

文章编号: 2095-4980(2016)06-0961-05

高压换流器辐射效应在线测试系统设计及应用

朱小锋¹, 肖 燕¹, 许献国¹, 李 超², 崔庆林²

(1.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2.中国电子科技集团公司 第二十四研究所, 重庆 400060)

摘 要: 针对高压换流器类器件的电特性参数, 设计了一种适合辐射效应在线测试的自动测试系统, 适用于剂量率、总剂量与中子注量辐照试验中的参数测试。本文简述了系统测试功能和软硬件组成, 并利用高压换流器 SWM012RH 完成了辐照试验测试验证。测试结果表明, 检测系统能够完成主要参数的测试, 高压测试精确度满足 1% 的要求, 为开展高压换流器相关类型器件的辐照试验验证和抗辐射性能评估能力奠定了基础。

关键词: 辐照; 在线测试; 测试系统; 高压换流器

中图分类号: TN307; TP23

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0961

On-line measurement system for HVDC in radiation and application

ZHU Xiaofeng¹, XIAO Yan¹, XU Xianguo¹, LI Chao², CUI Qinglin²

(1.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2.The 24th Institute, China Electronics Technology Group Corp, Chongqing 400060, China)

Abstract: The characteristics of High Voltage Direct Current(HVDC) power supply are studied, as well as the radiation sensitive parameters. The on-line irradiation examination method is designed. The irradiation examination system of HVDC is developed for parameter test on dose rate, total dose and neutron radiation. The validation test is performed by using HVDC SWM012RH in the examination system. The test results indicate that the examination system can be used to test most parameters, and the test precision meets the requirement of 1%. This work has laid a foundation for HVDC devices radiation examination validation and radiation hardening evaluation.

Keywords: radiation effect; on-line measurement; test system; High Voltage Direct Current

随着半导体器件及其测试技术的发展, 离线移位测试不能满足对器件辐射效应的快速、规律性测试需要, 试验效率低。除了移位测试外, 大量采用在线测试办法快速获取受辐照器件的辐射效应及其变化趋势^[1-4], 既可满足对器件辐射效应在短时间内进行快速检测需要, 减少效应退火影响, 也可避免测试人员辐射伤害, 与此同时需要同批测试的电子器件也越来越多, 对测试系统性能也提出了更高的要求。

目前国内的辐射效应测试系统主要是针对部分低压分立器件和集成电路^[5-8], 尚无针对高压换流器类型器件的在线测试系统, 本文针对高压换流器类器件的特点, 设计了辐照试验在线测试方法, 研制了高压换流器辐照试验在线测试系统, 为开展高压换流器相关类型器件的辐照试验验证和抗辐射性能评估奠定了基础, 并利用高压换流器 SWM012RH 完成了系统的测试验证。

1 系统组成及功能

高压换流器抗辐照性能在线测试系统组成框图见图 1。系统主要包含 3 个部分: 辐照电路板、辐照室内信号驱动转接模块、监控室内的信号测量监控模块。系统主要由台式标准仪器和定制信号处理模块构成, 其中标准仪器有 Rigol DM3068 数字表, 用于测量被测器件的稳态输入电流, Agilent 34411A 数字表用于测量所有电压相关信号, Chroma62012P10050 直流电源提供被测器件的偏置电压, TCP312A+TCPA300 电流探头测试器件的瞬态输入电流, Tektronix MSO4104 示波器测试所有波形参数。

辐照电路板用于安装辐照器件, 每套最多 12 只。

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2015-10-22

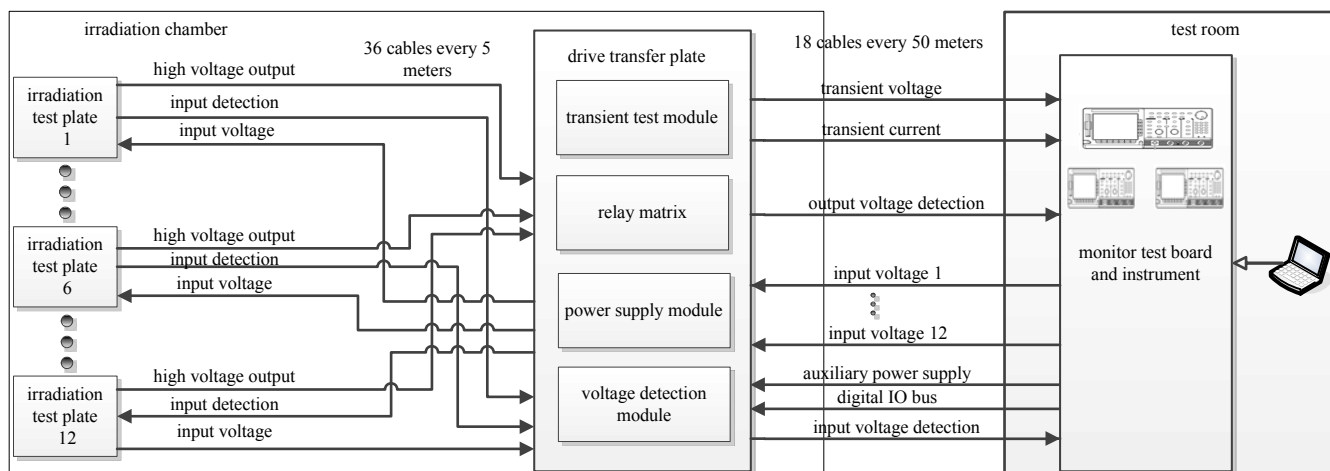


Fig.1 Chart of on-line measurement system for HVDC

图 1 高压换流器抗辐照性能在线测试系统组成框图

辐照电路板主要用于安装高压换流器电路样品,以 SWM012RH 为例,由于电路还包括一部分外围电路才能正常工作,因此辐照电路板还包括一部分电阻、电容等元件。器件的输入电源通过同轴电缆与监控室输入的电 源进行连接,并将电路的输入回测电压(用于补偿远距离输入电压损失)和高压输出信号分别通过 BNC 同轴电缆与高压专用连接器同辐照室内的信号转接部分进行连接。

驱动转接模块主要用于回测电压的控制和切换、高压输入信号切换、高压测试转低压测试、高压瞬态放电试验以及将被测信号转接至监控室。驱动转接模块盒主要由 4 块测试板构成:高压瞬态测试板、高压直流测试板、低压直流切换矩阵以及 RS485 转 IO 卡控制板。高压瞬态测试板包括高压电容、触发管、高压分压电阻等配套电路,用于进行瞬态放电试验,通过 BNC 接口将瞬态放电电流和电压转接至监控室外的示波器进行测量(已转为低压信号)。高压直流测试板主要包括高压负载电阻、高压分压电阻、负载电流取样电阻、高压继电器矩阵及配套继电器驱动电路,用于测试辐照器件的输出电压和带载控制,同时将高压转为低压后分为两路信号,一路通过 BNC 连接至监控室内示波器,用于测量上升时间,另一路通过低压直流切换矩阵之后再通过 BNC 转接至监控室内的信号测试板进行电压监测。通过信号转接盒,可以大量减少连接电缆数量,减少信号传输通道,便于信号通道进行长线校准,同时将高压危险信号转为低压安全信号后,再送到监控室进行测量。

信号测量监控模块主要包括程控电源、数字万用表、数字示波器等仪器以及主电源端口输出控制板、固定电源输出板、电压电流测量控制板、RS485 转 IO 卡控制板、USB 转 RS485 接口板和电压电流测量控制板等组成。该模块通过 BNC 接口与辐照室内的信号转接盒进行连接。信号测量盒用于所有瞬态信号的测量、电源输出控制以及辐照器件的稳态输入电流和瞬态输入电流监控测试,并记录直流参数和瞬态参数组件的测试值和测试曲线。

系统主要功能:满足高压换流器类器件在不同类型的辐照试验(剂量率辐照试验、总剂量辐照试验与中子辐照试验)中的参数测试需求(包括输出电压、电压调整率、电流调整率、稳态电源电流、输出电压充电时间、瞬态放电波形和瞬态输入电流),完成高压换流器辐照效应测试,且能够以 SWM012RH 型高压换流器抗辐照为基础,适应性能相似的同类产品的辐照试验测试需求。

2 系统软件设计

系统测试软件采用 C#编程,完成了上位机对测试监控仪器和自制 IO 卡的控制,实现了电路的加电控制、电压补偿、参数测试和数据采集等功能。系统测试软件主界面如图 2 所示。系统测试软件具备完善的输入有效性校验,对仪器进行识别和有效性判断。对于测量时对输入电压敏感的参数,监控软件还会自动进行输入电压补偿,确保电路输入端电压满足要求。采用多线程编程技术,分离了底层仪器控制、用户界面交互、数据存储等程序模块,可有效避免程序假死、测试测量不同步等问题。



Fig.2 Main interface of system testing software

图 2 系统测试软件主界面

3 在线测试解决的主要问题

3.1 长线远距传输信号测量与补偿

由于换流器主要参数均需要通过近 50 m 的长引线之后才进行检测,电参数精确度可能会受到较大干扰和影响,特别是交流参数,由于信号路径的分布参数,受到的影响可能更大,因此在使用系统前对检测的结果进行一定的修正与标定,并采取适当校准措施,以确保检测结果的准确性。通过对系统短线交流参数反复测试的结果分析,测试结果重复性很好,因此对于系统可以采用标定的方式进行校准。

3.2 远距离传输电源电压补偿

由于输入引线较长,导线引入的阻抗不能忽略,在输入电流动态变化过程中,电路端引脚的电压也会发生变化,因此需要在输出电压时采取适当措施,以降低输入端电压由于输入电流变化而导致的电压波动。

目前根据系统的测试结果进行分析,辐照器件的瞬态输入电流大于 1 A,稳态输入电流在 0.26 A 左右,而长线传输过程中的线电阻在 2 Ω 左右,同时加电会拉低电源电压,因此采用了错峰加电措施,在一只辐照器件进入稳态后(稳定时间在 1 s 内),再启动给下一只电路加电,直至所有电路加电完成,依次避免同时加电带来的浪涌电流。同时,还将每只辐照器件的输入路径单独控制,避免对其中某一路进行操作时,造成其他器件的输入电压波动。

3.3 高精度度高压检测实现

由于被测器件为高压输出型,输出电压在 3.7 kV~9 kV 左右,不能采用传统的直接测量方式进行测量,同时为保障现场操作人员的安全,必须采用衰减器对输出高压进行衰减后再进行检测。市面现有的高压探头,如 FLUKE 80K-40,Agilent 34136A,N3634A 等一系列高压探头测量精确度只有 2%,且需要 10 M Ω 输入阻抗匹配,而选用的高压分压电阻的分压精确度只有 $\pm 3\%$,且高压分压电阻与仪器的阻抗不匹配,因此在测量输出电压、充电时间等一系列高压相关参数过程中,需要对衰减器提前进行标定,并在主要操作的电压范围内进行查表或插值的处理方式,以便获取更高的测量精确度,同时在软件设计上,通过合理配置台式数字万用表的直流测量时的积分周期(Number of Power Line Cycles, NPLC),可以进一步改善在长线测试引入的附加噪声和强电磁环境干扰中直流参数的测量精确度。

3.4 瞬态放电大电流处理与测量的参考点处理

由于在测试瞬态放电参数时,瞬时的电流高达数 kA,为避免如此巨大的电流对低压部分测试系统带来破坏性的损坏,对测试参数精确度引起过大误差,因此设计此参数的测试系统时,应当避免将放电电流回路与测量系统等回路交叉,所以采用专用的放电通道,以避免发生此问题。此外,由于被测器件为共地型输出,且在电路的测量设备与被测设备通过了近 50 m 的长传输线进行信号传输,接地点可能不统一。因此,在瞬态放电测试时,将瞬态放电回路进行限制,瞬态放电的参考地在测试瞬态放电时与高压直流测试地不在辐照室相连接,相当于放电回路为一单独回路,只在辐照室端单点接地。实际对系统进行测试时,未发现在进行瞬态放电时,产生其他干扰。

4 系统应用测试结果

对测试系统进行标定和校准后,采用高压源 SL150 输出高压,通过与高压数字表 CS149-20 对比,测试结果见表 1。从表 1 可以看出校正后的系统高压测量精确度绝对差均在 4 V 以内,误差分布均为正差。从高压换流器实际测量使用的范围(3.5 kV~8.0 kV)分析,系统测量精确度在 0.2%以内,高于传统的高压棒 2%的测量精确度,满足测试系统高压测试精确度 1%的要求。

应用该测试系统,对 SWM012RH 样品进行了剂量率、电离总剂量、中子注量摸底测试,表 2 中列出了部分辐照试验测试的结果,从剂量率、总剂量和中子注量试验结果,可以看出,输出高压和充电时间随辐照剂量的增加均有不同程度的增大,以输出高压变化 100 V 为失效判定依据,可以得出 SWM012RH 的抗辐射阈值分别在 150 Gy(Si)、 1.5×10^{13} n/cm²左右,这与器件规范较为一致,剂量率引起的参数变化不大,存在毫秒级别的扰动。瞬时剂量率试验输出电压波形(充电时间波形)如图 3 所示,测试输出电压瞬态扰动波形如图 4 所示,其中 1#为输出高压,2#为触发信号,4#为电源电流。

表 1 高压测试数据
Table1 High voltage test data

SL150 Set voltage/kV	high voltage meterCS149-20 reading voltage/V	system measuring voltage/V	absolute error of measurement/V
0	0	0.05	0.05
0.102	102	104.90	2.90
0.501	502	505.10	3.10
0.997	1 000	1 003.00	3.00
1.994	2 000	2 003.50	3.50
2.991	3 000	3 002.80	2.80
3.487	3 497	3 500.40	3.40
3.595	3 606	3 608.50	2.50
3.690	3 700	3 703.30	3.30
3.730	3 750	3 752.30	2.30
3.781	3 799	3 800.80	1.80
3.880	3 889	3 891.60	2.60
3.990	3 994	3 997.20	3.20
4.990	5 005	5 007.40	2.40
5.979	5 995	5 998.40	3.40
6.987	7 004	7 007.20	3.20
7.481	7 500	7 503.00	3.00
7.987	8 008	8 009.30	1.30

表 2 SWM012RH 辐照效应试验测试结果
Table2 Test results of irradiation effect for SWM012RH

test parameters	charging time/s	output voltage/V	steady state current/A	voltage adjustment rate/(%)	current adjustment rate/%	irradiation test
before irradiation	0.628	3 708.616	0.350	0.025	0.041	dose rate test
	0.619	3 707.032	0.337	0.025	0.043	
	0.626	3 708.934	0.338	0.026	0.044	
	0.620	3 711.604	0.357	0.018	0.075	
after the first shot 4×10 ⁹ Gy(Si)/s	0.630	3 713.934	0.357	0.022	0.067	
	0.635	3 715.310	0.358	0.026	0.077	
	0.682	3 716.724	0.341	0.038	0.085	
	0.685	3 718.009	0.358	0.015	0.101	
after the second shot 8.8×10 ⁸ Gy(Si)/s	0.678	3 718.080	0.358	0.034	0.084	
	0.671	3 719.205	0.341	0.030	0.102	
	0.666	3 720.888	0.358	0.018	0.112	
	0.660	3 720.852	0.342	0.030	0.102	
before irradiation 50 Gy(Si) 100 Gy(Si) 150 Gy(Si) 200 Gy(Si) 250 Gy(Si)	0.593	3 753.79	0.215	0.146	0.056	total dose test
	0.623	3 766.667	0.218	0.138	0.027	
	0.679	3 790.323	0.211	0.132	0.081	
	0.729	3 845.95	0.209	0.119	0.149	
	0.768	3 855.438	0.21	0.105	0.238	
	0.803	3 863.152	0.211	0.095	0.36	
before irradiation 0.25×10 ¹³ n/cm ⁻² 0.5×10 ¹³ n/cm ⁻² 0.75×10 ¹³ n/cm ⁻² 1×10 ¹³ n/cm ⁻² 1.25×10 ¹³ n/cm ⁻² 1.5×10 ¹³ n/cm ⁻² 2.0×10 ¹³ n/cm ⁻²	0.622	3 747.062	0.224	0.088	0.102	neutron radiation test
	0.629	3 743.097	0.223	0.109	0.032	
	0.653	3 756.207	0.226	0.088	0.048	
	0.726	3 782.516	0.217	0.077	0.142	
	0.787	3 814.028	0.215	0.059	0.266	
	0.823	3 838.605	0.215	0.049	0.417	
	0.857	3 852.019	0.215	0.051	0.431	
	0.927	3 893.065	0.216	0.043	0.511	

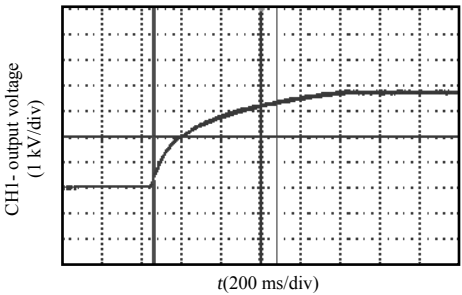


Fig.3 Test waveform of charge time
图 3 充电时间测试波形

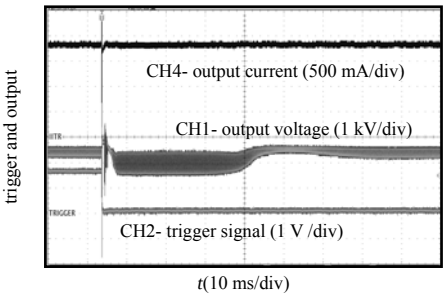


Fig.4 Experimental waveform of 8.8×10⁸ Gy (Si)/s
图 4 剂量率为 8.8×10⁸ Gy(Si)/s 时的试验波形

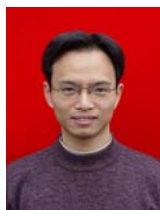
5 结论

高压换流器辐射效应在线测试系统按照技术指标要求,能够完成主要辐射敏感参数的测试,测试精确度满足要求,并具备一次性测试 12 只器件的能力,测试效率高,测试结果一致性、重复性较好,避免了手动测试时间过长而导致的器件输出漂移对其辐照性能评估的影响。该系统已应用到高压换流器 SWM012RH 的辐射效应参数测试中,通过样品夹具和相应软件修改,即可完成同类高压换流器测试,具有很好的通用性。为开展高压换流器相关类型器件的辐照效应试验和抗辐射性能评估提供了保障。

参考文献:

- [1] 张民,徐迅,赵胜凯. 电路在线测试技术及应用[J]. 计算机自动测量与控制, 1999,7(4):41-43. (ZHANG Min,XU Xun,ZHAO Shengkai. In-circuit test technique and application[J]. Computer Automated Measurement & Control, 1999,7(4):41-43.)
- [2] 王雪,张冠军,严璋. 国内高压绝缘子在线检测方法综述[J]. 电瓷避雷器, 2002,190(6):3-6. (WANG Xue,ZHANG Guanjun,YAN Zhang. Overview of on-line detection method for high voltage insulator in China[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002,190(6):3-6.)
- [3] 丛忠超,余学锋,崔江维,等. 静态随机存储器总剂量辐射损伤的在线与离线测试方法[J]. 物理学报, 2014,63(8):086101(1-7). (CONG Zhongchao,YU Xuefeng,CUI Jiangwei,et al. Online and offline test method of total dose radiation damage on static random access memory[J]. Acta Physica Sinica, 2014,63(8):086101(1-7).)
- [4] 陆时跃. MOS 器件及电路的总剂量辐射效应测试技术解析[J]. 硅谷, 2013(12):49-50. (LU Shiyao. Analysis of total dose radiation effect testing technology for MOS devices and circuits[J]. Silicon Valley, 2013(12):49-50.)
- [5] 余学锋,郭旗,任迪远,等. 电子元器件总剂量辐照在线测试系统及其应用[J]. 核电子学与探测技术, 1998,18(5):356-360. (YU Xuefeng,GUO Qi,REN Diyuan,et al. An on-line measurement system for electrical devices in total dose radiation and its application[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1998,18(5):356-360.)
- [6] 关颖,林东生,郭红霞,等. CMOS 器件总剂量效应长线传输在线测试系统[J]. 微电子学, 2001,31(5):367-369. (GUAN Yin,LIN Dongshen,GUO Hongxia,et al. Online testing system for total dose effect of COMS device[J]. Microelectronics, 2001,31(5):367-369.)
- [7] 姚志斌,张凤祁,何宝平,等. SDRAM 辐照效应测试系统的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2009,29(1):31-36. (YAO Zhibin,ZHANG Fengqi,HE Baoping,et al. Development of SDRAM irradiation effect test system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009,29(1):31-36.)
- [8] 齐超,林东生,陈伟,等. 基于辐射回避的 SRAM 型 FPGA 瞬时电离辐射效应测试系统研制[J]. 原子能科学技术, 2012,46(S1):598-601. (QI Chao,LIN Dongshen,CHEN Wei,et al. Development of test system for transient ionizing radiation effects on SRAM-based FPGA based on radiation evade mechanism[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(S1):598-601.)

作者简介:



朱小锋(1976-),男,四川省大英县人,硕士,副研究员,主要研究方向为抗辐射加固.email:229700535@qq.com.

肖燕(1974-),女,四川省绵阳市人,学士,技师,主要研究方向为元器件测试。

许献国(1971-),男,河北省沧州市人,博士,副研究员,主要研究方向为抗辐射加固。

李超(1988-),男,重庆市人,学士,助理工程师,主要研究方向为高压大功率 DC/DC 变换器等电源测试。

崔庆林(1975-),男,山西省临汾市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为高速高精度 AD/DA、大功率驱动器件测试。