

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI XITONG
DIANCI JIANRONG JISHU

电力系统 电磁兼容技术

李景禄 主 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA

TM732/6

2007

DIANLI XITONG
DIANCI JIANRONG JISHU

电力系统 电磁兼容技术

主 编 李景禄
编 写 李卫国 陈俊武 李茂军
汤放奇 林 冶
主 审 周 浩



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分为十二章，主要内容为电力系统电磁兼容概述，电力系统的电磁环境分析，电磁干扰的途径及耦合机理，电力系统谐波，电力系统的雷电干扰及保护，静电干扰及静电防护，发电厂、变电所的地电位干扰及保护措施，电力系统的暂态干扰，电磁兼容试验，微机监控设备的电磁屏蔽，微机监控设备的接地技术，微机监控系统的抗干扰措施。

本书主要作为电气工程及其自动化专业的本科教材，也可作为相关专业方向的研究生教材，同时还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统电磁兼容技术/李景禄主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5992 - 2

I. 电... II. 李... III. 电力系统运行—电磁兼容性—高等学校—教材 IV. TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 121950 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 335 千字

印数 0001—3000 册 定价 22.60 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着电力技术的发展和微机保护、综合自动化系统的大量应用,电力系统的自动化水平得到了较大的提高,但是这也带来了一个新的问题,就是电磁兼容的问题。因为计算机等微电子元件对各种干扰具有很强的敏感性,而电力系统中又存在较为复杂的电磁环境,如发电厂、变电所就存在着很强的电场干扰、磁场干扰、谐波干扰、地电位干扰和雷电干扰,特别是当电力系统发生短路、接地等故障时,正需要保护和自动装置正确地发挥作用,但此时也是产生各种干扰最严重的时刻,如某一环节出现问题就会影响保护和自动装置的正确动作,会使事故扩大。电力系统中曾多次发生因干扰而使保护和自动装置误动、拒动导致事故扩大的事情,有时甚至使微机保护和自动装置损坏。因此,电力系统电磁兼容技术必将成为电力系统专业的主干课程。

本书在编写过程中作者结合近年来在电磁兼容方面的研究成果,查阅了国内外大量的电磁兼容研究资料,收入了国内外在该领域中的新技术,并且强调了理论与实用相结合的编写原则。全书共分十二章,重点突出了电力系统的暂态干扰、雷电干扰、静电干扰、谐波干扰和地电位干扰及其抗干扰措施。本书为电力工程类专业本科教材,同时也可以作为研究生的参考教材,亦可作为其他相近专业的参考教材和工程技术参考资料。关于教学内容可根据学时的不同进行取舍,基本学时应为60~70学时。

本书由长沙理工大学李景禄教授主编,由华北电力大学的李卫国教授、长沙理工大学的汤放奇教授和李茂军教授、华中科技大学的陈俊武副教授、福建省电力公司的林冶副主任参编。长沙理工大学的研究生孙春艳、何艳娇、万欣、杨鑫、陶蓉、李志娟、黄欣、李李参与了本书的资料收集、编写和校对工作,特别是孙春艳同学对全部书稿进行了认真的校对。本书由浙江大学的周浩副教授主审,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限,再加上成书时间仓促,书中缺点和不足之处在所难免,敬请读者指正。

作 者

2007年6月

目 录

前言

第一章 电力系统电磁兼容概述	1
第一节 电力系统电磁兼容研究的目的及意义	1
第二节 电力系统电磁兼容的发展	2
第三节 电力系统电磁兼容研究的内容和目标	2
第四节 电力系统电磁兼容名词术语和基本概念	4
习题	5
第二章 电力系统的电磁环境分析	6
第一节 发电厂、变电所的静电干扰	6
第二节 发电厂、变电所的电磁干扰	8
第三节 发电厂、变电所的辐射干扰	9
第四节 发电厂、变电所的雷电干扰	13
习题	16
第三章 电磁干扰的途径及耦合机理	17
第一节 差模干扰及共模干扰	17
第二节 电导耦合	19
第三节 电容耦合	25
第四节 电感耦合	31
第五节 辐射耦合	36
习题	43
第四章 电力系统谐波	44
第一节 电力系统谐波产生的原因	44
第二节 谐波测量	47
第三节 谐波危害	53
第四节 谐波抑制及治理	56
习题	60
第五章 电力系统的雷电干扰及保护	61
第一节 电力系统直击雷及其防护	61
第二节 电力系统感应雷干扰及其防护	68
第三节 线路来波干扰及其保护措施	75
第四节 发电厂、变电所二次系统的雷电干扰及其保护措施	78
第五节 发电厂、变电所微机保护系统的电源干扰和保护措施	82

习题	84
第六章 静电干扰及静电防护	85
第一节 静电的产生	85
第二节 静电放电	85
第三节 静电危害	89
第四节 静电测量	91
第五节 静电干扰的防护措施	93
习题	96
第七章 发电厂、变电所的地电位干扰及保护措施	97
第一节 发电厂、变电所接地网的地电位升高	97
第二节 反击过电压	100
第三节 发电厂、变电所的冲击电位分布	103
第四节 防止地电位干扰的措施	104
习题	107
第八章 电力系统的暂态干扰	108
第一节 开关操作引起的暂态干扰	108
第二节 短路事故状态下的暂态干扰	113
第三节 电力系统发生铁磁谐振时的暂态干扰	116
第四节 弧光接地过电压产生的暂态干扰	121
第五节 直流电源回路操作引起的暂态干扰	126
习题	127
第九章 电磁兼容试验	128
第一节 静电放电抗扰度试验	128
第二节 浪涌冲击抗扰度试验	130
第三节 干扰电压与干扰电流的测量	134
第四节 干扰场强的测量	139
第五节 干扰功率的测量	141
习题	143
第十章 微机监控设备的电磁屏蔽	144
第一节 电场屏蔽	144
第二节 磁场屏蔽	147
第三节 电磁屏蔽	151
第四节 电磁屏蔽材料	156
第五节 信号电缆的屏蔽接地方法	164
习题	167
第十一章 微机监控设备的接地技术	168
第一节 接地基本概念	168

第二节	接地分类	171
第三节	限制地线干扰的主要方法	179
第四节	搭接	181
	习题	186
第十二章	微机监控系统的抗干扰措施	187
第一节	微机监控系统的元、器件抗干扰措施	187
第二节	微机监控系统的传输通道抗干扰措施	190
第三节	微机监控系统的电源抗干扰措施	191
第四节	微机监控系统的机房防护措施	193
第五节	微机监控系统的软件抗干扰技术	197
第六节	微机监控系统的硬件抗干扰技术	203
第七节	微机监控系统的电磁泄漏及防护措施	204
第八节	隔离技术	206
	习题	212
	参考文献	213

第一章 电力系统电磁兼容概述

第一节 电力系统电磁兼容研究的目的及意义

发电厂、变电所的各类保护和控制系统目前均为计算机控制的综合自动化系统,这与过去传统的保护和控制装置相比,是一次技术上的革命。但是计算机综合自动化系统现在面临的一个问题,就是各种干扰的问题。因为计算机综合自动化系统在运行中面对的是非常复杂的高电压、强电场电磁环境,既有大电流造成的磁场干扰,又有高压设备造成的电场干扰。例如:有大电流流经接地装置时由地电位差引起的地电位干扰,电网中一些非线性铁磁元件和整流设备产生的谐波干扰,还有在雷击时由雷电过电压产生的雷电过电压干扰、雷电过电流干扰,静电干扰,电网中开关操作产生电弧重燃和过渡过程干扰以及电网中各种内过电压干扰。而微机保护和综合自动化系统的计算机则比较脆弱,对干扰具有敏感性。这些干扰会对计算机监控设备的取样回路、控制回路、电源和通信回路造成影响。如果某一环节出现问题,这些干扰就会对综合自动化系统造成较大的危害,比如会使逻辑混乱、计算机死机、芯片损坏、保护“失灵”等,严重时甚至会危及到发电机、变压器等一些主设备。最近几年,由各类干扰造成微机保护或综合自动化系统“失灵”的事故曾多次出现,有的还发展成主设备烧毁事故。国内外曾多次发生在雷击时或在厂、站内接地短路时微机保护误动或死机,使事故扩大烧毁主设备或发展为“火烧连营”的事故。事后分析其原因:大都是因微机保护或综合自动化系统受到干扰造成的;另外,由微机控制的机电一体化设备、自动设备受到干扰而使控制失效的事例也时有发生。以上发生的问题,不能不让人担忧。因而对变电所微机保护、综合自动化等二次系统的干扰源和抗干扰措施进行研究,通过研究找出现有抗干扰措施上的不足、找出改进和完善的措施,从而提高微机保护综合自动化系统和调度自动化系统的抗干扰水平,确保电网的安全稳定运行有着非常重要的现实意义。

对于变电所微机保护、综合自动化等二次系统可能出现的雷电干扰、地电位干扰等,应研究这些干扰出现的形式、幅值和对微机保护、综合自动化装置的危害,重点在于找出防止干扰的措施,以保证微机保护和综合自动化系统的安全运行,这对保证发电厂、变电所计算机监控系统的安全稳定运行具有较好的现实意义和实际应用价值。

电力系统电磁兼容研究的主要目的和目标:对变电所微机保护、综合自动化等二次系统存在的谐波干扰、地电位干扰和雷电干扰进行深入的研究,对电力系统异常运行状态下、事故状态下所产生的干扰及干扰对计算机监控系统的影响进行研究,通过计算机仿真试验和各种模拟试验的手段,找出干扰的途径、方法和干扰的结果;建立雷电干扰、地电位干扰和谐波干扰的数学模型和物理模型,找出干扰的频域、耦合方式和危害;通过实验室和现场实验进行各主要干扰的理论研究和现场研究,找出抗干扰的措施,对目前变电所微机保护、综合自动化等二次系统所采用的抗干扰措施进行分析、试验和研究,对高电压设备的电场干扰、大电流所产生的磁场干扰进行研究,对电容耦合、电感耦合和阻抗耦合进行分析,对屏蔽电缆的各种接地方式及其对计算机监控设备的影响进行试验研究,找出在不同使用场所正确的

接地方式,找出变电所微机保护、综合自动化等二次系统在抗干扰上存在的薄弱环节和不足以及相应的改进措施,从而防止微机保护、综合自动化误动、拒动,保证电力系统的安全稳定运行。

第二节 电力系统电磁兼容的发展

国际上电磁兼容(EMC)的发展迅速、经历了从“路”到“场”、从低频到高频、从狭义的电磁干扰到广义的电磁兼容。EMC的研究,已从电力行业、通信行业、IT行业发展到其他相关行业。欧美发达国家对电磁影响的本质和传播途径、差模及共模干扰、干扰源及其分类、窄频干扰、间歇性的宽带干扰、瞬态干扰、雷电电磁脉冲(LEMP)、核电磁脉冲、环境等级、耦合机理与防护措施、电磁屏蔽理论、电磁兼容的敏感性测量技术、典型电磁兼容问题、电磁兼容标准进行了大量的研究,建立了若干个抗干扰研究机构,如CISPR(国际无线电干扰特别委员会)和TC-77[国际电工委员会电气设备(包括网络)之间的电磁兼容性],进行了EMC大量的课题研究。另外,CIGRE(国际大电网会议)、CCITT(国际电报电话咨询委员会)和IEE-EMC(跨国电气电子工程师学会电磁兼容专业委员会)等定期召开学术会议进行学术交流对EMC领域中的各个层面进行研究,对大家共同关心的问题如EMC标准、测量技术、电缆与接地、过电压保护、设备电磁兼容、发电厂和变电所电磁兼容、雷电、静电感应、生态效应等进行了大量的研究,取得了许多成果。国内科研院所、大专院校对电磁兼容问题进行过大量的研究,武汉高压研究院和中国电力科学研究院建设了具有世界水平的电磁兼容研究室,对电磁兼容建立了相应的行业标准和国家标准,对电磁兼容也进行了系统的理论研究和实际应用研究。如对电力系统谐波效应及谐波抑制、谐波标准、变电所暂态干扰、高频辐射干扰、静电干扰、电磁干扰及防护、干扰信号的测量和试验进行了系统的研究。各微机保护和综合自动化系统的生产厂家和科研机构对产品的抗干扰措施进行了研究,如硬件系统的滤波、光隔等,软件系统的看门狗、容错技术以及不间断电源等,使计算机系统的抗干扰水平有了很大的提高,但是这些具体的产品抗干扰措施虽然有较大发展。特别是制定了一系列的电磁兼容标准和试验检测方法。但是由于电磁兼容问题属于边缘科学,人们对电磁兼容有一个逐步认识过程,至今还有许多方面没有为人们所认识,有些已得出的结论也可能是错误的。例如:由于计算机技术的高速发展与普及,而在计算机各种抗干扰措施的研究上,特别是在雷电干扰、地电位干扰以及高次谐波干扰的防护上存在不足和漏洞;在某些干扰模型的建立和计算上也存在一些问题,特别是在大电流接地短路状态下的地电位干扰、地电位的干扰方式、屏蔽电缆的接地方式、杂散电容的耦合方式和雷电对计算机监控系统影响的研究上;电力系统计算机监控系统的抗干扰措施的研究上存在着不足,以至于在电力系统微机保护、综合自动化和通信设备运行时由于受到各种干扰的影响,误动、拒动和错动的情况时有发生,有时甚至造成元器件损坏对电力系统的安全稳定运行构成了极大影响。

第三节 电力系统电磁兼容研究的内容和目标

随着电力系统的发展,微机保护、综合自动化系统、调度自动化系统等微电子元件在电

力系统中有大量应用,但由于微电子元件对干扰的敏感性,而电力系统又存在大量的电场干扰、磁场干扰、静电干扰、谐波干扰及雷电干扰。特别是电力系统的微机保护、综合自动化系统、调度自动化系统要在电力系统故障和电网异常运行时可靠的工作,而这时也正好是各种干扰最为严重的时候,电力系统中因发生干扰而使继电保护误动、拒动和错动,甚至造成微机保护和综合自动化插件损坏的事故时有发生。在电力系统中处于同一电力系统中的各种电气设备通过电的或磁的联系彼此紧密相连,相互影响。由于运行方式的改变、故障、开关操作等引起的电磁振荡会波及很多电气设备,使这些设备的工作性能受到影响,甚至遭到破坏。即使在正常的运行状态下,某些整流设备及非线性元件等产生的谐波也会危害其他设备,因此,电力系统内部存在着大量的电磁兼容问题。而电力系统中的电磁骚扰大致可分为三种情况:一次设备之间、一次设备与二次设备之间、二次设备之间。变电所是一次设备和二次设备最集中的场所。一次回路中的开关操作、雷电流及短路电流在接地网上引起的电位升高、甚至二次回路中电缆之间的电磁耦合,都会对二次回路产生骚扰。因而电力系统的电磁兼容研究的对象为:

- (1) 微机保护的电磁兼容。
- (2) 综合自动化系统的电磁兼容。
- (3) 自动装置的电磁兼容。

电力系统的电磁兼容研究的对象内容如下。

1. 雷电干扰

雷电干扰是指雷击线路、构架、变电设备或控制楼对控制设备、保护设备造成的干扰。现在电力系统一次设备的防雷措施已趋完善,但在弱电系统上还存在较多弱点和漏洞,电力系统中曾发生过不少雷电打坏微机保护和综合自动化设备的事故,有的还造成了保护误动、拒动使事故扩大。因而弱电系统的防雷电干扰已变得十分迫切。

2. 高压隔离开关或断路器的操作

这些操作可能在母线或线路上引起含有多种频率分量的衰减振荡波,产生操作过电压。将暂态电磁场的能量或过电压直接耦合至二次回路,对二次系统产生干扰。

3. 系统短路故障

系统短路故障发生时正是要求微机保护和监控系统可靠工作的时候,但这时也正是各种干扰最为严重的时候,比如由于铁磁元件的饱和造成的谐波干扰、由大电流入地引起地网电位的升高、由电源电压的变化造成的电源干扰,都会对二次系统造成严重的影响。

4. 局部放电(电晕、沿面放电)

局部放电时产生频率较高的电磁辐射,可能在电子设备的线路中引起干扰。

电力系统的电磁兼容研究的目标为:通过对电力系统的谐波干扰、雷电干扰、静电干扰和地电位干扰对微机保护、综合自动化、调度自动化系统的影响进行研究,找出干扰的途径和干扰的方式,干扰对计算机系统造成的影响和后果。对电磁兼容进行理论分析和实际应用研究,如对电力系统的电磁干扰环境特别是在异常运行和故障状态时的暂态干扰进行研究,分析研究电力系统故障时,是否存在以前没有涉及到的干扰及干扰对计算机监控设备的影响。对计算机监控系统的抗干扰措施进行分析,找出其存在的不足,从而找出解决干扰的方法,重点找出计算机监控设备硬件和软件的抗干扰措施。

第四节 电力系统电磁兼容名词术语和基本概念

一、电磁兼容基本名词术语

- (1) 干扰源——任何产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统或自然现象。
- (2) 辐射干扰——由任何部件、天线、电缆或线路辐射引起的电磁干扰。
- (3) 传导干扰——沿着导体传输的电磁干扰。
- (4) 电磁骚扰——任何引起装置、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。
- (5) 电磁干扰——电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能下降。
- (6) 电磁环境——存在给定场所的所有电磁现象的总和。
- (7) 电磁噪声——一种明显不传送信息的时变电磁现象，它可以与有用信号叠加组合。
- (8) 无用信号——可损害有用信号接收的信号。
- (9) 抗扰度——装置、设备或系统面临电磁骚扰而不降低运行性能的能力。
- (10) 电磁敏感性——存在电磁骚扰的情况下，装置、设备或系统不能避免性能降低的性能。
- (11) 电磁易损性——系统在人为恶劣环境中遭到一定程度的机理性威胁后，在执行任务时经常出现有限度降级的一种特性。
- (12) 干扰抑制——削弱或消除电磁干扰的措施。
- (13) 电磁兼容性——装置、设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰能力。
- (14) 抗扰性电平——将某给定的电磁骚扰施加于某一装置、设备或系统而其仍能正常工作并保持所需性能等级时的最大骚扰电平。
- (15) 抗扰性限值——规定的最小抗扰性电平。
- (16) 抗扰性裕量——装置设备或系统的抗扰性限值与电磁兼容电平之间的差值。
- (17) 系统间的电磁兼容性——给定系统与它运行所处的电磁环境，或其他系统之间的电磁兼容性。
- (18) 系统内的电磁兼容性——在给定系统内部的分系统设备、各部件相互之间的电磁兼容性。
- (19) (电磁) 兼容电平——预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上的最大电磁骚扰电平。
- (20) 电磁兼容裕量——装置、设备或系统的抗扰性电平与骚扰源的发射限值之间差值。
- (21) 屏蔽——用来减少场向指定区域穿透的措施。
- (22) 电磁屏蔽——用导电材料减少交变电磁场向指定区域穿透的屏蔽。
- (23) 屏蔽效能——对给定外来源进行屏蔽时，在某一点上屏蔽作为安放前后的电场强度或磁场强度之比，通常以 dB 来表示。

二、电磁兼容的基本概念

1. 电磁干扰的分类

- (1) 按传播途径可分为传导干扰和辐射干扰。其中：传导干扰的传输性质有电耦合、

磁耦合及电磁耦合；辐射干扰的传输性质有近区场感应耦合及远区场感应耦合。

(2) 按干扰源的性质可以分为自然干扰和人工干扰。自然干扰包括宇宙干扰、天线干扰及雷电干扰；人为干扰包括工业干扰、辐射干扰、传导干扰、串扰、天线端传导干扰、宽带干扰、窄带干扰、有害干扰、大功率效应及电磁脉冲。

(3) 按干扰频带可以分为窄带干扰和宽带干扰。

2. 电磁干扰三要素

形成所有电磁干扰都是由三个基本要素组合而成的，即电磁干扰源、干扰传播途径（或传输通道）和敏感设备这三要素组成，称为电磁干扰三要素。

习 题

1. 电力系统电磁兼容研究的对象和内容是什么？
2. 简述电力系统电磁兼容的重要性。
3. 什么是电磁干扰三要素？

第二章 电力系统的电磁环境分析

电力系统正常运行的首要条件是各种大型电力设备（大型电力变压器、大型发电机等）的正常运行，而其中影响设备正常运行的一个主要问题就是大型电力设备绝缘状况。如何对大型电力设备的绝缘状态进行监测和诊断，是当前电力系统实现设备的状态检修的根本前提；此外，随着现代工业的发展和进步，电力系统的电磁兼容问题变得日益严重，社会各方面对电力系统的变电站、输电线路等也提出了电磁环境方面的要求，因此也需要对电力系统的电磁兼容问题进行深入的研究。

电力系统是由一、二次设备组成的特殊电磁环境，其中存在着多种电磁干扰和相互作用。当前电力系统正朝着电压等级更高、容量更大、电力网络更密集、系统更复杂、设备更先进的方向发展，导致电力系统产生的电磁干扰更严重、更复杂。另一方面，先进的电力系统采用了更多的自动化设备及计算机等控制、测量、通信和保护系统，而以固态电子为基础的先进设备和系统耐受电磁干扰的能力更弱，更容易受外界电磁环境的影响。因此，电力系统中的电磁兼容问题日益突出。关于发电厂、变电所自动化系统的抗干扰问题也越来越受到电力系统的重视。

第一节 发电厂、变电所的静电干扰

静电的起因是两种不同物质的物体互相摩擦时，会使正负电荷分别积累在两种物体上。在静电场中，人体和设备、导体和非导体都会感应出不同的电荷产生静电，形成电压，干扰系统的工作。由于人体、导体和绝缘体上都带有正电或负电，特别是物体移动时，会因摩擦而使物体的某个部分带有电荷，或使物体原有电荷重新分布。

静电干扰造成的危害越来越引起人们的关注。实验表明，当带电体表面电荷面密度达到 10^{-6}C/m^2 时，就会产生明显的宏观静电现象。在空气中，如果场强达到 30kV/cm 时，就会产生明显的电火花放电现象，也就是产生静电放电。静电放电（ESD）是指具有不同静电电位的物体相互靠近或直接接触时引起的电荷转移。ESD 接受者首先受到与电荷有关的电场作用，然后，当发生介质击穿时就有一次性复杂的瞬态电流的放电，产生一个瞬态的电磁场。ESD 现象与环境的湿度、温度、周围电介质的性质等密切相关。ESD 现象表现为两个方面：ESD 电流及由 ESD 电流产生的场。

一、ESD 干扰机理分析

对于电子设备而言，主要的 ESD 干扰源是人体所带的静电。在静电放电抗扰度试验中，静电放电发生器模拟的就是人体静电的放电过程。在设备使用环境中存在人们无法预计和控制的 ESD 干扰源，所以在产品设计时必须遵从和满足相关电磁兼容产品标准的严酷度等级要求。

ESD 对设备产生的干扰有两种主要传播途径，即传导耦合和电磁场耦合。

传导耦合可以分为以下几种情况：一种情况是 ESD 直接施加在设备上，通过直接接触

放电或空气放电的方式,设备本身成为静电放电的通道。这种情况下,对于设备内部的单板或敏感电路而言,又可能存在两种传导干扰方式。一是单板或敏感电路是 ESD 电流泄放通道的一部分,另外,如果单板与系统地只有单点接地,其他地方与系统地有足够的隔离,则 ESD 会通过共地产生干扰。另一种情况是,如果不同的设备通过信号线连接或共地,则对其中一个设备施加 ESD 时,可以通过信号线或共地对其他设备产生传导干扰影响。

电磁场耦合也有几种情况:一种情况是设备附近如果有其他设备遭受 ESD 干扰,这时设备可能会受到邻近设备 ESD 产生的干扰电磁场的影响;另一种情况是 ESD 施加在设备上时,设备本身的静电泄放电流在内部空间产生干扰电磁场,这种干扰电磁场可以对内部的敏感电路产生干扰影响。

在发电厂、变电所中,经常会发生静电感应。当有带电的雷云出现时,在雷云下面的建筑物和传输线路上会感应出与雷云相反的束缚电荷。这种感应电荷在低压架空线路上可达 100kV 静电电位,信号线路上可达 40~60kV 静电电位,一旦雷云放电后,束缚电荷迅速扩散,即引起感应雷击。

二、静电对自动化电子设备的影响

随着电力系统自动化水平的不断提高,电子设备在电力系统中的应用更加广泛,电子设备使用的电子元件从电子管发展到晶体管、集成电路以及大规模和超大规模集成电路,其工作电压也在一级级地降低,由原来的几十伏降低到几伏,信号电压也变得更小,而运行速度却越来越快,这就使得电子设备对外界的干扰变得更加敏感,也就是说,导致其损坏或误动所需要的干扰信号的幅值和能量越来越低。变电所是电力系统中一次和二次设备最集中的场所,继电保护、控制装置等设备通过控制回路、测量回路、通信线以及电缆与一次设备相连,电磁耦合更加紧密,电磁兼容问题也显得更为突出。

在电子控制设备外壳上放电是经常见到的放电现象,放电电流流过金属外壳,产生电场和磁场,通过分布阻抗耦合到壳内的电源线、信号线等内部走线,引起误动作。

1. 电压型损伤

由于带静电高压的物体通过器件引脚进行放电,导致器件电压型损伤。其损伤类型大致分为四类。

(1) 栅氧穿通。MOS 晶体管或 MOS 电容器由静电放电 (ESD) 引起的主要损伤机理之一是栅氧化层击穿,当加在栅氧化层上的静电电压超过二氧化硅介质的耐压时就会发生栅击穿失效。一旦发生栅击穿,当存在足够大的静电能量时,击穿点就会出现短路。

(2) 气体电弧放电。器件芯片表面存在间距很小,表面又无钝化保护的金属化条时,气体的电弧引起器件性能降低和金属化变质,甚至熔化。对这种失效机理比较敏感的器件有声表面滤波器件和存在薄金属又无钝化保护的微波电路及微波器件。其典型情况是键合引线与电源线之间的放电失效。

(3) 多晶电阻与铝金属氧化线间的介质击穿。多晶硅工艺的多晶电阻条是埋在氧化层内部的,多晶电阻上的氧化层比较薄,而多晶电阻条上常有跨越的铝金属化线。当 MOS 电路输入薄电路中的多晶保护电阻上有跨越过的地或电源铝金属化线时,输入端引线可导致该处介质发生击穿短路。

(4) 铝金属化与掺杂扩散区短路。铝金属氧化线与反型的渗杂扩散区短路,类似于铝金属化与多晶电阻之间的短路。短路部位常发生在与压焊区连接的扩散电阻和横跨其上的电源

或地的铝条之间,所不同的是铝金属化与扩散区之间的氧化层比铝金属化与多晶电阻之间的氧化层相对厚一些,因此出现击穿短路的几率比较小。

2. 电流型损伤

(1) PN 结短路。因为半导体材料的热时间常数与静电放电脉冲的瞬态时间相比一般是比较大的,所以对有效面积很小的结(如发射极与基极的 PN 结)在功率耗散面积上几乎没有热扩散,而在元器件内部则会形成大的温度梯度,从而导致结的局部熔化。PN 结的 ESD 电流型损伤一般由瞬间二次击穿引起。

(2) 铝和多晶硅条在大电流作用下的损伤。当静电放电电流流过铝金属氧化连线或多晶硅条时,可能会因其局部温度增至熔融而失效。现在以建立理论模型来计算各种材料在一定横截面积下可通过的电流,确定多大电流才会导致金属连线或多晶硅发生失效。

三、静电放电会产生强烈的电磁辐射形成电磁脉冲

人们在研究静电放电危害时,主要关心的常是静电放电产生的注入电流对电工、电子器件、电子设备及其他静电敏感系统的危害,静电放电电流瞬时流经计算机机壳,对信号线、电源线会产生感应干扰。静电产生的高压会引起工作地、安全地的电位变动,损坏设备元器件。由于计算机的高速、大容量、小型化意味着半导体元件的高密度和大集成,将对静电干扰十分敏感,静电可击穿 MOS 电路,使受控器件(各种工业机器人等)误动或运算错误,而这些影响是随机的、不重复的,也是难以寻找和排除的。

但是,近年来随着静电测量技术、测量仪器和测量手段的迅速发展,使人们对静电放电这一瞬态过程的认识越来越清楚。在静电放电过程中会产生上升时间极快、持续时间极短的初始大电流,并产生强烈的电磁辐射形成静电放电电磁脉冲,其电磁能量往往会引起电子系统中敏感部件的损坏、翻转,或使保护装置误动。所以,静电放电电磁脉冲已受到人们普遍重视,作为近场危害源,许多人把它与高空核爆炸形成的核电磁脉冲及雷电放电时产生的雷电电磁脉冲相提并论。

第二节 发电厂、变电所的电磁干扰

电磁干扰(EMI)是当在由另一个电子设备产生的射频频谱(RF)内的电磁场附近对电子设备进行操作时产生的干扰。中等或高能量的无线电发射机可以产生足够强的电磁场而扰乱了附近电子设备的正常工作。

发电厂、变电所内一次回路和二次回路之间存在着电和磁的联系,因此,在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形成干扰。高压电气设备的操作、低压交流和直流回路内电气设备的操作、雷电引起的浪涌电压、电气设备周围静电场、电磁波辐射和输电线路故障所产生的瞬间过程等都会产生电磁干扰。这些干扰进入发电厂、变电所内的自动化系统或其他电子设备,就对能引起自动化系统工作不正常,甚至损坏设备。发电厂、变电所中的电磁干扰主要有两种类型:一是磁场干扰,二是电容耦合干扰。

一、磁场干扰

由于发电厂、变电所一次设备中一般通过的通常是交流电,因此它将在二次回路敷设空间产生交变磁场,由于磁场的变化,它就会在二次回路中产生交变的感应电压。如图 2-1 所示。设 L_0 为一次线路, L_2 为二次电缆, L_m 为电缆屏蔽层, I_0 为一次电路的电流值,

M_{20} (一次线路与二次电缆芯线的互感) 为 I_0 的角频率, M_{m0} 为一次回路与电缆屏蔽层的互感。当屏蔽层两端不接地时, I_0 对电缆芯产生的干扰电压 E_2 为

$$E_2 = -jM_{20}I_0 = -jM_{m0}I_0(2-1)$$

由式 (2-1) 可知, 干扰电压的大小由 M_{m0} (或 $M_{20}2-1$) 的大小决定, 即由一次设备与二次回路的相互空间位置来决定。

二、电容耦合干扰

由于一次设备载流体对二次回路间存在有电容, 如电压互感器和电流互感器一、二次绕组之间的电容, 电容式电压互感器的中间变压器两绕组之间的电容以及高压母线与二次回路之间的寄生电容等等, 因此一次设备对二次电缆产生电容干扰, 造成电场耦合干扰的原因是两根导线之间的分布电容产生的耦合, 如图 2-2 所示。设 U_1 为一次设备带电体电压、 C_{1a} 为一次设备与二次电缆间的电容、 C_{aa} 为二次电缆对地电容、 U_a 为由电容耦合在电缆芯上产生的电压, 则得

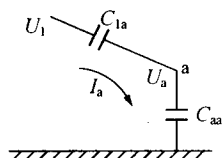


图 2-2 两根导线之间的电容耦合

$$U_a = U_1 C_{1a} / (C_{aa} + C_{1a}) \quad (2-2)$$

因 $C_{aa} \gg C_{1a}$, 故式 (2-2) 变为

$$U_a = U_1 C_{1a} / C_{aa} \quad (2-3)$$

第三节 发电厂、变电所的辐射干扰

在电力系统中, 辐射干扰虽不像传导干扰和耦合干扰那样普遍, 但是在某些情况下也不容忽视。例如, 高压变电所中的局部放电 (电晕、沿面放电等)、开关操作以及直流换流站中换流阀导通和关断时都会产生高频电磁场辐射。

一般来说辐射干扰波及的范围广、传播的距离远, 虽然能量较小、很少损坏二次设备, 但是往往对敏感度高的二次设备能够产生不可忽视的干扰, 而且辐射都和传导、耦合相伴而生, 加强了干扰作用。

一、高压变电所的高频辐射干扰

高压变电所中的局部放电是主要干扰源。高压导线表面及绝缘子金具尖端部位的电晕放电、接触不良产生的火花放电以及污秽绝缘子表面的局部电火花等都会产生电磁辐射形成辐射干扰源; 另外, 变电所中的高频载波、对讲机等也会产生不容忽视的辐射干扰。以上这些干扰源都应在二次回路设计时予以考虑。

当然, 附近的雷电现象以及大功率的发射机, 如电台、通信等也会影响到变电所中的敏感设备。

1. 电晕

电晕放电时不断形成流注, 引起强烈的电流脉冲, 这些电流脉冲将产生电磁波传播到空间。在工频交流电压下, 由于每半周内都存在电晕的起始和熄灭阶段, 故能辐射出大量电磁

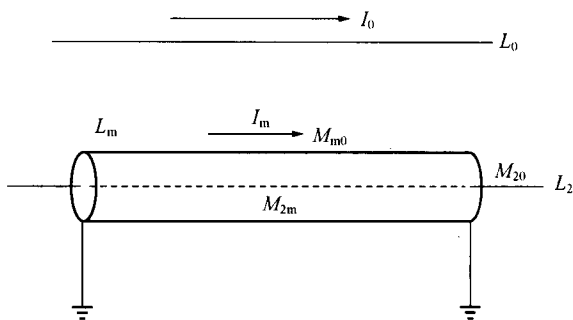


图 2-1 一次设备对二次回路产生的磁场干扰

波,形成电磁干扰。

电晕干扰的强度决定于很多参数,其中有些参数与导线的几何特征有关,如导线的尺寸、几何位置及导线表面的电位梯度等。所有这些参数都可以精确地确定。而且我们可以利用这些参数定量地计算干扰强度。但是,还有一些参数主要决定于周围环境。例如导线的表面状态和气候条件、海拔等。这些参数的影响很难精确估计,因为它们都带有很大的随机性。

(1) 导线参数的影响。导线表面电场强度的提高导致干扰强度的增加。电场强度和干扰强度之间存在线性关系。当电场强度不变时,增大导线半径,干扰水平也随之增加,这是由于电晕脉冲功率增加的缘故,采用分裂导线是降低电晕干扰的重要措施之一。分裂导线产生的电晕干扰强度和分裂导线的根数有关。

(2) 导线表面状态的影响。表面光滑的导线起始电晕电压比较高。当导线表面粗糙或有其他杂质或微粒附着在上面时,不论这些附着物是导体还是电介质,都会形成流注的发源地而使起始电晕电压降低、电晕干扰增强。

导线表面油污也是使电晕增强的重要因素。涂在导线表面的油脂主要是为了防止在运输及放线过程中导线之间以及导线与地面之间摩擦损伤导线。钢芯铝绞线的钢芯上也常常采用涂油的方法来防止腐蚀。当气温升高时,油流出来形成表面油污。这些油污粘住空气中的灰尘及昆虫,增加导线表面的粗糙程度,电晕干扰强度也随之增加。

新架设的导线往往由于在制造、运输及架设过程中不当心使表面损伤,因此新投入运行的变电所干扰数值往往比较高。运行一段时间以后,导线表面被灰尘覆盖,而这些灰尘又被导线电晕炭化。这种灰尘最终形成均匀的黑色薄层覆盖在导线的表面上,这就是人们熟悉的老化现象。导线的老化可以明显地降低干扰强度。运行经验表明,新导线运行数月以后,干扰强度大约下降 6dB。经过 4~5 年以后就可以完成老化过程,干扰强度可下降 10~12dB。

(3) 气象条件的影响。电晕干扰与环境的气象条件关系很大。大气的温度、压力、湿度、雨量、风等都会影响电晕放电的强度。观察的结果表明,随着昼夜季节的变化,电晕干扰的强度呈周期性变化。在干燥的气候条件下,夜间的干扰强度比白天低约 5~8dB,天亮以后干扰强度逐渐增加,大约在下午两点钟至四点钟之间达到最大值,然后又开始下降。在一年之中:冬季,干扰最小;春夏两季,由于植物种子、大气中尘埃增加,昆虫活跃,使干扰增大;秋季,雨水冲洗导线表面,干扰强度下降。

在气象条件中,雨水的影响最大。雨水可以冲掉导线表面的附着物,使电晕减弱,也可以形成水滴增加电晕干扰源。但是一般来讲,随着雨量的增加,干扰强度呈增加趋势,然后

趋于某个饱和值。图 2-3 为干扰强度与雨量的关系曲线。

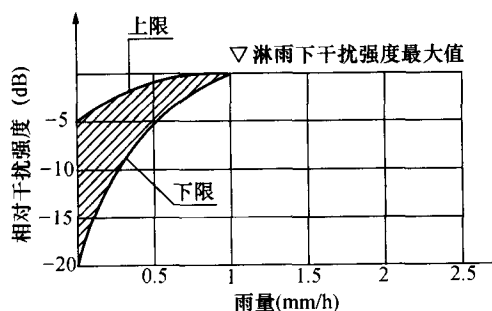


图 2-3 干扰强度与雨量的关系曲线

由图 2-3 的曲线可以看出,当降雨量大于 1mm/h 时,干扰强度达到稳定值。当降雨量小于 1mm/h 时,干扰强度具有分散性。降雨量愈小,分散性愈大。这是由于当雨量过小时,不足以冲掉导线表面的附着物,因而干扰强度具有分散性。随着雨量增加,导线表面被冲洗,使原来影响放电分散性的那些表面因素逐渐减