[发电机]

发电机定子线棒内部放电仿真及检测技术

文/中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院　杨玉磊

发电机定子绕组运行状态对电力系统有至关重要的影响，绝缘缺陷会导致发电机内部产生局部放电，不利于发电机及电力系统的稳定运行。构造了发电机定子线棒电路模型，并确定电路参数，使用Simulink搭建了仿真电路并对仿真结果进行了实验验证，实验结果与仿真结果基本相同。为发电机定子绕组局部放电提供了更精准、更直观的理论及数据支持，为发电机状态检修提供了诊断依据。

发电机在电力系统中扮演着不可或缺的角色，随着社会发展与科技进步，发电机正朝着容量更大、稳定性更高的方向发展。由于发电机单机容量大，其本身的缺陷可能会造成不可逆转的损失。绝缘系统缺陷是大型发电机运行安全的主要威胁，这是根据发电机自身绝缘结构、绝缘的运行状态和运行条件决定的。在绝缘介质内部，经常会由于各种因素存在一些缺陷，其中最为常见的是在设备的制造与安装过程中，由于生产工艺或绝缘自身原因而存在缺陷，该内部缺陷主要反映为气隙或气泡。这些内部缺陷的介电常数小、电场强度高，随着电压升高，缺陷部位极易产生放电。初次发生放电时产生的能量较少，不至于干扰发电机介质的绝缘强度。电场长期作用后，放电逐渐积累并影响发电机绝缘性能，最终在介质中形成放电通道，分解、破坏绝缘介质，使其发生不可逆转的破坏。因此，研究发电机局部放电具有重要意义。

局部放电检测方法及原理

局部放电是指电气设备的绝缘系统中一部分区域发生放电的现象。由于电场强度不均匀、电介质不均匀或其他不可避免的绝缘缺陷的存在，当某区域的电场强度高于该区域绝缘介质的击穿场强时，电气设备就会发生放电。电气设备发生局部放电时会伴随产生光、声、电、气体等物理或化学现象。根据局部放电产生的各种现象，研究人员开发了不同的检测方法来评估设备放电程度、定位放电位置及计算放电参数，常见的检测方法包括超声检测法、特高频检测法和脉冲电流法等。

1. 超声检测法

超声检测法是指在设备外壳安装超声传感器来采集设备发生局部放电时产生的超声波信号。发生局部放电时，电子碰撞会产生超声波信号，该信号持续时间很短，因此超声传感器要有很高的灵敏度和较宽的工作频带。

超声检测法与电检测法不同，采集到的超声波信号不能直观反映放电量，因此，研究人员常用超声检测法和电检测法相结合来定位放电位置并计算放电量。

2. 特高频检测法

特高频检测法是指使用特高频传感器来采集电气设备发生局部放电时产生的电磁波信号，该方法检测频带为300 MHz～3 GHz，外界环境中存在的电磁波信号不处于该频带，因此，该检测方法具有

较强的抗干扰性。

特高频检测技术对于多种类型的放电性不足有很高的灵敏性，该方法可对放电位置进行定位，可根据局部信号谱图测定放电类型。

3. 脉冲电流法

脉冲电流法也叫耦合电容法，是局部放电检测方法中应用最为广泛的一种方法。局部放电发生时会在电气设备中产生一定量的电荷，电极两端的电压会随着电荷中和发生相应变化，同时产生脉冲。脉冲电流法利用相应装置检测电气设备发生放电时产生的脉冲信号，并将该信号进行滤波、放大等一系列处理，处理完成后可得到放电量、放电特征等参数。

除上述方法外，对于局部放电的检测还有射频检测法、光测法和化学检测法等。由于脉冲电流法技术较为成熟，检测结果相对精确，因此，本文基于脉冲电流法来构建发电机定子线棒内部放电仿真模型。

发电机定子线棒仿真模型

1. 电路模型构造

由于发电机定子线棒内部缺陷的主要存在形式为气隙或杂质，因此本文以气隙放电为模型来研究定子线棒内部放电。本文采用三电容模型来模拟绝缘气隙。三电容模型如图1所示，将气隙周围的绝缘介质分为串联介质和并联介质，其中C_g为气隙电容，C_a为串联介质电容，C_m为并联介质电容。

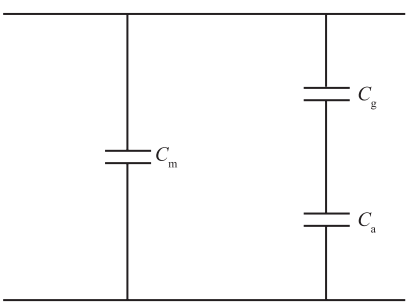

图1　三电容模型

以三电容模型为基础进行深入分析可知，在气隙处除气隙电容外，还有气隙电阻R_{g1}和表面电阻R_{g2}，因此，实际构造的电路模型如图2所示，其中U_{ac}为交流电压源，R为保护电阻，L为滤波电感，C_k为耦合电容。

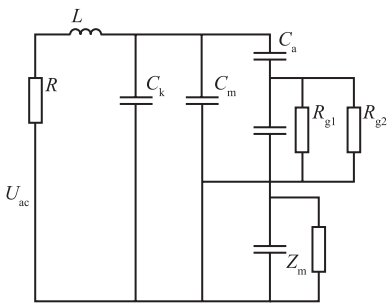

图2　仿真电路模型

2. 电路参数设定

本仿真中将交流电压源设置为50 kV，频率为50 Hz，保护电阻为5 kΩ，滤波电感为5 mH，绝缘以环氧材料为例，绝缘尺寸为30 mm×30 mm×30 mm，在绝缘中构建一个气隙模型，该气隙模型为半径3 mm、高7 mm的圆柱体，气隙压力为$p=1\times10^5$ Pa，绝缘式样两端的电极板间距为d=30 mm。

根据上述设定参数及经验公式，可求得气隙开始放电时对应的电场强度$E=4.05\times10^6$ V/m，起始放电电压U_1=28 kV，放电熄灭电压U_2=21.7 kV，计算公式如下

$$E=25.2p\left(1+\frac{B}{\sqrt{2ap}}\right) \tag{1}$$

$$U_1=Eh \tag{2}$$

$$U_2=U_1/1.304 \tag{3}$$

式中，B为气体类型常数，B=8.6(Pa·m)1/2。

同时可根据经验公式求得，C_g=0.056 pF；C_a=0.028 pF；C_m=0.552 pF，计算公式如下

$$C_g=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_1(d-2r)d}{d} \tag{4}$$

$$C_a=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_1\pi r^2}{d-h} \tag{5}$$

$$C_m=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_1\pi r^2}{h} \tag{6}$$

式中，$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}$F/m，代表真空介电常数；$\varepsilon_1$=2.6，代表绝缘相对介电常数；$\varepsilon_2$=1，代表气隙相对介常数。

当电气设备发生气隙局部放电时，电阻R_{g1}、R_{g2}会大幅减小，并形成半导电化电阻R_{g1}'和R_{g2}'，因此根据研究人员所得的研究成果可知，$R_{g1}=2\times10^{10}\Omega$，$R_{g2}=6\times10^{10}\Omega$，$R_{g1}'=6\times10^5\Omega$，$R_{g2}'=8\times10^5\Omega$。

电路仿真分析

1. 仿真电路搭建

根据构建的仿真电路模型，使用Simulink软件中的元件库搭建仿真电路，仿真电路如图3所示。其中，电流测量模块用于检测流经气隙的电流；Abs模块用于求气隙两端电压的绝对值；Relay模块用于气隙电压与放电起始和放电熄灭电压作比较，当气隙电压绝对值高于放电起始电压时，Ideal开关闭合，当气隙两端电压绝对值低于放电熄灭电压时，Ideal开关打开，以此来控制气隙电阻的大小并模拟放电现象。

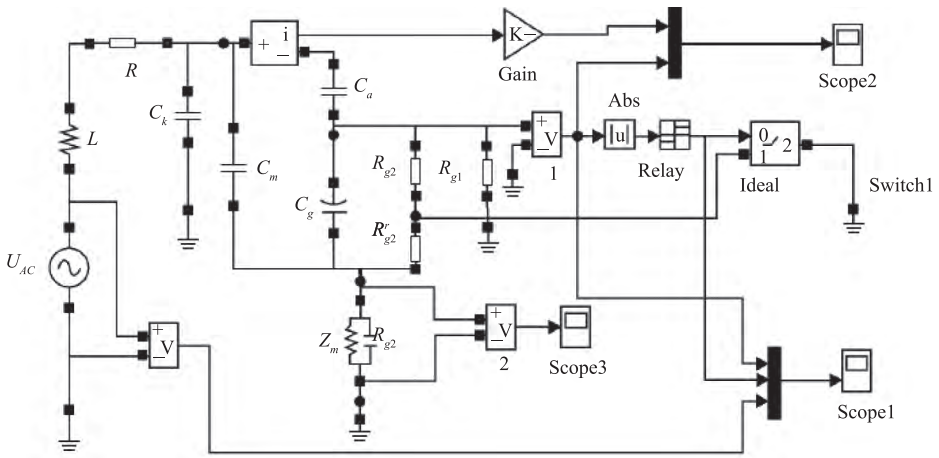

图3　仿真电路图

运行仿真电路后，双击示波器可查看相应仿真结果，仿真结果如图4所示，波形1为高压源波形，波形2为气隙电压波形。由仿真结果可见，当气隙两端电压绝对值增大到放电起始电压时放电开始；当气隙两端电压绝对值低于放电熄灭电压时放电结束，放电主要出现在第一、三象限，符合理论放电情况。

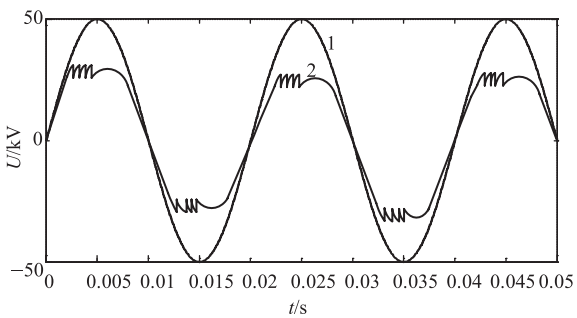

图4　仿真结果

2. 仿真验证与分析

为进一步提高仿真结果的可靠性，本文通过实验对仿真结果进行了验证。实验设备有可调高压源1套、定子线棒3根和局部放电综合分析仪1台。实验共分为三组，三组实验分别对三根不同的定子线棒进行加压，加压过程中记录每根定子线棒的放电起始电压和放电波形，每组实验重复3次。实验结果见下表。

表　不同定子线棒起始放电电压

（单位：kV）

实验项目	第1次放电电压/kV	第2次放电电压/kV	第3次放电电压/kV
第1根	2.9	3	3
第2根	5.5	5.6	5.5
第3根	3	3	3.1

接线时在线棒一端接可调高压电源，在相应位置的绝缘处接地，实验接线图如图5～图7所示，对线棒加压后放电波形如图8～图10所示。

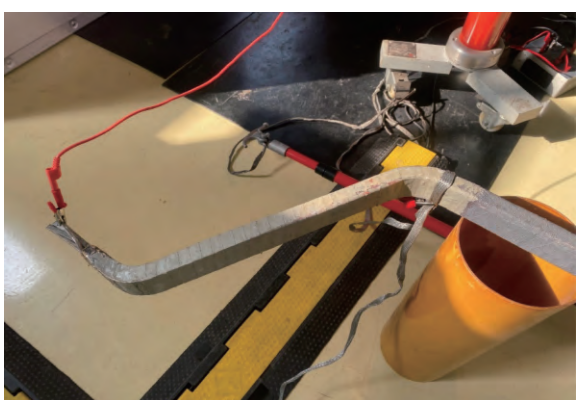

图5　第1组实验接线图

图6　第2组实验接线图

图7　第3组实验接线图

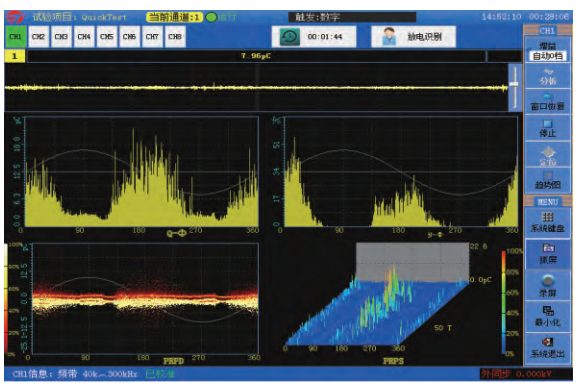

图8　第1组实验波形

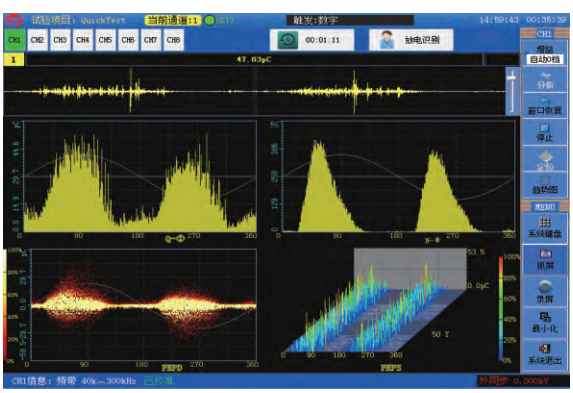

图9　第2组实验波形

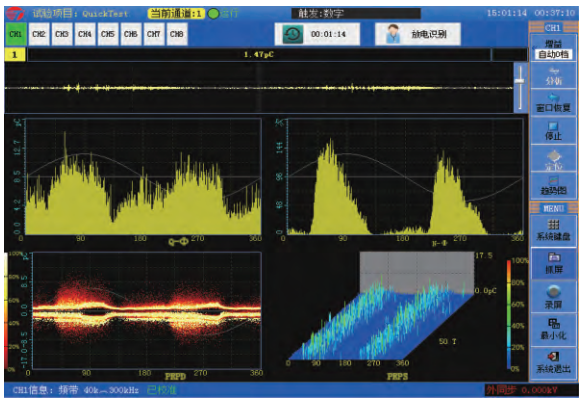

图10　第3组实验波形

根据实验所得定子线棒局部放电波形可知，不同线棒的绝缘能力存在差异，绝缘能力高的线棒起始放电电压高，绝缘能力弱的线棒起始放电电压较低，各线棒局部放电现象主要集中在第一、三象限，与上文所述仿真结果相符，通过局部放电检测，能够判断该发电机是否存在绝缘故障。

结束语

本文介绍了局部放电的检测技术及原理，基于三电容模型建立了发电机定子线棒内部放电电路模型，根据电路模型用Simulink软件搭建了仿真电路，并通过现场实验进行验证，得到如下结论：

1）仿真结果显示定子线棒内部放电主要集中在第一、三象限。利用真实定子线棒对仿真结果进行了实验验证，实验结果与仿真结果相符。

2）脉冲电流法局部放电检测技术能有效发现发电机绝缘故障。EA

（收稿日期：2021-10-18）