

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200697

一起继电保护装置单粒子翻转软错误分析及应对措施

周浩, 石磊, 彭涛, 李松泽

(长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 微机继电保护装置中大量使用各种芯片及存储器件, 器件失效将影响电力系统的稳定运行。结合一起由于单粒子翻转引起的保护装置动作行为, 分析了保护装置的动作原因, 提出了在微机继电保护装置中存在的单粒子翻转的问题。对单粒子翻转的机制、特点及影响进行分析, 并从芯片选型、硬件架构、软件架构等方面提出一整套完善的方案。在继电保护装置设计中应用所提出的方案可有效减少单粒子翻转对继电保护装置的影响, 对于继电保护装置和电力系统的稳定安全运行具有重要的意义。

关键词: 电力系统; 继电保护; 单粒子翻转; 软错误; 硬件架构; 软件架构

Analysis and countermeasures of single event upset soft errors in a relay protection device

ZHOU Hao, SHI Lei, PENG Tao, LI Songze

(CYG SUNRI CO., LTD., Shenzhen 518057, China)

Abstract: Various chips and storage devices are widely used in microcomputer relay protection devices. A failure of the device will affect the stable operation of the power system. The cause of the protection device action, combined with a malfunction of the protection device caused by a single event upset is analyzed, and the problem of single event upset is determined. The mechanism, characteristics and effects of the single event upset are analyzed, and a complete method to tackle this based on chip selection, hardware architecture, software architecture, etc. is proposed. The solution proposed in the paper is applied to the design of a relay protection device. It can effectively reduce the impact of a single event upset on a relay protection device. This is of significance for the stable and safe operation of relay protection devices and power systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904900 and No. 2018YFB0904903).

Key words: power system; relay protection; single event upset; soft errors; hardware architecture; software architecture

0 引言

微机继电保护装置是电力系统设备的重要组成部分。当电力系统中发生故障或异常危及电力系统的正常稳定运行时, 继电保护装置能够及时发出告警信息并快速切除故障元件, 继电保护装置本身的可靠性直接影响电力系统的稳定可靠性^[1-5]。随着微机继电保护装置的快速发展, 装置中大量使用各种芯片及存储器件, RAM、SRAM 等存储介质大量应用, 元器件的集成度越来越高。电子器件自身失效将影响继电保护装置的正常功能, 严重情况下可引

起继电保护装置的拒动或误动。

单粒子翻转^[6](Single Event Upset, SEU)失效现象由空间高能粒子影响半导体器件导致。在航天领域, 由于航天器需长期暴露在太空恶劣环境中, 容易受到高能粒子的干扰, 单粒子翻转在航天航空领域比较常见。微机继电保护装置应用初期, 由于半导体工艺限制等因素, 单粒子翻转发生的概率极低, 对继电保护的影响尚不明显。随着半导体工艺的提升, 单粒子翻转的影响不容忽视, 需引起继电保护从业人员的重视。

本文结合一起继电保护装置的动作行为, 明确定位了继电保护领域存在的内存单粒子翻转的现象, 分析了该现象产生的机制, 并提出了减小单粒子翻转发生后对继电保护装置影响的应对措施。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904900, 2018YFB0904903)

1 案例简述

某 220 kV 变电站主接线如图 1 所示。正常运行中, 110 kV 某线路发生 B 相单相接地故障, 线路保护装置动作, 同时#2 主变 B 套保护装置高压侧过流保护 I 段动作。

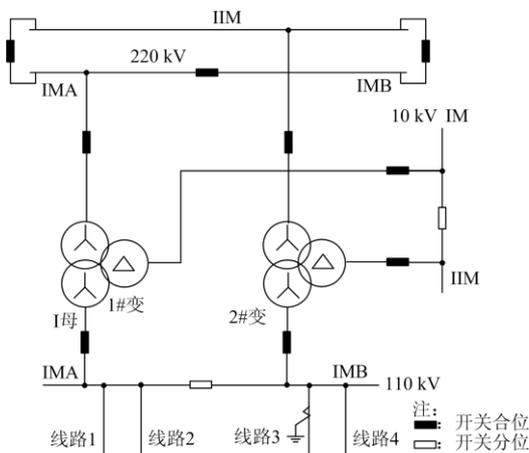


图 1 主接线图

Fig. 1 Main wiring diagram

变压器保护装置定值如表 1 所示。

表 1 保护定值信息

Table 1 Protection setting information

参数名称	参数值
低电压闭锁定值	70 V
负序电压闭锁定值	3.5 V
复压过流 I 段定值	1 A
复压过流 I 段时间	4 s

变压器保护装置动作行为如表 2 所示。

表 2 保护动作事件信息

Table 2 Protection action event information

参数名称	参数值
保护事件	高压侧过流保护 I 段
动作时间	10 ms
故障相别	$I_B = 2.2 A$

变压器保护装置动作录波中高压侧电流波形如图 2 所示。

2 案例分析

案例中保护装置的高压侧过流保护动作行为及动作时间异常。在变压器区外故障期间, 相电流大于整定门槛值, 但保护动作时间与整定延时不符, 因此对高压侧过流保护时间相关内存信息进行详细分析。通过分析高压侧过流保护时间相关内存数据,

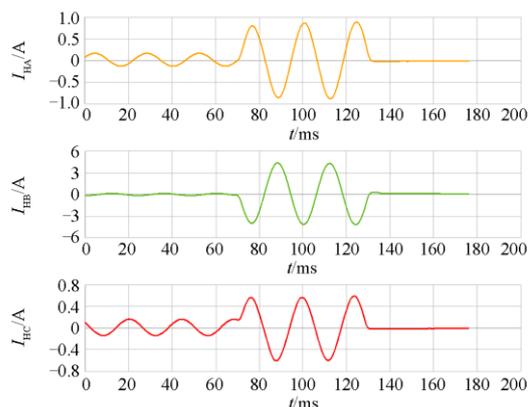


图 2 动作录波波形

Fig. 2 Action waveform

发现高压侧过流时间计数器的地址指针数值异常, 为 0x000024C, 而正常情况下该地址应为 0x0080024C。

该内存用于高压侧过流保护计数器的寻址。装置正常的情况下, 高压侧过流保护逻辑在启动后读取该内存中的数值 0x0080024C, 然后从以 0x0080024C 为首地址的内存中依次读取 A、B、C 三相动作计数, 将动作计数器与整定延时相比较, 当动作计数器小于整定定值时, 计数器累加。当计数器大于或等于整定定值时, 满足动作条件, 可驱动装置出口跳闸。

此次线路故障中, 高压侧相电流大于整定的相过流门槛值, 进入后备保护逻辑判断, 从内存中读取动作时间计数器。由于内存错误, 错误地读取了 0x0000024C 地址中的数据作为动作计数器, 0x0000024C 区域为 CPU 芯片存放引导程序的只读区域, 从该地址中读取数值作为动作计数器与整定延时进行比较, 大于整定延时, 满足动作条件, 高压侧过流保护出口跳闸。

分析对比图 3 异常内存数据和图 4 正常内存数据, 仅单点内存异常, 即内存的 DB23 位出现单比特翻转, 其周围的其他内存数据均正常。

```
0x803010: 008001fd, 00800215, 00800200, 00800203, 00800206, 00800209, 0080020c, 0080020f
0x803018: 00800212, 00800218, 0080021b, 0080021e, 00800221, 00800224, 00800227, 0080022a
0x803020: 00800230, 00800237, 0080023e, 00800245, 00800299, 008002a0, 008002a7, 008002ae
0x803028: 0080027d, 00800284, 0080028b, 00800292, 0080024c, 00800253, 0080025a, 00800261
0x803030: 00800268, 008002ef, 00800276, 008002b5, 008002bc, 008002c3, 008002ca, 008002d1
0x803038: 008002d8, 0080035d, 008002df, 008002e6, 008002f4, 008002fb, 00800302, 00800309
0x803040: 00800310, 00800317, 0080032c, 00800333, 0080033a, 00800341, 0080031e, 00800348
```

图 3 异常内存数据

Fig. 3 Abnormal memory data

```
0x803010: 008001fd, 00800215, 00800200, 00800203, 00800206, 00800209, 0080020c, 0080020f
0x803018: 00800212, 00800218, 0080021b, 0080021e, 00800221, 00800224, 00800227, 0080022a
0x803020: 00800230, 00800237, 0080023e, 00800245, 00800299, 008002a0, 008002a7, 008002ae
0x803028: 0080027d, 00800284, 0080028b, 00800292, 0080024c, 00800253, 0080025a, 00800261
0x803030: 00800268, 008002ef, 00800276, 008002b5, 008002bc, 008002c3, 008002ca, 008002d1
0x803038: 008002d8, 0080035d, 008002df, 008002e6, 008002f4, 008002fb, 00800302, 00800309
0x803040: 00800310, 00800317, 0080032c, 00800333, 0080033a, 00800341, 0080031e, 00800348
```

图 4 正常内存数据

Fig. 4 Normal memory data

由此可知，引起变压器保护动作的根本原因是 CPU 内存的单粒子翻转问题。

3 单粒子翻转机制简述

单粒子翻转错误存在于半导体行业中^[7-14]，在地表环境中出现概率较低，主要由宇宙射线或材料中放射性粒子等辐射粒子引起，通常不会损坏电路本身，但会损坏所存储的数据或所涉及电路的状态(将“1”数据状态翻转为“0”数据状态，或相反)。

辐射粒子会引起电荷的转移，当电荷转移足够大时，将引起相关单元逻辑状态改变。以 SRAM 单元为例，如图 5 所示，当辐射粒子轰击左侧的 NMOS 管并致其导通时，会导致 A 点因接地而从 1 变 0，进而会导致 B 点从 0 变 1。

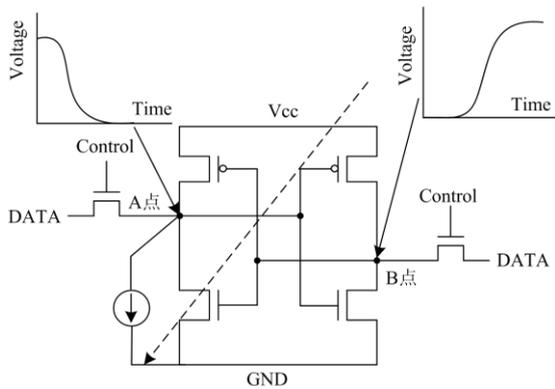


图 5 电子系统软错误机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the electronic system soft error mechanism

单粒子翻转软错误与硬错误存在差异：

1) 软错误是一个比较罕见的且随机的、不可复现的错误。发生软错误的设备本身并未损坏，重新写入数据或者系统重启均可恢复并且不可复现，很难监测。软错误是由外部原因造成的，不是元器件本身的缺陷，很难定位导致软错误的根本原因。

2) 硬错误是比较常见且可重复出现的错误，其常引起数据丢失、硬件损坏，且一般情况下不能恢复正常。硬错误根本原因是硬件设备物理上的损坏。硬错误一般是器件本身缺陷所致，可查明原因后从根本上解决。

随着半导体工艺向纳米技术进化，器件尺寸快速缩小，内存单元中的电容也越来越小，引起错误所需要的电荷也会随之降低，使内存单元很容易发生单粒子翻转。在电力系统应用中，单粒子翻转不但可以破坏数据，而且还可能使整个保护装置发生故障，从而给电网安全带来拒动和误动的风险。

4 继电保护设备应对单粒子翻转方案

单粒子翻转的根本原因是空间高能粒子引起的硬件器件的电荷翻转，无法从源头上减少或者消除高能粒子，只能从继电保护系统本身出发，优化系统设计，当有单粒子翻转情况时减弱甚至消除其产生的不利影响。以下从器件选型、装置架构、软件架构等方面提出可行的设计方案。

4.1 存储器选型方案

高能粒子直接作用于硬件系统引起单粒子翻转，因此需加强硬件自身的抗干扰能力^[15-16]。

在硬件存储器层级抑制电子系统软错误的措施主要有奇偶校验(Parity)、纠错码校验(Error Checking and Correcting, ECC)等校验方法。ECC 具有比 Parity 更强大的自动识别和更正的能力，很多芯片厂商将 ECC 校验技术应用于存储器件的设计上。

存储器使用的纠错码 ECC 是在逻辑电路中采用加固的锁存器/触发器以及并行的错误检测与重试技术。在内存中 ECC 能够容许错误，并将错误更正。器件的原理框架如图 6 所示。

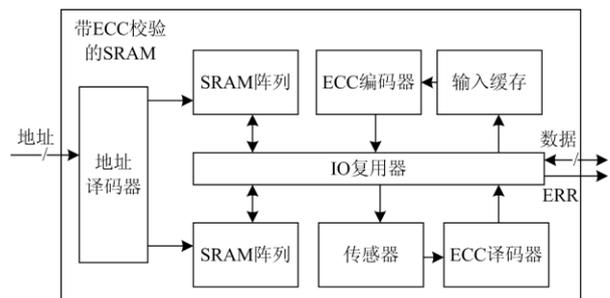


图 6 ECC 校验的内存工作原理

Fig. 6 Working principle of ECC check memory

当向 SRAM 写入数据时，对应的 ECC 代码也同时保存。当读取数据时，将 ECC 代码和读取的数据进行对比，当不一致时，将对出现异常的数据进行解码确认，然后丢弃错误的数据，释放正确的数据，从而保证在单粒子翻转措施发生时 CPU 采集到的数据是正常的。

在继电保护硬件系统设计时应优先选择具备 ECC 校验机制的元器件并设置使用该功能。

4.2 装置架构方案

从可靠性角度出发，微机继电保护装置系统设计时应采用冗余的架构设计方案^[17-21]，推荐采用双 CPU 的设计方案，可选模式如图 7、图 8 所示。

1) 双 CPU(保护+保护)模式：如图 7 所示，双 CPU 中含有完全相同的全套保护逻辑。在故障中，只有两个 CPU 都满足完整的动作出口逻辑后保护

才能动作出口。

2) 双 CPU(保护+启动)模式: 如图 8 所示, 此模式中双 CPU 中均含有完整的保护启动逻辑, 但两个 CPU 中的动作逻辑不同, 某保护动作逻辑仅存在于一块 CPU 中。双 CPU 均满足独立的启动元件且单 CPU 满足动作逻辑时才能动作出口。

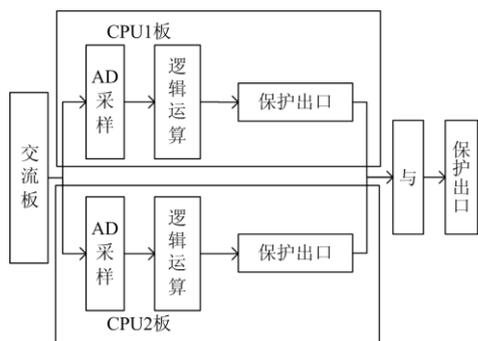


图 7 双 CPU(保护+保护)模式

Fig. 7 Dual CPU (protection + protection) mode

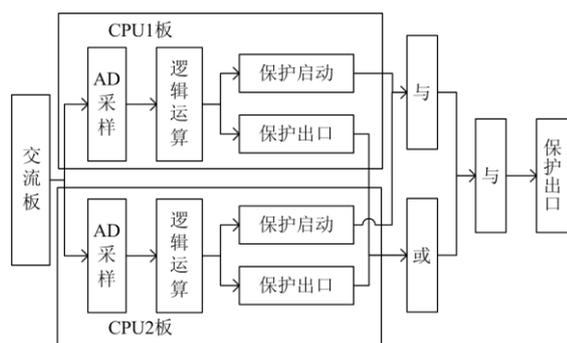


图 8 双 CPU(保护+启动)模式

Fig. 8 Dual CPU (protection + startup) mode

两种 CPU 架构均具备抗单粒子翻转软错误的的能力, 可防止在正常运行中由于单 CPU 板异常导致的保护误动作。由于“保护+启动”模式的保护逻辑只在一块 CPU 中, 抗软错误能力稍弱于双保护模式, 可增加内存自检措施进行完善。

4.3 内存自检方案

软件抗单粒子翻转软错误的措施是对软件中的代码段、常量段等设计完善的自检机制, 当有异常时, 可快速检测出异常, 闭锁保护并告警。

有厂家提出了一种内存软错误监视和自纠错措施^[22], 其思路是针对代码数据, 比较硬件存储器与 RAM 内存中实时运行的代码。对于常量采用冗余的方案, 将常量数据备份两份, 采用“三取二”的思想。该方案需要实时读取外设信息, 占用资源较多。三取二的方案也需要大量的内存空间, 当设备资源紧张的情况下, 方案实施存在难度。

针对当前行业内应用较多的 DSP 和 SOC 两类

CPU 芯片, 分析各自典型应用中的内存分布情况。

图 9 为 TI 公司 TMS320VC33 型 DSP^[23]的典型内存及功能区域划分示意图。

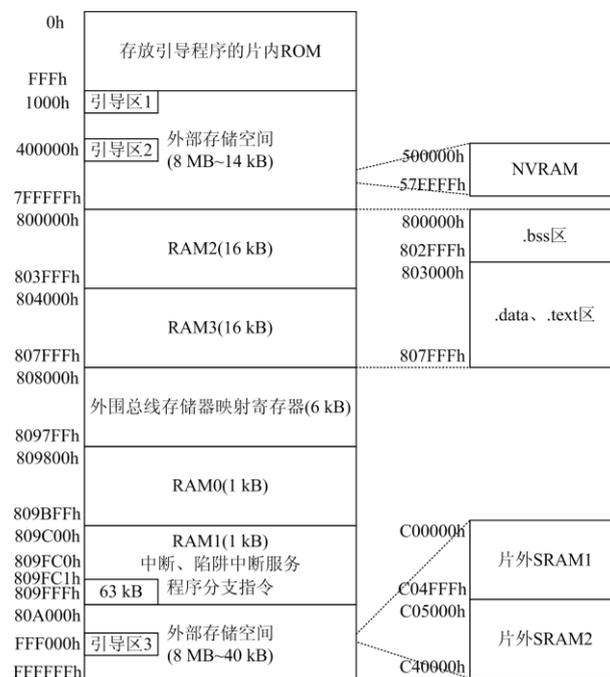


图 9 DSP 内存分布示意图

Fig. 9 Schematic diagram of DSP memory distribution

其中 803000h~807FFFh 的空间为片内常量区空间, 用于保存 .data、.text 等常量数据; C00000h~C04FFFh 的空间为片外 SRAM 空间, 主要用于存储程序代码等常量数据。

图 10 为 xilinx 公司 Zynq-7000 型 SOC^[24-25]的典型内存及功能区域划分示意图。

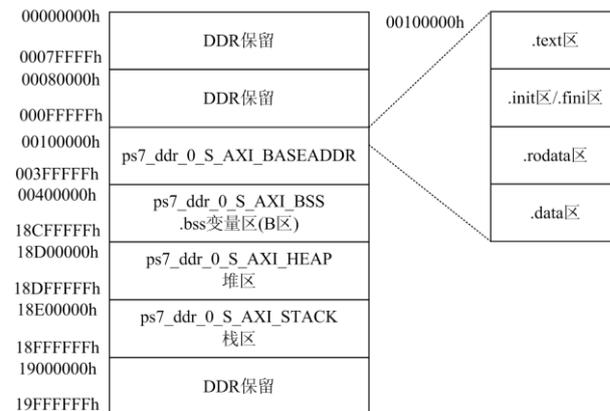


图 10 SOC 内存分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of SOC memory distribution

其中 00100000h~003FFFFFFh 的空间含有代码段(.text)、中断向量及库函数段(.init/.finit)、只读数据段(.rodata)、数据段(.data)等常量数据。

分析 DSP 和 SOC 典型的内存分布，二者内存功能分布基本一致，可以采用统一的方案对常量区进行自检。由于代码段和常量段上电初始化后内存信息将一直保持不变，根据此特征设计自检方案：

1) 装置上电初始化完成后，计算内存中代码段、常量段数据的 CRC 并保存。

2) 保护正常运行中，在保护中断(主循环)任务内，计算同一片内存常量数据的 CRC，与上电时计算的 CRC 进行比较。

3) 当比较结果不一致时，表示常量区数据存在变化，可瞬时闭锁保护，延时告警。

常量区 CRC 校验方案的流程如图 11 所示。

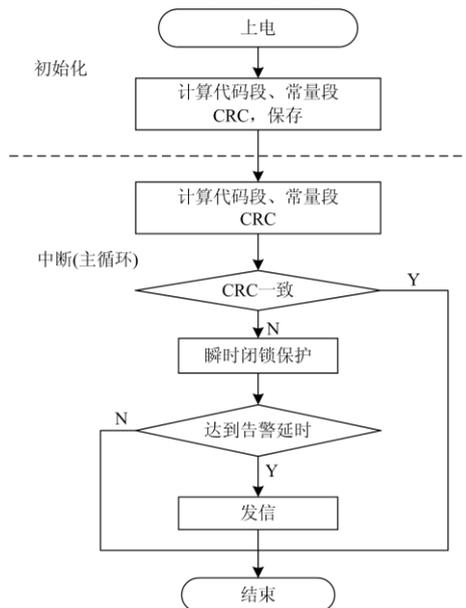


图 11 常量区域自检流程图

Fig. 11 Flow chart of self-checking in constant area

4.4 其他辅助方案

对于继电保护装置，除对常量区域进行自检外，对于变量区域中的部分数据也可进行自检校验，方案简述如下。

1) 定值芯片自检：将定值写入定值存储芯片时，同时写入正码和反码信息。每次读取定值时同时读取正码和反码信息，将两者进行校验，正确后再用于保护逻辑。

2) 定值 CRC 自检：装置上电或修改定值后，从定值存储器件读取定值转存到变量区，此时计算变量区内定值的 CRC 并备份。正常运行中，计算变量区中定值 CRC，与备份 CRC 进行比较，当检测到不一致时认为存在异常。

3) 范围自检：变量区的大部分数据在运行中都会变化，如交流采样数据、计数器、中间状态标志

等，可采用范围校验，针对特定的变量设置上下限范围，当变量大小超过上下限范围时认为存在异常。

4) 定点扫描自检：在变量区中插入多个不连续的常量数据扫描点。装置上电初始化时，将插入的扫描点初始化为固定值。正常运行中，实时监控该地址内数据是否改变。当发生变化后认为存在异常。

5 结论

结合一起由单粒子翻转引起的继电保护装置异常动作行为，从元器件选型、硬件架构、软件架构等方面提出了多种可行的方案。考虑到继电保护装置的重要性，推荐采用带内存校验机制的芯片，硬件采用双保护架构，软件增加完善的常量区和变量区内存校验机制的综合设计方案。在新装置设计或旧装置改造中采用文章中的设计方案，可以有效减少单粒子翻转对继电保护装置的影响。

文章给出的整套方案在解决单粒子翻转软错误引起的异常动作行为的同时也可有效防止大部分其他由于硬件异常或者软件异常导致的保护装置不正确动作行为，提高了继电保护装置的可靠性。

参考文献

[1] 国家电力公司. 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[2] 张烈, 吕鹏飞, 张瀚方, 等. 2018 年国家电网公司 220 kV 及以上交流保护装备及运行情况[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 217-222. ZHANG Lie, LÜ Pengfei, ZHANG Hanfang, et al. Analysis on protective relaying and its operation conditions of SGCC AC systems of 220 kV and above in 2018[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 217-222.

[3] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66. WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.

[4] 张旭泽, 郑永康, 康小宁, 等. 智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 90-96. ZHANG Xuze, ZHENG Yongkang, KANG Xiaoning, et al. Several problems of intelligent substation relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 90-96.

[5] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于 Markov 模型与 GO 法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 47-55. YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real time reliability analysis of relay protection system in intelligent substation based on Markov model and GO method[J].

- Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 47-55.
- [6] 冯彦君, 华更新, 刘淑芬. 航天电子抗辐射研究综述[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1071-1080.
FENG Yanjun, HUA Gengxin, LIU Shufen. Radiation hardness for space electronics[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1071-1080.
- [7] ZIEGLER J F, LANFORD W A. Effect of cosmic rays on computer memories[J]. Science, 1979, 206: 776-788.
- [8] MAY T C, WOODS M H. A new physical mechanism for soft errors in dynamic memories[C] // 16th International Reliability Physics Symposium, April 18-20, 1978, San Diego, CA, USA: 33-40.
- [9] ZIEGLER J F. IBM experiments in soft fails in computer electronics (1978-1994)[J]. IBM Journal of Resources and Development, 1996, 40(1): 3-18.
- [10] NICOLAIDIS M. Scaling deeper to submicron: on-line testing to the reuse[C] // Proceedings of the 28th Symposium on Fault-Tolerant Computing (FTCS-28), June 1998, Munich, Germany: 299-301.
- [11] NICOLAIDIS M. Design for soft-error robustness to rescue deep submicron scaling[C] // Proceedings of the IEEE International Test Conference, October 18-23, 1998, Washington, DC, USA.
- [12] MICHALAK S E, HARRIS K W, HENGARTNER N W, et al. Predicting the number of fatal soft errors in Los Alamos National Laboratory's ASC Q supercomputer[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2005, 5(3): 329-335.
- [13] HAZUCHA P, SVENSSON C. Impact of CMOS technology scaling on the atmospheric neutron soft error rate[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2586-2594.
- [14] 胡刚毅. 微电子器件的抗辐射加固和高可靠技术[J]. 微电子学, 2003, 33(3): 224-231.
HU Gangyi. Radiation hardening and reliability technologies for microelectronic devices[J]. Microelectronics, 2003, 33(3): 224-231.
- [15] 曾东华. 一种嵌入式系统软错误率评估方法[J]. 信息技术与信息化, 2020(2): 118-120.
ZENG Donghua. An evaluation method of soft error rate in embedded system[J]. Information Technology and Informatization, 2020(2): 118-120.
- [16] 朱健伟. 数字集成电路的软错误防护[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
ZHU Jianwei. Soft error protection of digital integrated circuits[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [17] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156.
XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new network redundancy device for smart substation and its implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 151-156.
- [18] 陈建玉, 俞拙非, 孟宪民, 等. MGT100 系列微机型发电机变压器保护装置的设计[J]. 继电器, 2000, 28(7): 55-58.
CHEN Jianyu, YU Zhuofei, MENG Xianmin, et al. The design of MGT100 microprocessor based relay for generator and transformer[J]. Relay, 2000, 28(7): 55-58.
- [19] 江卫良, 郝后堂. 大型发电机-变压器组微机保护装置新平台技术[J]. 广东电力, 2011, 24(8): 54-58.
JIANG Weiliang, HAO Houtang. New platform technology of digital protection device for large generator transformer set[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(8): 54-58.
- [20] 杨钰, 苏毅, 聂娟红, 等. 提高微机型变压器保护可靠性的探讨[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 180-182.
YANG Yu, SU Yi, NIE Juanhong, et al. Measures improving protection reliability of microprocessor-based transformer protection[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(3): 180-182.
- [21] 马凯, 汪溢, 黄曙, 等. 基于常规采样的合并单元可靠性分析[J]. 广东电力, 2017, 30(11): 67-71.
MA Kai, WANG Yi, HUANG Shu, et al. Analysis on reliability of merging unit based on conventional sampling[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11): 67-71.
- [22] 赵天恩, 周强, 孙浩, 等. 基于 BF548 的内存软错误监视和自纠错设计[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(10): 77-79.
ZHAO Tian'en, ZHOU Qiang, SUN Hao, et al. Design of memory soft error monitoring and self-correction based on BF548[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(10): 77-79.
- [23] 党瑞荣, 高国旺, 谢雁, 等. TMS320C3X 系列 DSP 原理与开发技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [24] 于同伟, 丁岳, 李良, 等. 用于就地化保护关键技术的 SOC 设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 150-155.
YU Tongwei, DING Yue, LI Liang, et al. SoC design for key technologies of outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 150-155.
- [25] Zynq-7000 all programmable SoC technical reference manual (v1.12.2)[M]. USA: Xilinx Inc., 2018.

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-09-01

作者简介:

周浩(1984—), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhouhao@sznari.com

石磊(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

彭涛(1986—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护可靠性分析。

(编辑 魏小丽)