

3 种典型 220 kV GIS 变电站进线方式的电磁场分析

牟秋谷¹, 周 凯^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 高压输变电系统产生的工频电磁环境成为当今人们关注的热点问题。本研究利用 COMSOL Multiphysics(多物理场有限元仿真软件)模拟分析了 3 种典型 220 kV GIS(气体绝缘组合电器设备)变电站进线方式在周围空间所产生的工频电场和磁场分布特征及影响规律。首先建立 3 种输电线路的模型;然后利用有限元法进行软件仿真,计算电磁场在离地 1.5 m 和 15 m 高度处的水平分布;最后按照国际非电离辐射防护委员会(ICNRIP)1998 年发布的《限制时变电场、磁场和电场磁暴露(300 Hz 以下)导则》对结果进行评估。计算结果表明 220 kV 电压等级的 3 种进线方式产生的工频电磁场均低于 ICNRIP 规定的公众暴露限制。

关键词: 输电线路; GIS 变电站; 电磁环境; 有限元法; 仿真

Abstract: The electromagnetic environment of high-voltage transmission systems has become the focus with the increase in high voltage transmission level. The distribution features of power-frequency electric field and magnetic field of three typical incoming lines in 220 kV GIS (gas-insulated switchgear) substation are investigated and analyzed. Firstly, the models of three typical incoming lines are established. Then the horizontal distribution of power-frequency electric field and magnetic field at the height of 1.5 meters and 15 meters above the ground is simulated and calculated using finite element method (FEM) with the software of COMSOL Multiphysics. Finally, according to "Guidelines for Limiting Exposure To Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 Hz)" (ICNRIP, 1998), the data of simulation calculation is analyzed and evaluated. The result indicates that the power-frequency electromagnetic fields generated by three kinds of incoming lines in 220 kV GIS substation are lower than the public exposure limits prescribed in ICNRIP.

Key words: transmission line; GIS substation; electromagnetic environment; finite element method; simulation

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0030-04

0 引言

随着城市电网的负荷越来越大, 10 kV 系统已不能满足城市电网需要, 城市中心区域需修建大容量变电站才能满足日益增长的负荷需要。GIS 变电站由于其具有节约占地、安装方便以及不受恶劣环境影响等优点成为城市变电站的首选。然而由于中国电磁场环境健康公共信息长期不对称, 部分公众对 GIS 变电站的电磁场环境影响充满担忧和误解, “输变电电磁辐射严重危害健康”等言论流传更增加了公众的误解与不满。居民过度维权造成电网建设受阻, 不仅影响了中国国民经济的发展, 更严重影响了城市居民用电的保障。GIS 变电站采用了较好的电磁屏蔽措施, 其对电磁场的影响主要来源于高压端进线部分。因此, 对 220 kV GIS 变电站进线产生的电磁场

分布的研究和评估, 对认识输变电系统的环境影响和未来发展有着重要意义。

目前对于输电线路电磁场的研究主要集中于架空输电线^[1,3]和 XLPE(交联聚乙烯)电缆^[2]。但多是单独研究某一类型输电线路的电磁场分布, 缺少将不同输电线路产生的电磁场进行比较的研究。同时, 国内对于 GIC(气体绝缘电缆)的电磁场研究也较少。

这里利用 COMSOL Multiphysics 软件建立架空输电线、XLPE 单芯电缆和 GIC 3 种典型变电站进线模型, 计算其在相同电压等级下输送相同电力容量时工频电磁场的分布, 并对结果进行评估和比较。

1 研究方法

1.1 原理

1.1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组利用一组偏微分方程(PDEs)概括了电磁场的规律。为了说明其物理意义,这里采用其积分形式。

$$\oint_L H \cdot dl = \int_S (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \cdot dS \quad (1)$$

$$\oint_L E \cdot dl = - \int \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (2)$$

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (3)$$

$$\oint_S D \cdot dS = q \quad (4)$$

式(1)是全电流定律,它说明不仅传导电流产生磁场而且变化的电场也会产生电场;式(2)是推广的电磁感应定律,它说明变化的磁场可以产生电场。式(3)是磁通连续性原理,说明磁力线是闭合曲线;式(4)是高斯定理,反映了电荷以发散的方式产生电场。这组方程表明变化的电场和磁场相互联系、相互激发形成统一的电磁场。

1.1.2 数值分析方法

COMSOL Multiphysics 采用有限元法进行求解计算。其基本思想是把连续的求解域划分为有限个网格单元,在每个单元内选取一些合适的点作为求解函数的插值点,将微分方程(组)改写成由各变量或其导数的节点值与所选的插值函数组成的线性方程(组),求解线性方程(组)获得近似解来代替求解域内的真值。COMSOL Multiphysics 通过3步来完成对物理场的仿真计算。①前处理:建立有限元模型,完成单元网格划分;②处理:将微分方程(组)转化为线性方程(组)并进行求解;③后处理:采集处理分析结果,使用户能简便提取信息。

1.2 模型构建

1.2.1 模型参数

模型参数均依据国标采用较为典型的输电线路模型。电压等级采用220 kV,输送容量为180 MVA,电流按照负载达到额定功率时每相平均分配。线路参数如下表^[4-5]。

表1 输电线路模型主要参数

输电线路	主要参数表
架空 输电线	直线塔同塔双回,铁塔型号 SZ402,导线型号 2×LGJ400/50 地线型号 LGJ95/55
XLPE 单芯电缆	电缆型号 YJLW02-Z,标称截面 630 mm, XLPE 绝缘厚度 26 mm,外半导层厚度 1.2 mm,皱纹铝护套厚度 2.4 mm, PVC 护套厚度 5 mm
GIC	分相封闭式 GIC, $\mu_s/dc = 307/102$ mm

3种输电线路敷设方式如图1、图2、图3。

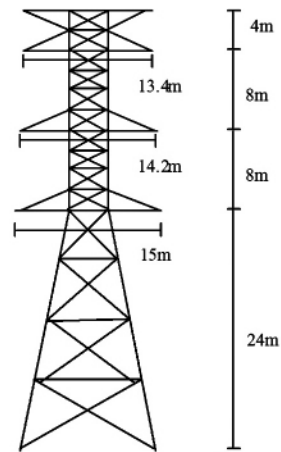


图1 架空输电线铁塔主要参数

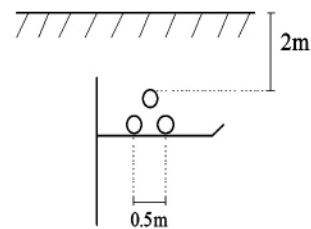


图2 XLPE单芯电缆的敷设方式

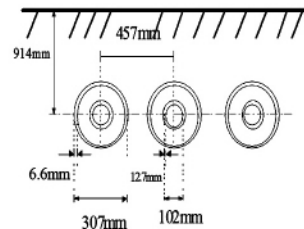


图3 GIC的敷设方式

1.2.2 模型构建

模型构建如图4所示,以输电线路为水平中心,建立一个120 m×60 m的电磁场求解空间,并将材料设为空气。对于入地敷设的XLPE电缆和GIC,则将求解空间扩大到地面以下10 m。为了较好地模拟真实情况,在求解空间外加入了一层无限元区域,使模拟的工频电磁场在无限远处电场和磁场强度为零。在计算工频电场时,把大地作为电位为零的等位体,因此不需要地面以下的一层无限元区域。

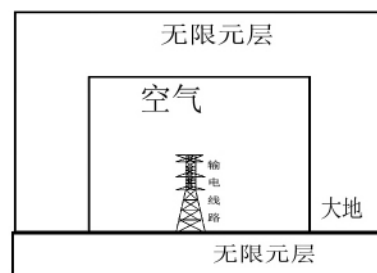


图4 输电线路空间建模图

1.3 评估标准

对计算结果采用国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)1998年发布的《限制时变电场、磁场和电场磁暴露(300 Hz以下)导则》(下称《导则》)以及中国国家环保总局制定的《500 kV超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》(下称《规范》)。

《导则》规定50 Hz工频磁场的公众暴露限制为100 μT,电场的公众暴露限制为5 kV/m^[7]。《规范》规定“送电线路的测量是以档距中央导线弛垂最大处线路中心为原点,沿垂直于线路方向进行,测点间距为5 m,顺序测至边相导线地面投影点外50 m处止。分别测量离地1.5 m处电场强度垂直分量、磁场强度垂直分量和水平分量”^[8]。

研究选取离地高度1.5 m,水平距输电线路50 m以内的空间作为计算空间,计算电磁场分布以及磁感强度和电场强度最大值从而评定其是否符合公众暴露限制标准。再选取离地高度15 m,水平距输电线路50 m以内的空间作为计算空间,计算电磁场分布,用于判断输电线路产生的工频电磁场对周围高楼居民的影响。

2 结果和讨论

2.1 磁场分布

以输电线路几何中心为原点,计算在离地1.5 m和15 m高度处其磁场的水平分布,结果如图5、图6。

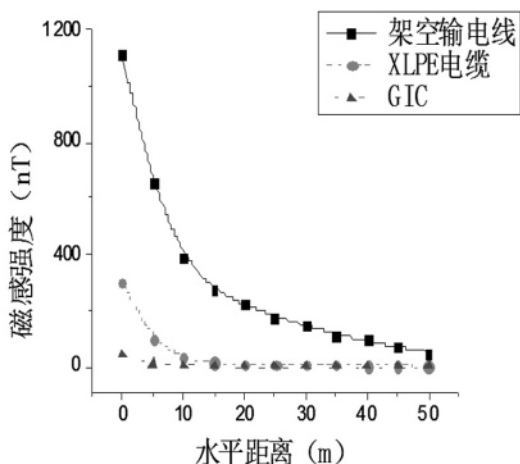


图5 离地1.5 m高处3种输电线路工频磁场的水平分布

由图5可知,磁感强度随着水平距离的增加而减小。曲线下降速度随水平距离的增加而趋于平缓。

距地1.5 m高处架空输电线、XLPE电缆和GIC的最大磁感强度分别为1.11 μT、0.30 μT、0.04 μT,远小于ICNIRP规定的公众暴露限制100 μT。

XLPE电缆和GIC的磁感强度远小于架空输电线的磁感强度。GIC由于其金属外壳对磁场有较强的屏蔽作用,故其磁场强度最低。XLPE电缆采用了正三角形敷设方式,其三相产生的磁场互相抵消,故其磁感强度也较低。距离电缆越远,这种抵消作用越明显。这种现象在图5表现为其磁感强度曲线从0到10 m处急剧下降,当水平距离大于10 m后,磁感强度小于最大值的1/10。架空输电线由于没有电磁屏蔽措施,其三相导线采用纵向排列,故其磁场最强。

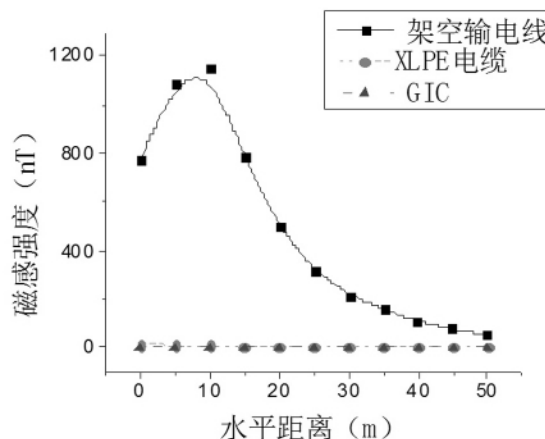


图6 离地15 m高处3种输电线路工频磁场的水平分布

在离地距离15 m高处,此时相距XLPE电缆和GIC都较远,其磁感强度小于15 nT,可以忽略。主要考虑架空输电线的磁场分布:水平距中点10 m处离架空输电线最下一根导线最近,因而其场强最高,为1.154 μT,仍远小于100 μT。当水平距离大于10 m时,磁感强度随着水平距离的增大而降低。距离场源越近,磁感强度的变化越剧烈。

当水平距离大于35 m时,两个高度的磁场强度都小于0.2 μT。可认为当居民楼建在距离架空输电线35 m以外的地方,住户不会受到工频磁场影响。

2.2 电场分布

XLPE电缆的皱纹铝护套和GIC金属外壳接地,将电场屏蔽在电缆和GIC内部,故其外部电场强度为零。这里只讨论架空输电线的电场。

图7为220 kV架空输电线工频电场的等位图。由图7可见,靠近导线的区域等位线较密,场强较高。在距地15 m处,位于最低导线下方等位线最密,说明

此处电场最强。在距地 1.5 m 处,位于水平中点等位线最密,说明此处电场强度最强。

以架空输电线几何中心为中点,计算在离地 1.5 m 和 15 m 高度处其电场的水平分布,结果如图 7、图 8。

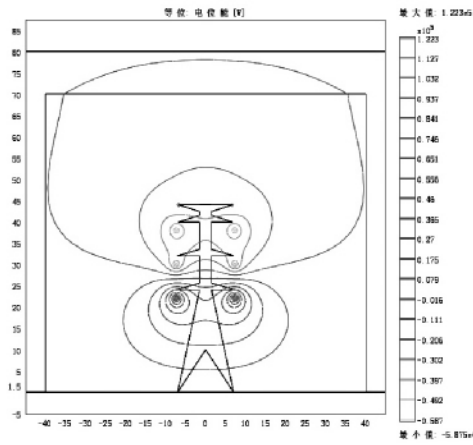


图 7 220 kV 架空输电线工频电场等位图

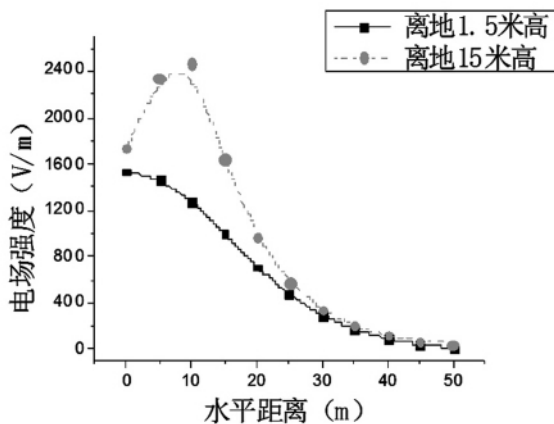


图 8 架空输电线工频电场的水平分布

架空输电线产生的工频电场在离地 1.5 m 高处和 15 m 高处电场最大值分别为 1 535 V/m 和 2 468 V/m,均小于 ICN RIP 规定的公众暴露限制 5 000 V/m。

在 15 m 高度水平距中点 10 m 处离架空输电线最下一根导线最近,因而其场强最高,这与电场等位图相符合。当水平距离大于 10 m 时,曲线开始下降,下降速度随水平距离的增加而趋于平缓。

当水平距离大于 50 m 时,两个高度的电场强度均小于 50 V/m,可以认为当 5 层居民楼建在距离架空输电线 50 m 以外的地方,住户不会受到工频电场影响。

3 结 论

1) 在 1.5 m 高度向线路两侧延伸 50 m 空间内 3

种 220 kV GIS 变电站进线方式在输送 180 MVA 容量时产生的工频电磁场最大磁感强度分别为 1.11 μ T、0.30 μ T、0.04 μ T,架空输电线在此空间内最大电场强度为 1.535 kV/m,均小于 ICN RIP 规定的公众暴露限制 100 μ T 和 5 kV/m。XLPE 电缆和 GIC 由于其皱纹铝护套和金属外壳接地将电场屏蔽在电缆和 GIC 内部,故其外部电场强度为零。

2) 输送相同容量时, XLPE 电缆和 GIC 产生的工频磁场强度远小于架空输电线。

3) 在输电线路周围空间中,距离场源越近,电磁场强度越强,其变化也越剧烈。

参考文献

- [1] 许杨,张小青,杨大晟. 高压输电线路工频电磁环境[J]. 电力学报,2007,22(1):9-14.
- [2] 王勤,杨敬梅,张欣,等. 西北 750 kV 输电线路工频电场模拟试验研究[J]. 高电压技术,2005,31(5):34-36.
- [3] 张愉,吴锁平,窦飞,等. 500 kV 过江电缆空间工频磁场的研究[J]. 华东电力,2010,38(6):881-886.
- [4] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京:水利电力出版社,1994:56-62.
- [5] 刘书全. 220 kV XLPE 绝缘电力电缆的设计及试制[J]. 电线电缆,2000(5):10-14.
- [6] DL/T 5092-1999,110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICN RIP). Guidelines For Limiting Exposure To Time-varying Electric, Magnetic, And Electromagnetic Fields(up to 300 GHz) 1998[S].
- [8] HJ/T 24-1998,500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].
- [9] William B. J. Zimmerman. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [10] 邹澎,王芳. 高压输电线附近工频电场的数学模型[J]. 中国电力,1994(6):20-23.

作者简介:

牟秋谷(1982),男,硕士研究生,高电压与绝缘技术专业;

周凯(1975),男,博士,副教授,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

(收稿日期:2011-02-10)