

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.020

# 扫频电流下不同电流频率对 GIS 电磁分布特性的影响

赵晋飞<sup>1</sup>, 张壮壮<sup>1</sup>, 刘琛硕<sup>1</sup>, 周亦君<sup>2</sup>, 李宏祥<sup>2</sup>, 祝令瑜<sup>1</sup>

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049;  
2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电局, 内蒙古 包头 014030)

**摘要:** 气体绝缘开关设备(GIS)在电力传输中具有重要作用,对电力系统安全、稳定运行具有重要意义。目前,利用电力设备扫频特性对 GIS 机械故障进行检测的方法受到广泛关注,但缺乏对 GIS 在扫频电流作用下的磁场以及电磁力分布研究。为此,文中建立 110 kV 三相共体式 GIS 母线筒的有限元模型,仿真研究不同电流频率下 GIS 磁场及电磁力分布特征。结果表明,随着电流频率的变化,GIS 内部磁场分布规律、GIS 外壳和导电杆所受电磁力分布规律均不发生改变;但 GIS 内部磁通密度会随着电流频率增加而下降,外壳所受电磁力大小会随着电流频率的增加而增大。研究结果为利用 GIS 扫频特性进行机械故障检测提供了理论基础。

**关键词:** 气体绝缘开关设备(GIS);有限元模型;扫频电流;磁场分布;电磁力分布

中图分类号:TM155

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0138-05

## 0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulation switcher, GIS)是一种电能传输设备,在电力系统中有至至关重要的作用,一旦出现故障,将会导致极为严重的大面积停电事故。GIS 能有效减少变电站占地面积,提高电力系统可靠性、安全性,被广泛应用于现代电力系统中。随着 GIS 的广泛应用,因安装缺陷、螺栓松动、触头接触不良等机械故障引起的设备故障次数占比约为 39.30%,高于绝缘故障占比 38.10%<sup>[1-4]</sup>。因此,检测机械缺陷对保障 GIS 安全稳定运行具有重要意义。

从 20 世纪 80 年代开始,文献[5—8]利用 GIS 外壳振动信号故障检测技术进行了一系列研究,但局部放电信号频率较高,与现场实际检测到的 GIS 低频振动噪声不同,不能直接反应 GIS 内部机械缺陷。利用振动信号对 GIS 的机械故障诊断主要从振动产生机理和故障诊断算法 2 方面进行研究。文献[8]研究了三相分体式和共体式 GIS 的振动机理,利用模态分析手段对 GIS 母线气室进行仿真和试验。文献[9]利用希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)的时频谱和边际谱对故障 GIS 设备进行诊断。文献[10]提出利用高频振动谐波与 100 Hz 振动幅值的比值作为母线触头松动缺陷的判断依据。文献[11]通过改进梅尔倒谱系数对断路器的机械状态进行检测。文献[12]仿真研究了 GIS 中的电磁波传播特性。文献[13]研究了 L 型和 T 型

GIS 中的电磁波传播特性。虽然上述研究提出了三相共体式 GIS 振动机理,并利用振动信号对 GIS 机械故障进行检测,但提出的模型均利用了导电杆尺寸远小于导电杆间距离的假设,不符合 GIS 内部实际尺寸结构。且仅对外壳表面振动进行研究,未探讨磁场分布、电磁力大小与外壳振动的关系,亦未对导电杆的振动进行分析。此外,以上仅对 GIS 外壳在工频电流作用下的振动进行研究,缺少扫频电流作用下 GIS 机械故障诊断的相关理论基础。

为了解决扫频电流作用下 GIS 机械故障诊断理论研究的不足,文中从电磁-机械力学的耦合分析入手,利用有限元软件建立三维模型,获得三相共体式 GIS 在不同频率电流作用下 GIS 导电杆和外壳的磁场分布、电磁力大小规律,为进一步利用 GIS 扫频特性对其机械故障进行检测奠定基础。

## 1 仿真模型

研究采用的 110 kV 三相共体式 GIS 母线筒的结构尺寸如表 1 所示。

表 1 GIS 母线筒尺寸

Table 1 The size of GIS bus barrel

参数	数值/mm
母线筒长度	982
母线筒半径	250
母线筒厚度	8
绝缘盆厚度	70
绝缘盆半径	315

根据实际使用的 110 kV GIS,其母线筒材料为铝合金,绝缘盆为环氧树脂,导电杆为铝合金。根

收稿日期:2020-05-05;修回日期:2020-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877168)

据GIS各部分的结构材料参数在软件中选择相应的部件进行参数设定,具体参数如表2所示。

表2 材料参数  
Table 2 Parameters of materials

材料	密度 $\times 10^3 / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量 $\times 10^{10} / \text{Pa}$	泊松比
铝(AL-6063)	2.7	6.9	0.33
环氧树脂	2.0	0.1	0.38

根据母线筒尺寸和材料,得到如图1所示的GIS母线筒模型。模型由3段母线筒组成,模型从左向右分别为母线筒1、绝缘盆1、母线筒2、绝缘盆2、母线筒3。根据该110 kV GIS实际结构,在2个绝缘盆下方分别添加刚度为 $10^7 \text{ N/m}$ 的弹簧约束模拟GIS母线筒下方的地脚刚度。在母线筒1的端板添加200 kg的质量模拟三相出线端子的重量。在母线筒3的端板添加刚度为 $5 \times 10^8 \text{ N/m}$ 的弹簧模拟断路器对于母线筒振动的约束。

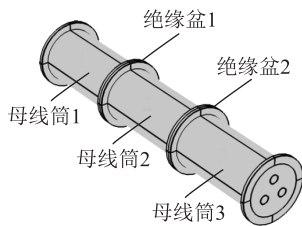


图1 GIS母线筒模型

Fig.1 Model of GIS bus barrel

## 2 GIS内部磁场分布特性

分别对GIS内部三相导电杆施加外电流,时间取A相到达峰值的时刻,此刻A相电流峰值为2828 A,计算GIS罐体内部的磁场分布。分别考虑GIS外壳有涡流、无涡流和不同频率下的磁通密度分布情况,磁通密度也称磁感应强度。在仅考虑磁通密度大小,不考虑磁通密度方向的情况下,通过计算磁通密度的幅值(磁通密度模)来表征各处磁通密度的大小。

### 2.1 涡流对磁场分布的影响

分别计算外壳有、无涡流时的磁场(电流频率为50 Hz),如图2所示。由图2可知,有、无涡流2种情况下,罐体内磁场分布规律基本一致,导电杆周围磁通密度较大。由于A相电流处于峰值,所以A相导电杆附近的磁通密度最大,均为0.02 T。但2种情况下磁通密度的最小值不同,外壳存在涡流时磁通密度的最小值增大,由 $1.54 \times 10^{-4} \text{ T}$ 增加至 $6.34 \times 10^{-4} \text{ T}$ 。这是由于外壳涡流产生的磁场与导电杆电流产生的磁场叠加,使得靠近外壳处的磁通密度增加,故磁通密度的最小值增大。

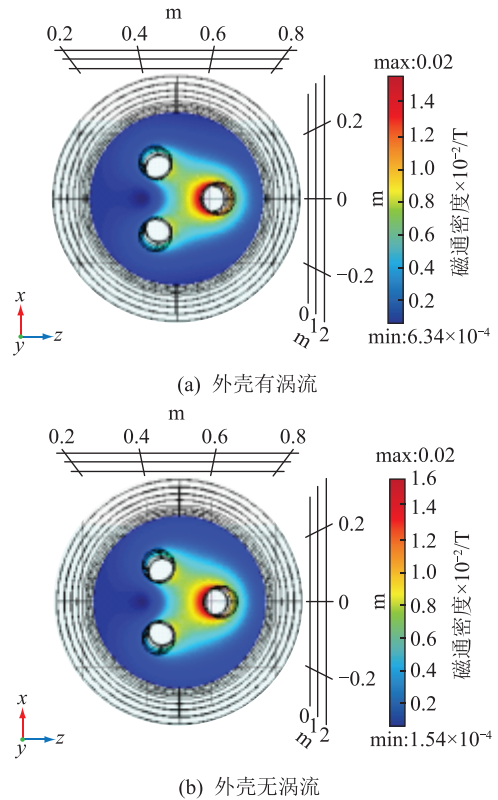
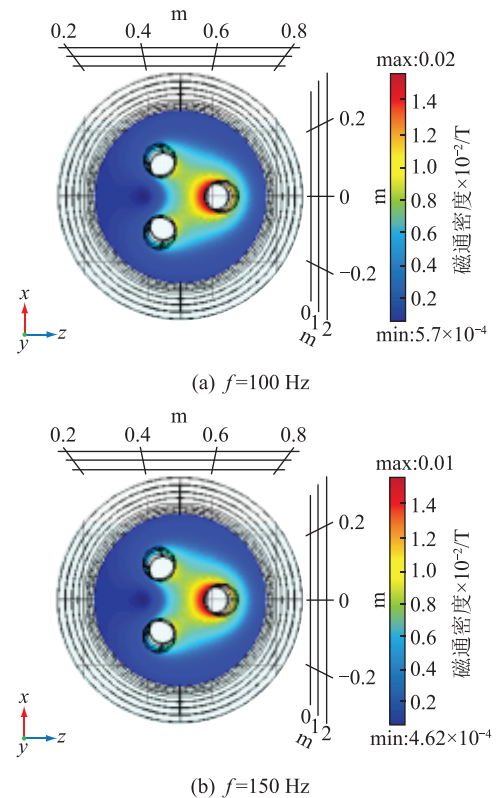


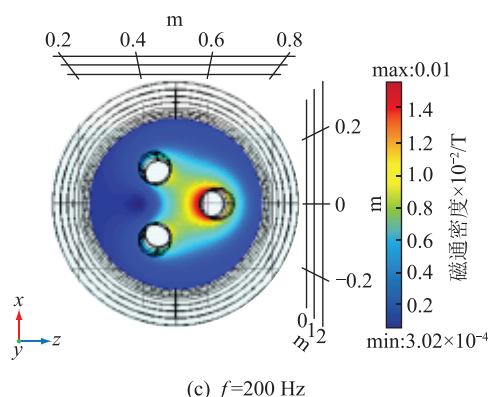
图2 GIS内部的磁通密度( $f=50 \text{ Hz}$ )

Fig.2 Magnetic flux density inside GIS( $f=50 \text{ Hz}$ )

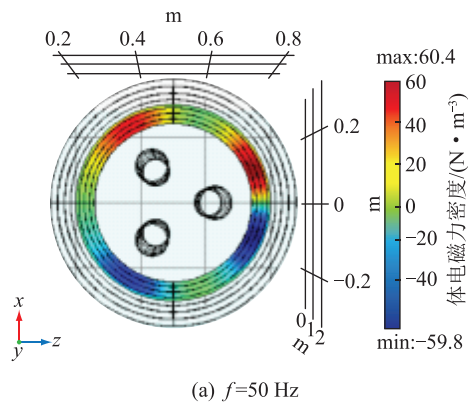
### 2.2 电流频率对磁场分布的影响

利用频域计算电流频率为50 Hz时的磁场分布如图2(a)所示,电流频率为100 Hz,150 Hz,200 Hz时的磁场分布如图3所示。





(c)  $f=200$  Hz



(a)  $f=50$  Hz

图3 不同电流频率下 GIS 内部的磁通密度  
Fig.3 Magnetic flux density inside GIS under different current frequencies

由图3可知,电流频率不同时,GIS罐体内磁场分布规律基本一致,导电杆周围磁通密度较大,由于A相电流处于峰值,所以A相导电杆附近的磁通密度最大。但随着频率增加,外壳感应出的涡流逐渐增大,涡流对磁场的削弱作用逐渐增强,导致母线筒内部磁通密度逐渐下降,其变化规律见图4。内部磁通密度最大值由0.02 T下降至0.01 T,内部磁通密度最小值由 $6.34 \times 10^{-4}$  T下降至 $3.92 \times 10^{-4}$  T。

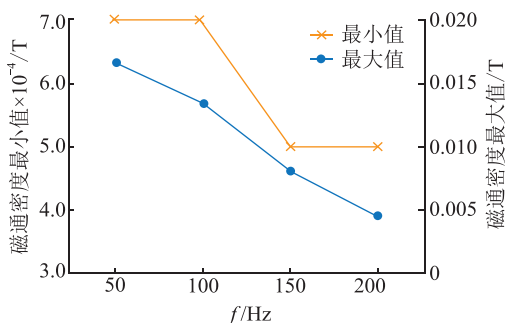


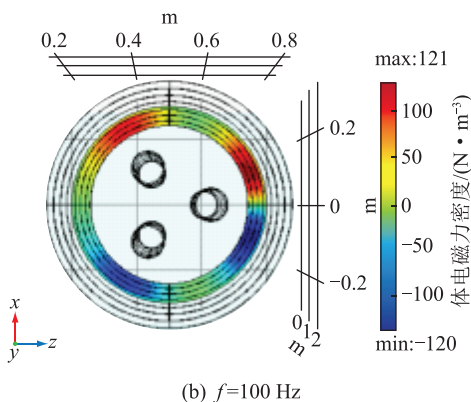
图4 GIS 内部磁通密度最值与电流频率的关系  
Fig.4 The relationship between the minimum/maximum magnetic flux density and the current frequency

### 3 GIS 外壳与导电杆电磁力特性分析

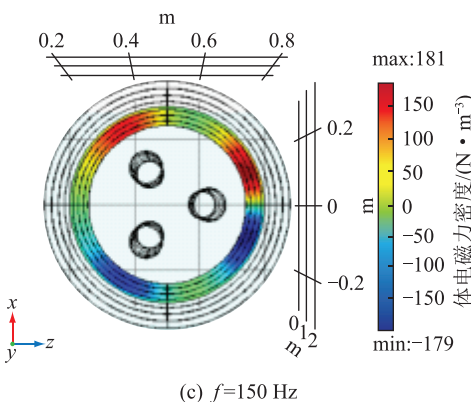
#### 3.1 外壳所受电磁力分布

对于GIS外壳来说,由于外壳中感应出涡流,而在磁场中受到力的作用。当导电杆通过不同频率的电流时,GIS外壳体电磁力密度分布情况如图5所示,体电磁力密度为单位体积外壳所受的电磁力。

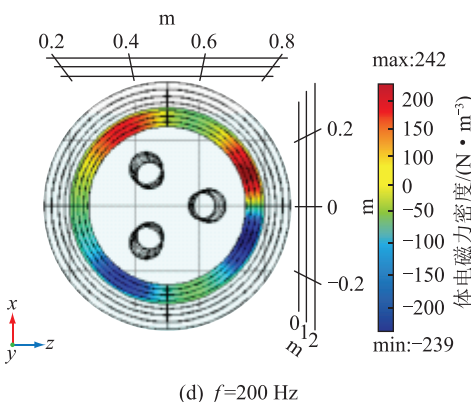
由图5可知,不同电流频率下外壳体电磁力密度的分布规律一致:靠近三相导电杆部分的体电磁力密度较大,且上、下外壳受力方向相反,最大值为 $60 \text{ N/m}^3$ ;两相导电杆之间的部分体电磁力密度较小,小于 $10 \text{ N/m}^3$ 。根据理论推导,外壳所受电磁



(b)  $f=100$  Hz



(c)  $f=150$  Hz



(d)  $f=200$  Hz

图5 不同电流频率下 GIS 外壳体电磁力密度分布  
Fig.5 Electromagnetic forcedensity distribution of GIS shell under different current frequencies

力为:

$$F_1 = B_0 \cos \omega t \frac{-B_0 S \omega \sin \omega t}{Z_{eq}} L =$$



$$\frac{-B_0^2 S \omega L}{2Z_{eq}} \sin 2\omega t \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为工频角频率;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\mu_r$  为 SF<sub>6</sub> 相对磁导率;  $r$  为 GIS 外壳半径;  $B_0$  为磁通密度幅值;  $S$  为外壳轴向剖面的单侧截面积;  $Z_{eq}$  为外壳感应电流回路的等效阻抗;  $L$  为外壳长度。

由式(1)可知,外壳所受电磁力与电流频率成正比。体电磁力密度变化规律仿真结果如图6所示。由图6可知,随着电流频率增加,外壳体电磁力密度逐渐增大,且与电流频率成正比,最大值从 60 N/m<sup>3</sup> 增加至 240 N/m<sup>3</sup>。由于体电磁力密度可反映电磁力大小,所以外壳所受电磁力也与电流频率成正比,与式(1)相符。

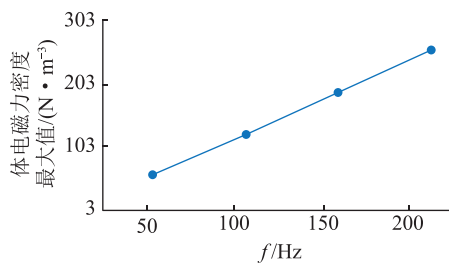


图6 GIS 外壳体电磁力密度最大值与电流频率的关系

Fig.6 The relationship between the maximum electromagnetic force density and current frequency

### 3.2 导电杆所受电磁力分布

计算不同电流频率下三相导电杆体电磁力密度大小,如图7所示。可知,随着电流频率增大,导电杆体电磁力密度分布规律、大小并不发生改变。因此,根据体电磁力密度分布,可知导电杆所受的电磁力分布规律为:导电杆轴向各部位电磁力大小相同,左右两侧电磁力大小相同方向相反。由于 A 相电流为峰值,所以 A 相受力最大。此时,B、C 两相电流大小相同,二者所受电磁力大小相同。

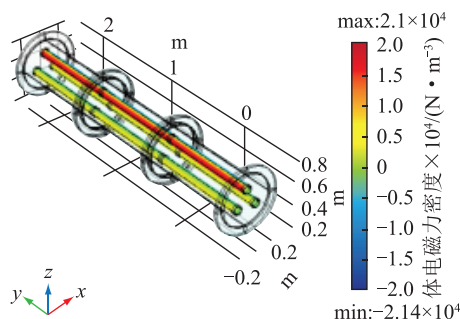


图7 导电杆体电磁力密度分布

Fig.7 Electromagnetic force density distribution of conducting rod

## 4 结论

文中根据 110 kV GIS 建立三相共体式 GIS 母

线筒的有限元模型,利用电磁场与机械力学多物理场耦合,从空间分布特点的角度对不同电流频率下 GIS 的电磁场分布以及 GIS 所受电磁力进行分析,得出的结论为:

(1) GIS 内部磁通密度随电流频率的增加而降低;

(2) GIS 外壳所受电磁力与电流频率成正比;

(3) 后续对 GIS 在扫频电流激励下的振动信号进行测量时,测量点应选三相导电杆正对的外壳。此处所受电磁力最大,故振动信号最为明显,可有效提高测量准确度。

文中建立的模型及所用方法为研究 GIS 扫频振动特性及故障检测奠定了基础,后续将利用该模型对 GIS 在扫频电流作用下的声振特性进行研究,并利用 GIS 在扫频电流激励下的振动信号对其机械故障进行检测。

本文得到内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(nmgdlkxm2019024)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 刘媛,杨景刚,贾勇勇,等. 基于振动原理的 GIS 隔离开关触头接触状态检测技术[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1591-1599.  
LIU Yuan, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnector based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1591-1599.
- [2] 李通,薛峰. UHF 局放检测技术在 GIS 故障诊断中应用与分析[J]. 供用电, 2018, 35(12): 80-88.  
LI Tong, XUE Feng. Application and analysis of UHF partial discharge detection technology in GIS fault diagnosis[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(12): 80-88.
- [3] 连杰,李钧. 363 kV GIS 断路器振动引起螺栓松动问题分析[J]. 西北水电, 2013(2): 62-64.  
LIAN Jie, LI Jun. Analysis on bolt looseness by vibration of 363 kV GIS circuit breaker[J]. Northwest Water Power, 2013(2): 62-64.
- [4] 李凯,许洪华,陈冰冰,等. GIS 振动机理及固有频率研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(3): 14-18.  
LI Kai, XU Honghua, CHEN Bingbing, et al. Research on vibration mechanism and natural frequency in GIS [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(3): 14-18.
- [5] 公多虎,陈文涛,吴天博,等. 振动测试技术在 GIS 耐压试验故障定位中的应用分析[J]. 电气应用, 2020, 39(7): 64-66, 73.  
GONG Duohu, CHEN Wentao, WU Tianbo, et al. Analysis of application of vibration testing technology in fault location of GIS withstand test[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(7): 64-66, 73.
- [6] 李秀广,吴旭涛,师愉航,等. 基于声学成像的 GIS 机械故障

- 带电检测系统[J]. 高压电器,2019,55(5):42-46.  
LI Xiuguang, WU Xutao, SHI Yuhang, et al. Charged detection system of GIS mechanical fault based on the acoustical imaging [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5):42-46.
- [7] 刘勇业, 马宏忠, 姜宁, 等. GIS 沿面放电缺陷的振动检测法分析[J]. 广东电力, 2017, 30(3):71-75.  
LIU Yongye, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Analysis on vibration detection method for creeping discharge defect in GIS [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3):71-75.
- [8] 李凯, 许洪华, 马宏忠, 等. GIS 针尖类局部放电引起的振动特性研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(9):80-84.  
LI Kai, XU Honghua, MA Hongzhong, et al. Vibration characteristics of needle partial discharge in GIS[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9):80-84.
- [9] 徐天乐, 马宏忠, 陈楷, 等. 基于振动信号 HHT 方法的 GIS 设备故障诊断[J]. 中国电力, 2013, 46(3):39-42.  
XU Tianle, MA Hongzhong, CHEN Kai, et al. Fault diagnosis of GIS equipment based on vibration signal and HHT method [J]. Electric Power, 2013, 46(3):39-42.
- [10] 黄清, 魏旭, 许建刚, 等. 基于振动原理的 GIS 母线触头松动缺陷诊断技术研究[J]. 高压电器, 2017(11):99-104.  
HUANG Qing, WEI Xu, XU Jiangan, et al. Research of GIS bus loose contact fault diagnosis techniques based on mechanical vibration [J]. High Voltage Apparatus, 2017(11):99-104.
- [11] 徐明月, 李喆, 孙汉文, 等. 基于改进梅尔倒谱系数的 GIS 机械故障诊断方法[J]. 高压电器, 2020, 56(9):122-128.  
XU Mingyue, LI Zhe, SUN Hanwen, et al. Mechanical fault diagnosis method of GIS based on improved MFCC [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9):122-128.
- [12] OKABE S, YUASA S, KANEKO S, et al. Simulation of propagation characteristics of higher order mode electromagnetic waves in GIS [C]//International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials. IEEE, 2006.
- [13] LI Junhao, SI Wenrong, LI Dajian, et al. Simulation study on electromagnetic wave propagation characteristics within L-type and T-type gas-insulated switchgear model [J]. Power System Technology, 2008, 32(19):93-97.

作者简介:



赵晋飞

赵晋飞(1996),男,硕士在读,研究方向为电力设备在线监测技术(E-mail:945110059@qq.com);

张壮壮(1996),男,硕士在读,研究方向为变压器减振降噪技术;

刘琛硕(1996),男,硕士在读,研究方向为柔性直流输电用高压器件状态评估。

### Electromagnetic distribution characteristics of GIS under sweeping current

ZHAO Jinfei<sup>1</sup>, ZHANG Zhuangzhuang<sup>1</sup>, LIU Chenshuo<sup>1</sup>, ZHOU Yijun<sup>2</sup>, LI Hongxiang<sup>2</sup>, ZHU Lingyu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;

2. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd. Baotou Power Supply Bureau, Baotou 014030, China )

**Abstract:** Gas insulation switcher (GIS) is important equipment in power system. It plays an important role in the power transmission, and is of great significance to the safe and stable operation of the power system. The method of detecting mechanical faults using sweeping frequency characteristics of power equipment has attracted wide attention, but there is few research about the magnetic field and electromagnetic force distribution of the GIS under sweeping frequency currents. In order to solve above problems, finite element model of 110 kV three-phase common type GIS is established. And the distribution characteristics of the magnetic field and electromagnetic force of the GIS under different current frequencies are simulated. The results show that with the change of current frequency, the distribution of magnetic field in the GIS and the distribution of the electromagnetic force on the GIS shell and the conductive rod do not change. However, the magnitude of magnetic field in the GIS and the magnitude of electromagnetic force on the GIS shell change with the current frequency change. Research results provide foundation for detecting mechanical faults by using frequency sweeping characteristics of the GIS.

**Keywords:** gas insulation switcher (GIS); finite element model; frequency sweeping current; distribution of magnetic field; distribution of electromagnetic force

(编辑 吴楠)