

GIS 局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较

李德军^{1,2}, 沈 威², 郭志强²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海西门子高压开关有限公司, 上海 200245)

摘要: 介绍了几种 GIS 局部放电常用的检测技术, 并应用常规脉冲电流检测法和超声波检测法对模拟的 GIS 运行中常见的几种典型缺陷, 包括带电导体上尖端、壳体内壁上尖端、自由金属颗粒、悬浮电位、绝缘子内气泡以及黏附在绝缘子表面的金属颗粒等进行了检测。再通过对测试系统记录的放电脉冲和超声波脉冲的相位分布比较、不同缺陷在一定电压下的脉冲放电电量大小比较, 以及不同缺陷超声波脉冲有效值和周期峰值的特征和大小比较, 总结得到在上述各种典型绝缘缺陷情况下, 应用这两种检测方法所得波形和信号的主要特征, 为超声波局部放电检测技术在 GIS 现场交流耐压试验和运行阶段的有效应用提供参考。

关键词: GIS 局部放电; 超声波检测法; 超高频检测法

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0099-05

Application Comparison between Conventional and Ultrasonic Detection Methods for GIS Partial Discharge

LI De-jun^{1,2}, SHEN Wei², GUO Zhi-qiang²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Siemens High Voltage Switchgear Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: Some popular technologies for detecting partial discharge (PD) in GIS are described. Some typical simulated defects during GIS operation, such as sharp protuberance on HV conductor, sharp protuberance on inner surface of housing, free particle, floating electrode, void in spacer, and metal particle stuck on insulator surface, etc., were detected by means of the conventional pulse current detection and ultrasonic detection methods. The phase distributions of discharge pulse and ultrasonic wave pulse, the magnitudes of discharge on different defects under given voltage, and the features and magnitudes of root mean square and periodic peak values of ultrasonic waves from different defects, are respectively compared. The major features of the ultrasonic wave patterns from the two detection methods are hence achieved. These features may be taken as a reference for the application of ultrasonic detection of partial discharge to high voltage test and operation of GIS on site.

Key words: GIS partial discharge; ultrasonic detection; ultra-high frequency detection

0 引言

随着电力需求的不断增大, 电力设备电压等级的不断提高, 电网中高压 GIS 的应用越来越广泛。由于 GIS 结构紧凑, 承受的工作场强往往很高, 因此对 GIS 设备的绝缘性能有很高的要求。但在 GIS 制造、运输和现场安装调试的过程中, 有时会产生一些绝缘性缺陷。这些缺陷在 GIS 运行过程中可能会引发绝缘故障, 甚至造成严重的系统事故^[1,2]。研究表明, 绝缘介质在发生击穿前都会产生局部放电, 因此局部放电是设备绝缘缺陷的重要征兆和表现形式。通过检测 GIS 局部放电, 可以及时有效地发现 GIS 内部存在的故障缺陷^[3]。

笔者主要对 GIS 几种较为成熟的局部放电检测技术进行介绍, 并通过模拟 GIS 运行中常见的几种典型故障缺陷, 重点介绍超声波局部放电检测和传统电流脉冲局部放电检测在 GIS 出厂试验阶段的比较应用。同时通过这种比较, 为超声波局部放电检测技术在 GIS 现场交流耐压试验和运行阶段的有效应用积累一些经验。

1 GIS 局部放电检测技术概述

局部放电的影响是多方面的, 有物理的、化学的和电气的, 原则上, 它们中的任何一个都能够用来检测局部放电的存在^[4]。目前在 GIS 局部放电检测方面, 技术比较成熟并且应用比较广泛的主要有声测法中的超声波检测法、电气法中的常规脉冲电流法

收稿日期: 2008-12-25; 修回日期: 2009-02-13

作者简介: 李德军(1976), 男, 硕士研究生, 从事 GIS 的制造和研究工作。

和超高频检测法。其它诸如光学检测法和化学检测法都因为自身的局限性还未能广泛应用。

1.1 常规脉冲电流法

GIS 发生局部放电时, GIS 试品两端产生瞬时的电压变化 ΔU , 当把试品接入检测回路时, 就会产生脉冲电流。该脉冲电流信号通过输入阻抗 Z_m 转换成脉冲电压信号, 然后再通过滤波、放大器放大、信号采集以及计算处理, 测定出局部放电的一些基本量(如: 视在放电量 q 、局部放电脉冲大小、数量与相位)。该技术成熟、应用广泛, 已经形成了专业标准(IEC-60270 和 GB/T 7354)。相对于其它方法, 其对视在放电量的定量测量能更直观地反映系统局部放电的剧烈程度。但缺点是抗干扰能力差, 尤其是对于频率 $f < 10$ MHz 的噪音干扰, 同时其测量频率范围一般小于 1 MHz, 信息量少, 设备笨重不适合现场局部放电检测。

1.2 超声波检测法

GIS 发生局部放电时分子间剧烈碰撞并在宏观上瞬间形成一种压力, 产生超声波脉冲, 其中包含横波、纵波和表面波。在 SF_6 气体中只有纵波可以传播并且衰减很大, 而在带电导体、绝缘子和金属壳体等固体中传播的除纵波外还有横波, 横波在固体中衰减减小。由于超声波的波长较短, 因此它的方向性较强, 从而它的能量较为集中。通过安置在外壳上的超声波传感器可以接收到这些声信号, 再通过对声信号进行分析判断可以诊断出是否发生了局部放电^[3]并能对放电缺陷进行定位。其测量频率范围通常在 20~100 kHz, 在此频段可以很好地滤除干扰获得较好的信噪比。超声波传感器通常采用非侵入式结构不需要预先安装到 GIS 本体中, 检测时不会对 GIS 正常运行产生影响。但缺点是声信号在通过气体和绝缘子时衰减很严重, 无法检测出某些缺陷(如绝缘子气泡)引起的局部放电。

1.3 超高频检测法(UHF)

GIS 发生局部放电时, 放电脉冲上升时间和持续时间都极短仅为几个 ns, 其相对应的频域十分宽广。该脉冲信号在 GIS 腔体中传播时会引起电谐振, 激发出频率高达 300 MHz~3 GHz 的电磁波。电磁波传播时, 不仅以横向电磁波(TEM)形式传播, 而且还会建立高次横向电波(TE)和横向磁波(TM)。TEM 波为非色散波, 可以以任何频率在 GIS 中传播, 但频率越高衰减越快。TE 和 TM 则不同, 它们具有各自的截止频率, 只有当信号频率高于截止频率时才能传播。GIS 的同轴结构相当于一个良好的波导, 信号在其内部传播时衰减很小, 有利于局部放电检测。超高频法的原理就是根据局部放电所激发的电磁波的这些特性, 利用内置或外置的超高频传感器来接收这些电磁波并对其进行分析, 从而判断出缺陷类型

和故障定位。其优点是抗干扰能力强, 测试灵敏度高。但缺点是与常规脉冲电流法相比, 检测时无法对局部放电进行一个放电量大小的标定。

2 常规电流脉冲检测法和超声波检测法的比较试验

2.1 试验电路

图 1 所示是由实际出厂绝缘试验系统对实际 252 kV GIS 产品的通管模块进行工频耐压及局部放电测量的试验电路。其中试验变压器为 380 V/750 kV 气体绝缘金属封闭型试验变压器。GIS 通管模块由一根对接在试验变压器上的外壳内径 ϕ 为 248 mm、中央导体直径 ϕ 为 80 mm、长 3 150 mm 的通管和一个盘式绝缘子构成。检测系统有局部放电常规测量装置(MWB 产 200B4M-380 V/750 kV 型试验变压器、PD 产 ICM-Compact, Preamplifier RPA1A 和 CIL3M 局放测量系统)和挪威 Doble TransiNor 产便携式 AIA-2 超声波检测装置。常规局放检测频段为 100~800 kHz, 全系统背景局放小于 0.7 kHzpC。AIA 检测仪则采用 20~100 kHz 频段。

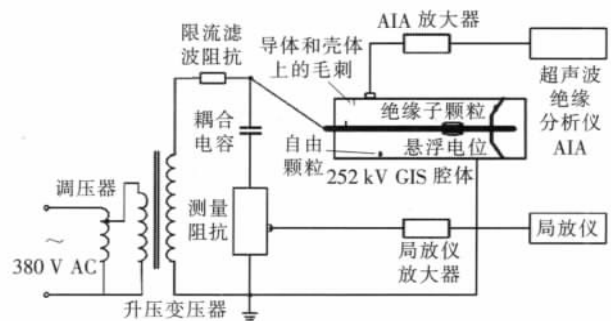


图1 试验模型及测试系统

每次先在 GIS 通管模块中安放一个模拟缺陷, 然后将通管和试验变压器对接, 抽真空至 1 mbar, 再注入 6.1 bar 的 SF_6 气体。静置 30 min 后进行气体的水分 ($\leq 150 \times 10^{-6}$) 和浓度 ($\geq 98\%$) 检测。

2.2 试验结果分析和比较

在 GIS 内分别模拟了带电导体上尖端、壳体内壁上尖端、自由金属颗粒、悬浮电位、绝缘子内气泡以及黏附在绝缘子表面的金属颗粒等 6 种典型故障缺陷。同时通过测试系统记录的放电脉冲和 AIA 超声波脉冲的相位分布比较、不同缺陷在一定电压下的脉冲放电电量大小比较, 以及不同缺陷超声波脉冲有效值和周期峰值的特征和大小比较, 分析得出一些经验判据来帮助利用超声波检测法对 GIS 局部放电类型进行识别。

2.2.1 带电导体上的尖端

在 GIS 导体上安装一根长 5 mm、直径 1 mm 的金属尖刺并施加不同的电压来模拟带电导体上尖端放电缺陷。AIA 超声波传感器距离尖刺约 2 000 mm。

图2所示是常规局部放电仪测得的127 kV试验电压下放电脉冲相位分布和放电量大小的情况:在外加电压负半周发生放电的次数和强度都明显大于正半周,成不对称分布;最大放电量发生在外加电压波峰附近,并随着外加电压的增加而变大。图3所示是127 kV试验电压下超声波脉冲相位分布和脉冲幅值的情况:超声波脉冲在参考电压正负半周的形状和大小相似,并且随着外加电压的变化,其分布相位也会出现相应的漂移导致最大脉冲提前于或滞后于参考电压波峰一定角度。

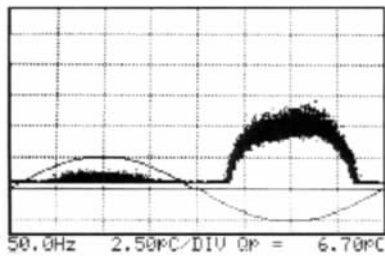


图2 127 kV 电压下放电脉冲分布

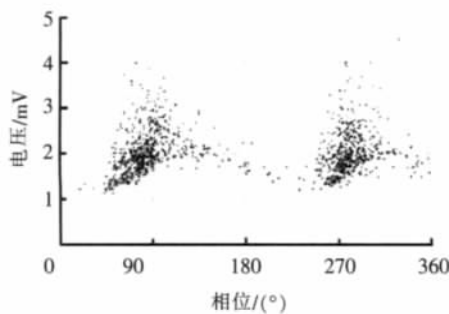


图3 127 kV 电压下超声波脉冲分布

2.2.2 壳体内壁上的尖端

将带电导体上的金属尖刺移置并固定安装到壳体内壁上,尖端指向导体,然后施加不同的电压来模拟壳体内壁上尖端放电的故障缺陷。AIA 超声波传感器距离尖刺大约 2 000 mm。在外加电压 294 kV 下试验结果见图 4、5。壳体上尖端的脉冲放电模式正好和带电导体尖端的放电模式相反,虽然也是不对称分布,但其在外加电压正半周的放电次数和放电量大均明显大于负半周。最大放电量发生在外加电压波峰附近。而超声波脉冲分布的形状和大小仍然基本相似,相位也随着外加电压的变化而产生一定漂移。

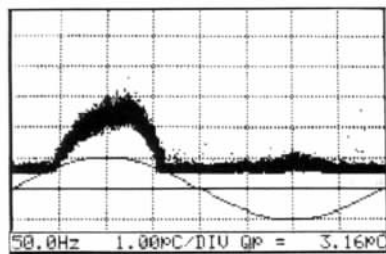


图4 294 kV 电压下放电脉冲分布

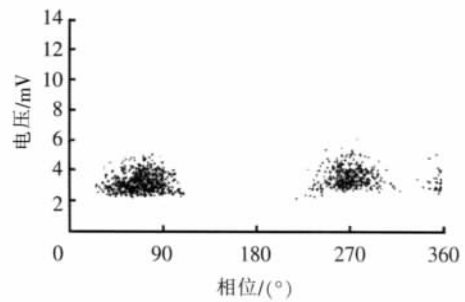


图5 294 kV 电压下超声波脉冲分布

对于相同大小的尖端,处于壳体上时其起始放电电压明显比位于带电导体上时要高很多。在相同放电电压下,前者的局部放电量和超声波脉冲的幅值也小于后者。

值得注意的是,在局部放电常规检测时,该模拟缺陷在规定电压下的局部放电量小于国标规定的 5 pC 的限定值,试品的局部放电在合格范围内。而超声波检测结果能更突出地体现故障缺陷的存在。

2.2.3 自由金属颗粒

在 GIS 腔体内放置一颗直径约 4 mm 的铝箔揉制的球状颗粒,然后施加不同的电压来模拟自由金属颗粒放电的故障缺陷。在外加电压 90 kV 下试验结果见图 6、7。在外加电压正负两个半周内的放电次数基本相同并成对称分布;最大放电量发生在电压正负波峰附近且大小相等。随着外加电压的升高,放电强度明显增大。自由颗粒在电场的作用下会产生跳动并与外壳碰撞激发出超声波。因为这种跳动和碰撞是无规律的,所以其激发的超声波脉冲的分布很随机杂乱无任何相位相关性。信号水平很高。

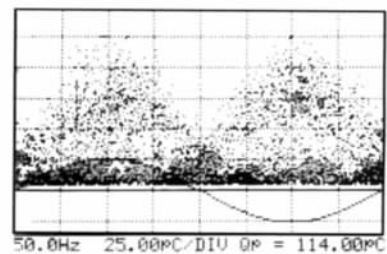


图6 90 kV 电压下放电脉冲分布

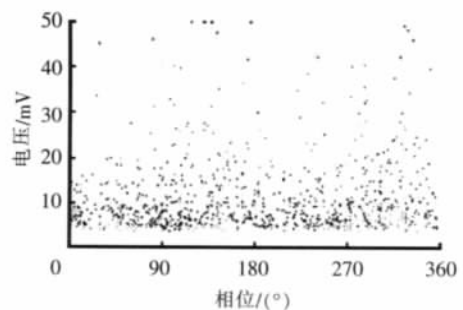


图7 90 kV 电压下超声波脉冲分布

2.2.4 悬浮电位

将一个盆式绝缘子安装在试品 GIS 通管端部,其中央金属导体距离通管的带电导体大约 20 mm

构成一个悬浮电位，再通过施加不同的电压来模拟该类缺陷的放电情况。AIA 超声波传感器距离缺陷点大约 1 500 mm。在外加电压 143 kV 下试验结果见图 8、9。放电现象在正负两个半周都比较明显，尤其是外加电压超过放电起始电压后放电量随电压升高而快速增长，最大放电量发生在外加电压波峰附近。超声波脉冲也较为集中地分布于参考电压波峰附近。

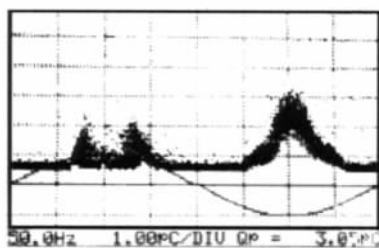


图 8 143 kV 电压下放电脉冲分布

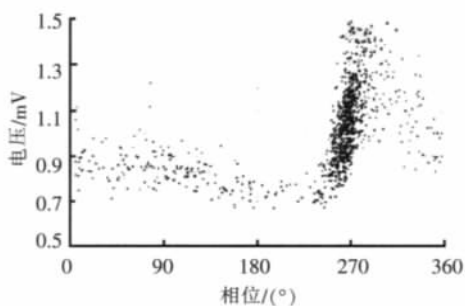


图 9 143 kV 电压下超声波脉冲分布

2.2.5 绝缘子上颗粒

用胶带将一根长 5 mm、直径 1 mm 的铜丝粘贴在盆式绝缘子上，距离其中央金属导体约 7 mm，然后施加不同的电压来模拟绝缘子上颗粒放电的故障缺陷。AIA 超声波传感器距离缺陷点大约 1 500 mm。在外加电压 294 kV 下试验结果见图 10、11。在外加电压波形上升段发生的放电次数明显高于下降段，正负两个半周的放电次数和放电量大小分布十分相似，只是局放相位与外加电压相位会出现偏移而使得最大放电量没有出现在外加电压波峰附近。超声波脉冲在参考电压正负两个半周上分布的形状和大小基本相似，信号水平不高。

2.2.6 绝缘子中气泡

将一个带有两个空气气泡的绝缘子安装到试验 GIS 通管上，然后施加不同的电压来模拟绝缘子气

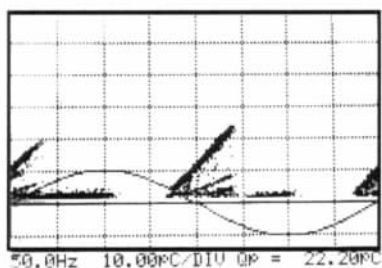


图 10 294 kV 电压下放电脉冲分布

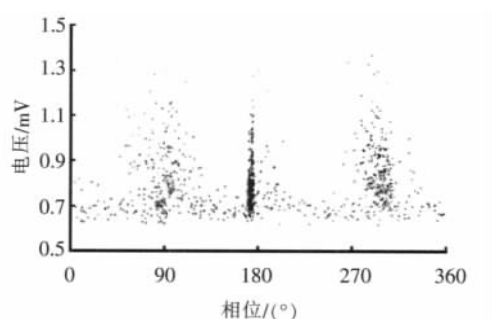


图 11 294 kV 电压下超声波脉冲分布

泡放电的故障缺陷。AIA 超声波传感器距离缺陷点大约 500 mm。在外加电压 294 kV 下试验结果见图 12、13。放电情况在外加电压正负两个半周基本相同，并且具有很大的放电强度，但放电相位与外加电压相位出现一定的偏移。由于环氧树脂对放电信号衰减很大，绝缘子内部放电产生的超声波脉冲信号都被其吸收掉而无法传递到外部，所以超声波传感器几乎检测不到任何超声波脉冲，脉冲相位分布平坦等同于背景噪音水平。

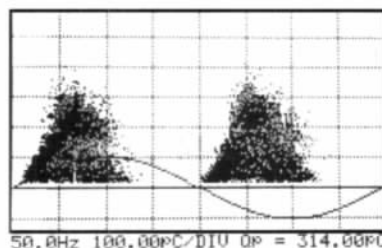


图 12 294 kV 电压下放电脉冲分布

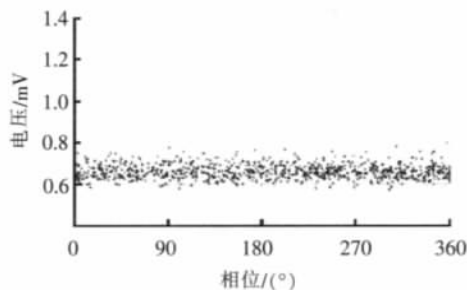


图 13 294 kV 电压下超声波脉冲分布

2.3 故障特征分析和诊断

通过上述试验及分析，可以得出 GIS 典型故障放电在两种检测模式下的图谱特征，从而为故障的类型诊断提供一些经验判据。具体放电图谱特征见表 1。

3 结论

通过局部放电常规检测与局部放电超声波检测对比试验证明：

- (1) 超声波检测法对金属尖端、自由金属颗粒、悬浮电位等缺陷具有较高的灵敏性，而对绝缘子气泡和绝缘子表面颗粒等缺陷不敏感。超声波检测法

表1 GIS局部放电故障图谱特征

缺陷类型	常规局部放电信号和特征	AIA 脉冲信号和特征
		(信号水平指信号的有效值和峰值的大小)
带电导体上的尖端	信号幅值不高,放电集中于外加电压的峰值附近; 负半周局放幅值明显高于正半周,局放首先发生在负半周峰值处,随着电压的增加,正半周峰值处也出现局放,同时局放的相位带也随之变宽,放电量也略有增加。	在放电电压稳定不变的情况下,超声波信号水平不高,幅值变化不大,随着电压升高信号幅值增大; 含有较稳定的50 Hz成分; 峰值系数低。
壳体上的尖端	信号幅值不高,放电集中于外加电压的峰值附近; 正半周局放幅值明显高于负半周,局放首先发生在外加电压正半周峰值处,随着电压的增加,负半周峰值处也出现局放,出现局放的相位带随着电压的增加而变宽。	信号水平低,幅值变化不大,随着电压升高信号幅值略有增大; 含有较稳定的50 Hz成分; 峰值系数低。
自由金属颗粒	信号幅值高,外加电压瞬时值高时,局放幅值也高; 局放可发生在任何相位处; 局放图谱呈现与外加电压相对应的两个正弦半波,局放的发生分布较均匀。	信号水平高,幅值变化大,随着电压升高信号幅值大幅增大; 基本无50 Hz/100 Hz相关性; 峰值系数高。
悬浮电位	信号幅值高,幅值分布较分散; 局放主要发生在外加电压峰值附近。	信号水平高,幅值变化不大,随着电压升高信号幅值大幅增大; 含有很高的100 Hz成分和一些50 Hz成分; 峰值系数低。
粘在绝缘盆上的颗粒	信号幅值不高; 局放在电压零点前出现,电压上升段局放发生率明显高于下降段,局放相位与外加电压相位会出现偏移。	信号水平很低,幅值变化大,随着电压升高信号幅值略微增大; 具有50 Hz相关性; 峰值系数不高。
绝缘盆中的缺陷	信号幅值高; 局放相位与外加电压相位有偏移; 电压上升段局放发生率明显高于下降段。	信号水平极低,基本检测不到。

抗干扰能力强。

(2)在GIS出厂试验阶段引入超声波检测法,对于局部放电常规检测来说它是种有益的补充,能为一些故障缺陷的检测和判断提供进一步的信息,如壳体上尖端缺陷。

(3)对比试验的分析结果可以作为GIS现场局部放电测量的判据,用于评估现场GIS故障缺陷,掌握GIS设备绝缘性能状况。

(上接第98页)

对上述窄带型空心线圈进行了被测导体中心轴偏移试验、角偏移试验、平行外边缘试验、垂直外边缘试验,测试结果见表1。

表1 窄带型空心线圈的测试误差 %

中心轴偏移	角偏移	平行外边缘	垂直外边缘
0.6	0.2	0.11	0.01

从表1列出的数据可以看出,与平板型空心线圈和组合型空心线圈相比,窄带型空心线圈的互感系数受载流导线的位置变化较上述两种空心线圈明显,一方面是该线圈的中心孔特别大,等效内直径达1 m,另外一方面是与多块长条PCB板的连接处的间隙有关,如果在连接处采用高磁导率的软磁材料可有效减小导线位置变化带来的误差。

4 结语

基于PCB的窄带型空心线圈能够满足理想空

参考文献:

- [1] 邱毓昌. 用超高频法对GIS绝缘进行在线监测[J]. 高压电器, 1997, 33(4): 36-40.
- [2] 刘卫东, 黄瑜琰, 王剑锋, 等. GIS局部放电特高频在线检测和定位[J]. 高压电器, 1999, 35(1): 11-15.
- [3] 邱昌荣, 王乃庆. 电工设备局部放电及测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [4] PEARSON J S, FARISH O, HAMPTON B F, et al. Partial Discharge Diagnostics for Gas Insulated Substations [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 893-905.

心线圈的要求,线性度大为提高,抗外界磁场影响的能力进一步增强,成本低,焊点少,易于生产,测量准确度较高,适合用于电力系统保护等被测电流大的应用场合,是平板型空心线圈和组合型空心线圈的有效补充。

参考文献:

- [1] LJUBOMIR K. Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement of Power Systems [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3): 47-52.
- [2] CHEN Qing, LI Hong-bin, ZHANG Ming-ming, et al. Design and Characteristics of Two Rogowski Coils Based on Printed Circuit Board [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(3): 939-943.
- [3] 陈庆, 李红斌, 张明明, 等. 采用主副印制电路板构造的Rogowski线圈性能分析及设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 79-82.