

GIS局部放电检测用外置传感器性能仿真分析及其设计

超高频局部放电检测法是通过超高频传感器传感GIS内部局部放电所产生的0.3~3 GHz的超高频电磁波,从而实现局部放电的检测和定位,并实现抗干扰。利用高频有限元仿真软件Ansoft HFSS对用于GIS局部放电的常用外置传感器进行仿真,分析了传感器设计参数对其性能的影响,在此基础上设计出工作频带为354~443 MHz的矩形微带贴片窄带传感器和0.5~3 GHz的双臂平面等角螺旋传感器。

吴 笛 吴海入/国网湖南省电力公司长沙供电分公司



吴 笛/助理工程师

局部放电是气体绝缘组合电器 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 绝缘故障早期的主要表现形式,也是表征绝缘状况的重要特征。超高频 (Ultra-High Frequency, UHF) 法是一种利用传感器接收由GIS内局部放电陡脉冲所激发的300~3 000 MHz 的电磁波来检测GIS局部放电的方法。它具有抗低频干扰能力强、能实现局部放电电源定位、判断绝缘缺陷类型及可实施在线监测等优点。用于GIS局部放电检测的UHF传感器是其检测系统中的核心元件,通常根据安装位置的不同可分为内置和外置两种。GIS内置传感器具有较高的传感效率,利于抗GIS外部及其他间隔等信号的干扰,但所需传感器个数多,会增加密封点,且需在制造时完成。因GIS法兰之间通过盆式绝缘子连接形成的缝隙窄,针对内部局部放电所激发的超高频信号可以通过该缝隙辐射到GIS外部的特性,为克服GIS内置传感器检测方法的局限性,形成了外置传感器的检测方法。依据此原理的局部放电检测系统完全独立于GIS,且不需要打开任何零部件,可以广泛适用

于已投入运行的GIS局部放电信号的检测。但外部检测方法因GIS运行在过程中内外部会有很多干扰信号源,对检测系统的频域特性要求较高。

本文运用高频有限元仿真软件Ansoft HFSS对GIS典型的外置式传感器进行仿真,建立了可有效接收其局部放电超高频信号的微带贴片式外置传感器和等角螺旋外置传感器两种模型,并用Ansoft HFSS软件仿真传感器的VSWR、输入阻抗、方向图和增益等,比较分析了两种传感器设计参数对其性能的影响。

GIS外置传感器接收信号的理论分析

1. GIS局部放电电磁波特性

在GIS中局部放电产生持续时间仅为纳秒级的脉冲电流,典型波形^[1]如图1所示,其等效频率可大于1 GHz。GIS局部放电内外置传感器相当于一个接收天线,接收局部放电所激发的超高频频域范围内的电磁波和通过GIS (可以看作同轴波导) 所传播来的传感信号。

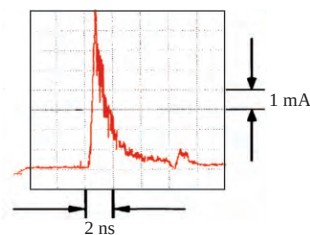


图1 GIS局部放电的典型波形

2. GIS外置传感器的放电信号接收原理

实际运行的GIS由多个间隔组成,各

关键词/Keywords
气体绝缘组合电器·
局部放电·
超高频·
外置传感器·

个间隔之间采用盆式绝缘子封闭和连接。外置传感器接收由局部放电所激发、传播到盆式绝缘子并泄漏到GIS外部空间的电磁波。对于伸展金属面上的任意开口，当电磁能量信号通过其开口辐射时，由天线理论可知该开口可以看作缝隙天线。GIS局部放电脉冲激发并泄漏到GIS外部空间的电磁波则可以认为是内部电磁场在间隔缝隙表面电流驱动的缝隙天线所发射的电磁波，如图2所示。

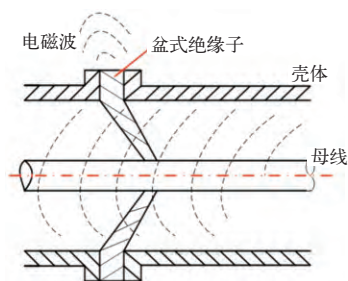


图2 GIS绝缘缝隙处电磁波的泄漏

微带贴片传感器的性能分析及其设计

1. 微带贴片传感器的结构与理论分析

近年来微带天线传感器越来越受到重视，因为它具有其他类型天线所少有的特点：①便于获得圆极化特性，容易实现双频段和双极化。②体积较小。③具有平面结构。微带贴片天线的缺点是工作频带很窄，但可以通过适当的技术来克服这些缺点^[2]。本文采用的微带贴片传感器由矩形金属贴片、介质板、金属底板及馈线四部分构成，如图3所示。采用损耗、厚度相对较小的介质板，在两侧分别敷设金属底板和金属贴片，即构成基本微带贴片传感器。采用同轴线馈点，其内导体从金属底板后穿入并与金属辐射贴片连接，而外导体则与金属底板相连。

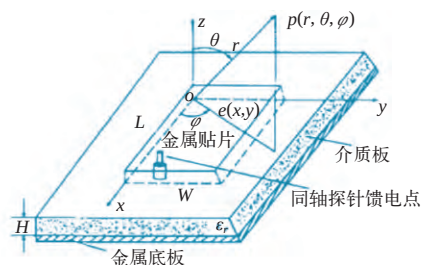


图3 微带贴片传感器结构示意图

设一辐射元的长为 L ，宽为 W ，介质基片的厚度为 H ，现将辐射元、介质基片及接地板视为一段长度为 L 的微带传输线，那么在传输线的两端将形成开路。因基片厚度 $H \ll \lambda$ ，根据微带传输线理论，场沿 H 方向均匀分布，场沿宽度 W 方向没有变化，仅在长度方向（ $L \approx \lambda/2$ ）有变化，其场的分布如图4所示。

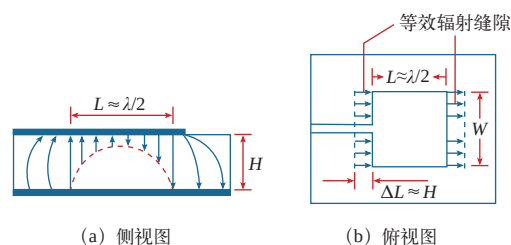


图4 微带贴片传感器场分布

由图4a可见，在两侧所形成的开路端电场均可分解为垂直分量和水平分量，且两侧的垂直分量方向相反，而水平分量方向相同。所以在与接地板垂直的平面上，水平分量所激发的远区场两者同向相叠加，而垂直分量所激发的场两者反向相互抵消。从而两侧开路端的水平分量可以等效为无限大平面上同向励磁的两个缝隙，如图4b所示，缝隙的电场方向与长边垂直，并沿长边 W 均匀分布，缝隙的宽度为 $\Delta L \approx \lambda/2$ 。上述微带天线的辐射可以等效为由两个缝隙所组成的二元阵列。可见，微带贴片传感器是利用金属贴片与金属底板之间缝隙接收电磁波，并转化为高频电流，用同轴探针进行馈电，最后通过同轴电缆将信号传输给检测设备。

微带贴片传感器的谐振半波长实践中需要依靠经验进行调节。其近似值为

$$L \approx 0.49 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中， λ 为自由空间的波长； ϵ_r 为介质基板的介电常数。

2. 介质基板对微带贴片传感器特性影响的分析

微带贴片传感器的实际频率特性与很多因素有关，此处以单谐振频率的正方形微带贴片传感器为例，探究基板厚度、边长和基板介质对微带传感器频率特性的影响。通过Ansoft HFSS仿真，

结果如表1~表3所示。由表1、表2可知：①随着基板厚度的增大或基板边长的增大，微带贴片传感器的谐振频率略微下降，这是因为随着传感器整体尺寸增大而使电特性跟随变化的缘故。②随着基板厚度的增加，谐振点的反射系数将增大，即基板厚度增大使输入阻抗的虚部也就是电抗值增大。③当基板厚度增大时，传感器的工作频带加宽，这是由于厚度的增加使其辐射电导随之增大，从而降低了传感器对应的品质因数。由表3可知，当基板介质的介电常数增大时，传感器的谐振频率减小，同时谐振点处的谐振程度减弱，频带略有减小。通过理论分析可知，若采用介电常数较小的材料，那么传感器的储能因数也相应降低，从而使辐射对应的频带变宽。而基板的介电常数对谐振频率的影响，可以直接从式（1）中看出，当介电常数减小时，传感器的中心谐振频率必然升高。

表1 基板厚度对传感器中心频率的影响

组号	贴片边长/cm	基板厚度/cm	基板边长/cm	谐振频率/MHz
1	24	4.0	30	398
2	24	4.5	30	395
3	24	4.9	30	393
4	24	5.5	30	390

表2 基板边长对传感器中心频率的影响

组号	贴片边长/cm	基板厚度/cm	基板边长/cm	谐振频率/MHz
1	24	4.9	28	399
2	24	4.9	30	393
3	24	4.9	32	389

表3 介质对传感器中心频率的影响

组号	介质	介电常数	谐振频率/MHz
1	聚四氟乙烯	2.1	427
2	聚苯乙烯	2.6	390
3	聚酯	3.2	357

3. 矩形贴片尺寸对传感器特性的影响分析

当微带贴片传感器的基板尺寸和介质一定时，传感器的特性由贴片的尺寸决定。首先由表4的仿真结果可以看出，当贴片边长增大时，谐振频率相应减小。由前文所述的矩形微带贴片天线的原理可知，贴片的长度决定了其谐振的中心频

率。事实上，矩形微带贴片除了可以从一个侧面看做两个缝隙外（如图4b所示），从另外一个侧面也可以看作另外两缝隙，也就是矩形微带贴片传感器长和宽各确定一个谐振频率。表4所示的正方形微带贴片是矩形的特殊情况，只有一个谐振频率。而矩形较小的边长决定了一个较大的谐振频率，大的边长则决定了较小的谐振频率，仿真结果如表5所示。矩形微带贴片传感器有两个谐振频率的存在，当两个谐振频率相配合时，可以使微带贴片传感器的工作频带加宽。

表4 不同贴片边长时传感器的谐振频率

组号	贴片边/cm	基板厚/cm	基板边/cm	谐振频率/MHz
1	22	4.9	30	422
2	24	4.9	30	393
3	26	4.9	30	368

表5 不同贴片长宽时传感器的谐振频率

贴片长/cm	贴片宽/cm	基板长、宽和高/cm	谐振频率1/MHz	谐振频率2/MHz
20.0	26.0	26、32、4.9	336	412
18.0	26.0	24、32、4.9	354	447
17.9	25.0	23.9、31、4.9	370	430

4. 矩形微带贴片传感器的优化设计

通过矩形贴片微带传感器的特性影响因素分析，可得到如下结论：为了得到较宽的频带，应选取介电常数较小的介质；介质板要适度高；贴片的长宽比值要使两者的谐振频率配合且传感器的频带宽度达到最宽状态。优化设计后的传感器，选取介电常数为2.6的聚苯乙烯作为介质基板，尺寸参数如表4中第3组。该传感器的中心频率在400 MHz附近，传感器的工作频带即其驻波比小于2的频率范围为354~443 MHz，且带宽达到了22.25%。该传感器的驻波比如图5所示，方向如图

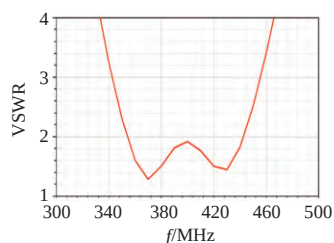


图5 微带贴片传感器的驻波比

6所示。从图6可知,传感器在0°时增益最大达4 dB,最易接收到来自GIS绝缘隙缝泄漏出的电场波。

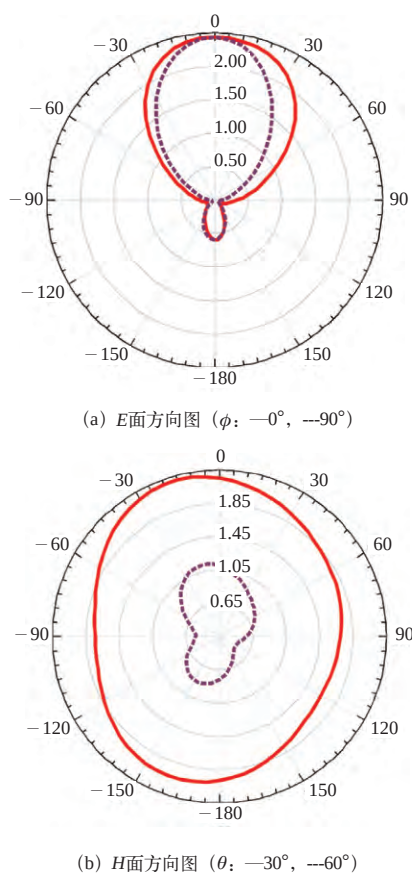


图6 微带贴片传感器的方向

平面等角螺旋传感器的设计

1. 非频变天线的概念

天线不能用于宽频带的原因是频率改变时,天线的线性电长度相应地发生变化,从而破坏了天线的电性能。如果天线的外形只由角度决定,则天线的性能将不再受频率的影响,这就是非频变天线。理想非频变传感器的方向图、阻抗和极化都应该是与频率无关的常数,因此非频变传感器的设计以对几何尺寸的依赖最小、对角度的依赖最大为基本原则。

2. 平面等角螺旋传感器的结构

螺旋线的极坐标方程为

$$\rho = \rho_0 e^{\alpha\varphi} \quad (2)$$

式中, ρ 为极径; ρ_0 为 $\varphi=0^\circ$ 时的 ρ 值; α 为螺旋率,即表示螺旋的紧密程度参数; φ 为极角。

平面等角螺旋传感器是指具有螺旋线形状的金属导体位于同一平面构成的天线,双臂平面等角螺旋天线的结构如图7所示,是工程上常用的一种非频变天线。该天线的一个臂由螺旋线方程为 $\rho_1 = \rho_0 e^{\alpha\varphi}$ 和 $\rho_2 = \rho_0 e^{\alpha(\varphi-\delta)}$ 的曲线构成;而另一臂相当于前一臂绕定轴旋转半圈,并与前一臂形成对称形状,由螺旋线方程 $\rho_3 = \rho_0 e^{\alpha(\varphi-\pi)}$ 和 $\rho_4 = \rho_0 e^{\alpha(\varphi-\delta-\pi)}$ 的曲线构成。但工程上可实现的天线几何尺寸不可能无限大,因此实际的天线必须在适当的长度上截断两臂,使其臂长为有限数值。本文中所用平面等角螺旋天线为自补结构, $\alpha=0.221$, $\delta=\pi/2$,取1.5圈螺旋,在一定的频域内可视为具有非频变特性。

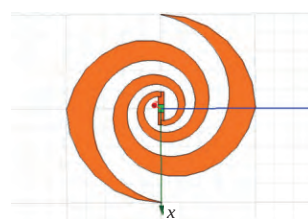


图7 双臂平面等角螺旋天线的结构

3. 平面等角螺旋传感器参数的影响因素

平面等角螺旋传感器的工作带宽主要受天线的臂长所限制,在螺旋线臂长很短或频率很低时,其辐射场基本上是线极化的。但随着螺旋线臂长的增加或者工作频率的升高,其辐射场将逐步地过渡到椭圆极化,并最终达到圆极化。所以,平面等角螺旋天线的极化特性可作为选择用频带下限频率的一个标准。平面等角螺旋天线的最低工作频率和最高工作频率可以按下式估算

$$\rho_0 = \lambda_{\min} / 4 \quad (3)$$

$$\rho_l = \lambda_{\max} / 4 \quad (4)$$

平面等角螺旋传感器本身的理论研究较为成熟,工作频率与理论计算非常一致,故本文仅研究介质基板对传感器性能的影响。相比传感器有介质基板,当传感器的一侧未装有介质基板时,传感器低频部分(0.3~0.5 GHz)的传输特性较好,但无法滤去0.3 GHz以下的谐波,如图8所示,且当频率高于0.5 GHz时,其驻波比较有基板时略高些,不适用GIS局部放电检测的抗低频域信号干扰要求,可见必须选择合适的介质基板。

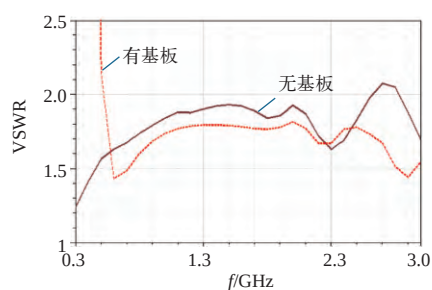


图8 有无基板时双臂平面等角螺旋传感器的驻波比

4. 平面等角螺旋传感器的设计

由前述分析可知,平面等角螺旋传感器的设计首先根据传感器的工作频带由式(3)和式(4)选择传感器的外径。本文根据GIS局部放电检测要求选取传感器的下限工作频率300 MHz,计算得其外臂长为25 cm,选取合适的介质基板,再综合考虑匹配状态,最后得到该传感器的驻波比和方向分别如图9和图10a、b所示。从图9中可以看出传感器在很宽的频率范围内都能满足要求(0.3 GHz以上),即有较好的非频变特性。从图10可知,该传感器的最大增益较大,可达到3.6 dB,且其方向性非常好,能接收到信号的60°。

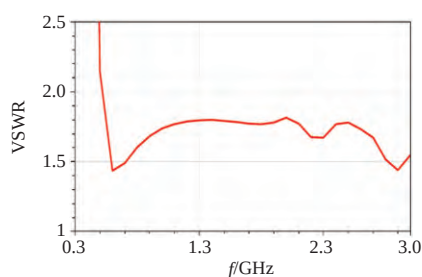
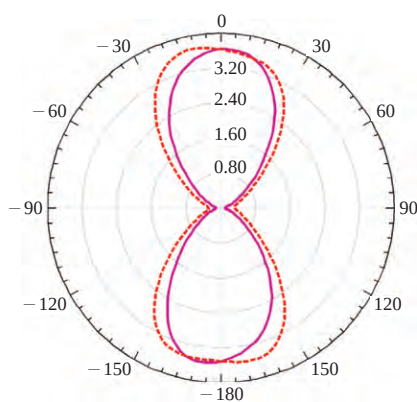
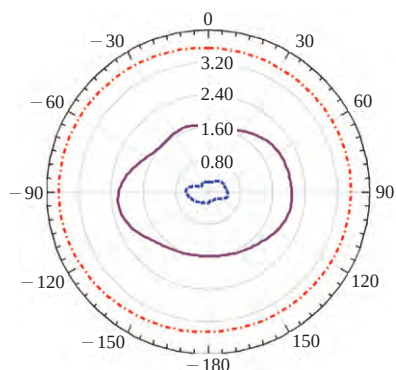


图9 平面等角螺旋传感器的驻波比



(a) E面方向图 (ϕ : -0° , -90°)



(b) H面方向图 (θ : -10° , -40° , -60°)

图10 平面等角螺旋传感器的方向

结束语

传感器的研究和设计一直是GIS局部放电在线监测的难点和关键点之一。本文通过微带贴片、平面螺旋外置传感器的结构参数对性能参数的影响进行了仿真分析,验证了这两种GIS外置传感器的频率工作特性并进行了优缺点比较。微带贴片外置传感器频带窄且较低,滤波特性好;平面螺旋外置传感器频带宽、方向性好但工作频率下限较高且下限工作频率由外臂长决定,介质基板和GIS都能使下限工作频率下降。此外,还提出了工作频带为354~443 MHz、中心频率为400 MHz、带宽22.25%及最大增益为4 dB的矩形微带贴片传感器仿真设计方案,以及工作频带为0.5~3 GHz的双臂平面等角螺旋传感器。实际的GIS局部在线放电监测中,可以同时使用两种类型的外置传感器,利用两种传感器的优点,综合分析考虑得到最准确的结果。

参考文献

- [1] 钱勇,黄成军,等.基于超高频法的GIS局部放电在线检测研究现状及展望[J].电网技术,2005,29(1).
- [2] 王建生,邱毓昌,等.超高频天线传感器的优化设计[J].传感器技术,2000(2).
- [3] 孙才新,许高峰,等.检测GIS局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8).

(收稿日期:2014-09-15) EA