

特高压变电站二次设备电磁兼容建模

马海杰¹, 罗广孝¹, 徐刚², 黄少锋², 崔翔¹

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 特高压变电站二次设备运行所处电磁环境恶劣, 提高其抗干扰性对电网的安全、可靠运行具有重要意义。对二次设备端口电路建立等效模型, 利用 HSPICE 电路仿真工具模拟限幅、滤波、隔离等提高设备抗扰度措施, 并研究这些措施实施的有效性, 为设计者提供了电路设计依据。对于敏感电路, 通过网络分析仪测量设备二端口网络的 S 参数, 采用向量拟合有理函数逼近的方法建立与之等效的宽频电路模型, 为时域仿真提供依据。对该设备进行电磁兼容抗扰度测试, 分析比较这些措施实施前后的时域波形, 同样得出采取限幅、滤波等措施的有效性, 在时域上验证了建模方法的正确性。

关键词: 特高压; 变电站; 二次设备; 抗扰度; 端口; 宽频建模; S 参数

EMC model of secondary equipment in UHV substation

MA Hai-jie¹, LUO Guang-xiao¹, XU Gang², HUANG Shao-feng², CUI Xiang¹

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: It is important for power network's safe and reliable operation to improve the immunity of secondary equipment of ultra high-voltage substation running in badly electromagnetic environment. The model is set up based on equivalent circuit for the secondary equipment port, using HSPICE to simulate limiting, filtering, isolation devices, and so on. It can improve the effectiveness of equipment immunity measures and provide reference for the circuit designers. For sensitive circuit, the network analyzer is used to measure S-parameters of two-port network, and rational approximation of frequency domain responses by vector fitting is adopted to build broad frequency equivalent circuit for time domain. By testing the equipment electromagnetic compatibility, analysing and comparing time-domain waveforms, it draws to conclusion that measures such as limiter, filter, and so on are effective and the correctness of the modeling method in time domain is verified.

This work is supported by International Science and Technology Cooperation Program (No. 2007DFA71250) and the Young Teacher Foundation of North China Electric Power University (No. 200711011).

Key words: UHV; substation; secondary equipment; immunity; port; broad frequency model; S parameter

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0053-05

0 引言

1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程于 2006 年 8 月通过国家发改委核准, 同年底开工建设。2008 年 7 月关键设备全部研制成功, 12 月初工程全面竣工。随着电网规模的扩大、电压等级的提高、电磁兼容的问题更加尖锐。安装于特高压变电站的二次设备所面临的电磁环境更为恶劣, 从而对二次设备的电磁兼容性提出了更高的要求^[1-3]。

二次设备的电磁兼容问题直接影响设备的技术指标, 影响整个设备的抗干扰性能, 直接关系到整个系统的可靠性和稳定性, 为此设备投入使用前就应对其抗干扰性测试。对设备模拟信号调理电路、数字芯片敏感端口、敏感电路建立宽频电路模型, 利用电路仿真软件进行设备系统级电磁兼容仿真, 可为预测设备的抗扰度性能设计提供理论依据; 对设备各端口进行电磁兼容抗扰度测试^[4-7], 电快速瞬变^[8]、静电放电、暗室辐射、阻尼振荡波、浪涌测试^[9-11]等测试项目, 可以验证仿真模型的正确性。

基金项目: 国际科技合作计划 (2007DFA71250); 华北电力大学青年教师基金 (200711011)

1 设备端口抗扰度分析

现场的模拟电压电流量、开关量输入输出线路、

各种通信总线和供电线路暴露在变电站电磁干扰场中，直接把各种骚扰量通过传导方式耦合进二次设备。特高压变电站二次设备中交流模拟量输入端口电路如图 1 所示。互感器将一次侧的电压、电流信号转换成适合继电保护和测控装置输入要求的小电流、电压信号，并进行有效隔离。缓冲部分往往采用集成运算放大器这类有源模拟器件。由于运放的开环电压增益和输入阻抗均很高，输出阻抗较低，具有一定的缓冲作用。对于输入的模拟量需要采用低通滤波器将最高信号频率限制在一定的带宽以内，以降低采样频率。一般采用 RC 无源低通滤波器，主要是因为其结构简单、可靠性高。滤波后的信号经过模数转换后输入到数字器件进行处理。下面我们主要讨论模拟量输入端口的抗扰问题，其他端口分析方法类似。

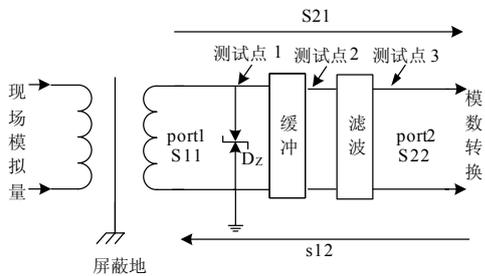


图 1 输入端口电路

Fig.1 Circuit diagram of import port

1.1 模拟调理电路建模

利用电路分析软件对电路进行仿真，可获得电路中各节点和支路的响应特性，输出结果可以是文本方式和波形曲线方式，分析这些结果，可以得知电路的功能和技术指标，可以快速、精确地评价电路抗扰度设计的正确性。

电压、电流互感器的原、副边的耦合电容对干扰信号提供了通道，使干扰信号可直接进入装置内部，对装置的运算放大器、A/D 等造成影响，严重时会导致误动、拒动现象。在变压器副边增加限幅和滤波措施可解决上述问题。

在 HSPICE 仿真软件中建立图 1 模型，R、C 等无源器件直接采用软件库中模型，运算放大器采用模拟器件厂家提供的 SPICE 电路模型网表，瞬变抑制二极管采用等效电路模型参数，互感器通过测量频域 S 参数后转化为等效电路，互感器的饱和特性，本文暂不做讨论。在现场模拟量处加浪涌干扰，测试图 1 中测试点 1 处加 D_z 前后的电压波形，分别如图 2 (a) (b) 所示。图 2(a)中电压幅值为 1.5 kV，加瞬变抑制二极管后有效地释放了浪涌能量，使电压嵌位在 12 V 左右。可以根据后续回路对电压

的要求，灵活选择合适参数的瞬变二极管。

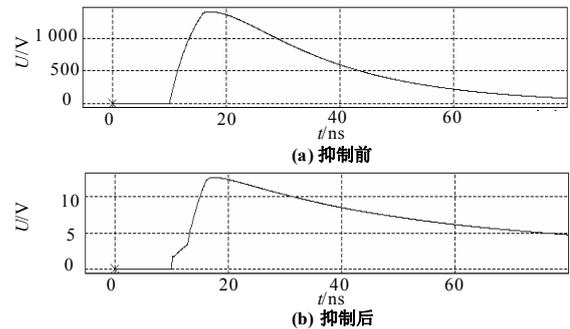


图 2 瞬变二极管对浪涌的抑制作用

Fig.2 Transient diode's suppression to surge

通过设计电路元件参数，构成低通滤波器，仿真得到低通滤波器幅频特性曲线，如图 3 所示。图 3 (a) 为滤波前，即图 1 中测试点 2 处的幅频特性曲线，截止频率为 100 kHz，图 3 (b) 为一阶滤波和二阶滤波后，即图 1 中测试点 3 处的幅频特性曲线，二阶滤波后的截止频率为 100 Hz。通过选取 RC 的数值，可改变截止频率，滤除高频干扰。

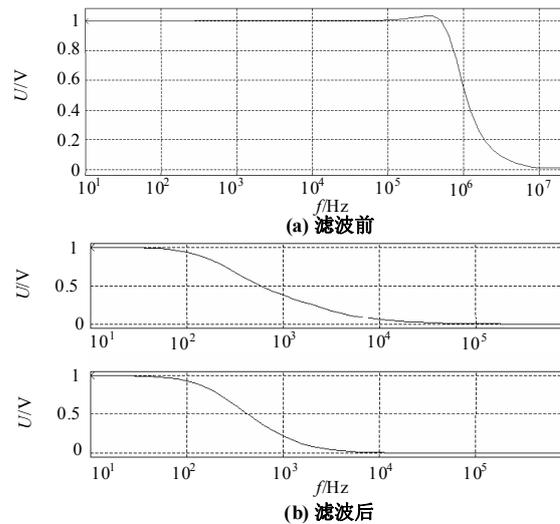


图 3 滤波前后的幅频响应

Fig.3 Frequency response before and after filter

1.2 数字器件端口特性行为级建模

对各部分电路整体时域仿真，分析电路的信号完整性和电磁兼容特性时，端接数字器件的模型很难得到，对于数字芯片可以使用其 IBIS (I/O Buffer Information Specification) 模型进行端口行为级建模。IBIS 模型不同于 SPICE 模型，其屏蔽了电路的内部技术设计细节，采用 I/V 和 V/T 表的形式来描述数字集成电路电源、I/O 和地单元的电气特性。从 IBIS 模型中得到芯片关于封装部分的描述，再通过电磁场计算工具提取 PCB 板等效参数，可以建立

如图 4 这样的关于数字芯片电源端口的等效模型。

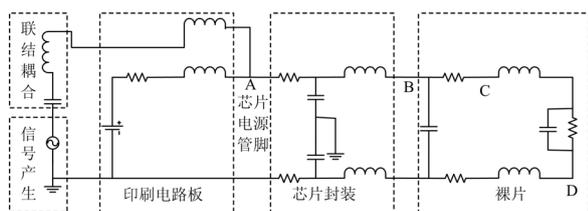


图 4 数字芯片电源端口等效模型

Fig.4 Equivalent model of digital chip power port

图 5 为射频干扰在图 4 中 A、B、C、D 各点的幅频响应。从图 5 可得, 在芯片电源管脚 A 处, 电源耦合进的射频干扰频率在 80 MHz 处容易产生, 在电源上产生较大的过冲, 最高点达到 1.45 V。芯片电源管脚 A 处加 0.1 μF 滤波电容后, 此处过冲最高点降到 0.5 V。可见, 在电源管脚处加滤波电容能起到很好的滤波效果。

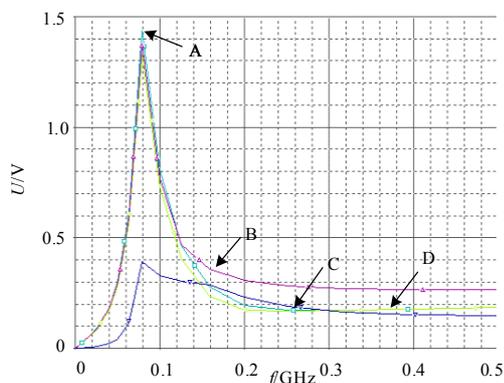


图 5 射频干扰在等效模型各点的幅频响应

Fig.5 Frequency response of radio-frequency interference to each equivalent model

2 敏感电路宽频建模

电磁兼容抗扰度测试中电快速瞬变、静电放电、暗室辐射等都体现信号频谱范围宽的特性, 干扰量频谱达到 GHz 级别, 这些情况在特高压现场电磁骚扰测量中也得到了证实。传统的集总参数电路模型并不能很好地体现电路的分布参数特性, 因此, 对二次设备中的各个关键电路中的互连系统、无源器件等进行宽频建模, 时域分析时才能完整地描述设备的电磁兼容特性。

网络分析仪和电磁场计算工具可以对相关系统的宽频特性进行参数测量和仿真计算, 结果可以用 S 参数的形式表述。S 参数称为散射参数, 它是建立在入射波、反射波关系基础上的网络参数, 以器件端口的反射信号以及从该端口传向另一端口的信号来描述电路网络。

图 1 所示网络为二端口网络, 定义测试点 1 对地为发送端口 port1, 测试点 3 对地为接受端口 port2。用 4 个 S 参数来表示其端口特性, 各参数的物理含义和特殊网络的特性如下:

S_{11} : port2 匹配时, port1 的反射系数;

S_{22} : port1 匹配时, port2 的反射系数;

S_{12} : port1 匹配时, port2 到 port1 的反向传输系数;

S_{21} : port2 匹配时, port1 到 port2 的正向传输系数;

其中, S_{21} 表示有多少能量被传输到 port2, 这个值越大越好, 理想值是 1, 即 0 dB, S_{21} 越大传输的效率越高。

如图 6 所示为网络分析仪实际测得某设备对应图 1 所示网络的 S_{21} 参数, 与建模仿真所得到的二阶滤波后的幅频响应曲线在低频部分基本吻合, 高频部分的误差由于 R、C 器件的高频非理想特性造成。

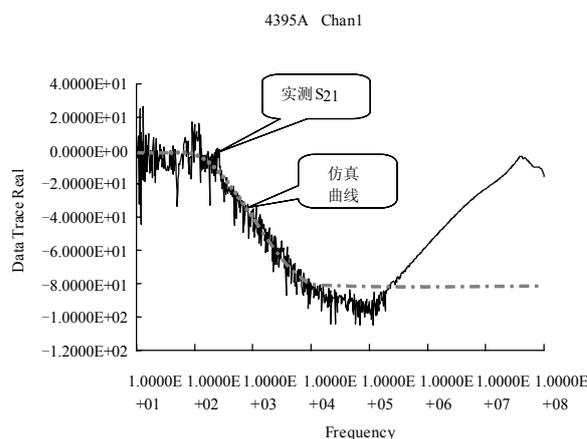


图 6 输入端口 S_{21}

Fig.6 S_{21} of import port

在 SPICE 电路仿真工具进行时域计算时, 需要将得到的 S 参数转化成相应的宽频电路模型。我们采用有理函数逼近的方式^[12], 通过向量拟合 S 参数曲线, 再转化成对应的电路模型。这样电磁兼容中的敏感电路涉及到的无源器件、PCB 布线中不连续的部分都可以转化成相应的宽频等效电路, 微带线、带状线可以视为传输线网络, 其分布参数可以用如 CST MWS 和 HFSS 电磁计算工具得到, 这些模型均可加入 SPICE 电路仿真工具, 实现敏感电路的时域分析。图 7 为有理函数逼近的方法向量拟合一个穿过电源、地平面的通孔的过程, 通孔的 S 参数通过电磁场计算工具 CST MWS 建模计算得到, 最后得到等效的宽频模型。

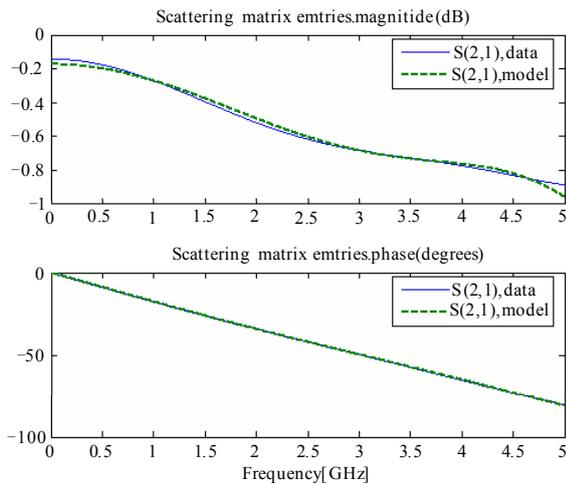


图7 有理函数法拟合通孔 S_{21} 参数

Fig.7 Rational approximation of through via' s_{21} by vector fitting

3 抗扰度测试时域分析

在特高压变电站复杂而恶劣的电磁环境中, 会出现工频电流和雷电、操作冲击以及多种放电现象的电磁骚扰。随着变电站一次系统电压的升高、容量的增大, 电磁骚扰可能更加严重。

对某设备各端口进行电快速瞬变、静电放电、暗室辐射、阻尼振荡波、浪涌测试, 以确定二次设备的抗扰性能^[13-17], 进一步验证采取限幅、滤波、隔离等措施的正确性。

在未加措施前, 测试交流电压输入端口过程中, 浪涌共模输入 1 kV 时检同期功能判断有误; 差模输入 2 kV 时三相电压显示不正确。经检查发现其中 A/D 有损坏, 严重时会导致误动、拒动现象。为此在变压器副边增加限幅和滤波措施可解决上述问题。同时注意, 电压、电流互感器原、副边中间的屏蔽层要良好接机箱地, 以及进线短, 出线远离进线等问题。

3.1 限幅

在图1所示的测试点1处安装双向瞬变二极管, 可有效避免过大的电压输入到运放输入端, 造成运放饱和的情况。图8为在交流电压输入端加共模 0.25 kV 浪涌信号, 测得图1测试点1处不加瞬变二极管的电压变化。图9为在交流电压输入端加共模 0.5 kV 浪涌信号, 测得测试点1处加上瞬变二极管时的电压变化。可见加上瞬变二极管后可使运放输

入电压稳定在 10 V 以下。加差模信号可得到同样结论, 此结论与仿真结果吻合。

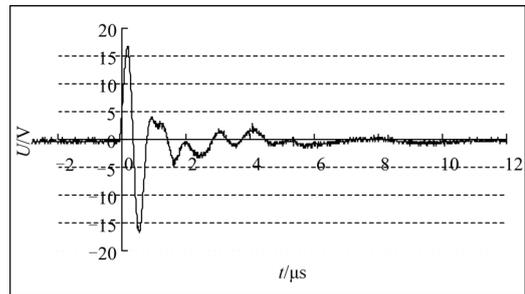


图8 共模 0.25 kV 浪涌,

测试点1处无瞬变二极管时电压变化量

Fig.8 The 1th testing point's change without transient diode at 0.25 kV common mode surge

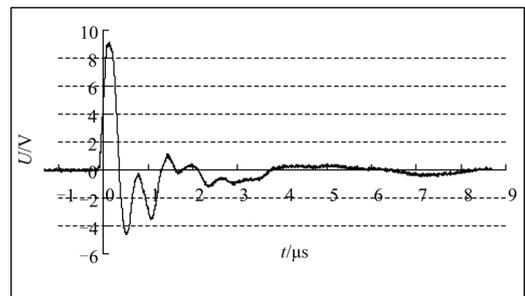


图9 共模 0.5 kV 浪涌,

测试点1处加瞬变二极管时电压变化量

Fig.9 The 1th testing point's change with transient diode at 0.5 kV common mode surge

3.2 滤波

图1的测试点2、3间采用两级 RC 滤波可有效地将高频成分滤除, 使输入到 A/D 的波形更加稳定。图10、图11分别为在交流电压输入端加共模 0.5 kV 浪涌信号, 测试点2、3处的电压变化。可见, 经过两级滤波后电压变化被控制在 1.4 V 以下, 为软件抗扰度的设计策略提供了参考, 可有效避免误动。实测得到的结论与模型仿真结果一致。

为研究数字芯片的抗干扰性, 针对 IBIS 模型, 将面板看门狗芯片的电源输入端的去耦电容去除后对该设备进行静电放电抗扰度实验, 测试过程中当对某按键进行接触放电时, 液晶屏闪了三次, 连续上报报文。后经分析发现, 主要是静电放电产生高电压、大电流窜入系统内部, 看门狗供电电源波动, 系统重启所致。在看门狗的电源和地间加一滤波电容后, 此问题得到解决。验证了利用芯片的 IBIS 文件信息对数字器件电源端口进行建模的正确性。

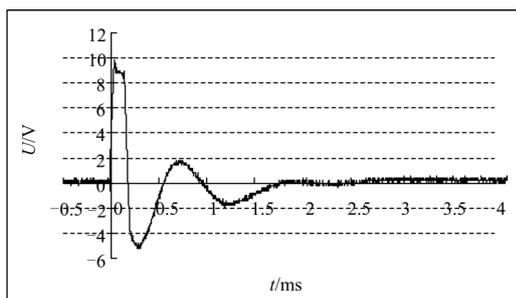


图 10 测试点 2 处电压变化量

Fig.10 The 2th testing point's change

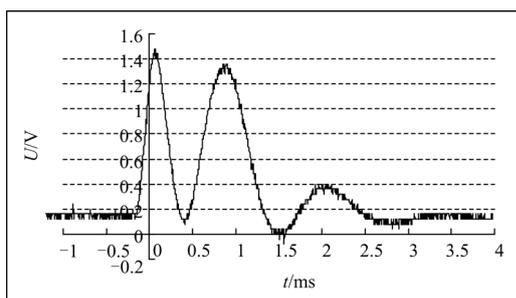


图 11 测试点 3 处电压变化量

Fig.11 The 3th testing point's change

4 结论

本文提出了一种二次设备电磁抗扰度建模的方法,并用一些典型端口电路验证了方法的正确性。文中建立了模拟信号调理电路、数字器件端口建模以及敏感电路宽频等效的方法,在设计初期为设备有效地提高电磁兼容抗扰度提供参考依据,避免设备生产后期更大的电磁兼容整改投入。

为验证该分析方法的正确性,针对某特高压变电站二次设备,对其增设抗干扰措施前后,分别在华北电力大学电磁兼容实验室进行了系列电磁兼容项目的性能测试,得出的结论与仿真分析所预测的结论相符,验证了所提出方法的有效性。

参考文献

- [1] 巩学海, 何金良. 变电所二次系统电磁兼容抗扰度指标分析[J]. 高电压技术, 2008, 34 (11): 2412-2416.
- [2] 万保权, 张广洲, 邬雄, 等. 500 kV 变电站电磁骚扰水平及输变电设备电磁环境影响研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [3] 周志敏, 纪爱华. 电磁兼容技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [4] IEC 60255-26 measuring relays and protection equipment-part 26: electromagnetic compatibility requirements for measuring relays and protection equipment [S].

- [5] GB/T 17626.4-1998 electromagnetic compatibility-testing and measurement techniques-electrical fast transient/burst immunity test[S].
- [6] GB/T 17626.2-1999 electromagnetic compatibility-testing and measurement techniques-surge immunity test [S].
- [7] GB/T 17626.2-1998 electromagnetic compatibility-testing and measurement techniques-electrical discharge immunity test[S].
- [8] 程利军, 等. 快速瞬变脉冲群对微机保护装置数据采集系统的影响和对策[J]. 电力自动化设备, 2004.
- [9] Chiste A, Funke J. Electronic systems protection via advanced surge protective devices[C]. // Telecommunications Energy Conference, INTELEC, 24th Annual International. 2002: 22-26.
- [10] GB/T 17626.5-1999 电磁兼容试验和测量技术: 浪涌(冲击)抗扰度试验[S].
- [11] IEC 61000-4-5 electromagnetic compatibility(EMC)-part 4-5: testing and measurement techniques-surge immunity test[S]. 1995.
- [12] Gustavsen B, Semlyen A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999,14 (3): 1052-1061.
- [13] DL/Z 713-2000 500kV 变电所保护和控制设备抗扰度要求[S].
- [14] Medora, Kusko. An enhanced computer simulation model of the IEEE Std C62.41.2-2002 surge generator for simulated surge testing of electrical systems[C]. // Product Compliance Engineering. 2007: 1-8.
- [15] Dev Paul. Low voltage power system surge overvoltage protection[C].//Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. 2000: 21-29.
- [16] Chiste A, Funke J. Electronic systems protection via advanced surge protective devices[C]. // Telecommunications Energy Conference. 2002: 22-26.
- [17] Ermeler K, Pfeiffer W, Schoen D, et al. Surge immunity of electronic equipment[C]. //International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1999: 90-93.

收稿日期: 2009-08-26

作者简介:

马海杰(1980-),女,讲师,主要研究电力二次设备电磁兼容; E-mail: hbmahaijie@163.com

罗广孝(1977-),男,讲师,主要研究高速电路电磁兼容;

徐刚(1975-),男,高级工程师,长期从事电力系统继电保护和自动化装置研究和设计工作。