

变电站微机保护装置的电磁兼容研究

周冰航, 周有庆, 刘敏

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 电磁兼容一直以来都是微机保护装置开发研究的重点。文中分析了干扰的主要来源及其对微机保护装置的影响。共模干扰和差模干扰是各种电磁干扰在微机保护装置中的主要表现形式, 可以通过减弱干扰源的辐射, 阻塞干扰的耦合通道, 增强敏感回路的抗干扰能力和合理设计泄放通道进行抑制。提出的措施包括对电源进行滤波, 合理布局元器件和合理设计电路接地, 对开关量输入输出、通信接口良好隔离等。这些措施应用于一套微机保护装置中并使其顺利通过IV级电磁兼容试验。

关键词: 微机保护; 电磁兼容; 抗干扰

Research on the EMC of microprocessor-based protection for substation

ZHOU Bing-hang, ZHOU You-qing, LIU Min

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Research on the technology of electro-magnetic compatibility (EMC) is a focus on microprocessor-based protection development. This paper analyzes the main interference sources and their influences on the operation of protection equipments. The common-mode interference and differential-mode interference are the main forms of electro-magnetic interference in microprocessor-based protection, and they could be suppressed by reducing radiation of the interference sources, blocking the coupling channel of common-mode interference, promoting the anti-interference ability of the sensitive circuit, and designing the bleeder circuit rationally. The concrete measures include filtering the power source, distributing components and grounding the circuit rationally, isolating imports and exports of switch value, isolating internal communication ports from external and so on. By adopting these measures, the protection device has passed the IV level EMC test successfully.

Key words: microprocessor-based protection; electro-magnetic compatibility (EMC); anti-interference

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)10-0001-04

0 引言

随着电力工业的不断发展和微机保护技术的逐步成熟, 微机保护装置在电力系统中获得了越来越广泛的应用。而随着电压等级的逐步提高, 电网的安全稳定运行对微机保护装置提出的要求也越来越高。目前, 变电站综合自动化已经完成由“面向功能设计”向“面向间隔设计”的重大转变, 由此带来的“保护下放”模式的应用, 使得位于开关场内的微机保护装置受到的电磁干扰更为强烈。与此同时, 微机保护装置正向微机化、智能化、网络化方向发展, 由此趋势带来的保护、监控、测量和通信一体化的设计方案使得微机保护装置的电磁敏感性大大增强。这些因素都使得微机保护装置的电磁兼容问题变得越来越突出。

电磁兼容一直以来都是微机保护装置开发研究

中的重点和难点。以往大多数研究都是采用测试修改法, 主要是结合测试针对单一问题而进行的, 较少从整体和系统角度进行全面的分析和研究。本文采用系统设计法进行研究, 结合微机保护装置电磁兼容试验, 提出了一套完整的解决方案, 并将其成功应用在一套微机保护装置中。

1 微机保护装置电磁干扰源及其影响

微机保护装置是以微处理器为核心的自动控制系统, 所处的电磁工作环境恶劣。其干扰源十分复杂, 有装置内部的, 也有装置外部的, 主要可以归纳为以下三个方面^[1~4]:

(1) 供电系统干扰。其中电源干扰是微机保护装置最主要的干扰源。

(2) 信号通道干扰。干扰信号通过与主机相连的输入/输出接口和通信接口进入微机保护装置。

(3) 静电和电磁感应干扰。电磁感应干扰来源包括高压开关操作、雷击、低频干扰以及附近电力设备产生的工频电磁场等。由于高压开关动作而引起的电弧熄灭与重燃过程会在母线上产生一系列高频电压波和电流波, 这些高频信号会以暂态电磁场的形式进入一次系统, 同时也会通过CT/PT或分布电容等耦合进入二次系统^[3]; 由于避雷装置的保护作用, 变电站遭受直接雷击的情况比较少, 主要是线路遭受直击雷或感应雷。线路遭受直击雷或感应雷时雷击波将会通过一、二次系统间的各种耦合途径或接地网, 在保护装置中感应出电压和电流干扰信号。

各种干扰通过传导、电场感应、磁场感应或电磁场耦合等方式进入微机保护装置, 在装置中的主要表现形态为共模干扰和差模干扰两种^[5]。干扰对微机保护装置的影响, 主要表现以下四个方面:

(1) PC指针出错。在微机程序的运行期间, 如果干扰信号改变了控制程序流向的标志字, 也将会改变程序的执行顺序, 从而使微机的程序跑飞, 出现CPU不断复位、程序出错等问题。

(2) 运算或逻辑出错。在微机保护装置运行时, RAM中存放了大量实时数据。由于RAM的抗干扰能力差, 在强电磁干扰作用下, RAM中的部分数据可能会发生变化; 此外, 读写数据时, 数据和地址总线也可能在干扰信号的作用下发生读写错误或数据传送到错误的地址中。

(3) 采样误差。干扰信号进入模拟采样通道, 从而影响数据采样的精度, 进而影响到数字系统的正确工作。

(4) 毁坏元件。直击雷或浪涌等在短时间内释放出巨大的能量, 将会破坏微机保护装置的各种敏感器件。

2 微机保护装置硬件电磁兼容设计

微机保护电磁兼容设计的目的就是要抑制差模干扰和共模干扰。抑制差模干扰的关键是要减小小电流回路面积、信号电压波动和滤波; 抑制共模干扰的关键是要减小电路间的耦合, 采取措施阻塞其耦合通道^[6~8]。针对不同干扰的特点, 对微机保护装置的各个模块采取相应的措施, 从而确保其安全稳定地工作。

据原国家电力公司自动化设备电磁兼容实验室统计, 在出现电磁兼容问题的装置中导致不正常的原因分布如下: 滤波不良占 49%, 屏蔽和接地不良占 31%, 布线问题占 8%, 其它占 12%^[2]。由此可见, 有效的滤波、合理的屏蔽和接地对于解决装

置的电磁兼容问题至关重要。

2.1 电源模块电磁兼容设计

电源是微机保护装置最关键的模块, 常出现的电源干扰异常情况有过压、欠压、跌落、浪涌、瞬变脉冲和尖峰脉冲等^[9]。这些干扰会导致装置内芯片逻辑出错、程序流程被打乱, 从而使装置工作不正常。所以必需对电源模块采取有效的电磁兼容解决措施。

图 1 为电源模块输入端的处理电路。压敏电阻 (VDR) 可以防止浪涌对微机保护装置的冲击, 双向瞬态电压抑制二极管 (TVS) 可以吸收尖峰脉冲, 压敏电阻和 TVS 管结合使用可以使电路既有较快的响应速度, 又有较大的电流吸收能力^[10, 11]。C1 为火线安规电容, 根据 IEC60384-14, 选择其型号为 X2。C2、C3 跨接在 L、N 之间, 组成差分滤波网络, 用于滤除差模干扰。电容 C3 和共模扼流线圈组成低通滤波器, 用于滤除瞬变干扰脉冲^[10, 12, 13], 电容 C4、C5 能有效抑制共模干扰。据长期电磁兼容试验统计数据表明, 70~100 MHz 的快速瞬变脉冲群干扰对于微机保护装置电源模块影响甚大。图 1 电路中加入了差模扼流线圈和地线扼流线圈, 相比于普通滤波电路, 对于 70~100 MHz 的快速瞬变脉冲群干扰有很强的抑制能力^[5]。另外, 采用稳定的开关电源模块, 也可以减小过压、欠压和跌落等对于微机保护装置的影响。

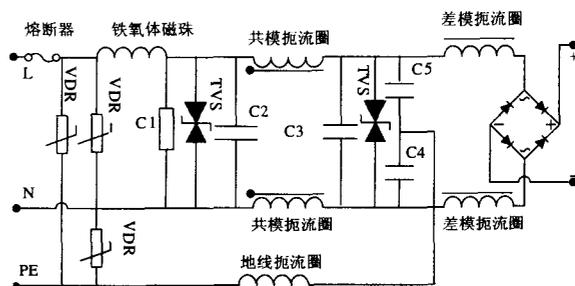


图 1 电源输入端 EMC 设计

Fig.1 The EMC design of power input

除了对电源模块输入端采取有效措施之外, 还必须对其输出端进行合理的处理。为了防止装置中各模块因共电源或共地产生串扰, 对于不同的功能模块采用分布式供电^[2, 5]。具体方法为: 整流后的 220 V 直流经开关电源输出 24 V, 经过滤波器, 构成 24 V 母线, 再经过 DC/DC 开关电源转换, 分别为保护 CPU、人机交换模块、通信模块、模拟板和开入/开出模块提供相应电压等级的直流电源。在各路

直流输出再设一级滤波,从而滤除电源本身的干扰。对于工频干扰,可以采用如图 2 所示的滤波器。其频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{U_0}{U_1} = \frac{1 - (\omega RC)^2}{1 - \omega R^2 C - j4\omega RC} \quad (1)$$

当 $\omega = 1/(RC)$ 时, $U_0 = 0$, $f = 1/(2\pi RC)$; 当 $f = 50 \text{ Hz}$ 时, 分别给定 R 和 C , 使 $RC = 1/(2\pi f)$ 即可^[13]。

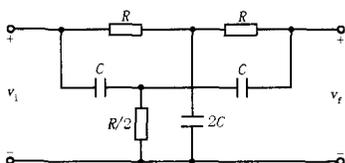


图 2 50 Hz 滤波器

Fig.2 The 50 Hz filter

2.2 保护 CPU 模块电磁兼容设计

保护 CPU 模块的 PCB 板采用多层板,有完整的电源层和地线层,从抑制共模、差模干扰角度出发,以减少串扰、公共阻抗干扰及反射引起的波形畸变为目的,在设计中应注意以下几点:

(1) 不同频率的元件分开布放,高频器件靠近连接器,低速逻辑和寄存器远离连接器,以利于减少共阻抗耦合、辐射和串扰;

(2) 数字部分和模拟部分隔离,保护 CPU、AD 采样模块和通信的供电电源严格分离;

(3) 确保电路中闭合回路导线所围成的面积最小,从而降低高频辐射场的耦合;

(4) 合理使用去耦电容。去耦电容能够提供局部的直流电源给有源器件,满足驱动电路的电流变化;也能去除高频噪声,避免相互间的耦合干扰。信号线在完成跳变时,去耦电容就起到电池的作用,及时提供电流,保持电源线的电压相对稳定^[13],在频率为 100 MHz 的系统中一般取值为 10 nF。电容不仅要尽量靠近芯片放置,更重要的是要尽量减小去耦电容的供电回路面积。

(5) 合理布放旁路电容。一般是指高频旁路,滤除输入信号中的高频噪声,给高频的开关噪声提供一条低阻抗泄放途径。其取值大约为去耦电容的 100~1000 倍。

(6) 由于时钟电路和高速电路是电路板上的主要干扰和辐射源,须单独安排,远离敏感源,合理设计地线回路,确保时钟电路的高频干扰信号迅速泄放到大地。电路中考考虑选用有源晶振,相比于无

源晶振,它有较强的抗干扰能力,而且对外的干扰也较小,在其电源入口增加铁氧体磁珠和去耦电容,有利于减小电源的干扰对时钟电路的影响。

2.3 开关量回路和交流量输入接口电磁兼容设计

开关量回路必须经过光隔与 CPU 相连,为防止在快速瞬变脉冲干扰下发生“瞬态饱和”,应选用速度适当、原副边杂散电容小、驱动电流大的光隔芯片;光隔芯片应当远离信号线、电源线及地线,以减少外部干扰对微机保护装置的影响^[2, 13];在光隔芯片原方还可以加入 EMI 片状滤波器,以提高共模电路阻抗,并采用“出口不带电技术”。

交流量输入端相应的电磁兼容解决措施为:选用带有静电屏蔽的变压器,串接铁氧体磁珠,采用经试验证明高效可靠的二阶低通滤波并结合软件处理躲开瞬变干扰的影响。

2.4 通信模块电磁兼容设计

对于 Ethernet 经以太网控制器外接屏蔽双绞线引出。对于 CAN、RS485 等通信接口需要进行光电隔离,为了满足通信传输速率的需要应选择高速光隔,如 HCPL-063。光隔芯片同样要远离信号线、电源线和地线。同时,在通信端口增加铁氧体磁环以抑制“瞬态饱和”^[16]。

3 电磁兼容设计实际应用效果

采用文中的设计方法,通过与原有的一套装置对比、改进,开发了一套以 DSP TMS320C812 为处理器的微机保护装置。在电源端口施加 4 级快速瞬变脉冲,当电源没有采用文中设计的滤波电路时,+5 V 输出端的波形见图 3,而采用文中电路后,+5 V 输出端的波形见图 4。可以清晰地看到采用文中的滤波电路后效果明显。

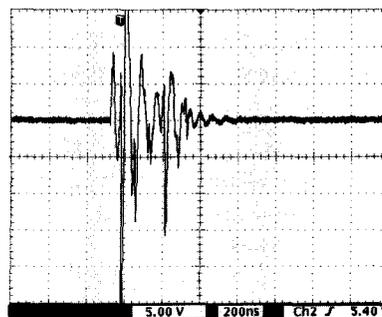


图 3 无滤波器的电源在瞬变干扰下 +5 V 端口输出波形

Fig.3 The output wave of +5 V power without filter under EFT

该装置从电路设计的初始阶段开始就系统分析电磁兼容问题,并结合了软件抗干扰技术,设计出的各个模块和整体均具有良好的电磁兼容特性,并

顺利通过了IV级电磁兼容试验。所通过的电磁兼容试验项目包括：静电放电、射频电磁场辐射、工频磁场、脉冲磁场、射频感应的传导干扰、电快速瞬变脉冲群、浪涌、振铃波、直流电压暂降和中断等。

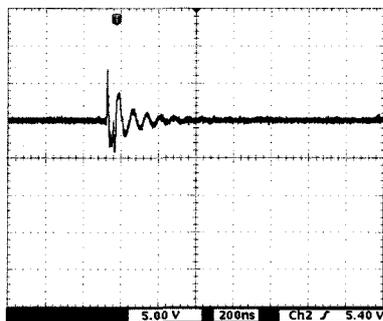


图 4 使用改进滤波器的电源在瞬变干扰下+5 V 端口输出波形

Fig.4 The output wave of +5V power with improved filter under EFT

4 结论

在电力系统中运行的微机保护装置面临着越来越恶劣的电磁环境，为了满足电力系统对其在可靠性和稳定性方面的要求，必须对其进行系统的电磁兼容设计。由于越早考虑电磁兼容问题，解决起来越容易，所需费用越小，所以从产品方案提出阶段就要在控制干扰源、阻塞耦合通道和增强敏感回路的抗干扰能力等方面全面考虑相应的电磁兼容解决方案。文中提出的方法可以很好地削弱传导干扰和辐射干扰，具有一定的普遍性，对微机保护装置开发设计人员有一定借鉴意义。

参考文献

- [1] 林国荣. 电磁干扰及控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 梁志成, 傅静波, 李富同, 等. 微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 65-68.
LIANG Zhi-cheng, FU Jing-bo, LI Fu-tong, et al. Electrical Fast Transient Burst Immunity of Protection Equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 65-68.
- [3] 姚刚, 贺家李, 王钢, 等. 电力系统自动化设备的电磁兼容技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 52-57.
YAO Gang, HE Jia-li, WANG Gang, et al. Electromagnetic Compatibility of the Automatics Equipment of Power System[J]. Proceedings of EPSA, 2003, 27(11): 65-68.
- [4] 文武, 贾俊, 阮将军. 电力系统电磁兼容问题综述[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2003, 18(3): 42-46.
WEN Wu, JIA Jun, RUAN Jiang-jun. Overview of Electromagnetic Compatibility in Electric Power System[J]. Journal of Changsha University of Electric Power(Natural Science), 2003, 18(3): 42-46.
- [5] 程利军. 微机继电保护装置电磁兼容研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2001: 39-61.
CHENG Li-jun. Research of Electromagnetic Compatibility of Microprocessor-based Protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001: 39-61.
- [6] 姜琳, 沈有昌, 杨奇逊. 微机保护抗干扰研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 65-68.
JIANG Lin, SHEN You-chang, YANG Qi-xun. Research on Anti-interference Ability of Microprocessor-based Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 65-68.
- [7] 韩青, 尹项根. 瞬态脉冲及抑制方法[J]. 继电器, 2003, 31(8): 46-48.
HAN Qing, YIN Xiang-gen. The Transient Burst Disturbance and Its Suppression Method[J]. Relay, 2003, 31(8): 46-48.
- [8] 韩天行, 李秦. 继电保护及设备的电磁兼容技术和电磁干扰的抑制方法[J]. 继电器, 2000, 28(11): 73-76.
HAN Tian-xing, LI Qin. EMC Technology of Relaying Protection and Equipment and Suppression on EMI[J]. Relay, 2000, 28(11): 73-76.
- [9] 刘萍. 电磁干扰排查及故障解决的电磁兼容技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [10] IEC 60255-26, Measuring Relays and Protection Equipment-part 26: Electromagnetic Compatibility Requirements for Measuring Relays and Protection Equipment[S].
- [11] 陈迁, 徐国政, 关永刚, 等. 高压开关设备就地检测装置的电磁兼容设计和实验[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 21-26.
CHEN Qian, XU Guo-zheng, GUAN Yong-gang, et al. Electromagnetic Compatibility Design and Test of High Voltage Switchgear On-site Monitoring Device[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3): 21-26.
- [12] 叶晓慧, 胡文超, 鲁远曙. 开关电源的电磁干扰与抑制[J]. 海军工程学院学报, 1999, 87(2): 102-105.
YE Xiao-hui, HU Wen-chao, LU Yuan-shu. Switch Power Supply' EMI and Suppression[J]. Journal of Nave Academy of Engineering, 1999, 87(2): 102-105.
- [13] 张盛旺, 林凤. 电力系统微机保护装置的抗干扰措施[J]. 电力系统自动化设备, 2005, 25(2): 93-96.

(下转第10页 continued on page 10)

- 34 (11): 27-30.
- [11] 王成山, 余旭阳. 基于 Multi-Agent 系统的分布式协调紧急控制[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 1-5.
WANG Cheng-shan, YU Xu-yang. Based on Multi-Agent System for Distributed Control of the Coordination of Emergency[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 1-5.
- [12] 杨震, 周艳平, 束洪春. Agent 在变电站自动化系统中的应用及通信研究[J]. 云南水力发电, 2006, 22(3): 88-92.
YANG Zhen, ZHOU Yan-ping, SHU Hong-chun. The Application of Agent in the Substation Automation System and Research on Its Communication[J]. Yunnan Hydropower, 2006, 22 (3): 88-92.
- [13] 董海鹰, 常弘, 白健社, 等. 一种基于 Web 的多 Agent 变电站故障诊断方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(2): 196-200.
DONG Hai-ying, CHANG Hong, BAI Jian-she, et al. Multi-Agent Fault Diagnosis Approach for Substation Based on Web[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(2): 196-200.
- [14] 曹立霞, 厉吉文, 程新功, 等. 基于多 Agent 技术的分布式电压无功优化控制系统[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 30-33.
CAO Li-xia, LI Ji-wen, CHENG Xin-gong, et al. Distributed Optimal Voltage/Reactive Power Control System Based on Multi-agent System[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 30-33.
- [15] Wong S K, Kalam A. Development of a Power Protection System Using an Agent Based Architecture[A]. In: Proc of International Conference on Energy Management and Power Delivery[C]. 1995.433-438.
- [16] Wong S K, Kalam A. Distributed Intelligent Power System Protection Using Case Based and Object Oriented Paradigms[A]. In: Proc of International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems[C]. 1996.74-78.
- [17] Wong S K, Kalam A. An Agent Approach to Designing Protection Systems[A]. In: IEE Sixth International Conference on Developments in Power System Protection[C]. Nottingham(UK):1997.373-376.
- [18] 李彦哲. 输电线路短路故障实现自适应保护的分析和计算[J]. 兰州交通大学学报, 2005, 24(3): 75-79.
LI Yan-zhe. Analysis and Calculation of Adaptive Protection for Power Lines[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2005, 24(3): 75-79.

收稿日期: 2007-07-26; 修回日期: 2008-01-04

作者简介:

杨伟(1965-), 男, 副教授, 主要从事电力系统运行、控制和电力市场方面的研究; E-mail: weiyang@mail.njust.edu.cn

华梁(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。

(上接第 4 页 continued from page 4)

- ZHANG Sheng-wang, LIN Feng. Anti-interference Measures in Microprocessor-based Protective Equipment of Power System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 93-96.
- [14] 黄盛霖, 姜海勋. 混合印制电路板的电磁兼容设计[J]. 电子产品可靠性与环境实验, 2005, (2): 39-42.
HUANG Sheng-lin, JIANG Hai-xun. PCB Design Techniques for EMC[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005, (2): 39-42.
- [15] 徐亮, 阮江军, 甘艳, 等. 去耦电容在 PCB 板中的应用[J]. 电测与仪表, 2002, 39(436): 5-8.
XU Liang, RUAN Jiang-jun, GAN Yan, et al. Application of Decoupling Capacitor in PCB Design[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2002, 39(436): 5-8.
- [16] 王剑乔, 刘建新. 微机保护抗电快速瞬变脉冲群干扰的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 36-38.
WANG Jian-qiao, LIU Jian-xin. Research on Electrical Fast Transient Immunity for Relay Protection Equipment[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 36-38.

收稿日期: 2007-09-28; 修回日期: 2007-12-06

作者简介:

周冰航(1973-), 男, 工程师, 研究方向为自动化控制系统; E-mail: hndxamd@hotmail.com

周有庆(1944-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护、变电站综合自动化与配电自动化;

刘敏(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统微机保护。