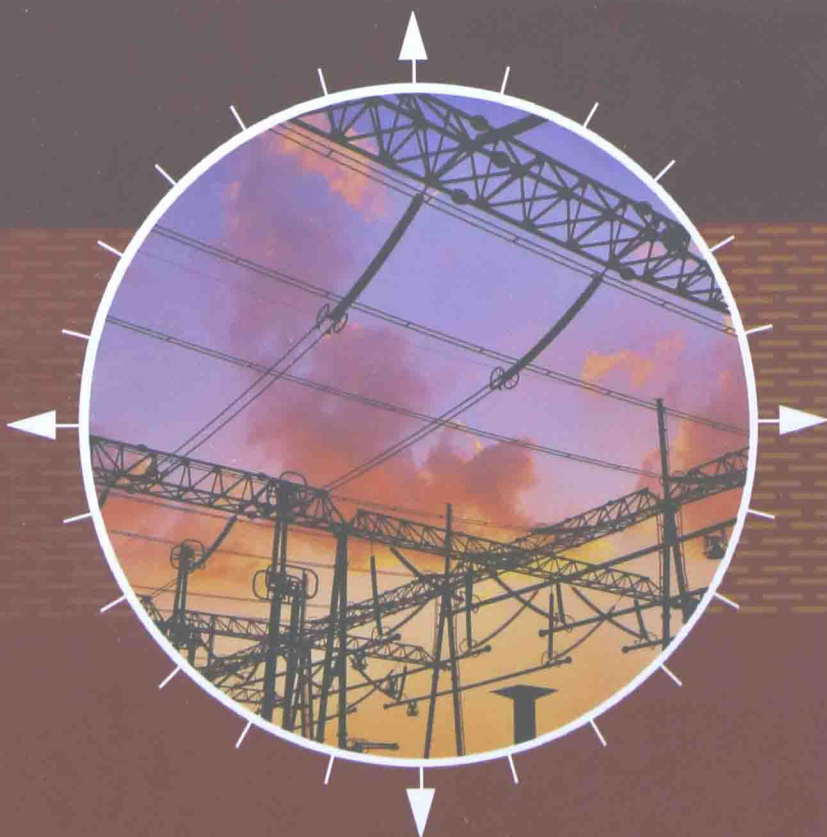


Study on EMI of Communication Equipment in Substations

变电站内电力通信设备 电磁干扰分析研究

马海杰 安 勃 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Study on EMI of Communication Equipment in Substations

变电站内电力通信设备 电磁干扰分析研究

马海杰 安 勃 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书对变电站和换流站内电力通信设备面临的电磁环境进行了现场测量,按不同电压等级、不同测试位置进行了暂态和稳态方面的测试,得到变电站工频电场、工频磁场、开关操作等产生的电磁干扰特性,为将要采取的防护措施提供了实测依据。

全书共 10 章,主要包括电磁兼容研究意义和现状、变电站常见干扰源及分类、变电站电磁干扰传播及耦合、变电站和换流站电磁环境测试介绍、500kV 变电站稳态电磁干扰测量及分析、220kV 变电站稳态电磁干扰测量及分析、220kV 智能变电站稳态电磁干扰测量及分析、500kV 换流站稳态电磁干扰测量及分析、220kV 变电站通信机房暂态电磁干扰测量及分析、变电站和换流站电磁干扰测量总结。

本书可作为普通高等院校通信与信息系统、电力工程等相关专业的教学用书,还可作为电磁兼容、电子设备电磁防护设计等领域从事相关工作的研究人员和工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

变电站内电力通信设备电磁干扰分析研究/马海杰,安勃著. —北京:中国电力出版社,2015.2

ISBN 978-7-5123-6369-4

I. ①变… II. ①马…②安… III. ①电力通信系统—通信设备—电磁干扰—研究 IV. ①TM73②TM15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 195910 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 8 印张 133 千字

印数 0001—2000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

电磁兼容是一门交叉性很强的学科，涉及的基础知识非常广泛，主要包括电磁场理论、电工原理、电子技术、电磁测量、信号分析、机械结构、自动控制、材料及工艺等。电磁兼容研究的内容主要包括电磁干扰特性及其传播理论、电磁兼容分析与预测、电磁兼容评价、电磁抗扰度、测量及试验技术、防护技术、技术标准与规范等诸多方面。

本书调研了国内外电力行业电磁兼容、变电站电磁环境及干扰耦合路径以及通信与电子设备电磁兼容研究现状。其次对工业环境常见的电磁干扰源进行了初步研究及分类。再次对电磁干扰的传播途径以及耦合机理进行了系统梳理。根据变电站和换流站内电力通信设备面临的电磁环境进行现场测量，按不同电压等级、不同测试位置进行了暂态和稳态方面的测试，得到变电站工频电场、工频磁场、开关操作等产生的电磁干扰特性。通过对大量测量数据进行分析得到变电站稳态电磁干扰的数学特征参数，为将要采取的防护措施提供了实测依据。

全书共有十章：第1章绪论介绍电磁兼容研究意义；第2章针对变电站常见的电磁干扰源进行分类；第3章介绍了变电站电磁干扰传播及耦合路径；第4章针对变电站和换流站电磁环境制定测试方案；第5章至第8章总结了500kV变电站、220kV变电站、220kV智能变电站、500kV换流站稳态电磁干扰测量并对其数据进行分析；第9章总结了220kV变电站通信机房暂态电磁干扰测量并对数据进行了分析；第10章是变电站和换流站电磁干扰测量总结。

本书的研究工作得到了国家电网公司科技项目（TX71-13-038）、中央高校基本科研业务费专项资金资助（13MS63）等课题的资助。张卫东、陶

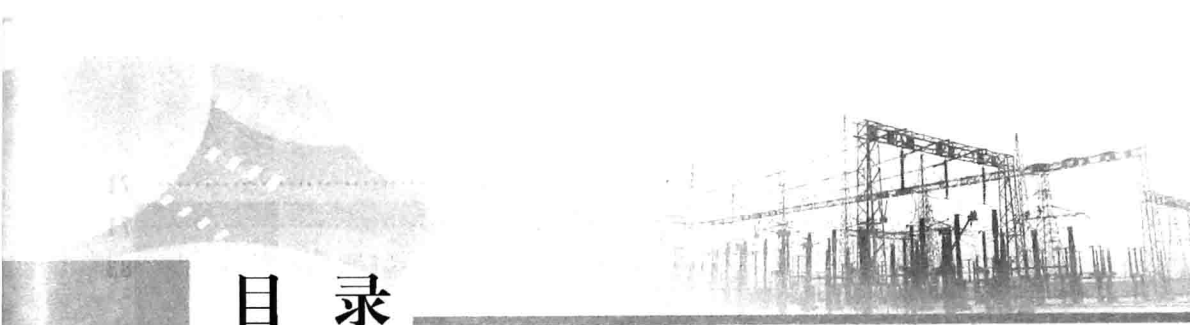
瑞祥、王昊天、郭韶杰、靳洋、王智慧、刘国军等人参与了课题研究，对本书的编写提供了帮助。本书的顺利完成得到了华北电力大学领导和同事们的大力支持和帮助，在此一并致谢！

由于时间和水平的限制，相关理论和技术还有待于进一步深入研究，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

著 者

2014.12

于河北保定



目 录

前言

1	绪论	1
1.1	电磁兼容研究意义	2
1.2	国内外电磁兼容研究现状	3
2	变电站常见干扰源及分类	9
2.1	干扰源分类	9
2.2	变电站干扰源及其分类	12
3	变电站电磁干扰传播及耦合	18
3.1	电磁干扰传播途径	18
3.2	端口与电磁拓扑分析	20
4	变电站和换流站电磁环境测试介绍	24
4.1	电力通信设备电磁环境测量	24
4.2	变电站电磁干扰测量	27
5	500kV 变电站稳态电磁干扰测量及分析	31
5.1	实测点数据	31
5.2	测量小结	47
6	220kV 变电站稳态电磁干扰测量及分析	48
6.1	实测点数据	48
6.2	测量小结	69

7	220kV 智能变电站稳态电磁干扰测量及分析	71
7.1	实测点数据	71
7.2	测量小结	83
8	500kV 换流站稳态电磁干扰测量及分析	84
8.1	实测点数据	84
8.2	测量小结	90
9	220kV 变电站通信机房暂态电磁干扰测量及分析	91
9.1	变电站暂态测量内容及干扰特征分析	91
9.2	瞬时干扰测量结论	116
10	变电站和换流站电磁干扰测量总结	117
10.1	变电站空间稳态电磁场	117
10.2	电源稳态干扰	119
10.3	瞬态干扰	119
	参考文献	121



绪 论

电磁骚扰指的是“任何可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象”。电磁骚扰只有在影响敏感设备正常工作时，才构成电磁干扰。电磁干扰指的是电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的降低，是电磁骚扰的后果。而电磁环境指的是“存在于给定场所的所有电磁现象的总和”。讨论电磁骚扰就离不开对电磁现象和电磁环境的讨论。国际电工委员会（IEC）对电磁兼容（Electro Magnetic Compatibility, EMC）的定义是“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的能力”。由此可见电磁兼容学科研究的主要内容即是如何使处于同一电磁环境下的各种电气电子设备或系统能够正常工作而不相互干扰，达到所谓的“兼容”状态。在我国电力工业的规划中，电网的建设与优化被列为重点。其中，超高压输变电工程支撑起主干网，并正在大力发展特高压输电技术。在变电站和换流站内，一方面，输电电压等级的提高使电磁干扰更为强烈；另一方面，变电站和换流站二次设备由于越来越多地依赖于微电子技术和计算机技术，对电磁干扰的敏感性却越来越强。电力系统综合自动化技术的实施，采用分层分布式的保护和控制系统后，需要把一些电子设备下放安置在变电站的高压开关场内，由此带来的电磁兼容问题更加突出。电磁兼容的三要素是干扰源、传播途径、敏感设备。电磁干扰源是指任何产生电磁干扰的元器件、设备、分系统、系统或自然现象；传播途径是指将电磁干扰能量传输到受干扰设备的耦合通道；敏感设备是指当受到电磁干扰源所发射的电磁能量的作用时，系统性能降低或失效的器件、设备、分系统或系统。本书侧重研究的是变电站、换流站内电力通信设备所处环境的干扰源、传播途径问题。

1.1 电磁兼容研究意义

随着电子和电气技术的发展,电磁兼容问题已引起世界各国的高度重视,产品的电磁兼容性能已经成为产品可靠性设计中一个重要的指标。近年来,随着电力工业的发展和新技术的采用,电力系统已经不仅是一个极强的干扰源,同样也是一个极易受干扰的敏感者。以微电子技术与计算机技术为基础的继电保护、自动装置、远动和通信装置等二次弱电设备在电力系统中广泛使用,它们的灵敏度高、信息量大、分布面广,很容易受到干扰。电力系统中,开关操作、雷电、辐射电磁场、工频磁场等原因所引起的干扰事件可能会造成保护装置误动,自动化设备不能正常工作,甚至造成元件或设备的损坏。

近年来,我国的直流输电技术得到大力发展与广泛应用。2012年以来,国家电网公司110(66)kV及以上交流线路开工4万km,投产3.5万km;直流线路开工3890km,投产2090km,换流容量开工3500万kW,投产870万kW。与变电站相比,由于换流站的换流阀在进行交、直流转换时伴随阀的导通与关断会产生重复性的瞬态干扰,因此阀厅内及其邻近区域的电磁环境更加复杂。

电力通信设备是变电站和换流站的信息传输系统的重要组成部分,是各种保护和监控设备之间的纽带。在电网中数据的获取、保护和控制信号的上传下达都必须依靠通信设备,因此电力通信设备是建立智能电网的基础之一,其高速、双向、实时、可靠运行直接关系到系统运行的安全。电磁干扰导致的设备故障如扩大到整个变电站和换流站范围,进而引发系统故障,不仅会造成重大经济损失,而且会带来不良的社会影响。因而研究电磁兼容以及防护技术对电力系统通信设备的影响,对电网的发展和安全稳定运行,具有重大意义。

尽管智能变电站的发展趋势是减少使用电缆、改用光纤传输、全站数字化,抗干扰能力将更强,但由传统变电站向智能变电站发展是有个过程的,目前大多还处于中间模式阶段,仍然存在传统的电磁干扰的问题。与此同时,变电站运行电压等级的提高、电子式互感器的使用、保护等电气设备的下放、变电站电气设备电源的一体化会对这些弱电设备提出更高的电磁性能的要求。变电站空间有限、各种电子设备的距离较近、主回路耦合强,这使得电磁干扰能量极易进入设备内部。电子设备元件众多且构造复杂,这些器件抵御电磁干扰能力非常差,像通信系统(载波、明线、无线通信系统)一般通过电介质承载电磁能量的方法进行信息传播,非常容易受到电磁干扰的影响而无法正常运行。如何提高处于恶劣电磁环境下的电子设备的抗干扰能力是很多学者研究的



主要内容。

电力通信设备是电力系统运行设备的组成部分,在讨论其电磁兼容问题时,不应该把它作为孤立的电子设备来进行,而要结合电力系统的电磁环境进行综合、全面地考虑。研究电力通信设备的电磁兼容性能,最终目的是提高其抵御各种电磁干扰的能力,同时降低设备对周围其他设备的干扰程度,从而提高系统运行的可靠性。然而设备抗干扰性能的提高并不是无限度的,这从技术上、经济上考量都是不现实的。从变电站和换流站总体电磁环境角度出发,对干扰源以及干扰耦合途径进行深入的研究,在此基础上,对电力通信设备所处的电磁环境进行合理的测量,才能获取电力通信设备将面临的电磁干扰水平,为今后采取抗扰度措施提供实测依据。

1.2 国内外电磁兼容研究现状

1.2.1 电磁兼容研究

电磁干扰是人们早就发现的电磁现象,1823年安培发现了电流产生磁力的基本定律。1831年法拉第发现电磁感应现象,总结出电磁感应定律,揭示了变化的磁场在导线中产生感应电动势的规律。1840年美国人亨利成功地获得了高频电磁振荡。1864年麦克斯韦综合了电磁感应定律和安培全电流定律,总结出麦克斯韦方程,提出了位移电流的理论,全面地论述了电场和磁场之间的相互作用,并预言电磁波的存在。麦克斯韦的电磁场理论为认识和研究电磁干扰现象奠定了理论基础。1881年英国科学家希维赛德发表《论干扰》的文章,标志着研究干扰问题的开端。1888年德国物理学家 Hertz 用实验证实了电磁波的存在,从此开始了人类对电磁干扰问题的实验研究。1889年英国邮电部门研究了通信中的干扰问题,使对干扰技术问题的研究开始走向工业化和产业化。

20世纪以来,随着电子技术的发展和应用,人们逐渐认识到对各种电磁干扰进行控制的重要性。特别是工业发达国家格外重视干扰控制,相继成立了国家级以及国际间的组织,如德国电气工程师协会、国际电工技术委员会 IEC、国际无线电干扰特别委员会 CISPR 等。为了解决干扰问题,保证设备和系统运行的电磁兼容性,20世纪40年代初有人提出了电磁兼容性的概念。1944年德国电气工程师协会制订了世界上第一个电磁兼容性规范 VDE 0878。1945年,颁布了美国最早的军用电磁兼容性规范 JAN-I-225。从提出电磁兼容性概念起,电磁兼容学科在认识、研究和控制电磁干扰的过程中得到了发展。

电磁兼容学科深入阐述了电磁干扰产生的原因, 分清了干扰的性质, 研究了干扰传输以及耦合的机理, 系统地提出了抑制干扰的技术措施, 促进了电磁兼容的系列标准和规范的制订, 建立了电磁兼容设计、分析和预测等一系列理论体系。

世界各国都十分重视电磁兼容问题研究, 基本形成了一套完整的电磁兼容技术工作体系, 包括理论研究、试验与测试、技术规范标准等。技术标准基本上反映了电磁兼容的特定技术指标、技术的进展、实用化水平, 相关标准开发组织也同样十分重视电磁兼容相关标准的制定, 国际上制定电磁兼容相关标准的组织主要有 IEC CISPR、IEC TC77 等, 其制定的电磁兼容标准是其他标准的基础。CISPR 负责制订频率大于 9kHz 的电磁发射部分的基础标准和通用标准, 如 IEC/CISPR 16 系列; TC77 负责制订 9kHz 以下及开关操作等引起的高频瞬态发射及整个频率范围内的抗干扰性基础标准和通用标准, 如 IEC 61000 系列。

国外从 20 世纪 60 年代开始了电力系统电磁环境和电磁干扰问题的研究, 特别是 1970 年以后逐步由定性研究转为定量研究。美国、欧洲等先进的工业化国家最先开展了电力系统电磁兼容技术的研究。EMC 性能在国际上已成为产品质量指标的一个重要部分, 先进的工业化国家从设备研制到工程应用的各个阶段, 都按电磁兼容标准对设备进行考核试验, 严格控制其电磁兼容质量。在提高产品 EMC 性能方面, 美国是最早开展研究的国家, 并制定了一系列标准及规范。欧盟还以法令的形式规定了 EMC 标准以及相应的市场准入制度, 没有 EMC 试验合格标志的产品不准进入共同体市场。

在干扰测量和分析方面, 最具代表性的是美国电力研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 自 1978 年开展的以变电站电磁瞬态为课题的专项研究工作。全部工作历时十余年, 分两个阶段完成。

第一阶段的研究工作于 1983 年结束, 并提出了研究报告。该报告介绍了测量系统的研制、变电站电磁环境的测量和数据分析方法以及初步结果, 其中的测量数据包括一个 345kV 变电站、一个 500kV 变电站的实测结果和一个高压实验室的模拟测量结果。在测量瞬态电磁干扰的同时, 还对变电站的背景噪声和由广播发射机或步话机等有意辐射引起的窄带干扰信号进行了测量研究。

第二阶段的研究工作从 1986 年至 1993 年。测量工作涉及 7 个空气绝缘变电站 (Air Insulated Substation, AIS) 和 2 个气体绝缘变电站 (Gas Insulated Substation, GIS), 共组织了 13 次集中现场测试, 测得 800 多次事件的 3000 多个干扰波形, 数据量约 500MB。基于此项工作, 提出了完整的研究报告, 发表了一系列的论文。



2007~2009 年,在英国工程和自然科学研究委员会 (EPSRC) 的资助下,斯特莱斯克莱德大学 (University of Strathclyde) 联合巴茨大学 (University of Bath) 对物联网无线传感单元应用在变电站时受到的各类脉冲电磁干扰做了一些前沿研究工作。

我国对电磁兼容理论和技术的研究起步较晚,直到 20 世纪 80 年代初才有组织系统地研究并制订电磁兼容性标准和规范。广播、邮电、交通、船舶、航天和军工等行业在电磁兼容研究方面起步较早,结合各自的行业特点开展了许多很有成效的研究工作。20 世纪 80 年代,随着基于微电子技术的继电保护装置的应用与推广,变电站的电磁兼容问题在电力部门开始得到关注。由于欧共体从 1996 年 1 月 1 日起执行“89/336/EEC 电磁兼容性指令”,这使得我国各行业加大了对电磁兼容问题的研究力度。1981 年颁布了我国第一个较为完整的标准 HB 5662—1981《飞机设备电磁兼容性要求和测试方法》。此后,我国在标准和规范的研究与制订方面有了较大进展,已制定了近百个国家标准和国家军用标准。我国对应 CISPR 成立了“全国无线电干扰标准化技术委员会”,对应 TC77 成立了“全国电磁兼容标准化联合工作组”,并根据 IEC 61000 系列制订了 GB/T 17626 系列标准。电磁兼容问题的研究除了共性技术研究外,具有重要的行业应用需求驱动特点,电磁兼容问题在铁路运输、航空航天、武器装备、电信等行业显得十分重要,相应带动了有关领域电磁兼容问题的研究。典型的研究试验室包括北京交通大学电磁兼容试验室、北京航空航天大学电磁兼容研究所、北京邮电大学电磁学及电磁兼容研究所等,这些研究机构在电磁兼容技术领域取得了大量研究成果。中国电子学会电磁兼容分会,中国电机工程学会电磁干扰专业委员会,中国电工技术学会电磁兼容专业技术委员会等学术组织也在电磁兼容领域开展大量工作。中国通信协会电磁环境与安全防护专业技术委员会开展了电信设备的电磁兼容、雷击与强电的防护、电磁辐射对人身安全与健康的影响以及电磁信息安全的研究和标准化工作,根据研究领域的分工,主要对口 ITU-TSG5,另外分别与 IEC/CISPR、EN、IEEE、WHO、ANSI 等组织开展对口研究工作。

1.2.2 电力行业电磁兼容研究

国外从 20 世纪 60 年代开始了对变电站电磁环境和电磁干扰问题的研究,特别是 70 年代以后由定性研究转为定量研究。其中,美国电力研究院历时 20 余年完成了变电站中瞬态电磁干扰的测量和分析工作。为指导发电厂和变电站的电磁兼容设计,1997 年 12 月国际大电网会议 WG36.04 工作组发布了国际大电网会议第 124 号导则,即《发电厂和变电站电磁兼容导则》。而在 2002 年

国际大电网会议上俄罗斯专家也发表了他们在长达 15 年时间内对多个从 110kV 至 750kV 变电站电磁兼容研究工作取得的部分成果,内容涉及变电站电磁环境评估、开关操作对二次回路的电磁干扰和电磁环境改善等方面,成果表明按传统观念设计的变电站产生的干扰和电磁场强度对二次回路中的控制保护等设备是有危害的,必须采取相应的防护措施。

国内电力行业同样对电磁兼容问题开展了大量研究。中国电力科学研究院、国网电力科学研究院(国网南京自动化研究院)、国网武汉高压研究院、华北电力大学、四方公司、清华大学和武汉大学等单位相继开展了有关的研究工作。中国电力科学研究院很早就开展对高压线路、变电站的典型场景的电磁环境进行研究,建立了电力系统电磁兼容试验室,针对电力行业电磁兼容特点开展了广泛的研究和测试工作。开展过多项电力系统电磁兼容重点课题,1997 年翻译出版了国际大电网会议重要技术报告《发电厂和变电站电磁兼容导则》,在开展了一系列分析测量和标准化工作基础上,起草了 DL/Z 713《500kV 变电所保护和控制设备抗扰度要求》。该标准给出了 500kV 变电所保护、控制及通信设备在其电磁环境中的抗扰度要求以及评定各种功能抗扰度性能的判据。中国电力科学研究院已建成功能完善的特高压工程技术实验室,该实验室围绕特高压电网设备在各种环境条件下的运行考核试验,建立了特高压户外试验场、试验大厅、试验线段、电晕笼、污秽环境实验室、绝缘子实验室、避雷器实验室等试验设施,可开展全天候的特高压电磁环境等关键技术领域研究。国网武汉高压研究院负责起草了 DL/Z 713—2000《500kV 变电所保护和控制设备抗扰度要求》技术文件。国网电力科学研究院 2009 年承担了国家电网公司技术服务项目“特高压环境下通信设备电磁兼容性测试研究”,并编写了企业标准 Q/GDW 755—2012《电网通信设备电磁兼容通用技术规范》,该标准对处于变电站复杂电磁环境的电力通信设备的电磁兼容性能提出了基本技术要求。华北电力大学在变电站瞬态电磁环境数值预测方法、大型接地网设计和保护小室屏蔽性能分析等多个方面开展了理论研究和缩尺模型的实验研究工作,取得了一批成果。华北电力大学高压与电磁兼容试验室对稳态和瞬态电磁场特性,高压输电线路、变电站电磁环境影响开展大量研究,建立强场电磁环境分析评估系统。该试验室利用德国斯图加特大学研制的三维瞬态电场测量系统、法国汤姆逊公司生产的一维瞬态磁场测量系统和自己研制的瞬态电磁场测量系统,研究了复杂土壤中接地网的接地性能,提出分析变电站接地网的频域电磁场数值计算方法,开发了变电站接地网频域电磁场数值计算软件包,建立了 TV、TA 的宽频等效电路模型。



1.2.3 变电站电磁环境及干扰研究

当变电站高压隔离开关或断路器关合和断开运行线路时或者从电力系统退出故障设备和故障线路时,隔离开关触头间会产生一系列的电弧放电过程。电弧的多次重燃和熄灭,会在母线上和设备间连线上引起一系列快速暂态电压波和电流波,在这种情况下,母线 and 设备间连线就成为了一个复杂结构的天线,向空间辐射上升沿极陡的电磁脉冲,成为频带很宽的强烈干扰源,同时母线上的快速暂态过程通过电流互感器、电压互感器、电容式电压互感器等传导途径耦合到二次回路中,将对二次设备造成影响。

早期的瞬态电磁场研究主要是为了对电磁脉冲产生的瞬态电磁场进行测量和分析。以美国电力研究院为代表的机构和学者于20世纪80年代和90年代开展的电力系统瞬态电磁干扰研究工作取得了一系列成果。1987年,C. M. Wiggins在《Mobile transient measurement system》中介绍了一种瞬态电磁场测量系统,并在一个115kV变电站进行了实测。《Development and validation of a model to predict EMI effects of switching transients on protective circuits in high voltage substations》《Prediction of electromagnetic field and current transient in power transmission and distribution system》通过数值计算的方法对变电站瞬态电磁干扰进行了仿真分析。1991年,C. M. Wiggins在《Switching transient fields in substations》中介绍了变电站瞬态电磁场的现场实测工作,给出了不同变电站中瞬态电场与瞬态磁场的测量数据,并进行了分析。1994年,C. M. Wiggins的《Transient electromagnetic interference in substations》《Comparison of interference from switching, lighting and fault events in high voltage substations》对变电站瞬态电磁场干扰的数值分析方法和现场测量技术进行了总结,对比了数值分析结果与实测数据,并分析了电网故障、开关操作和雷击三种原因造成的瞬态电磁干扰波形的不同特点。国际大电网会议对20世纪八九十年代发表的相关论文进行了总结,于1997年12月发布了《发电厂和变电站电磁兼容导则》,列出了变电站瞬态电磁干扰的数据,给出了变电站瞬态电磁干扰的特性以及对二次线缆耦合的结果,对变电站电磁兼容设计提出了指导意见。M. Mohana Rao于2005年仿真了245kV的气体绝缘变电站的快速瞬态电流。2012年,B. Musa利用EMTP软件仿真了400kV空气绝缘变电站开关操作时母线上瞬态电流时域和频域特性。

由于我国的变电站在电压等级和主接线结构等方面的技术特点与国外不同,国外的测量和分析结果仅能作为参考,我国变电站瞬态电磁环境的研究需根据实际情况进行独立的测量和分析。华北电力大学在变电站中瞬态电磁环境

预测和瞬态电磁干扰在气体绝缘变电站中的干扰耦合途径建模的方面做了大量的研究工作。2003 年,张卫东在《变电站开关操作瞬态电磁干扰问题的研究》中分析了 3 座 500kV 敞开式变电站中开关操作引起的瞬态电磁干扰在二次设备端口处的实测数据,并提出了一种基于电磁拓扑概念的变电站瞬态电磁干扰机理的系统分析方法。2010 年,孙海峰利用黑箱理论与传统等效电路相结合的方法建立了换流站换流阀系统宽频等效电路,并对 $\pm 800\text{kV}$ 高压直流换流站的传导电磁干扰特性进行了仿真计算。

2012 年,Chen Li 在《Switching Transient of 1000kV UHV System Considering Detailed Substation Structure》考虑变电站的结构细节仿真了 1000kV 特高压变电站开关操作时的瞬态波形,结果表明变电站输电线上的振动波主要频率在 100~300kHz,上升时间为 $2\mu\text{s}$,陡度在 $0.2\sim 0.7\text{MV}/\mu\text{s}$ 。操作断路器或隔离开关时,站用变压器的交流电源出口产生的共模干扰电压的幅值较大,并以脉冲的形式出现。这是因为断路器辅助触点断开断路器跳、合闸线圈,为了保证跳、合闸的可靠性,一般不在跳、合闸线圈上设置消弧回路,这使得在断路器跳、合闸时对直流电源的干扰最大,直流电源成为变电站中一个主要的干扰源。Meng Jin 在《Identification of Essential Coupling Path Models for Conducted EMI Prediction in Switching Power Converters》中对应用广泛的开关电源变换器提出一种传导干扰分析和建模预测方法。基于时域测量波形诊断干扰与开关动作的本质作用关系,对 3 种主导干扰模式的产生机理和耦合通道分别进行了分析和研究。根据不同模式干扰的传播通道等效出相应的电路模型,并给出了模型参数的测量及计算方法。





变电站常见干扰源及分类

2.1 干扰源分类

2.1.1 自然电磁干扰源和人为电磁干扰源

电磁干扰源可以按照不同的方法分类。如可以按照干扰源的频谱宽度分为窄带干扰源和宽带干扰源，也可以按照干扰源的作用时间分为瞬态波干扰源和连续波干扰源。一般更常见的是把电磁干扰源分为自然电磁干扰源和人为电磁干扰源。

2.1.1.1 自然电磁干扰源

自然干扰源主要来源于大气层的噪声和地球外层空间的宇宙噪声，包括宇宙干扰、大气干扰、热噪声和沉积静电噪声等。这些电磁干扰源是地球电磁环境的基本组成部分。

宇宙干扰是来自太阳系、银河系的电磁干扰，包括了太阳、月亮、恒星、行星和星系发出的太空背景噪声、无线电噪声等。一般在 $2\sim 50\text{MHz}$ 的频率范围内干扰相当明显。受干扰对象主要是通过卫星传送的通信和广播信号以及航天飞行器等。

大气干扰主要是由雷电产生的，其频谱在 30MHz 之内，对无线电通信的干扰较大。雷电对生物体也可以造成非常大的伤害，甚至造成死亡。此外，大气中的沙暴、雨雾等自然现象也可以产生电磁噪声。

热噪声是指处于一定热力状态下的导体所出现的无规则电起伏，由导体中自由电子的无规则运动引起，其电压的平均值为零，但是瞬时值可以达到非常大。一般采用均方值表示。

沉积静电噪声指飞行器高速接触大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹时产生

的电荷积累产生的静电，可以引起火花放电、电晕放电等现象，可能严重影响无线电通信和导航，亦有很大的危害。

2.1.1.2 人为电磁干扰源

人为电磁干扰源是伴随电气与电子设备工作时产生的电磁干扰。一般情况下，人为电磁干扰源比自然干扰源发射的干扰强度要大，造成的影响更严重。主要的人为电磁干扰源包括：工业、科学、医疗设备，电力系统，电牵引系统，内燃机点火系统，信息技术设备，无线电发射设备，静电放电，家用电器、电动工具和照明系统，核电磁脉冲等。这些电磁干扰源存在于现代人类生活的每个环节和过程中，不可能完全排除。这些电磁干扰源均可能影响周围其他的电气与电子设备，但可以采取合适的设计、布置和措施，降低其受干扰的程度，从而与其他的设备达到电磁兼容。常见的人为电磁干扰源见表 2-1。可以看出，这些人为电磁干扰源大体可以分成两大类，一类是有意发射的电磁干扰源，如通信设备等；另一类为无意发射的干扰源，即在设备自身工作的同时向外发射电磁能量，如机动车辆、电力系统、家用电器等。

表 2-1 常见的人为电磁干扰源

干扰源类别	具体干扰源		
电力系统	开关操作	变换器	电动机
	电气故障	整流装置	发电机
工业和商用设备	电弧炉	计算机和开关电路	复印机
	感应炉	荧光灯	打字机
	空调	医疗设备	电焊机
机械设备	电磨	车床	电锯
	焊接设备	铣床	钻床
车辆系统	车辆点火系统	电气机车	电动车
通信系统	无线广播台站	移动电话	雷达
	电视台	无线遥控装置	发报机
家用电器	微波炉	真空吸尘器	风扇
	电冰箱	干发器	割草机
	电动剃须刀	洗衣机	电烘箱
	搅拌器	计算机	电磁炉