

变电站智能电子设备的电磁兼容技术

黄益庄

(清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 介绍了电磁兼容 EMC 的基本概念和变电站 EMC 问题的特殊性, 分析了变电站内的主要电磁干扰源及其干扰特性。针对智能电子设备在变电站中可能遇到的各种电磁干扰, 重点阐述了 IED 电磁兼容技术的设计方法, 提出了几种实用的解决电磁兼容问题的措施。利用上述方法所设计的继电保护装置经型式试验检验结果表明, 本文提出的有关电磁兼容技术的设计方法和措施, 对提高 IED 的抗电磁干扰能力是行之有效的。

关键词: 变电站; 智能电子设备; 电磁干扰; 电磁兼容

EMC technology for IED in substations

HUANG Yi-zhuang

(Dept of EE, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper introduces the basic concepts of electromagnetic compatibility (EMC) and the particularity of EMC in substations, and analyzes the main sources of electromagnetic interferences(EMI) in substations and their interference characteristics. Facing various EMI that Intelligent Electronic Devices (IED) in substations may encounter, the design method of EMC technology for IED is specially explained. Several practical methods for solving the EMC problems are proposed. Passing through the type test of relay protection equipment, it has been verified that the design method and measures for EMC, proposed by this paper, are effective for improving anti-EMI ability of IED.

Key words: substation; intelligent electronic devices; electromagnetic interference; electromagnetic compatibility

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1673-3415(2008)15-0006-04

0 引言

随着变电站综合自动化系统的发展和逐步推广应用, 智能电子设备 IED (Intelligent Electronic Devices), 已构成了新一代静态型的二次设备。IEC 对 IED 的定义是: 由一个或多个处理器组成, 具有从外部源接收和传送数据或控制外部源的任何设备。这些 IED 包括数字继电器 (微机保护装置)、自动装置、电子多功能仪表等等, 它们在物理位置上可安装在 3 个不同的功能层 (即变电站层、间隔层/单元层、过程层) 上。IED 中尤其是微机保护装置在解决动作迅速、灵敏度高等方面有明显的优越性, 但由于电力系统本身是一个极为复杂并存在多种干扰的电磁骚扰源, 恶劣的电磁环境对继电保护和自动装置的正常工作极为不利。为提高 IED 的可靠性, 深入解决其电磁兼容问题尤为重要。

1 电磁兼容的基本概念

电磁兼容 EMC (Electromagnetic Compatibility) 是指电气和电子设备或系统在包围它的电磁环境中能正常工作, 不因电磁干扰而降低工作性能, 且它们本身所发射的电磁能量不足以恶化环境和影响其它设备或系统的正常工作。在共同的电磁环境中, 互不干扰, 各自完成各自正常功能的共存状态。

电磁环境 EME (Electromagnetic Environment) 是指存在于给定场所的所有电磁现象的总和。

电磁干扰 EMI (Electromagnetic Interference): 在 GB/T4365-1995 中, 电磁干扰被定义为任何可能引起装置、设备或系统性能降低或者对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。

2 变电站的电磁兼容问题

IED 是电力系统重要的二次设备, 它们处于变

电站严重的电磁干扰中。变电站中一次回路和二次回路之间存在着电和磁的联系，一次回路中发生的任何形式的暂态过程都会通过不同的耦合途径传入二次回路中形成暂态干扰。暂态干扰对二次回路的设备可能造成两种后果，一是破坏二次设备的绝缘、甚至集成芯片烧毁，形成永久性破坏；二是干扰其正常的工作，使其误动作，导致或扩大一次设备故障，造成严重的损失。

现代的电力系统，有两种趋势使 EMC 问题更为突出。一方面是输电电压的提高，当开关操作或发生故障时，在空间会产生更强的电磁场，再加上 SF₆ 气体绝缘开关的使用，由于 SF₆ 气体去游离性极强，开关操作时，母线上会出现频率极高的快速暂态过电压，向空间辐射上升沿极陡的脉冲电磁场，成为频带很宽的强烈干扰源。另一方面 IED 的广泛应用，这些以微电子技术为基础的电子设备，对暂态干扰具有更加明显的敏感性和脆弱性。目前变电站自动化系统多采用分层分布式结构，继电保护装置“下放”安装在高压开关柜内，或在超高压开关场附近，EMC 的问题更为突出。

3 变电站内的主要干扰源及其特性

变电站的电磁干扰大致可分为三种情况：一次设备之间、一次和二次设备之间、二次设备之间。

3.1 高压开关操作

变电站高压断路器和隔离开关操作是变电站最典型和最重要的电磁干扰源，开关操作时，产生一系列高频率、前沿陡峭的瞬变电磁脉冲（即快速瞬变脉冲群）；触头间产生一系列电弧过程，电弧的熄灭和重燃，在被断开的母线上将引起一系列的高频电流波和高频电压波，并以暂态电磁波的形式向周围空间辐射能量。变压器、电抗器和电容器组等储能元件断路器的操作也是变电站重要的电磁干扰源。由于电感的磁链和电容上的电荷量均不能突变，开关操作使其工作状态发生变化时，会产生暂态过电压；这些暂态过程通过母线上的 PT 和 CT 等设备直接耦合到低压回路。俄罗斯专家在长达 15 年对 100 多个从 110 kV 到 750 kV 变电站电磁兼容进行一系列的研究，他们对隔离开关或断路器操作引起的二次回路干扰电压进行测量结果表明：对于 CT、PT 和 220 V 交流及直流用的低频电缆，产生的干扰电压，通常主导频率为 1MHz~4 MHz，幅值为几百伏（气体绝缘变电站例外）；但对于携带保护和远动信号的电力载波用的同轴电缆的干扰电压可达到数千伏，有的甚至超过 5 kV。

3.2 雷电

雷电是自然界发生的极为强烈的电磁暂态过程。一般雷击不会直接作用于二次回路，更多的可能是线路遭受直击雷或感应雷。雷击暂态过电压以大气行波的方式向变电站传播。不仅直接作用于一次设备，而且通过 CT、PT 或一、二次系统间的各种耦合途径或接地网进入二次回路。如果受影响的设备阻抗很高，则设备承受雷击电压脉冲；如果受影响的设备阻抗很低，则设备承受雷击电流脉冲，导致变电站地电位升高及地电位差。

3.3 运行中的电力设备

变电站运行中的线路或母线会产生工频磁场，电压等级越高电场强度越大。

此外，不良气候条件下导线上的电晕、连接不紧密处金属部件间的放电、脏污外绝缘表面的局部放电等都可成为频谱极宽的干扰源。

3.4 系统短路故障

系统短路时，大电流经接地点泄入接地网，使接地点乃至整个接地网的电位升高。在二次回路中就会产生共模干扰电压。统计表明，变电站内高压母线单相接地时，在二次电缆的芯线上产生的干扰电压的峰值可达到几十伏到一万多伏，暂态电压的频率约几 kHz 到几百 kHz。

3.5 辐射电磁场

无线电台、电视台、移动式无线电发信机及各种工业发射源都是辐射干扰源。电力系统中常用的步话机也是影响电子设备正常工作的主要辐射干扰源，可能引起继电保护装置误动或误发信号。

3.6 静电放电

静电放电可能使电子元器件故障、损坏或控制系统失灵，也可能使计算机程序出错或丢失数据。静电放电的特点是波头很陡，只有数 ns，带有数十 ns 的阻尼波尾，幅值可达十几 kV。

3.7 谐波对二次设备的干扰

电力系统电磁干扰源包括谐波。随着电气化铁道的发展和电力电子器件的广泛应用以及家用电器的不断增加，目前谐波污染已成为电力系统的公害。谐波对 IED 的主要影响是干扰其正常的工作状态、影响测量的准确度和动作的可靠性等。谐波对继电保护装置的干扰，严重时会导致拒动或误动。

综上所述，电力系统电磁兼容问题早已成为不容忽视的重要问题。为保证 IED 安全可靠运行，在研发阶段，就必须充分重视电磁兼容技术问题。

4 智能电子设备电磁兼容技术的设计方法

IED 最基本的抗干扰措施就是防止干扰进入弱电系统。一方面是通过改进装置的硬件设计增加其

抗干扰能力,另一方面可以从外部环境着手通过各种屏蔽隔离措施切断干扰的传播途径。

影响 IED 系统电磁兼容性的因素可用式(1)表示:

$$Y(X)=Q(X) \cdot H(X)/N(X) \quad (1)$$

式(1)中:Y(X)为干扰对系统(或设备)的影响;Q(X)为干扰的强弱;H(X)为干扰传输的耦合函数;N(X)为受干扰系统(或设备)的抗干扰能力,即敏感度阈值。

显然,影响 IED 受干扰严重程度的因素有三个方面,它们都是频率的函数。该数学模型提示了提高抗干扰能力要从以下几方面着手:①切断干扰源,即减小 Q(X);②减小耦合,即减小 H(X);③提高受干扰设备与系统的敏感度阈值,即加大 N(X)。在实际情况中,往往是三个因素综合考虑,并按①②③的顺序去采取措施,以获得最佳的效果。

电磁兼容技术的设计要从电磁兼容的三个基本要素着手,从原理的可行性、元器件的选择、加工工艺、安装运行环境等几个方面重点进行。电磁干扰主要是通过 IED 的各个端口,以共模的形式进入装置的内部,如果装置内部的某回路或元件对地分布参数不对称,共模干扰将转化为异模的形式,并形成对该回路或器件的干扰。屏蔽、接地、滤波是抑制电磁干扰的最基本方法。

4.1 智能电子设备的屏蔽

屏蔽是切断干扰源的有力措施,一般常用于隔离和衰减辐射干扰。为防止外部干扰直接耦合到智能电子设备内部的插件和元器件上,所有的插件用机箱来屏蔽,必须对机箱的电磁兼容设计给予充分重视。电子设备所产生的电磁能量和外部空间的电磁能量主要通过机箱盖板、机箱面板安装的电连接器和其它器件泄漏。导电性能良好的机箱相当于在 IED 与外部空间之间竖起了一道电磁屏障,它通过反射和吸收方式降低 IED 和外部空间电磁辐射能量,使智能电子产品设备满足电磁兼容设计要求。

(1) 机箱壳体应设计成一个完整的导体;

(2) 机箱面板与电连接器安装缝隙需采取必要的电磁屏蔽措施;

(3) 屏蔽体要良好接地。

4.2 滤波

滤波是利用滤波器来抑制传导干扰。常用的滤波器有:铁氧体磁环,模拟低通滤波器和去耦电路。铁氧体磁环是一种吸收型的滤波器,它通过吸收或耗散回路上的高频干扰能量来达到抑制电磁干扰的目的。模拟低通滤波器是指电容、电感等器件组成的,为限制串扰或为同一回路上的共模干扰提供通

路。一般在设备入口的地方或干扰比较严重的地方设置去耦电容,形成去耦电路,以达到抑制电磁干扰的目的。在采用滤波方法来抑制传导干扰时,首先必须分析干扰源的频谱,干扰波幅值等,有针对性地选择滤波器的种类或者设计滤波器电路。

快速瞬变脉冲干扰一般以共模方式施加到 IED 的电源端口、交流电压/电流端口、开入/开出端口和通信端口。如果 IED 各端口没有良好的滤波措施,则干扰信号就会进入设备的后续电路,通过传导和电容耦合进行传播。同时干扰信号也可进入电路板的信号地线,这必然会在公共地线上产生压降,对公用该地线的其他元件造成干扰。如果在 IED 的端口尤其是电源端口设置低通滤波器,这将有效提高硬件的抗干扰能力。

4.2.1 电源端口的滤波措施

(1) 在电源端口加滤波器,但一般的电源线滤波器只能在 10~30 MHz 范围内起到良好效果,对快速瞬变脉冲干扰的抑制作用不大。铁氧体是抑制高频干扰信号的一种好的选择,但目前进入装置内部再安装,有时不能起到预想效果,在进入设备机壳前安装效果更好。

(2) 弱电电源系统的滤波措施:目前我国微机保护装置的弱电电源系统多用浮地方式,即 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 15\text{ V}$ 、 $\pm 24\text{ V}$ 等与机壳无任何连接,这样弱电系统上的共模干扰电流就没有泻放通道,只能通过弱电电源线对机壳的杂散电容泻放掉,杂散电容的值难于控制,产生的不平衡就会在弱电电源系统中产生较大的差模电压,若在弱电电源系统的电源和其地分别对机壳地接入高频特性好、耐压高的电容,可起到平衡电路的作用;更重要的是为共模骚扰电流提供了泻放通道,可取得良好的电磁兼容性。

4.2.2 交流电压/电流端口

从交流电压/电流端口进来的快速脉冲骚扰经辅助 CT、PT 原、副边的杂散电容耦合到 $\pm 15\text{ V}$ 进入 A/D 系统,最终经杂散电容返回。不仅影响数据采集的精度,也影响到数字系统的正确工作,采用带有屏蔽层的辅助互感器,将屏蔽层接地,可减小杂散电容,但屏蔽层的接地阻抗要小。另外,在交流电压/电流端口加入铁氧体磁环以增大共模回路的阻抗,效果也很好。

4.2.3 开入/开出端口

微机保护装置的开入/开出回路大多采用光耦器件,所有开入量均由 24 V 电源(或 220 V)直接供电,利用光耦转换为 5 V 信号直接进入 CPU 模板,因此,快速瞬变脉冲干扰既可通过 24 V 侵入,也可通过开入/开出端口侵入电源系统。在设计电路时要

尽量选取速度较慢、驱动电流较大、原副边杂散电容小的光耦器件；在电路板布置上，要使光耦器件远离电源线、信号线、地线等敏感线路；另外也可在光耦的原边加磁珠或在开入/开出端口加磁环。

4.2.4 通信端口

一般通信端口的人机对话系统在装置 IED 的前面板，通信线到达前面板中间要经过很多环节，干扰一旦进入通信端口，就会通过各种耦合方式进入其他电路。可在通信端口串接共模扼流圈或铁氧体磁环以防止快速脉冲骚扰的进入。

4.3 电源的干扰及其抑制方法

4.3.1 干扰的方式

电源干扰是一种很复杂的干扰，产生的原因和干扰的形式是多种多样的，包括了许多可变的因素，但从干扰的方式上可归为共模干扰和差模干扰两类。共模干扰是由电源输入线对大地或中线对大地之间的电压差所形成的；差模干扰存在于电源线间、线与中线间；差模干扰发生在同一电源电路上，而共模干扰是因辐射和串扰耦合到电路中去。通常在电源的输入线上的干扰电压都会有共模电压分量和差模电压分量，由于线路阻抗的不平衡，这两种干扰电压在传输过程中会相互转换。一般快速瞬变干扰从 220/110 V 电源进入到微机保护装置的电源插件，然后通过直流弱电回路向其它的插件进行传播。电源端口引入对各插件的传导干扰如图 1。

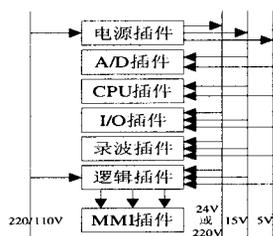


图 1 电源端口对各插件的传导干扰

Fig.1 The conductive interferences from power ports to inserted circuit boards

4.3.2 电源的电磁兼容设计

(1) 电磁兼容滤波器：电源电磁兼容设计，主要通过电源电磁兼容滤波器实现。滤波器可根据采用的电源类型、电源电压及滤波频率范围等参数进行选择，但应注意的是电源电磁兼容滤波器应具有从低频到高频全频率范围滤波功能和抗冲击及浪涌功能。电磁兼容滤波器的安装必须注意以下两点：

①必须使电源电磁兼容滤波器壳体与 IED 的地接触良好。

②必须使电源滤波器输入端到 IED 机箱面板连接器引线最短，而且需加装屏蔽层，以便减少通过引

线产生的电磁辐射干扰。

(2) 其它限制电源干扰的方法：瞬变干扰抑制器可以对预定过电压进行能量转移，属于这类范畴有气体放电管，金属氧化物压敏电阻及齐纳二极管，这些器件对共模或差模的瞬变干扰都有较大的抑制作用，这些抑制器必须安装在电源输入线的线与线或线与地之间。

4.4 智能电子装置的接地问题

4.4.1 屏蔽接地

接地技术是 IED 抗电磁干扰的重要手段。良好的接地可以在很大的程度上抑制装置内部的电磁干扰耦合，防止外部电磁干扰的侵入，从而提高系统的抗干扰能力。

目前，智能电子装置屏蔽接地广泛采用的方式是：装置内部需要屏蔽接地的屏蔽层、屏蔽体通过接地线连接到装置的外壳，再将装置的外壳通过低阻抗的接地线接到变电站的接地铜排上，最后连接到变电站的主接地网。实际上，装置外壳的接地起到了抑制电磁干扰和安全接地的双重作用。微机保护装置内部必须接地的屏蔽层是：模拟量输入插件上 CT、PT 原、副边线圈间的屏蔽层；通信线的屏蔽层也应该通过设备的外壳良好接地。

4.4.2 安全接地

安全接地是指当用电设备的绝缘层的绝缘水平下降，导致设备的金属外壳等导电部分出现较高的对地电压，当人触及这些部位时会发生危险。故需要设法降低设备外壳的对地电位，通常是将设备的外壳接大地。如果设备的外壳含有高导磁率的材料，还可以通过材料的分磁作用来实现对低频磁场的屏蔽。微机保护装置外壳的接地还可起到安全接地和扼制电磁干扰双重作用。

4.4.3 工作接地

控制系统中基准电位的连线称为工作地。信号回路和工作地的连接称为工作接地，接地的方式有单点接地、多点接地等。采用多层板的微机保护装置中，基本是采用多点接地，由于有专用的接地层，地线宽，接地效果很理想。工作地和大地连接一般有三种方式：浮地、直接接地和电容接地方式。

4.5 电路的电磁兼容设计

IED 的电磁兼容设计的目的是提高装置本身抗电磁干扰的能力和降低电路产生的电磁辐射能量，主要的设计方法是屏蔽和滤波。一般采用如下几种设计方法：①在元器件的电源和地之间加去耦电容；②在各电路模块电源输入端设计高、低频滤波电容，降低或消除通过电源进入电路模块的各种干扰信

(下转第 59 页 continued on page 59)

非刚性空间,在刚性空间中采用稳定性较高的隐式积分法,而在非刚性空间中,采用速度较快显示积分法。由于大型电力系统的刚性空间辨识存在“维数灾”问题,因此文中方法比较适合中小型电力系统的时域仿真。为使文中方法更具有通用性,下一步工作的重点是解决“维数灾”的问题,或者提出一个新的刚性空间识别方法。

参考文献

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis of Dynamic Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [2] E.P. de M. Simulating Fast and Slow Dynamic Effects in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(33):32-38.
- [3] Astic J Y. The Mixed Adams-BDF Variable Step Size Algorithm to Simulate Transient and Long-term Phenomena in Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 5(9):929-935
- [4] LIU Chih-wen. New Method for Computing Power System Dynamic Response for Real-time Transient Stability Prediction[J]. IEEE Trans on Circuits and System, 2000, 3(47):324-337.

- [5] 郭琦,赵晋泉,张伯明.基于变参数追踪的暂态稳定分析与预防控制[J].电力系统自动化,2005,29(24).
GUO Qi, ZHAO Jin-quan, ZHANG Bo-ming. Transient Stability and Preventive Control Approach Based on Parameter-switching Tracing Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24).
- [6] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] Hairer E, Wangner G. Solving Ordinary Differential Equations[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [9] Janovsk V, Liberda O. Continuation of Invariant Subspace via the Recursive Projection Method[J]. Applications of Mathematics, 2003 4(8):89-112.
- [10] Dan Y, Ventataramana A. A Decoupled Method for Power System Time Domain Simulation via Invariant Subspace Partition[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 7(2): 1-6.

收稿日期:2007-11-26; 修回日期:2008-01-06

作者简介:

苏思敏(1982-),女,主要从事电力系统市场部工作。

E-mail: baiom@126.com

(上接第9页 continued from page 9)

号; ③合理布置元器件,尽可能降低元器件之间连线长度,降低信号线产生的电磁辐射; ④合理排布电源、地和各种信号线,降低各种信号线之间产生的耦合干扰; ⑤多层板去耦技术,降低系统各连线之间的分布参数影响; ⑥表面贴片技术,可以提高电磁兼容的性能; ⑦软件抗干扰技术。

5 结束语

IED所处环境的电磁干扰源对IED自身而言是不能控制的,但防止电磁干扰电子装置的影响是可以采取措施解决的。上述分析和解决电磁兼容的方法和措施,已应用到清华大学和北京清电华力电气自动化科技有限公司共同研发的TD1-5L/5M/5LT/5TM/5C等系列微机保护装置中,这些系列装置已顺利通过电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心型式试验检验,其电磁兼容性能全部满足国标和IEC规定的电磁干扰严酷等级为IV级的电磁干扰试验。型式试验检验结果证明:应用上述主要措施可以比较满意地解决继电保护装置的电磁兼容问题。

参考文献

- [1] 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 the EPSA, 2000, 12(4): 52-57.

- [2] 张晖.继电保护装置的电磁兼容问题[J].江西电力,2006,30(5):1-3.
ZHANG Hui. The EMC of the Equipments of the Relay Protection[J]. Jiangxi Electrical Power, 2006, 30(5): 1-3.
- [3] 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.
- [4] 骆飞,王富荣,王海霞.微机继电保护的电磁兼容[J].电子质量,2004,(4):33-35.
LUO Fei, WANG Fu-rong, WANG Hai-xia. The EMC of Microcomputer-Based Protective Relay[J]. Electronic Quality, 2004, (4): 33-35.

本文为2007年12月中国电力系统继电保护应用技术学术研讨会大会发言稿

作者简介:

黄益庄(1938-),女,教授,研究方向为变电站综合自动化、微机继电保护、电能质量控制。E-mail:hyz-dea@tsinghua.edu.cn