

GIS 局部放电信号超高频包络检波电路的研制

李立学, 黄成军, 曾奕, 江秀臣

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: GIS 局部放电超高频信号带宽高达数 GHz, 对其实施实时采样成本很高; 其包络信号包含了放电的缺陷特征, 采用检波电路提取其包络然后进行信号分析, 可以大大降低对采样系统的要求。笔者在对高频检波二极管特性分析的基础上研制了适用于提取 GIS 局部放电信号包络的超高频包络检波电路, 采用 ADS 软件对该电路进行的仿真显示其具有很好的宽带特性和较小的峰值误差, 电路的实际测试验证了该检波电路在 GIS 局部放电的研究中获得了较好的包络提取效果。

关键词: 超高频; 二极管; 包络检波

中图分类号: TM56

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0406-03

Ultra-high Frequency Envelope Detection Circuit for GIS Partial Discharge Signal

LI Li-xue, HUANG Cheng-jun, ZENG Yi, JIANG Xiu-chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The frequency of GIS partial discharge signal is as high as several GHz, so the real-time sampling is of high cost. Its envelope signal contains fault characteristics of the partial discharge. Using a detection circuit to get the envelope and then analyzing it can greatly reduce the requirements for the sampling system. In this paper, an ultra-high frequency envelope detection circuit was designed on the basis of high-frequency characteristics of the high frequency detection diodes. Simulation via the software ADS and real test indicate that this detection circuit achieves satisfactory envelop extraction in the research of GIS partial discharge diagnostics.

Key words: ultra-high frequency; diode; envelope detection

0 引言

局部放电既是 GIS 绝缘劣化的征兆和表现形式, 又使绝缘进一步劣化, 因此对局部放电进行检测是目前 GIS 绝缘检测与诊断最有效的方法^[1]。通过局部放电检测能发现 GIS 制造和安装的“清洁度”, 能发现绝缘制造工艺和安装过程中的缺陷、差错, 并能确定故障位置, 从而进行有效的处理, 确保设备的安全运行。

超高频(UHF)方法是目前应用最为广泛的 GIS 局部放电在线检测方法。相比于耦合电容法、超声波法、化学法和光学法, 它具有灵敏度高、可用于在线监测、适用于各种缺陷类型、故障定位精确度较高和能判别故障类型等优点^[2]。

笔者应用超高频包络检波电路提取 GIS 局部放电的超高频信号包络, 并采用高速数据采集系统采样, 能够获取比峰值检波更多的局部放电信号特征,

便于采用基于包络特征指纹的研究方法。相比于借助宽带示波器进行实时采样(故障定位应用除外), 该方法大大降低了采样速率和数据量, 同时几乎保留了局部放电的所有细节。

1 超高频包络检波

包络检波电路利用检波二极管的单向导电性和电容的电荷存储功能, 获得输入信号的局部峰值电压, 即信号的包络。其中检波二极管为非线性器件, 等效为非线性电阻, 和积分电容一起构成低通滤波器, 去除输入信号中的高频载波分量, 得到信号的低频分量。

1.1 高频二极管检波器特性

高频检波二极管 HSMS-2825 模型^[3]见图 1, R_s 为串联电阻; C_j 为二极管管壳封装电容; R_j 为二极管等效电阻。

检波二极管具有非线性的 $i-V$ 特性, 其伏安特性的数学表达式为

$$i = I_s (e^{aV} - 1) \quad (1)$$

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-09-12

作者简介: 李立学(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力设备在线监测及故障诊断技术。

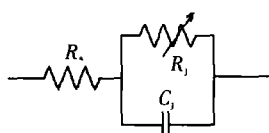


图1 高频二极管模型

式(1)中, $a=q/(nkT)$; i 为二极管电流; V 为二极管两端的电压; I_s 为(反向)饱和电流; k 为玻尔兹曼常数, 通常为 1.38×10^{-23} J/K; T 为绝对温度; q 为电子电荷, 通常取 1.6×10^{-19} C(库伦); n 为实验数据的修正常数, 将式(1)展开成幂级数的形式

$$i = I_s \left(aV + \frac{(aV)^2}{2!} + \frac{(aV)^3}{3!} + \dots \right) \quad (2)$$

由于信号的正负叠加和瞬间效应, 式(2)级数的奇次项相互抵消, 仅其二次及其他偶次项提供了整流作用。对于小信号的整流, 只有二次项有意义, 高次项忽略不计, 因此二极管检波器在小信号输入时检波输出的直流电流与跨接在该二极管两端的射频输入电压的平方成正比, 此时二极管检波器工作在平方律区域。当输入信号大到一定的程度高得使四次项不能忽略时, 二极管的响应便不再处于平方律区, 而是按准平方律整流, 这时称之为过渡区。当输入信号进一步加大, 检波二极管的输出电流就与输入射频信号的电压成正比, 即线性检波区。图2给出了典型的封装二极管检波的平方律—非平方律检波特性曲线, 其平方律区为从噪声电平开始(一般为 -70 dBm)到 -20 dBm 左右的这一段区域, 从 $-20 \sim 0$ dBm 为过渡区, 0 dBm 以上对应于线性区。对于检波二极管来说, 最大输入功率一般不超过 20 dBm(对应电压为 2 V), 否则二极管将被烧毁。

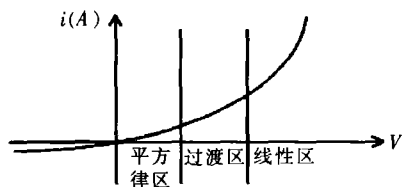


图2 二极管检波特性

实际电路选用高频二极管 SMS7630, 其典型参数为: $R_s=20 \Omega$, $I_s=5 \times 10^{-6}$ A, $C_j=0.14$ pF, 极限稳态电流为 $I_f=50$ mA。根据公式(1), 当流过的电流为 50 mA 时, 二极管两端的电压为 2 V, 即加在二极管上的静态电压必须小于 2 V。电路设计中给二极管加有 10μ A 的偏置电流, 以减少二极管的静态等效电阻, 使检波电路具有更小的充电积分常数。

1.2 包络检波原理

包络检波是指从高频调幅信号中还原出包络变化规律一致的原调制信号的过程。图3为检波电路原理图, 图3中负载电阻 R 数值较大; 负载电容 C 的值应选取在高频时其阻抗 $Z_C \ll R$, 可视为短路, 而调制频率(低频)时其阻抗 $Z_C \gg R$, 可视为开路; R_0

为二极管 D 的正向导通电阻。正弦波信号 U_i 输入时, 在其正半周, D 导通, C 开始充电, 充电时间常数 $R_0 C$ 很小, 使 C 的电压 U_o 很快达到 U_i 的第1个正相峰值 V_p , 之后 U_i 开始下降, $U_o > U_i$ 时截止, C 开始通过放电, 因放电时间常数远大于输入信号的周期, 故放电很慢, U_o 下降不多时 U_i 达到第2个正相峰值 V_p , D 又将导通, 继续对 C 充电。这样不断循环, 便得到信号包络波形。

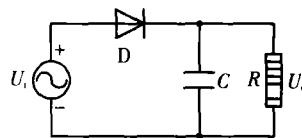


图3 检波电路原理

局部放电信号通常用4种数学模型描述, 分别是单指数衰减函数(SEAW) $f_1(t)$ 、双指数衰减函数(DEAW) $f_2(t)$ 、单指数衰减振荡函数(SEAOW) $f_3(t)$ 和双指数衰减振荡函数(DEAOW) $f_4(t)$, 其数学表达式分别见式(3)~(6)。

$$\text{SEAW: } f_1(t) = A e^{-t-t_0/\tau} \quad (3)$$

$$\text{DEAW: } f_2(t) = A (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \quad (4)$$

$$\text{SEAOW: } f_3(t) = A e^{-t/\tau} \sin(2\pi f_c t) \quad (5)$$

$$\text{DEAOW: } f_4(t) = A (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_c t) \quad (6)$$

调幅信号模型公式

$$V_s = A (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t \quad (7)$$

GIS 发生局部放电时, 信号在 GIS 腔体内谐振, 其发射的电磁波为多次折、反射形成的振荡信号, 因此式(5)、(6)更适合表征其特性。式(7)为调幅信号(其中 Ω 、 ω_c 分别为包络信号和载波的频率)的表达式, 由此可以看出, GIS 局部放电产生的 UHF 信号与调幅信号类似, 因此可以和调幅信号一样, 应用包络检波电路提取 UHF 信号的包络。

1.3 包络检波效率

检波效率(电压传输系数)是评价包络检波电路的重要参数。检波器输入为调幅波时, 检波效率 k 为输出低频电压幅度 U_o 与输入高频电压包络幅度 mU_c 之比: $k = U_o / (mU_c)$, 式中 m 是调幅系数。 k 越大说明同样的输入情况下可以得到较大的低频输出信号, 即检波效率高。GIS 局部放电产生的 UHF 信号可以近似看作调幅信号, 高频载波频率为 300 MHz ~ 3 GHz, 其包络为指数或双指数特性; UHF 信号持续时间为 $50 \sim 500$ ns, 近似认为调幅信号的低频分量的频率范围为 $2 \sim 20$ MHz。检波器的充电积分时间 $R_0 C$ 约为 2.6 ns, 放电时间约为 50 ns, 实验多次对比测试表明检波电路引起的峰值误差不超过 10% , 满足包络提取的要求。

1.4 包络检波电路的仿真

ADS 是微波电路和通信系统仿真软件,主要应用于射频和微波电路的设计。该软件提供了包括射频二极管 HSMS-2825 和 ATC100 高频电容等仿真器件库。笔者所用的仿真信号源表达式为

$$f(t)=A \cdot g(t) \sin(2\pi f_n t) \sin(2\pi f_c t) \quad (8)$$

式(8)中,信号幅值 A 为 0.25 V; f_n, f_c 分别为 100 MHz、1 GHz; $g(t)$ 为占空比为 20% 的门控脉冲信号。图 4(a) 为对应式(8)的检波电路的仿真调制输入信号,其最大幅值为 0.25 V; 图 4(b) 为包络检波电路的输出,其最大幅值约为 0.24 V, 上升时间约为 3 ns, 下降时间约为 10 ns。

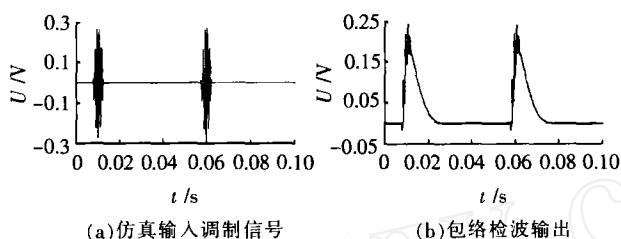


图 4 仿真输入调制信号与包络检波输出

2 超高频包络检波电路的应用

GIS 发生局部放电时, 电流脉冲上升时间为 ns 级, 其产生的高频电磁波频率为 300 MHz~3 GHz; 同时 GIS 腔体在 UHF 波段可视为同轴谐振腔, 由局放脉冲在谐振腔中激发的谐振的持续时间为 50~500 ns。因此, 包络检波器的输出为 50~500 ns 的脉冲包络, 其高频部分可视为载波, 被包络检波电路抑制。

2.1 超高频包络检波电路参数

UHF 信号频率高达 1 GHz, 重复试验观测均能证实 UHF 信号典型的振荡在 6~10 次, 因此理论上要求检波电路的充电响应时间 $t_c \ll 5$ ns, 即要求检波器的 $R_d C \ll 5$ ns, 且越小越好, 其充电积分时间足够小以减少峰值误差。在实际电路中, 二极管器件因其固有参数限制, 其室温情况下的等效导通电阻^[3]

$$R_j \approx \frac{0.026}{I_s + I_b} \quad (9)$$

式(9)中, I_s 为二极管的(反向)饱和电流, I_b 为流过二极管的电流。电路中二极管选用 SMS-7630, 在加有 10 μ A 偏置电流情况下, 其等效电阻约为 2.6 k Ω ; 电路中的积分电容 C 为 1 pF, 此时的等效积分时间常数为 2.6 ns。因此当该检波电路输入的为非等幅正弦信号的 GIS 局部放电 UHF 信号时, 存在一定的峰值检波误差, 多次试验对比测试表明该误差不超过 10%, 能满足工程要求。

由采样频率引起的测量误差

$$\delta = (1 - e^{-1/(fRC)}) \times 100\% \quad (10)$$

式(10)中, f 为采样系统的采样频率, R, C 分别为检

波电路的放电电阻和电容。实际的系统中使用的采样频率固定为 250 MSPS(样点/秒), 放电电阻 R 为 470 k Ω , 峰值误差约为 1%, 这样的误差在局部放电测量系统中完全可以接受, 见图 5。

2.2 GIS 局部放电信号包络的测量

基于包络检波的 GIS 局部放电检测系统由内置 UHF 传感器、UHF 放大器和 DSP 高速数据采集系统等组成, 其中内置 UHF 传感器安装在 GIS 模型的手孔上, 见图 5。

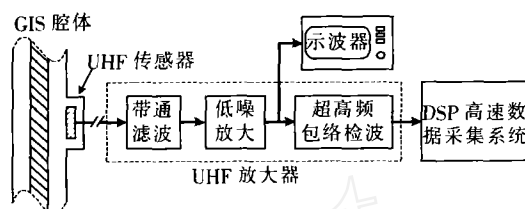


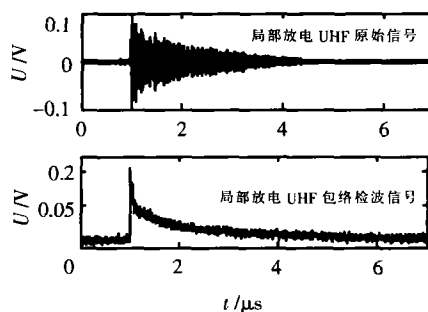
图 5 采用包络检波的 UHF 法局部放电检测系统

2.3 GIS 超高频局部放电信号特性

高压导体表面金属突起是 GIS 的主要缺陷之一^[4], 它通常是在制造不良、安装损坏或摩擦时导致的尖的毛刺。在稳定的工频状态下金属突起不引起击穿, 但在快速电压如冲击、快速暂态过电压(VFTO)条件下则可能发生放电。

试验中, 高压导体表面突起用针尖模型模拟。针尖缺陷模型使用直径 0.5 mm、长度为 5 mm 的金属丝, 头部打磨成光滑的弧形。超高频检波器输出的包络信号脉冲宽度在 50~500 ns, 后端的 DSP 高速数据采集系统或高速示波器以 250 MHz 的采样速率对其采样。

图 6(a) 为充满 SF₆ 气体的 GIS 中高压导体表面针尖缺陷模型所产生的局部放电原始信号和经过包络检波的包络信号, SF₆ 气压为 0.6 MPa; 图 6(b) 为手机干扰原始信号和经过包络检波的包络信号。基于包络检波的信号分析方法使用信号的时域指纹特征分析, 选用的特征参数包括: 波头时间 T_h 、脉冲上升沿时间 T_r 、脉冲下降沿时间 T_d 、放电脉冲宽度 $T_{50\%}$ 、视在放电持续时间 $T_{10\%}$ 、峭度 K_u 和偏斜度 S_k



(a) 高压导体上针尖模型 UHF 信号及其检波包络信号

(下转第 416 页)

2.4 对系统继电保护方面的影响

系统的安全稳定运行依赖于继电保护系统的可靠保障。采用笔者所提的方法在变压器中性线串接小电容器后,改变了系统的部分参数,对继电保护装置的正常运行可能会产生不利影响,因此有必要对这方面进行分析研究。

笔者提出的在变压器中性点串接小电容器的容抗值为 1Ω , 根据计算分析表明^[4], 该容抗值的电容器对继电保护的影响很小, 不会影响系统已投运继电保护装置的正确动作。

3 结论

通过对抑制变压器中性线直流电流的措施进行研究, 得到以下结论:

(1) 对交流变电站内的变压器直流偏磁的机理进行了分析研究;

(2) 在比较分析了其他限制直流电流的基础上, 提出了切实可行的优化设计方案。仿真试验结果证明了该方案的有效性。

下一步的工作目标是要制造基于笔者提出的设计方案的实际装置。如果该装置投入系统挂网运行, 必将为交流系统的安全稳定运行提供有力保障。

参考文献:

[1] 张波, 赵杰, 曾嵘, 等. 直流大地运行时交流系统直流

电流分布的预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 84-88.

[2] 刘曲, 李立程, 郑健超. 考虑海洋影响的直流输电单极大地运行时变压器中性点直流电流研究[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 57-60.

[3] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭, 等. 用于抑制大型电力变压器直流偏磁的接地电阻优化配置[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 62-65.

[4] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.

[5] 赵杰, 黎小林, 吕金状, 等. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 88-91.

[6] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施[J]. 高压技术, 2006, 32(9): 117-120.

[7] EITZMANN M A, WALLING R A, HUYNH H, et al. Alternatives for Blocking Direct Current in AC System Neutrals at the Radissoni/LG₂ Complex [J]. IEEE Trans, 1992, 7(3): 1328-1337.

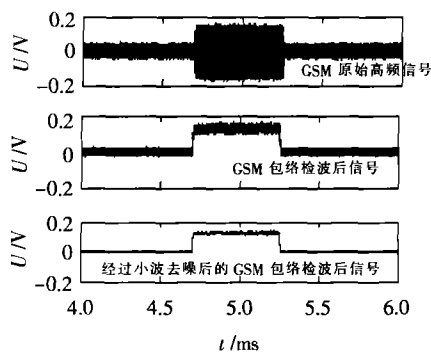
[8] KAPPENMAN J G, NORR S R, SWEEZY G A et al. GIC Mitigation: A Neutral Blocking/Bypass Device to Prevent the Flow of GIC in Power Systems [J]. IEEE Trans, 1991, 6(3): 1271-1281.

[9] 鞠狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.

[10] 皇甫成, 魏远航, 钟连宏, 等. 基于对偶性原理的三相多芯柱变压器暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 83-88.

[11] BOLDUC L, GRANGER M, PARE G, et al. Development of a DC Current-blocking Device for Transformer Neutrals [J]. IEEE Trans, 2005, 21(1): 163-168.

(上接第 408 页)



(b) GSM 手机干扰信号的包络信号

图 6 包络信号

等。从图 6(a)和图 6(b)可以看出, 手机信号的包络检波信号特征与高压导体表面针尖缺陷模型局部放电信号的包络特征有明显的差别, 其分别的时域指纹特征参数也会有较大的不同; 因此比较容易通过基于 BP 神经网络的模式识别方法进行区分, 去除手机信号的干扰。

3 结论

(1) 研制了适用于 GIS 局部放电信号检测的超高频包络检波电路, 该检波电路性能可靠, 检波峰值误差小。

(2) 提出了基于包络检测的 GIS 局部放电检测方法, 该方法通过对放电信号的包络进行分析可以识别局部放电, 并有效区分 GSM 手机等干扰信号。

参考文献:

[1] SAKAKIBARA T, NAKAJIMA T, MARUYAMA S, et al. Development of GIS Fault Location System Using Pressure Wave Sensors [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 371-377.

[2] 钱勇, 黄成军. GIS 中局部放电在线监测现状及发展[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 453-456.

[3] Technical Data of HSMS-282x Datasheet[EB/OL]. www.agilent.com/semiconductors.

[4] 李信, 李成榕. 基于超高频信号检测 GIS 局放模式识别[J]. 高压电器, 2003, 29(11): 26-30.