电弧重燃击穿引起的快速暂态过电压，由于隔离开关缺乏专门的灭弧设备，对其的操作是产生VFTO的最主要原因。隔离开关操作产生的

VFTO暂态波上升时间很短,约为5~20ns,电压上升率可达40MV/S。幅值在2.0~2.5pu范围内。VFTO的波形及各项指标与电路各元件的参数配置有关,最主要的是由电弧的形成时间决定,即触头间隙从开始发生电荷游离到完全击穿导通所需要的时间,该时间数值越小,VFTO的波形越陡。

[0042] GIS中的快速暂态过电压可分为内部暂态过电压和外部暂态过电压,内部的暂态过电压主要作用于GIS内部高压设备导体和金属壳体之间,会对GIS系统内的各种设备的正常运行造成影响。外部暂态过电压是产生暂态地电位升高的主要原因,其上的高频暂态过电压会以高频电磁波的形式向外辐射,对电力系统继电保护设备和监测设备的正常运行产生巨大影响。

[0043] 外壳环流产生机理

[0044] 在GIS系统中,各种高压开关设备被密封放置于金属外壳中,母线与金属外壳、金属外壳与接地网之间均存在电磁耦合。当隔离开关、断路器等操作产生的VFTO就会在GIS金属外壳上产生环流。

[0045] 以现有GIS系统中使用最广泛的三相分体式结构为例,在三相对称运行下,金属外壳上基本不会产生环流,当产生不对称运行状态或故障状态时,三相外壳之间以及外壳与接地网之间就会产生较高的环流数值,因为系统在正常运行时,外壳接地部分采用分段绝缘的方式,对外壳与大地之间的环流有非常好的抑制效果。但是当系统出现严重的故障状态时,外壳对地电压将急剧增大,绝缘间隙被击穿,对地电阻迅速变小,形成数值极大的外壳与地之间的环流。

[0046] TGPR产生机理

[0047] 在特快速暂态过程中,由于GIS系统的接地线较长,阻抗较高,当频率很高的特快速暂态电流在其上传播时,就会使接地外壳的电位在短时间内急速升高,GIS外壳上出现幅值很高的暂态电压,幅值最高可达100kV。产生TGPR的原因主要有以下几个:一是由GIS内的SF6介质相比于空气来说电气强度很高,但是一旦被击穿,其电气强度将会瞬间下降,电压急剧上升,极易在整个系统内引发高频振荡,引起暂态接地电位升高现象;二是母线上的电压较高,离地间隙较短,导致了空气间隙的击穿,从而引起电位升高;三是当进行断路器或隔离开关操作时,电弧重燃导致两触头间的气体被击穿;四是用于无功补偿或电压调整的外部集中电容器放电所引起暂态接地电位升高;最后一种是高频电流波在外壳断口处产生多次反射,从而引起很高的电压。

[0048] PEEC方法基础理论

[0049] PEEC模型是由麦克斯韦方程组推导出来的一种等效电路模型,要想使用该方法,首先要将被研究对象分割成足够小的微元,然后计算这些微元的自、互电感和自、互电容,再根据物体的实际结构构建出具体的电路模型,最后使用电路分析的方法计算该等效电路,从而实现了研究对象电磁耦合关系的分析。由于PEEC模型是由麦克斯韦方程组推导出来的,因此在考虑了电磁波的传播时延后,该模型可以完整描述电场磁场共存情况下物体的具体状态。近几年来,一些学者开始将PEEC方法运用于多导体系统的电磁暂态分析,把PEEC模型视为一个多端口电路模型,以便与传统意义上的电路模型相连接,从而实现了把PEEC模型的适用范围由微型电路扩展到多导体大尺寸电磁系统的目标。基于库伦、安培和法拉第等前人的研究成果,麦克斯韦得到了时变电磁场的基本方程组。其中,麦克斯韦电磁

场方程组中有三个独立方程,分别为:

$$[0050] \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3-1)$$

$$[0051] \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3-2)$$

$$[0052] \quad \nabla \times \vec{J}_c = -\frac{\partial \rho_f}{\partial t} \quad (3-3)$$

[0053] $\vec{H}$ 是磁场强度, $\vec{J}$ 是传导电流密度, $\vec{D}$ 是电通量密度, $\vec{E}$ 是电场强度, $\vec{B}$ 是磁通量密度, ρ_f 是电荷密度。

[0054] 对(3-1)和(3-2)两边取散度,并将(3-3)代入(3-1)可以得到

$$[0055] \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad (3-4)$$

$$[0056] \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3-5)$$

[0057] 在上面的五个等式中, $\vec{H}$ 、 $\vec{B}$ 、 $\vec{D}$ 、 $\vec{E}$ 四个矢量为基本电磁场量, $\vec{J}_c$ 、 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ 、 ρ_f 为基本场源。在时变电磁场中又有以下关系式:

$$[0058] \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3-6)$$

$$[0059] \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3-7)$$

[0060] 其中: μ 为磁导率, ϵ 为电导率。

[0061] 引入矢量磁位 $\vec{A}$:

$$[0062] \quad \nabla \cdot \vec{A} = -\mu \epsilon \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$[0063] \quad \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3-8)$$

[0064] 应用PEEC方法建立模型,需要考虑外部施加电压的作用,电场的积分式可以写成:

$$[0065] \quad \vec{E}_o(t) = \vec{E}(t) + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \quad (3-9)$$

[0066] 在不同的元胞中,电流密度主要来源于四部分:传导电流、传导电源分量磁化电流、位移电源分量磁化电流及极化电流。在体积单元 V_i 内对全电流求积分,结果如下:

$$\begin{aligned}
\tilde{J}_i &= \frac{\tilde{l}_i}{l_i} \int_{V_i} \tilde{J}(t) dV \\
&= \frac{\tilde{l}_i}{l_i} \int_{V_i} \tilde{J}_c(t) + \tilde{J}_{cm}(t) + \tilde{J}_{dm}(t) + \tilde{J}_p(t) dV \\
[0067] \quad &= \left(\frac{\sigma a_i}{l_i} + \frac{(\mu_r - 1) \sigma a_i}{l_i} \right) \eta_i(t) \\
&\quad + \left(\frac{(\mu_r - 1) \varepsilon a_i}{l_i} + \frac{(\varepsilon_r - 1) \varepsilon_0 a_i}{l_i} \right) \frac{\partial \eta_i(t)}{\partial t} \\
&= \left(\frac{1}{R_{ci}} + \frac{1}{R_{cmi}} \right) \eta_i(t) + (C_{dmi} + C_{pi}) \frac{\partial \eta_i(t)}{\partial t} \quad (3-10)
\end{aligned}$$

[0068] 式中, $\tilde{J}_c(t)$ 为传导电流密度, $\tilde{J}_{cm}(t)$ 为传导源磁化电流密度, $\tilde{J}_{dm}(t)$ 为位移源磁化电流密度, $\tilde{J}_p(t)$ 为极化电流密度, R_{ci} 、 R_{cmi} 分别为传导电流作用产生的电阻和传导源磁化电流作用产生的电阻, C_{dmi} 、 C_{pi} 分别为位移源磁化电流作用产生的电容和极化电流的作用产生的电容。

[0069] 元胞的PEEC模型,除了考虑电流等效外,还需要考虑面电荷对各节点电位的影响。元胞各单元电位 Ψ 与电量 Q 可以通过电容系数矩阵 C 和电位系数矩阵 P 相关联,如下式所示:

$$[0070] \quad \varphi = PQ$$

$$[0071] \quad Q = C\varphi \quad (3-11)$$

[0072] r_1 处的电位可表示为:

$$[0073] \quad \varphi(r_1) = \sum_{j=1}^N \frac{1}{4\pi\varepsilon} \rho_{sj} \int_{S_j} \frac{1}{r - r_1} dS' \quad (3-12)$$

[0074] 把第 j 个构件单元分成 N_j 个小单元,小单元上的电荷密度为常数,上式可以表示为:

$$[0075] \quad \varphi_i = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_j} \frac{1}{4\pi\varepsilon S_i S_j} \rho_{sj} \int_{S_j} \int_{S_i} \frac{1}{r - r_i} dS' dS Q_{sj}(t) \quad (3-13)$$

[0076] 式中: S_i 、 S_j 分别为第 i 、 j 个元胞的面积和 N 个构件单元的总面积,定义电位系数矩阵 p_{ij} 如下所示:

$$[0077] \quad p_{ij} = \frac{1}{4\pi\varepsilon S_i S_j} \int_{S_j} \int_{S_i} \frac{1}{r - r_i} dS' dS \quad (3-14)$$

[0078] 结合上面等式,可得考虑面电荷后的元胞全电流PEEC模型如图1所示。

[0079] 1GIS母线及外壳的PEEC模型

[0080] 母线在通过交流电信号时,在母线中会出现趋肤效应,电荷集中在母线“皮肤”位置,通常可以利用空心导电杆代替实心的导线。

[0081] 趋肤深度的计算公式为:

$$[0082] \quad \Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu r}} \quad (3-15)$$

[0083] 其中: r 是导电杆的电导率, μ 是磁导率。

[0084] 在对母线进行PEEC法等效时,选取高小于趋肤深度的长方形元胞作为单位元胞,

在这些元胞中,可以近似认为电荷密度是均匀的。在元胞划分中,取元胞长度为1m。母线的元胞划分如图2所示。

[0085] 对于长方体元胞,其部分自感的计算公式可近似为:

$$\begin{aligned} \frac{L_{ii}}{l} = & \left\{ \frac{\mu}{6\pi} 3 \ln[u + (u^2 + 1)^{1/2}] + u^2 + u^{-1} \right. \\ & \left. + 3u \ln\left[\frac{1}{u} + \left(\frac{1}{u^2} + 1\right)^{1/2}\right] - \left[u^{3/2} + \left(\frac{1}{u}\right)^{3/2}\right]^{1/2} \right\} \end{aligned} \quad (3-16)$$

[0087] 其中:u是元胞长宽比。

[0088] 在母线的元胞划分中,不同元胞的空间位置为空间平行,则其部分互感计算公式为:

$$M = \frac{\mu l}{2\pi} \left[\ln \frac{l + \sqrt{l^2 + h^2}}{h} - \frac{\sqrt{l^2 + h^2}}{l} + \frac{h}{l} \right] \quad (3-17)$$

[0090] 其中:l为元胞的长度,h为两个平行元胞之间的距离。

[0091] 则GIS母线的部分电感为:

$$L_p = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K^2} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K L_{pij} \quad (3-18)$$

[0093] 其中,K为母线划分的元胞数量,即部分电感是前文计算的部分自感和部分互感的求和。在元胞空间距离不是很小的时候,K的取值可以不用很大即可得到精度较高的结果。

[0094] 对于GIS外壳,由于外壳的感应电信号也是交流电信号,所以可以对外壳做类似于母线的处理,将外壳划分为长方体元胞,划分如图3所示。

[0095] 外壳的部分参数计算与母线类似,不做赘述。

[0096] 开关部件模型

[0097] 采用西门子公司提出的隔离开关模型,将其视为一个时变电阻的模型,电阻可用指数函数表示:

$$R_a(t) = r_0 + R_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-19)$$

[0099] 其中, $\tau = 1\text{ms}$,是时间常数; $r_0 = 0.5\Omega$ 是静态电阻值, $R_0 = 10^{12}\Omega$ 为开关间隙击穿前的电阻。其断口两侧用对地电容表示,数值为数十pF。

[0100] 对于变压器,采用入口电容的模型,入口电容的计算公式为:

$$C_i = K^n \sqrt{S} \quad (3-20)$$

[0102] 其中,对于绝缘子、电压互感器、避雷器等几种元件,采用集中参数的对地电容表示,套管可以采用波阻抗和对地电容表示。

[0103] 接地体模型

[0104] 接地网由多根接地体连接成网络状,参考文献可知,接地体之间的耦合可以忽略,所以接地体的II型等效电路组成,如图4所示。

[0105] 接地体参数可用单位长度上的电阻R、电导G、电感L和电容C来表示,其计算式为:

$$[0106] \quad \left\{ \begin{array}{l} R_0 = \frac{\rho_D}{S} \\ G_0 = \frac{2\pi}{\rho \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2hr}} - 1 \right)} \\ C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2l}{\sqrt{2hr}} - 1} \\ L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2hr}} - 1 \right) \end{array} \right. \quad (3-20)$$

[0107] 其中, ρ_D 为接地体电阻率, ρ 为土壤电阻率, h 为埋地深度, r 为接地体半径, l 为接地体长度。

[0108] 为了研究环流特性, 采用PEEC方法建立等值模型如图5所示。

[0109] 假定在土壤电阻率为 $20 \Omega \cdot m$, 的土壤条件下, 母线接地之间电感用 $L_s = 1 \mu H$ 来等效, 选择水平接地体分段与垂直接地体分段相结合的方法来模拟接地装置。

[0110] 环流分析

[0111] 在GIS金属外壳上按相同间隔取5个接地点, 计算每一相接地段的感应电流值与接地位置的关系, 具体关系如图6所示。

[0112] 通过该图可以看出, 地网环流值与接地位置之间的关系呈现U型曲线, 在中间的接地位置取得最小值。图中B相最小值出现在接地点4, 出现这种情况的原因可能是接地点数量选取略少的原因。

[0113] 为研究相间的环流特性, 任选两相之间进行分析, 得两相之间的环流大小随接地位置都近似成U型变化, 即GIS外壳间环流与接地点之间的电流的变化趋势相同。

[0114] 取两相之间的相间距离分别为1m, 2m, 3m, 4m, 5m。计算得到GIS每一个相间间距下的最大环流值。

[0115] 由图8可知, 随着相间距离的增加, GIS外壳相间的感应电流大小会有增加, 在相间距离达到一定值之后, 会趋于稳定。

[0116] 分别取外壳半径为0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m, 0.6m, 0.7m, 计算不同情况下GIS外壳接地端环流大小。

[0117] 由图9可知, 随着外壳半径的增加, 相间环流随之减小。

[0118] 按照上面的模型, 分别计算接地点间距为20m, 40m, 60m, 80m情况下GIS外壳接地端环流大小。

[0119] 通过图10分析可知, 加大接地间距的时候, 相间电流会有一定幅度的增加, 由此可知, 增加接地点数量, 缩短接地点间距可以缩小相间感应电流。

[0120] 为了保证GIS运行的安全, 其母线的外壳至少有一点是接地的。接地线与地网相连接, 此接地线可以降低壳体上的暂态电位。

[0121] 在GIS母线外壳上距离套管由近到远依次选取6个点, 其中节点1为套管与架空线连接点。接地线可以降低壳体上的暂态电位。通过仿真计算来分析GIS外壳接地线位置、数量和电感值以及GIS壳体接地点个数等因素对TGPR的影响。

[0122] 接地点在节点1、6处(节点1为套管与GIS连接处)时,计算得到的各点TGPR幅值与接地点在节点2、6处TGPR的幅值对比如下:

[0123] 表1不同接地点TGPR值比较

[0124]

接地点位置	1	2	3	4	5	6
1、6接地	0.23pu	0.21pu	0.18pu	0.18pu	0.15pu	0.12pu
2、6接地	0.29pu	0.27pu	0.23pu	0.21pu	0.18pu	0.17pu

[0125] 表1可以看出,接地线离GIS套管越近,各节点的TGPR幅值都有明显降低,可见如果在GIS套管处安装接地装置对接地点以及各点的TGPR有很好的抑制作用。

[0126] 将接地线电感改为 $0.2\mu\text{H}/\text{m}$,计算得到的各点TGPR幅值与原来情况对比如下。可以看出TGPR幅值随着接地线电感的降低而有显著的降低。因此可以通过降低母线筒高度,以减小接地引线长度,从而降低接地线的电感,从而达到降低TGPR数值的效果。

[0127] 表2接地线电感值对TGPR影响

[0128]

接地电感	1	2	3	4	5	6
$0.1\mu\text{H}/\text{m}$	0.29pu	0.27pu	0.23pu	0.21pu	0.18pu	0.17pu
$0.2\mu\text{H}/\text{m}$	0.34pu	0.29pu	0.26pu	0.24pu	0.24pu	0.22pu

[0129] 为研究环流值与接地点数量的关系,分别计算接地点位置为1、6时和接地点位置为1、3、5时的TGPR幅值,并列表比较。

[0130] 表3接地点数对TGPR影响

[0131]

接地位置	1	2	3	4	5	6
1、6	0.23pu	0.21pu	0.18pu	0.18pu	0.15pu	0.12pu
1、3、5	0.18pu	0.15pu	0.14pu	0.13pu	0.11pu	0.11pu

[0132] 从表3可以看出,外壳的接地点越多,各个点的TGPR数值越低。

[0133] 金属氧化物避雷器有良好的陡波响应特性,可以抑制与VFTO类似的TGPR。金属氧化物避雷器主要用来抑制绝缘法兰两端处的TGPR。

[0134] 表4金属氧化物避雷器对TGPR影响

[0135]

	1	2	3	4	5	6
加装前	0.29pu	0.27pu	0.23pu	0.21pu	0.18pu	0.17pu
加装后	0.24pu	0.23pu	0.20pu	0.18pu	0.16pu	0.14pu

[0136] 可以看出,加装金属氧化物避雷器能有效降低TGPR的幅值。

[0137] 本发明在介绍GIS系统中的环流和暂态对地电位升高的产生机理的基础上,采用PEEC法建立GIS母线和外壳的模型,分析结果表明:GIS相间环流和地网环流的幅值与接地点之间都呈现U型曲线,环流的较大值出现在套管与母线的连接点;考虑相间环流,减小相间距离、增加外壳半径、增加接地点数量等方法可以有效抑制外壳环流;调整接地点位置、降低接地电感值、增加接地点数、加装避雷器等方法可以有效抑制TGPR。

[0138] 以上所述仅为本申请的优选实施例而已,并不用于限制本申请,对于本领域的技术人员来说,本申请可以有各种更改和变化。凡在本申请的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本申请的保护范围之内。

[0139] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

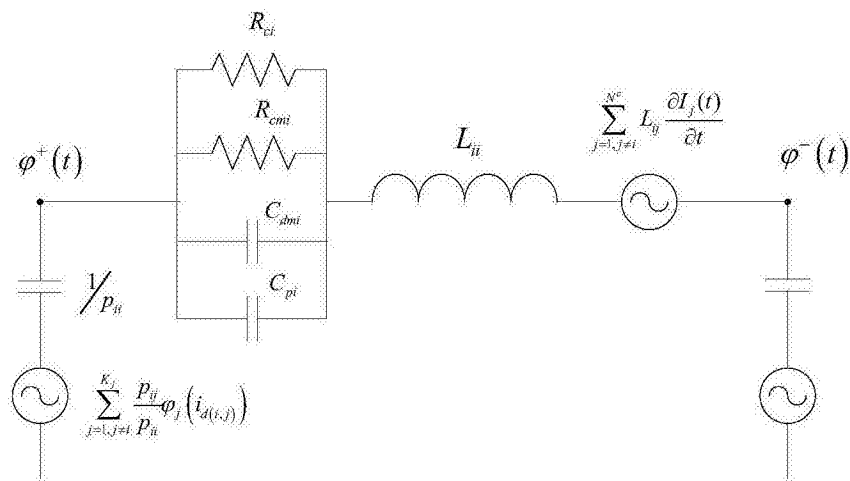


图1

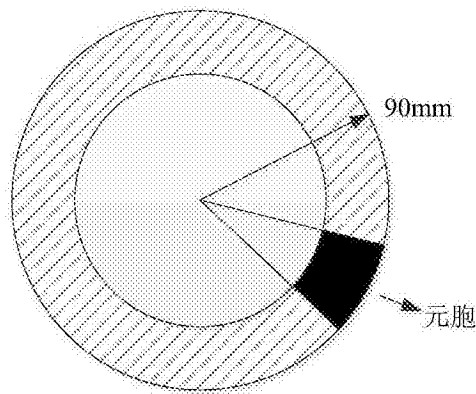


图2

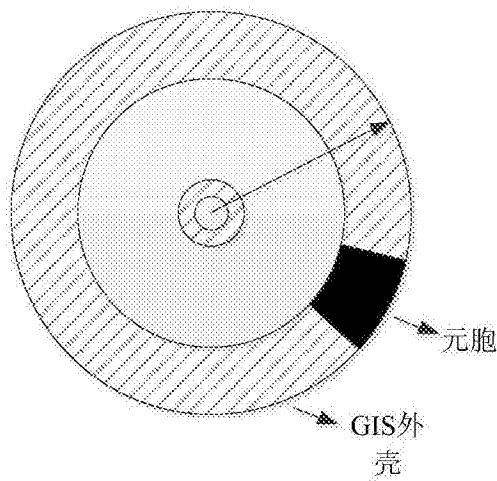


图3

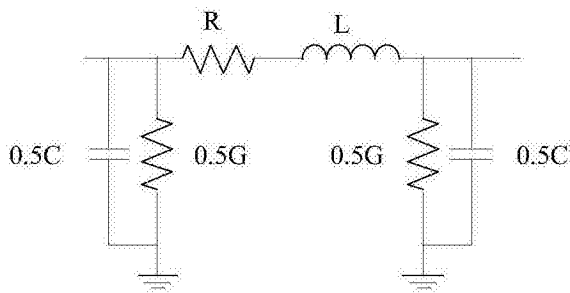


图4

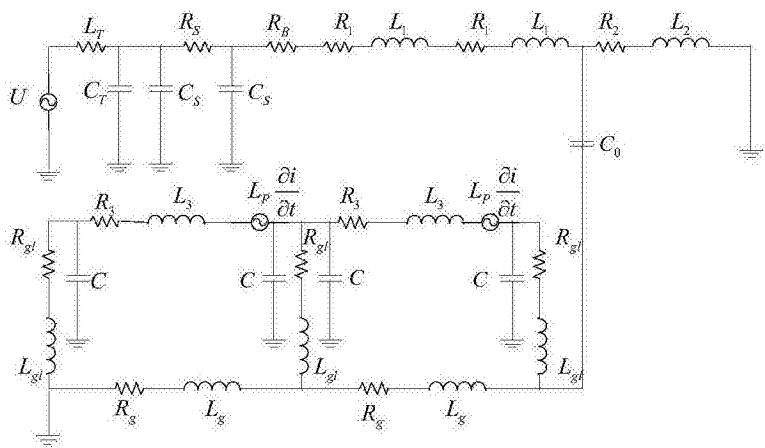


图5

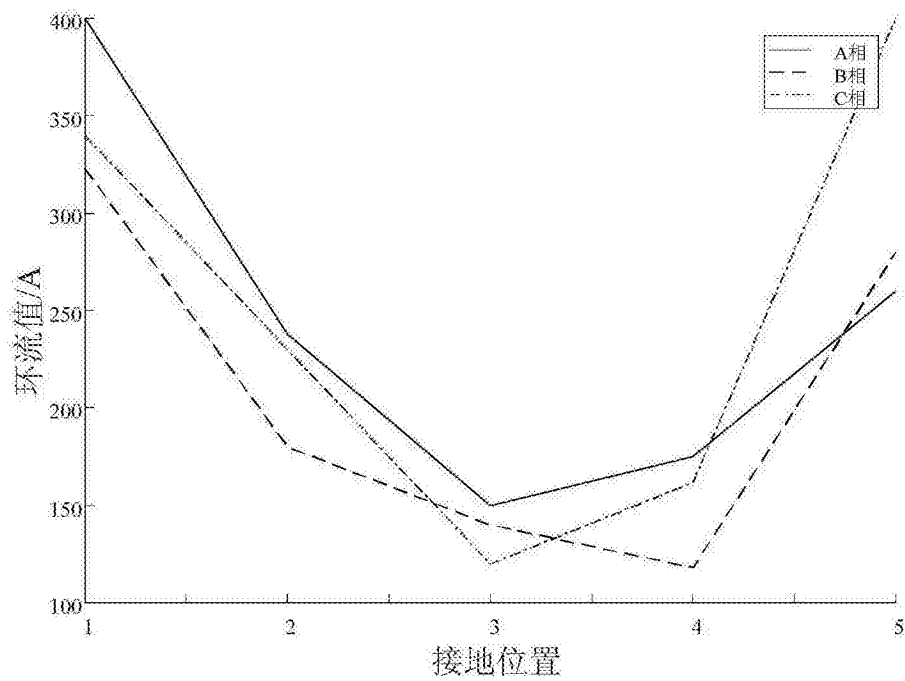


图6

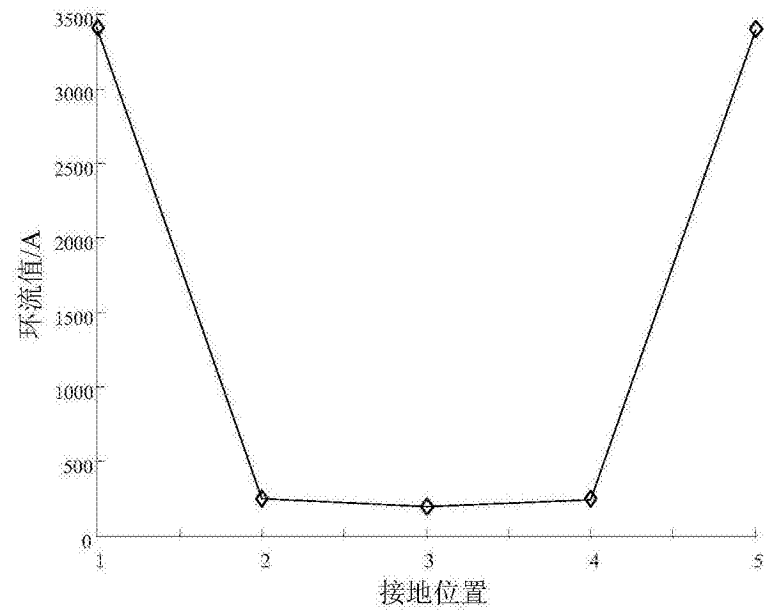


图7

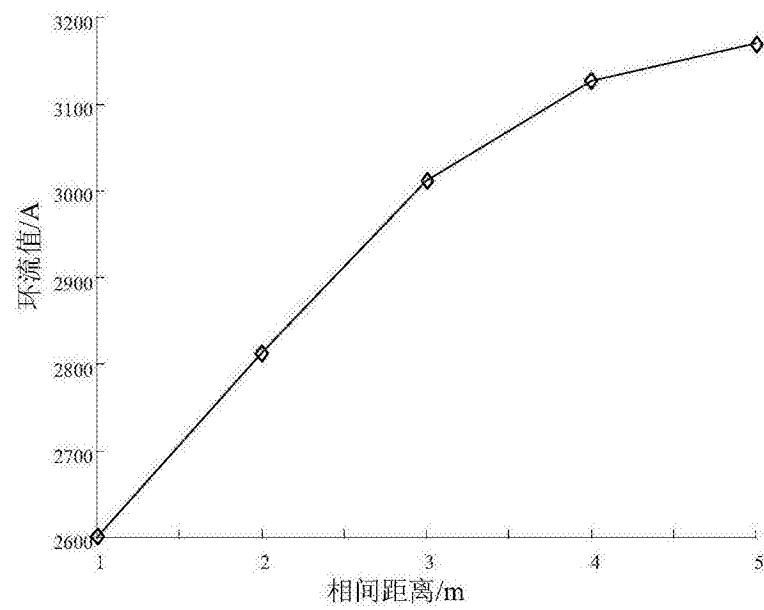


图8

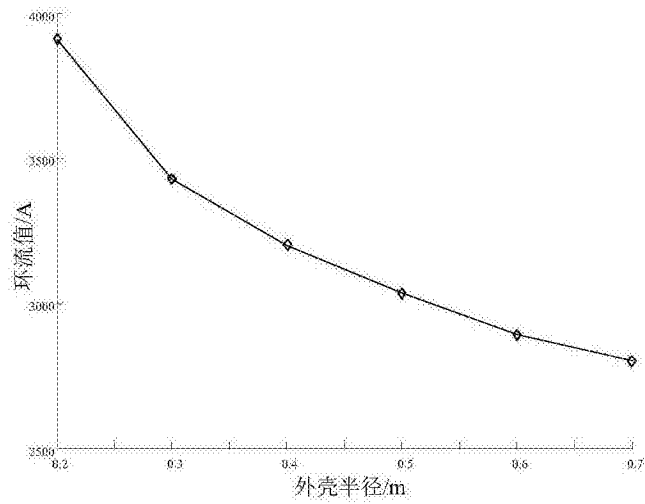


图9

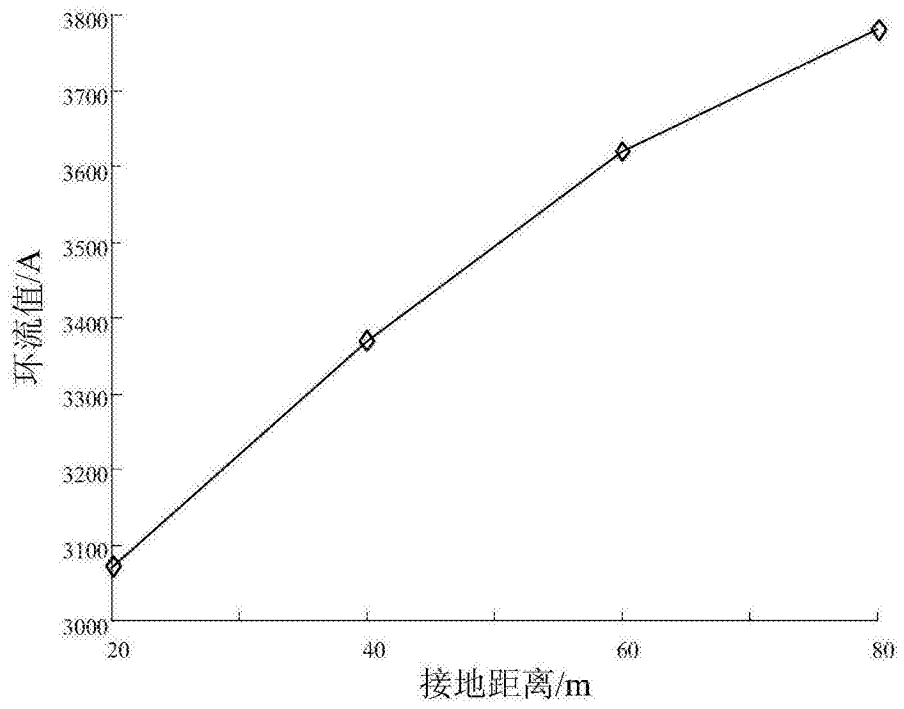


图10