

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.018

GIL内金属微粒在直流电压下的运动特性分析

贾云飞, 汲胜昌, 吕亮

(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)

摘要:气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)以其输送容量大、占地面积小、传输损耗小等优点,在许多场合成为替代电缆和架空线路的首选方案。但GIL内部的金属微粒会在电场的影响下发生起跳和运动,严重威胁了GIL的绝缘性能。为更好地捕获金属微粒,掌握GIL内金属微粒的受力和运动特性是十分有必要的。文中首先忽略盆式绝缘子对GIL轴向场强的影响,分析了金属微粒在同轴圆柱间的受力和运动特性,使用金属微粒谐振频率表征金属微粒在直流电压下的活跃度,并分析了电压和微粒半径对金属微粒谐振频率的影响规律。然后考虑盆式绝缘子对GIL轴向场强的影响,得到了金属微粒的几种典型运动轨迹。最后针对金属微粒陷阱布置提出建议,认为在盆式绝缘子凸面侧下方布置金属微粒陷阱是必要的。

关键词:气体绝缘金属封闭输电线路(GIL);金属微粒;受力分析;运动特性;金属微粒谐振频率

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0124-08

0 引言

近年来,随着用电量需求的提高,人们对电力传输设备安全性、可靠性和输送容量等方面的要求日益严格。在特殊场合,气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal enclosed transmission line, GIL)作为架空线路和电力电缆的一种有效替代方案,具有输送容量大、占地面积少、传输损耗小、环境友好和安全性高等优点^[1-3]。但在GIL的生产、装配和运行过程中,金属微粒的产生是不可避免的,如:生产过程中因内部清理不善而残存的金属屑,运输过程中挤压摩擦产生的碎屑,运行中触头插接造成的机械摩擦以及放电烧蚀产生的金属微粒等。在长距离的GIL设备中,复杂和恶劣的敷设和组装环境使得金属微粒有更大的残存性^[4-7]。

由于带电金属微粒在GIL腔体中受到库仑力、重力、摩擦力和气体粘滞力等力的作用,微粒将在GIL管道中往复运动,在带有电荷的金属微粒向反极性导体运动且尚未到达至反极性导体时,带电金属微粒与反极性导体间由于局部场强增强而发生击穿,形成流注,极易引发GIL间隙的击穿,因此有必要对金属微粒进行抑制和收集^[8-9]。设置微粒陷阱和低压电极覆膜是抑制金属微粒运动、提高直流GIL绝缘强度的重要措施^[10]。

为了更好地、有针对性地对金属微粒进行抑制和收集,明确微粒运动是指导微粒抑制的前提,因此研究GIL中金属微粒的运动具有重要意义。目前

已有不少文献对GIL中金属微粒的受力和运动特性进行了仿真。文献[8]对楔形电极间金属微粒的受力和运动轨迹进行仿真和实验,证实了微粒对电极间绝缘的危害;文献[9]对盆式绝缘子附近的金属微粒的运动轨迹进行仿真,提出了临界陷阱和捕获值的概念,并进行有效陷阱范围的划分。但目前有关金属微粒活跃度及其影响因素的研究还较少。

文中研究了金属微粒在直流电压下的受力和运动特性,有针对性地分析直流电压下金属微粒在同轴圆柱间的受力和运动轨迹,采用金属微粒谐振频率表征金属微粒在直流电压下的活跃度,分析电压和微粒半径对金属微粒谐振频率的影响规律;给出金属微粒在盆式绝缘子影响下的几种典型运动轨迹;并针对金属微粒陷阱的布置提出建议。

1 金属微粒受力分析

由于GIL单节管道通常较长,若忽略盆式绝缘子和三支柱绝缘子对GIL轴向电场分布的影响,则可认为GIL中的电场是同轴电场。因此,金属微粒的受力和运动可近似视为一维,从而大大减少了计算量^[11-12]。

此处暂时忽略盆式绝缘子对GIL轴向场强的影响,对直流电压作用下的金属微粒进行受力分析。除了上述简化,在微粒运动的过程中,当微粒与电极较近时会引发间隙放电,该放电会对微粒所携带的电荷量造成额外的影响,导致运动轨迹变化。由于间隙放电的随机性较大,且对微粒携带电荷量的具体影响尚不明确,文中不考虑间隙放电对微粒携带电荷量的影响。

收稿日期:2020-06-13;修回日期:2020-07-20

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902500)

1.1 直流电压下的受力分析

在GIL中,运动中的金属微粒会受到重力、浮力、库仑力、电场梯度力和空气阻力等多种力的作用。可做简略的受力分析,如图1所示。

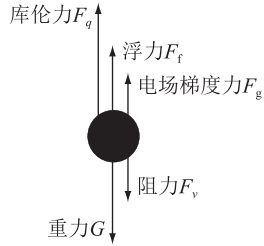


图1 金属微粒受力分析

Fig.1 Force analysis of metal particle

在图1所示的5个力中,金属微粒始终会受到重力和浮力的影响。重力方向始终垂直向下,大小与金属微粒的体积、材料有关。浮力方向始终垂直向上,大小与绝缘气体的密度有关。库仑力大小不仅与微粒所处电场大小有关,也与微粒所携带的电荷量有关:当微粒接触到电极时,微粒将携带与电极极性相同的电荷,电荷量大小与金属微粒尺寸和电极表面场强有关,当微粒离开电极后,微粒所携带的电荷量不变;电场力方向与金属微粒所处位置的场强方向和所携带电荷极性有关。电场梯度力与金属微粒所处的电场有关,和微粒是否带电无关。当金属微粒在电极间运动时,所受到的阻力大小与微粒运动速度和气体动力粘度有关,阻力方向与运动方向相反。当金属微粒静止于电极表面上时,还会受到来自电极的支持力。文中取与重力相反的方向为正方向。

1.2 重力与浮力

球形金属微粒所受到的重力和浮力大小与微粒材料和气体类型有关,其计算表达式为:

$$\begin{cases} G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{metal}} g \\ F_f = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{gas}} g \end{cases} \quad (1)$$

式中: G 为重力; r 为微粒半径; ρ_{metal} , ρ_{gas} 分别为金属微粒密度和气体密度; g 为重力加速度; F_f 为浮力。

G 与 F_f 式形式类似,但方向相反,数值上,若金属微粒材料是铝,则密度为 2700 kg/m^3 ;若绝缘气体是 SF_6 ,绝对气压为 0.4 MPa ,则常温下的密度为 24.35 kg/m^3 。相比之下,微粒所受浮力可以忽略。

1.3 库仑力

将GIL视为同轴圆柱电极,设高压导杆所带电压极性为正,当微粒碰撞到接地外壳后,所带负电荷可通过下式计算^[13-14]:

$$q_- = -\frac{2}{3}\pi^3 r^2 \varepsilon E = -\frac{2}{3}\pi^3 r^2 \varepsilon \frac{U_{\text{dc}}}{R_2 \ln(R_2/R_1)} \quad (2)$$

式中: q_- 为球形金属微粒在电场中与接地外壳碰撞后所携带的电荷量; ε 为气体介电常数; E 为微粒所处位置的电场强度; U_{dc} 为直流电压; R_1 为GIL高压导杆外半径; R_2 为GIL管道外壳内半径。

类似地,当金属微粒碰撞到高压导杆后,所带电荷可用下式计算:

$$q_+ = \frac{2}{3}\pi^3 r^2 \varepsilon E = \frac{2}{3}\pi^3 r^2 \varepsilon \frac{U_{\text{dc}}}{R_1 \ln(R_2/R_1)} \quad (3)$$

金属微粒所受库仑力可用下式计算:

$$F_q = qE = q \times \left[-\frac{U_{\text{dc}}}{R \ln(R_2/R_1)} \right] \quad (4)$$

式中: q 为金属微粒所携带电荷量,根据碰撞情况选择式(2)或式(3)计算; R 为金属微粒在同轴圆柱间与中心轴线间的距离。

1.4 电场梯度力

电场梯度力(又称介电泳力)用于描述金属微粒(可看作强极化形成的宏观偶极子)在不均匀电场中的偶极矩所受净力,与物体是否带电无关,可通过下式计算^[15]:

$$F_g = 2\pi r^3 \varepsilon |\nabla E^2| \approx 4\pi \varepsilon \frac{r^3}{R^3} \left[\frac{U_{\text{dc}}}{\ln(R_2/R_1)} \right]^2 \quad (5)$$

1.5 空气阻力

微粒在间隙间运动时,将受到来自空气的阻力,阻力方向与运动方向相反,阻力大小与微粒运动速度有关。

在先前的仿真中^[16],认为金属微粒运动属于Stokes型运动,其所受阻力与速度成正比,可用下式计算:

$$F_v = 6\pi \mu_{\text{gas}} r v \quad (6)$$

式中: μ_{gas} 为气体动力粘度; v 为微粒运动速率。

但Stokes阻力公式的适用范围为雷诺数 $Re \ll 1$, Re 可用下式计算:

$$Re = \rho_{\text{gas}} v (2r) / \mu_{\text{gas}} \quad (7)$$

文中所涉及气体密度约为 $2 \sim 30 \text{ kg/m}^3$,微粒半径范围约为 $0.1 \sim 4 \text{ mm}$,微粒速度至少大于 0.2 m/s ,气体动力粘度约为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。因此可以估算得雷诺数 Re 大于5,此时微粒所受到的阻力不符合式(6),对于大雷诺数圆球绕流阻力,通常使用经验公式计算^[17]:

$$F_v = \left(\frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \right) \pi r^2 \rho_{\text{gas}} v^2 \quad (8)$$

1.6 金属微粒的起跳电压

当金属微粒静止于接地外壳时,金属微粒仅受

到库仑力、重力、浮力和支持力的影响,若逐渐升高电压,金属微粒将发生起跳。

根据式(1)一式(4)可知,金属微粒起跳电压可通过下式进行计算:

$$U_{dc} = R_2 \ln \frac{R_2}{R_1} \sqrt{\frac{2r(\rho_{\text{metal}} - \rho_{\text{gas}})g}{\pi^2 \epsilon}} \quad (9)$$

由式(9)可知,当 GIL/气体绝缘变电站(gas insulated substation, GIS) 设备尺寸固定后,金属微粒的起跳电压将仅与微粒半径、微粒密度和气体介电常数有关。

在仿真中,均取高压导杆外半径 R_1 为 0.085 m, GIL 管道外壳内半径 R_2 为 0.44 m, 气体为 SF_6 , 绝对气压 0.4 MPa, 常温下密度为 24.35 kg/m^3 , 气体介电常数为 1.002。

考虑金属微粒材料分别为铜、铁和铝, 其密度分别为 $8\,900 \text{ kg/m}^3$, $7\,800 \text{ kg/m}^3$ 和 $2\,700 \text{ kg/m}^3$, 得到不同材料和半径的球形金属微粒起跳电压如图 2 所示。

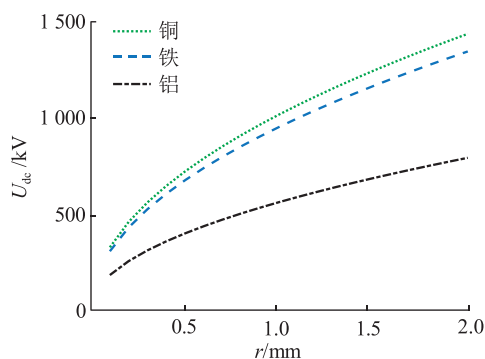


图 2 不同材料和半径的球形金属微粒起跳电压

Fig.2 Take-off voltage of spherical metal particle of different materials and radii

根据式(9)和图 2 可知,金属微粒材料的密度越大,金属微粒半径越大,则起跳电压越高。

2 同轴圆柱中金属微粒的运动特性

此处暂时忽略盆式绝缘子对 GIL 轴向电场的影响,将 GIL 中的电场近似视为同轴电场,通过仿真来分析球形金属微粒在直流电压下的运动特征,使用金属微粒谐振频率来描述金属微粒运动的激烈程度,并分析了微粒半径和施加电压对金属微粒谐振频率的影响。

2.1 运动轨迹的仿真计算

在第 1 章所述的重力、浮力、库仑力、电场梯度力和空气阻力共计 5 种力中,根据式(3)一式(5)可知,库仑力远比电场梯度力大,约 2~3 个数量级。因此在仿真中可忽略电场梯度力的影响,仅考虑重

力、浮力和库仑力。

与传统 GIS 母线相比,以长直管道为主的直流 GIL 单元长度可达 10~18 m,管道半径通常在几十厘米,在远离绝缘子和管道接口处的腔体大部分区域中,轴向不均匀电场可以忽略;同时由于同轴电极间电场的特点,金属微粒在电极间运动时,仅受到径向方向上的力,若不考虑碰撞的随机过程,可将金属微粒的运动视为一维运动,仅用径向坐标即可表示微粒的运动状态。

综上,在一维坐标上,以指向高压导杆为正方向,考虑重力、浮力、库仑力和空气阻力对金属微粒的影响,即可得到运动方程如下:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = ma = F_q + F_f - G - F_v \quad (10)$$

式中: h 为金属微粒起跳高度; t 为时间; m 为金属微粒重量; a 为金属微粒所受加速度。

当金属微粒在 GIL 腔体内发生碰撞时,不可避免地会产生能量损失,属于非弹性碰撞。根据同轴电极间的电场特点,微粒在受到库仑力的加速后,可认为微粒在与电极碰撞时的速度总与电极表面的切线相垂直,同时金属微粒的半径远小于同轴圆柱的尺寸,因此微粒与导体、外壳的碰撞过程可简化为球与板的正碰撞过程,不再考虑斜碰撞引起的剪切形变和摩擦能量损耗。考虑能量损耗,碰撞过程后的微粒动能可表示为:

$$E = k^2 \left(\frac{1}{2} m v_1^2 \right) \quad (11)$$

式中: k 为恢复系数,是碰撞后金属微粒的速度 v_2 与碰撞前速度 v_1 的比值。

恢复系数与碰撞物体的材料弹性塑性相关,与物体的形状和尺寸无关,通常通过自由落体碰撞反弹实验侧得。若球从 H_1 高度自由下落,与平板碰撞后反弹到 H_2 高度,则恢复系数为:

$$k = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{H_2}}{\sqrt{H_1}} \quad (12)$$

根据式(12)以及之前对金属微粒的受力分析,同时考虑微粒与高压导杆、接地外壳之间的非弹性碰撞,微粒运动的仿真计算流程如图 3 所示。图 3 中,微粒的状态分为 3 类:与接地外壳碰撞、不碰撞和与高压导杆碰撞。

在仿真的开始,首先判断微粒是否发生起跳。若可以发生起跳,则判断微粒状态,如果是无碰撞的状态,计算微粒的受力、加速度、速度和位置;如果微粒状态是与接地外壳碰撞或者是与高压导杆碰撞,则需要重新设定微粒所携带的电荷量,根据

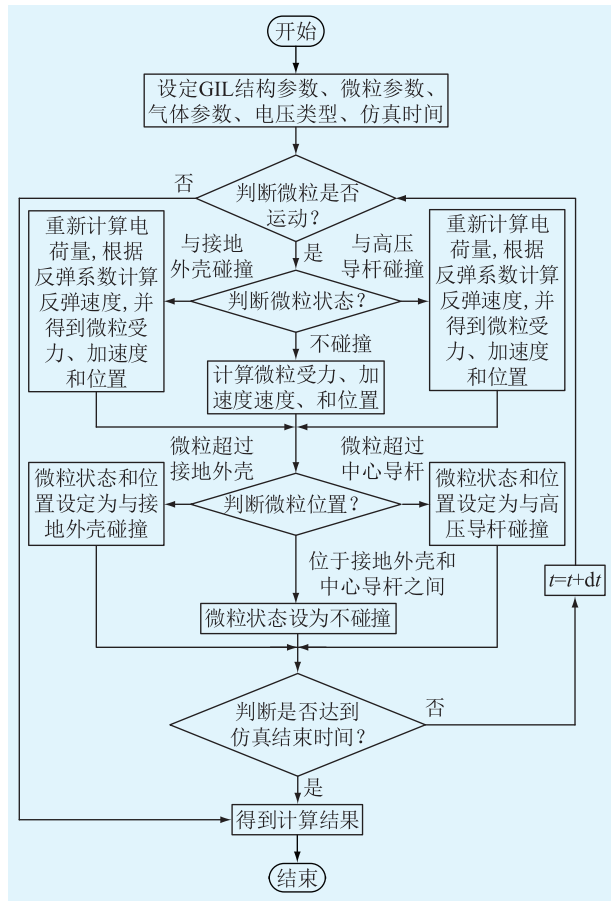


图3 微粒运动仿真计算流程

Fig.3 Particle motion simulation process

反弹系数重新计算反弹速度,并计算微粒的受力、加速度、速度以及位置。

然后根据微粒的位置重新判断微粒状态。若微粒处于接地外壳和高压导杆之间,则微粒状态设定为不碰撞;若微粒越过了高压导杆或接地外壳,则需要对微粒的位置进行调整并将微粒状态设定为与高压导杆碰撞或与接地外壳碰撞。

重复上述步骤,直至仿真时间结束。

在仿真中,取 GIL 高压导杆半径为 85 mm,外壳内半径为 440 mm,绝缘气体为 SF₆,绝对气压 P 为 0.4 MPa,气体密度为 24.35 kg/m³,气体动力粘度为 1.377×10^{-5} Pa·s,微粒材料是铝,微粒密度为 2 700 kg/m³,微粒与外壳碰撞的恢复系数为 0.553^[18]。

2.2 运动轨迹分析

若微粒半径为 0.5 mm,根据式(9)和图 2 可知,微粒的起跳电压为 396.4 kV,若取电压为 400 kV,结合图 3 可以仿真得到微粒的运动轨迹和受力,如图 4 所示(重力方向为负方向)。

由图 4 可知,当电压达到微粒的起跳电压后,由于库仑力仅略大于重力,微粒经过长时间的加速过程后,缓慢地向高压导杆靠近,根据同轴圆柱电极

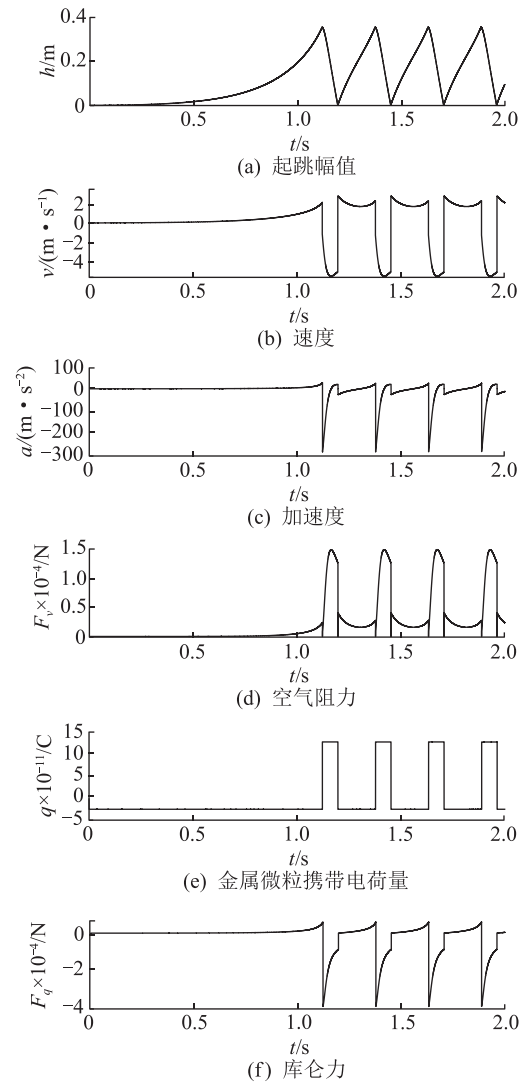


图4 金属微粒的受力和运动

($U_{dc} = 400$ kV, $r = 0.5$ mm, $P = 0.4$ MPa)

Fig.4 The force and motion of metal particle

($U_{dc} = 400$ kV, $r = 0.5$ mm, $P = 0.4$ MPa)

间电场的特点,在微粒靠近高压导杆的过程中,微粒所携带的电荷量不变,但微粒所处位置的场强逐渐增大,库仑力也随之增大,故微粒的速度将加速增加,同时空气阻力增大,但重力始终不变,直至约 1.12 s 后,微粒与高压导杆发生了碰撞。

微粒与高压导杆发生碰撞后,速度变为原来的 0.553 倍,同时微粒所带电荷由原来的负电荷变为正电荷,由于高压导杆处场强远比外壳处大,微粒所带的电荷量也较大,此时微粒受到了和重力同向的库仑力,故微粒加速向接地外壳运动。此过程中微粒所受到的库仑力逐渐减小,但由于速度较快,导致空气阻力较大,微粒速度有所下降,直到约 1.2 s 时,微粒与接地外壳又发生碰撞。

微粒与接地外壳发生碰撞后,速度又变为原来的 0.553 倍,同时微粒所带电荷由正电荷转为负电

荷,电荷量也大大减小,导致之后一段时间内微粒所受到的库仑力小于重力与空气阻力的合力,速度有所降低。但随着微粒向高压导杆运动,所受库仑力逐步增加,大于重力与空气阻力的合力,微粒速度又有所增加,微粒再次加速运动至高压导杆。

最终,微粒将在高压导杆和接地外壳之间保持往复运动。可将其看为谐振运动,并将金属微粒在高压导杆与接地外壳之间往复一次看为一个运动周期,则图4中金属微粒的谐振频率约为3.92 Hz。

2.3 金属微粒谐振频率及其影响因素

此处提出使用谐振频率来表征直流电压下金属微粒的活跃度。

当GIL结构尺寸、气体参数和微粒材料固定后,其谐振频率仅与电压幅值和微粒半径有关。谐振频率越高,说明金属微粒运动越剧烈,对绝缘的威胁越大。当微粒半径固定为0.5 mm时,不同电压下的谐振频率如图5所示。

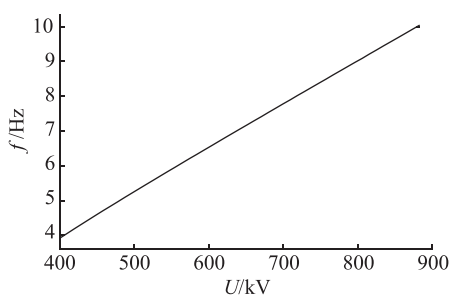


图5 谐振频率与电压之间的关系
($r=0.5\text{ mm}, P=0.4\text{ MPa}$)

Fig.5 The relationship between resonance frequency and voltage amplitude ($r=0.5\text{ mm}, P=0.4\text{ MPa}$)

根据图5可知,当电压高于起跳电压后,金属微粒发生谐振,其谐振频率将随着电压增加而增加。

当电压分别固定为600 kV,800 kV和1 000 kV时,不同微粒半径下的谐振频率如图6所示。

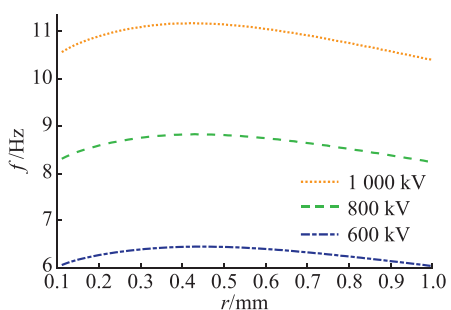


图6 谐振频率与微粒半径之间的关系($P=0.4\text{ MPa}$)

Fig.6 The relationship between resonance frequency and particle radius($P=0.4\text{ MPa}$)

由图6可知,若电压幅值固定不变,当微粒半径发生变化时,其谐振频率存在极值。虽然库仑力随

着微粒半径的增大而增大,但当微粒半径过小时,相对而言,空气阻力是阻碍微粒运动的主要因素;当微粒半径过大时,重力是阻碍微粒运动的主要因素。故微粒半径过小或过大时,谐振频率均较小;当微粒半径约为0.4 mm时,谐振频率最高。

3 盆式绝缘子影响下金属微粒运动特性

在GIL中靠近盆式绝缘子的周围,由于绝缘子的存在,周围电场中的轴向分量较大,不可忽略,因此有必要对此处金属微粒的运动特性进行研究。

考虑了盆式绝缘子对GIL中轴向电场分布的影响,对直流下盆式绝缘子附近的金属微粒进行了仿真,分析其运动特性。

建立轴对称简化模型,认为盆式绝缘子倾角为 45° ,绝缘子厚0.07 m。对中心导杆施加600 kV直流电压,外壳接地。金属、绝缘子和气体的相对介电常数分别为 $1 \times 10^7, 4.65, 1$;电导率分别为 $6 \times 10^7, 1 \times 10^{-16}, 1 \times 10^{-20}$ 。利用有限元方法可得电场分布如图7所示。可以看出,盆式绝缘子附近的电场有所畸变。

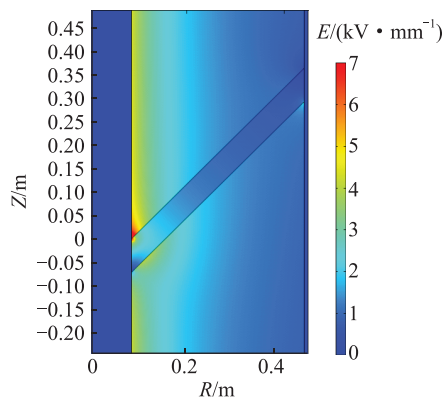


图7 GIL 电场分布 ($U_{dc}=600\text{ kV}$)

Fig.7 GIL electric field intensity distribution ($U_{dc}=600\text{ kV}$)

若要计算轴对称模型下金属微粒的运动轨迹,其流程与图3所示的流程相仿,但不同的是,原本只需要一维的微粒起跳高度坐标,此时需要轴向R和径向Z 2个坐标,各个受力方程和运动方程也都变为2个形式相仿的方程。

在距离盆式绝缘子不同的位置设置金属微粒,进行仿真,当金属微粒位于盆式绝缘子凸面侧时,根据微粒与绝缘子碰撞次数的不同,得到3种典型运动轨迹,如图8所示。

在图8中,当金属微粒距离盆式绝缘子较远时,周围电场受绝缘子的电场畸变影响较小,仅略微向盆式绝缘子运动,无法与盆式绝缘子发生碰撞,运

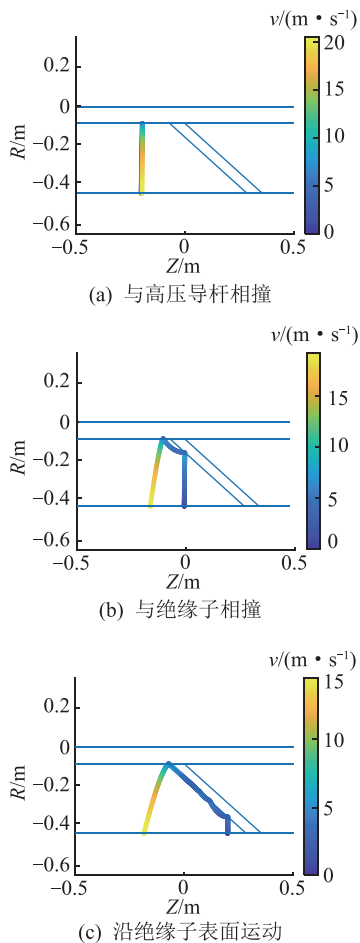


图8 盆式绝缘子凸面侧金属微粒典型运动轨迹

Fig.8 Typical motion curve of metal particle on the convex side of basin-type insulator

运动轨迹如图8(a)所示;当金属微粒距离盆式绝缘子较近时,金属微粒首先向盆式绝缘子运动,此过程积攒了较大的动能,因此在与绝缘子发生一次碰撞后,有足够的动能运动至高压导杆,然后落回地电极,运动轨迹如图8(b)所示;当金属微粒距离盆式绝缘子过近时,金属微粒首先向盆式绝缘子运动,但由于动能不足,之后又会多次落回绝缘子表面,金属微粒将沿绝缘子表面“爬”至高压导杆,最终落回接地电极,如图8(c)所示。

综上,当金属微粒位于盆式绝缘子凸面侧时,金属微粒将朝绝缘子方向运动,因此有必要在盆式绝缘子凸面侧下方安装微粒陷阱。

金属微粒位于盆式绝缘子凹面侧时,有典型的运动轨迹如图9所示。可知,位于盆式绝缘子凹面侧的金属微粒将向远离盆式绝缘子的方向运动。

故每段GIL中金属微粒都将向盆式绝缘子凸面侧运动,在此过程中,金属微粒将在高压导杆和接地外壳之间往复运动,若金属微粒距离盆式绝缘子凸面侧较近,则微粒将与盆式绝缘子相撞,然后运

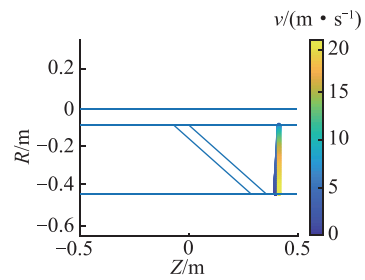


图9 盆式绝缘子凹面侧金属微粒典型运动轨迹

Fig.9 Typical motion curve of metal particle on the concave side of basin-type insulator

动至高压导杆并落回接地外壳。

虽然GIL全程均安装栅格状微粒陷阱是收集金属微粒效果最好的,但对于较长的GIL,成本将大大提高,因此需要有针对性地安装微粒陷阱。根据上述仿真结果可知,如果将微粒陷阱安装在盆式绝缘子凸面侧的下方,既可以收集逐渐向盆式绝缘子凸面侧运动的微粒,也可以收集经绝缘子反弹后的微粒。因此,在盆式绝缘子凸面侧的下方安装微粒陷阱是十分有必要的。

4 结论

文中对GIL中球形金属微粒进行了受力分析,分别在不考虑绝缘子影响下的同轴圆柱模型和考虑绝缘子影响下的轴对称模型中进行了金属微粒运动轨迹仿真和运动特性分析,得到以下结论:

- (1) 可使用谐振频率来表征直流电压下金属微粒运动的活跃度。当电压越高时,金属微粒的谐振频率越高,运动速度越快,对GIL绝缘的威胁越大。
- (2) 存在一个临界金属微粒半径(约0.4 mm),使得在某一电压下,金属微粒的谐振频率达到最大值。
- (3) 每段GIL中的金属微粒都将向盆式绝缘子的凸面侧运动,因此微粒陷阱应尽量安装在盆式绝缘子凸面侧的下方,既可以收集逐渐向盆式绝缘子凸面侧运动的微粒,也可以收集经绝缘子反弹后的微粒。

参考文献:

- [1] 南振乐,李振军,刘朋飞. 复杂地形条件下的GIL工程设计[J]. 高压电器,2016,52(6):193-198.
 NAN Zhenle, LI Zhenjun, LIU Pengfei. Engineering design of GIL used at complex terrain[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6):193-198.
- [2] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术,2015,41(5):1466-1473.
 QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and

- prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(5):1466-1473.
- [3] 李庆民,王健,李伯涛,等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3):849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(3):849-860.
- [4] 李翔宇,淡淑恒,尤伟任,等. SF₆ 气体绝缘高压设备颗粒陷阱综述[J]. 高压电器, 2013, 49(9):150-154.
LI Xiangyu, DAN Shuheng, YOU Weiren, et al. Review of particle trap in SF₆ gas insulated apparatus[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9):150-154.
- [5] ZHOU K, BOGGS S. Uniform field charge on a conducting particle[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2009, 16(4):1158-1159.
- [6] 王健,常亚楠,王靖瑞,等. 基于捕捉效用分析的直流 GIL 微粒陷阱设计与参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15):5050-5061.
WANG Jian, CHANG Ya'nan, WANG Jingrui, et al. Design and optimization of particle traps in DC GIL based on the capture effect analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15):5050-5061.
- [7] 孙曙光,陆俭国,俞慧忠,等. 基于 UHF 法的 GIS 局部放电测量与分析[J]. 电测与仪表, 2012, 49(4):5-8, 23.
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Measure and analysis of GIS partial discharge based on UHF method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(4):5-8, 23.
- [8] 律方成,刘宏宇,阴凯,等. 直流 GIL 不均匀场中金属微粒运动的数值模拟及放电特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10):2798-2806.
LYU Fangcheng, LIU Hongyu, YIN Kai, et al. Numerical simulation and discharge characteristic analysis of metallic particle motion in non-uniform electric field of DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10):2798-2806.
- [9] 汪佛池,杨磊,曹东亮,等. 直流 GIL 中球状自由导电微粒的运动及陷阱抑制[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3141-3149.
WANG Fochi, YANG Lei, CAO Dongliang, et al. Motion and trap suppression of spherical free conducting particles in DC GIL[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(10):3141-3149.
- [10] 律方成,刘宏宇,颜湘莲,等. 直流电压下 SF₆ 气体中电极覆膜后金属微粒启举场强的计算分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(4):1187-1195.
LYU Fangcheng, LIU Hongyu, YAN Xianglian, et al. Calculation and analysis of lifting field of metallic particle on dielectric coated electrode in SF₆ under DC voltage[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(4):1187-1195.
- [11] 王健,李庆民,李伯涛,等. 直流 GIL 中自由线形金属微粒的运动与放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17):4793-4801.
WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Motion and discharge behavior of the free conducting wire-type particle within DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4793-4801.
- [12] 王志远. GIL 微粒活性抑制与主动式调控技术研究[D]. 北京:华北电力大学, 2018.
WANG Zhiyuan. Study on activity inhibition and active control of metal particles in GIL[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2018.
- [13] SAKAI K, TSURU S, ABELLA D L, et al. Conducting particle motion and particle-initiated breakdown in DC electric field between diverging conducting plates in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(1):122-130.
- [14] KHAN Y, OKABE S, SUEHIRO J, et al. Proposal for new particle deactivation methods in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1):147-157.
- [15] 王健,李庆民,李伯涛,等. 考虑非弹性随机碰撞与 SF₆/N₂ 混合气体影响的直流 GIL 球形金属微粒运动行为研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15):3971-3978.
WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Motion analysis of spherical conducting particle in DC GIL considering the influence of inelastic random collisions and SF₆/N₂ gaseous mixture[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15):3971-3978.
- [16] 贾江波,陶风波,杨兰均,等. GIS 中不均匀直流电场下球状自由导电微粒运动分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8):106-111.
JIA Jiangbo, TAO Fengbo, YANG Lanjun, et al. Motion analysis of spherical free conducting particle in non-uniform electric field of GIS under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8):106-111.
- [17] 何亚群,赵跃民,段晨龙,等. 主动脉动气流分选动力学模型及其数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2):157-162.
HE Yaqun, ZHAO Yuemin, DUAN Chenlong, et al. Study on dynamic models of active pulsing air separation and their numerical simulation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2):157-162.
- [18] 孙继星,陈维江,李志兵,等. 直流电场下运动金属微粒的带电估算与碰撞分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(3):779-786.
SUN Jixing, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Charge estimation and impact analysis of moving metal particle under DC electric field[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(3):779-786.

作者简介:



贾云飞

贾云飞(1998),男,硕士在读,研究方向为 GIL 用绝缘子结构优化、GIL 金属微粒运动特性仿真(E-mail:kuanrong98@stu.xjtu.edu.cn);
汲胜昌(1976),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力设备在线监测及故障诊断、振动噪声机理及抑制等;
吕亮(1978),男,博士,高级工程师,从事电力设备在线检测、电气设备故障诊断等研究工作。

Motion characteristic of metal particles in GIL under DC voltage

JIA Yunfei, JI Shengchang, LYU Liang

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

Abstract: Gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) is alternative to cable and overhead line because of its large transmission capacity, small floor space and low transmission loss. Metal particles of GIL will take off under electric field, which threatens the insulation performance of GIL. To better collecting metal particles, it is necessary to investigate the force analysis and motion characteristic of metal particles of GIL. Firstly, the force and motion characteristic of metal particles between coaxial cylinder electrodes is analyzed, under the condition that the influence of the basin-type insulators on the axial electric field strength is ignored. The resonant frequency of metal particles is used to characterize the activity of metal particles under DC voltage, and the influences of voltage and particle radius on the resonant frequency of metal particles are analyzed. Then, considering the influence of the basin-type insulator on the axial electric field intensity of GIL, several typical motion trajectories of metal particles are obtained. Finally, some suggestions for the layout of particle traps are given. The results show that it is necessary to arrange metal particle traps under the convex side of basin-type insulator.

Keywords: gas insulated metal enclosed transmission line (GIL); metal particle; force analysis; motion characteristic; resonant frequency of metal particles

(编辑 钱悦)

(上接第 116 页)

Grey TOPSIS evaluation of non intrusive terminal identification ability based on combination weighting

FAN Jie¹, YANG Shihai^{2,3}, WU Wenguang⁴, CAO Xiaodong^{2,3}, CHEN Hao⁵

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center, Nanjing 211103, China; 3. State Grid Power Demand Side Management Technology Laboratory, Nanjing 211103, China; 4. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 5. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: Non-intrusive terminal overcomes the problems of high cost, complex installation and inconvenient maintenance of the traditional intrusive terminal, and is widely used. However, the non intrusive terminal load identification ability is only evaluated by electricity index, and the evaluation system is single presently. Therefore, multi-dimensional indicators are selected to comprehensively measure the terminal's ability to identify electrical loads, and a hierarchical multi group evaluation model of non-intrusive terminals is construct based on it. Entropy weight and analytic hierarchy process (AHP) combination evaluation technology is used to get the combination weight of indicators. On this basis, by using the grey technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) evaluation method, the electric appliance identification ability of the electric appliance combination cases are classified and sorted, so as to objectively obtain the overall identification ability level of the terminal and the quality of the terminal identification ability in different cases. Finally, four typical electrical appliances are selected from the non intrusive terminal demonstration platform of Jiangsu Electric Power Research Institute to verify that the scheme solves the problem of incomplete evaluation index data. Combined with the terminal identification ability verification of practical projects, the scientificity and effectiveness of the non-invasive load identification terminal identification ability evaluation are improved.

Keywords: non-intrusive terminals; identification capability; hierarchical multi-group evaluation model; entropy weight and analytic hierarchy process (AHP) method; grey technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) evaluation

(编辑 钱悦)