

第 1 章 概述

1.1 电磁暂态的危害

电力系统的开关操作、外部雷击都将产生电磁暂态,也称电力系统过电压,它是发展高压、超高压及特高压电网所必须研究的重要课题,它不仅影响变压器、断路器、输电线路等电力设备绝缘强度的合理设计,而且还直接关系到电力系统能否安全可靠地运行。

另外,发变电站环境具有各种电磁干扰源,如大型感性负荷操作、大故障电流、高能高频暂态。随着以计算机、电子及微电子设备、半导体器件、超大规模集成电路等固体电路为基础的控制和信号系统的不断增加,一些与电磁干扰有关的特殊问题也就产生了。电力系统操作以及雷电等通过各种途径在发变电站产生的电磁暂态会通过各种耦合方式在弱电系统内产生相应的干扰电压。干扰电压能引起控制系统的误动,在特殊情况下会损坏设备,导致系统停止工作,造成巨大的经济损失。同时,随着电子及微电子技术的发展,以大规模、超大规模集成电路为核心组件的测量、保护、监控、通信和计算机等电子产品广泛地应用于各个领域,外部雷击和静电、电源系统操作产生的电磁暂态等都会对设备或系统造成危害。

任何电磁暂态危害问题都可以分解为电磁干扰源、传播途径和被危害设备^[1]。任何形式的自然现象或电能装置所发射的电磁能量,能使共享同一环境的其他设备、分系统或系统发生电磁危害,导致性能降级或失效,这种自然现象或电能装置即称为电磁骚扰源。传播途径指传输电磁骚扰的通路或媒介,电磁暂态的传播途径包括传导路径及空间电磁辐射。被危害设备是指当受到电磁骚扰源所发射的电磁能量作用时会发生电磁危害、导致性能降级或失效的器件、设备、分系统或系统。

因此,电磁暂态研究的内容是充分考虑系统中电磁骚扰源、传输途径和被干扰设备的特性,分析电磁暂态在系统中的传输特性及其在系统中的分布规律。

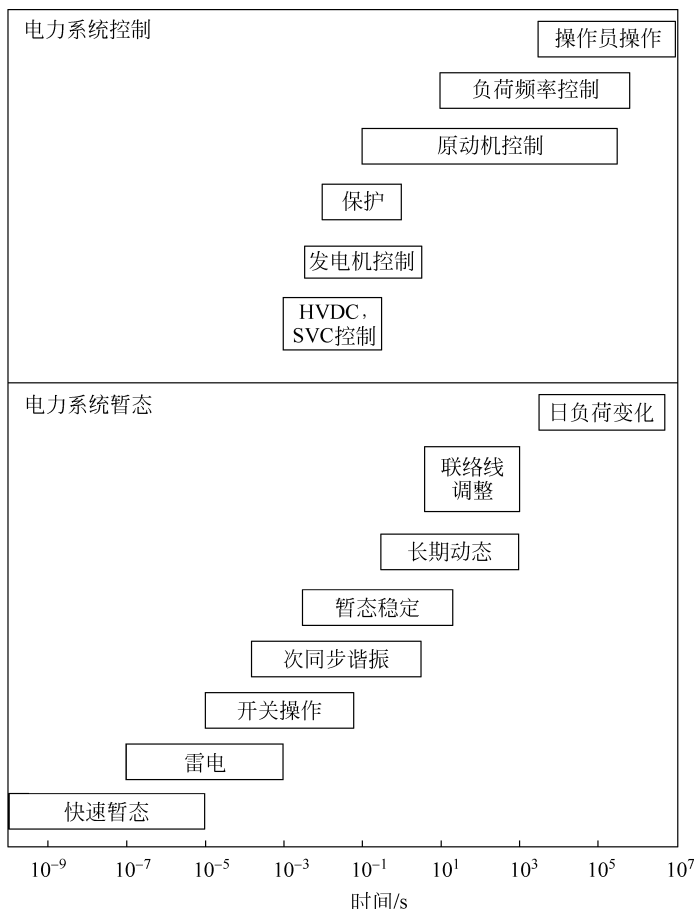
1.2 电力系统的电磁暂态

电力系统构成了一个电网络,电网络中元件及拓扑结构的变化将产生暂态过渡过程,包括电磁暂态和机电暂态,导致能量在系统元件间的传递。正常情况下,系统特性由频域中的电压和电流相量来表征。但当系统操作时,电路元件将承受很高的暂态电流和暂态电压,则必须采用微分方程来描述系统的暂态过程。电力系统典型暂态的时间尺度如图 1.1 所示^[2],靠近左边,以电感的磁场和电容的电场之间的交互作用为主,称为电磁暂态。靠近右边的暂态主要以储存在旋转电机中的机械能和储存在电网络中的电能之间的交互作用为主,称为机电暂态。中间部分为机电暂态和电磁暂态的共同作用区域。

电力系统含有非线性特性的避雷器、铁磁电感,以及具有分布参数特性的输电线路等电磁元件,有时还需要考虑输电线路参数随频率变化的特性和线路发生电晕以后的电磁特性等。因此,电力系统中的电磁暂态过程往往是很复杂的。解析方法只适用于过电压的原理分析和简单情况下的计算。按照电网实际工程条件计算过电压,则必须借助于模拟方法和数值计算方法。

电磁暂态波形包含有一个或多个振荡分量,可以由这些振荡分量的固有频率来确定。暂态过程模拟的精确度与描述电路元件的等值电路直接关联,没有元件模型适合于所有的暂态分析。因此,电磁暂态模拟的关键是根据所感兴趣的时间尺度选择与实际元件特性相符的分析模型。

从电磁暂态模拟角度来说,根据暂态过程的时间范围进行分类更为合适。雷电产生的暂态过程在数百纳秒到微秒级,系统工频电压和电流的变化可以忽略,系统的控制来不及反应,而系统杂散电容和杂散电感对暂态过程产生很大的影响。而系统操作时产生的暂态在微秒到毫秒级,如果要分析系统暂态过程的恢复过程,则时间将达到数个工频周期,另外,全封闭的气体绝缘变电站(GIS)的开关操作将产生波头时间只有几个纳秒的特快速暂态(VFTO),这时电磁暂态的分析时间将要精细到 0.1ns。基于不同的分析目的,暂态模拟需要对应不同时间尺度的系统元件模型,从快速暂态模拟的杂散参数模型到基于简化的等值电路模型。

图 1.1 电力系统的暂态分类^[2]

1.3 电磁暂态分析的数学方法

1.3.1 电磁暂态分析的数学模型

电磁暂态分析涉及的计算模型主要包括如下三类。

电路模型。电路模型的前提条件是回路长度比波长短得多，即不涉及波过程问题，在每个电路元件中，电流保持为常数。主要指集总的低频电路模型、高频电路模型、宽带时域或频域电路模型等的建模问题。除涉及静电场(电容参数)、静磁场(电感参数)、电流场(电阻参数)和涡流场(导体内阻

抗参数)的计算外,还涉及利用测量结果建立网络时域或频域模型的网络综合技术或系统辨识技术。在这些电路模型中,模型可以是线性的,也可以是非线性的,可以是时不变的,也可以是时变的,可以是频率无关的,也可以是频率相关的。

电路模型用以串联或并联方式形成的集总参数元件(没有空间尺度)网络来代表,这个网络由节点和支路构成,对它可写出 Kirchhoff 方程。穿过一电路的磁通的影响以集总参数电感来代表,因为磁通链只能对具有一定边界的区域而言,所以电感只能是对闭合回路而言。上述限制导致我们不能(至少在定量方面)将由电路理论得出的结论推广用于电大尺度(相对于波长而言,当物体的物理尺度小于波长的 $1/10$ 时,相位的变化就可以忽略,这样的物体称为电小尺度,反之为电大尺度)的回路。对于电大尺度的电路有必要求助于更普遍性的理论,或应用某些统计的或经验的法则。然而值得强调的是,以电路理论处理通常是保守的,并和其他理论不相矛盾,由天线理论出发的每一个理论都可以从对前一理论增加更多假定而导出。

以电路理论处理的主要优点是计算非常简单,并且无需用到许多计算方法。当回路尺寸较小时,耦合的物理机制便于理解。再则,它不需要确定电磁场,也不需要建立相应的模型,骚扰源总可以用电压源或电流源来表示。所以,同样的模型可用来描述与电磁暂态源的直接接触(电流源或电压源直接注入受害电路),也可描述由电场或磁场引起的非直接影响。例如,通过电缆系统将电磁暂态传播出去。

传输线模型。主要指分布的均匀和非均匀双导体和多导体传输线模型,在模型中分布参数可以是时不变的,也可以是时变的,可以是频率无关的,也可以是频率相关的,激励源可以是集总的,也可以是分布的(如各类电磁脉冲或电磁波对传输线的耦合等)。

传输线模型基于以下假定:带电体横断面的尺度小于波长,即导线的直径和导体间的距离(或导体对地面距离)小于波长[准横电磁场(quasi TEM)]。沿线流动的电流的不同部分之间不存在相互影响,感应电流彼此之间不产生辐射影响(这意味着该载流体或多或少是线性的)。传输线理论的基础是波过程理论,可提供快速、准确的计算结果,因此,被广泛用于解决电缆和线路的耦合问题。

电磁场模型。主要指各类电磁辐射相关的计算方法。涉及各类偶极子和导电片在复杂媒质和边界条件下的时域和频域格林(Green)函数求解、薄介质或薄导体片的等效方法等。

1.3.2 计算方法的分类

从电磁理论的角度看,建立电磁暂态传输与耦合的数学模型就是求解电磁场的麦克斯韦(Maxwell)方程问题。严格地说,如果考虑到场源的结构、媒质的形状分布和性质等各项因素,求解麦克斯韦方程是极其困难的。一般都将整个问题分成几个独立的问题分别进行处理,同时加以理想化,即假设某些理想条件使具体问题得到简化和近似,以便于数学表达和处理。根据具体问题的不同,求解的方法也有所差异,通常可分为两类:一类是从麦克斯韦方程组和电路理论直接求解的直接法;另一类是通过位函数求解的间接法。电磁暂态分析的数学方程往往是一组微分方程或积分方程,求解时必须根据边界条件来确定解答,这称为边界值问题。电磁场的边界值问题求解归纳起来有三种方法:第一种称严格解析法或解析法;第二种是近似解析法或近似法;第三种方法是数值法或称数值法。

解析法包括严格建立和求解偏微分方程或积分方程。对偏微分方程的严格求解的经典方法是分离变量法;对积分方程的严格求解方法主要是变换数学法。解析法的优点是可将解答表示为已知参数的函数,从而计算出精确的结果,可作为近似法和数值法解答的检验标准。在解析过程中以及解的函数式中,可以观察到问题的内在联系和各参数对结果所起的作用。但是解析法存在严重的缺点,主要是它仅能用于解决很少量的问题。事实上,只有在参数不多的坐标系中能分离变量,而用积分法时往往又求不出结果,致使分析过程既困难又复杂。

分离变量法是求解二阶线性偏微分方程定解问题的经典方法之一,它获得了广泛的应用,同时它也受到一些因素的限制。因此必须指出,只有在少数问题中才能得到偏微分方程或积分方程的严格解,所以近似解析法变得十分重要,即使有严格解的问题也很少用解析法,而用近似法来求解往往比较便利。

近似法也是一种解析法,但不是严格解析法。它所得的结果一般都表示为级数。用这些方法可以求解一些用严格解析法不能解决的问题。在数理方法中主要的近似法有逐步逼近法、微扰法、变分法和迭代变分法等,还包括适用于高频技术的几何光学法、物理光学法、几何绕射法、物理绕射法等。

数值法又可分为纯数值法和解析数值法。在纯数值法中,通常用差分

代替微分,用有限求和代替积分(即数字积分),这样就将问题化为求解差分方程或代数方程组的问题。为了求得较准确的数值答案,计算工作量很大,为了减轻计算工作量而宁可增加一些解析部分,这种方法称为解析数值法。显然,数值解只是一种近似解。

数值法与解析法相比较,在许多方面具有独特的优点。该方法的出现,使电磁场问题的分析研究从解析的经典方法进入到离散系统的数值分析方法,从而使许多用解析法很难解决的复杂电磁场问题,有可能通过电磁场的计算机辅助分析获得高精度的离散解(数值解),同时也可极大地促进各种电磁场数值计算方法的发展。长期以来,已经形成了各有特色的多种数值计算方法,它们已成为电磁理论的重要部分。

1.3.3 电磁暂态的数值分析方法

数值分析方法包含着一个离散化的问题,因为无论在微分方程还是积分方程中,微分或积分的函数都是连续函数,而计算机所能处理的函数则是离散函数。数值方法所做的工作是将微分方程化为差分方程,或将积分方程中的积分化为有限求和,从而建立代数方程组,因此它的主要工作量是用电子计算机求解代数方程组。

数值分析方法可分为时域方法和频域方法。时域方法可以通过快速傅里叶(Fourier)变换转换为频域问题。电磁暂态的基本特征是信号随时间的变化,如果要深入理解信号,可以在函数的完备集合中以不同的形式将信号展开,其中最重要的表达形式是频域展开。时域和频域两种表达方式成为研究电磁暂态特性的互为补充的主要手段。自从计算电磁学作为一门学科问世以来,频域方法一直占据着主导地位。分析瞬态电磁场的一条途径是在频域求得一系列解析或数值解,再经过傅里叶变换或者拉普拉斯(Laplace)变换得到时域解。这种方法的优点是可以充分利用已经发展的非常成熟的频域方法,如矩量法等。缺点是通常需要计算相当多的频率点,使得计算量非常大。然而,随着人们在学习电磁学领域研究的深入,传统的点频法和窄频带方法已经不能满足需要。科学实践的需求推动了时域数值技术的发展和成熟。以计算机硬件技术的发展为契机,人们逐步具有了直接在时域对具有宽频带特性的瞬变电磁场进行计算分析的能力,从而实现了对物理量和物理现象更深刻、更直观的理解。时域数值技术的一个突出优点是可以给出关于问题空间的丰富的时域信息,而且经过简单的时频变

换,即可得到宽带范围的频域信息,相对频域方法显著地节约了计算量。

时域计算与频域计算相比,具有如下特点:

(1) 时域计算可以直接得到宽频数据,而频域计算必须进行很多频率的计算才能得到相同的数据;

(2) 对于非线性媒质或元件,在时域模拟阻抗的非线性更为直接;

(3) 能够处理负载阻抗的时变特性;

(4) 对于某些问题,在时域中计算时可以减少计算量。时域模型与频域模型相比是一种更为有效的方法,而频域必须通过傅里叶变换进行宽带的频率采样。在寻求宽带响应时,时域模型也是更自然的选择,时域模型响应的频带只受激励的频率范围以及建立模型时的时空采样的频率范围影响。

电磁暂态的数值分析包括路和场的数值分析两类。路的问题又可分为电路问题和传输线问题。传输线模型分析方法的基础是波过程理论,基于波过程理论发展了多种数值计算方法,如网格法、贝杰隆(Begeron)特征线法、频域法及时域法,如主要用于电磁场分析的时域有限差分法也用于分析传输线模型,同时切比雪夫(Chebyshev)多项式展开也用于传输线模型的时域分析,将传输线上的电压和电流用 Chebyshev 多项式展开。

场的数值分析方法可以简单分为低频方法和高频方法。低频方法有有限元法、有限差分法、矩量法、格林函数法、边界元素法、谱域法、奇点展开法、变分法等,高频方法有几何光学法、物理光学法、几何绕射理论等。另外低频方法主要包括积分方程法和微分方程法。积分方程法包括:表面积分方程法(SIEM,又叫矩量法、边界元方法)、体积分方程法(VIEM,又叫快速多极子方法、多层快速多极子方法)、时域积分方程法(IETD)等;微分方程法包括有限差分方法(FDM)、有限元方法(FEM)、传输线矩阵方法(TLM)。

各种数值分析方法的优缺点是相对的,哪一种方法也不可能十全十美,只能是比较适用于某种特定的情况。科学领域不断发展和互相渗透,从而使它们相互之间的界限逐渐变得模糊,于是在模糊的边界派生出新的分支,即产生各种混合方法,如边界元法与有限元法相结合的方法,矩量法与几何绕射理论相结合的方法,格林函数法与矩量法相结合的方法以及奇点展开法与变分法相结合的方法等相继提出,充分显示了它们之间取长补短的功效。

1.4 传导电磁暂态分析理论与方法

传导电磁暂态产生的根本原因是网络参数的突变。各种类型的过电压,如正常运行或切除故障所引起的操作过电压,雷闪放电引起的大气过电压等,都是由电力及电气和电子系统中突然出现的电磁暂态过程激发而成。

任何电气系统和电子系统的元件从性质上可以分为两类,一类是集中参数,如电力系统的电容器和电抗器;另一类是分布参数元件,如输电线路、地下电缆等。从元件特性上则可分为线性元件(如集中电容和电感、电阻等)和非线性元件(如压敏电阻、具有磁芯的电抗器等)。开关操作时产生的暂态将涵盖 50Hz 到数 MHz 的频率范围,因此模拟过程必须能表征集中参数和分布参数的频率特性。另外,暂态模拟要反映系统元件的磁饱和、限压元件的非线性电阻特性、断路器动作时的非线性电弧特性、接地系统在雷电流作用下的时频特性等。

1.4.1 电磁暂态分析技术的发展过程

电磁暂态研究的发展经历了从物理模拟方法到数值模拟方法(TNA),以及物理和数值混合实时模拟方法的过程。物理模拟方法的主要工具是暂态网络分析仪,通过搭建按比例缩小的系统模型,以低电压和小电流来模拟实际系统的暂态过程。过去 TNA 对输电线路受大地影响的特性、线路的电晕特性、非线性电感等不能很好地模拟。目前 TNA 的模拟准确性已大大提高,另外由于其能够有效模拟实时特性,加之可以接入实际的控制系统,其仍在用于电力系统电磁暂态的分析,用于测试实际控制系统的硬件和软件的有效性。

20 世纪 60 年代,随着计算机技术的发展,加拿大 UBC 的 H. W. Dommel 教授提出了基于计算机的电磁暂态数值分析方法^[3]。目前,电磁暂态数值计算技术已形成一些比较成熟的算法和计算程序。例如,由 Dommel 创建并经过许多人的共同努力而完成的电磁暂态计算程序 EMTP,已经成为国际上普遍采用的大型计算程序,并发展成重要的两个分支,一是北美的 EMTP 程序,走的是商业路线,目前已发展为可实现实时仿真的 PSCAD/EMTDC;二是欧洲的 ATP 版本,属于免费版本。另外,在广为应用的工具软件 MATLAB 中有一个 Power System Blockset 模块,也能

够进行电磁暂态计算。应用数值计算方法研究电力系统过电压等电磁暂态过程,在通用性、灵活性、计算精度和功能等方面日益显示其优越性,可以满足在电网实际条件下计算各种类型过电压的工程要求。目前,电磁暂态分析软件已从过去的 DOS 版本升级为 Windows 版本,可以直接搭建所需解决的电路,非常方便实用。目前已有诸多著作介绍以 EMTP 为主的电磁暂态分析程序的计算原理和数值计算方法^[4-8]。

另外,现代电力系统的控制和保护方案直接影响着系统电磁暂态的过程,TNA 虽然具有能够考虑实际控制系统连接的特点,但模拟系统的费用太高,目前已发展为能够与控制系统硬件相连的数模混合式实时仿真系统,如加拿大 Manitoba 直流研究中心的 RTDS。电磁暂态分析正朝着全数字实时仿真系统方向发展,实时数字仿真系统是计算机技术、并行计算技术、数字信号处理技术和现代控制技术发展的产物。目前各种实时数字仿真系统大都采用并行处理的硬件结构和高速 DSP 芯片,利用数学上可分割子系统的概念在各个运算芯片或芯片组间分担计算任务。它继承了数字仿真软件和模拟仿真器的优点,体积小,建设周期短,功能强大,对于测试的系统可实时闭环运行^[9]。

目前的电磁暂态分析程序的 Windows 版本(如 PSCAD/EMTDC)在数据输入上更为开放,为用户直接建立模型提供了条件。随着电磁暂态分析技术的发展,近年在各种设备的电磁暂态建模方面有了长足的发展。各种设备的嵌入式模型,包括断路器的电弧模型、变压器模型、旋转电机模型、电力电子及其控制模型,均可与 EMTP 直接接口,提高电磁暂态分析的精确度。

传统的以 EMTP 为主流的电磁暂态分析,是以电路理论为基础的模拟分析方法,在原理上不能对非横电磁波的传播进行分析,如雷击垂直的接地物体。另外,采用以电路理论为基础的分析方法求解复杂媒质中的电磁暂态(如多层土壤媒质中的接地极、电缆的半导体层等)存在很大困难。更为重要的是,以电路理论为基础的分析方法所需要的电路参数,在很多情况下是很难获得的^[10]。

多年来,人们采用全波数值电磁分析方法(NEA)通过在频域或时域直接求解麦克斯韦方程来获得数值解^[10],目前已经在电力系统电磁暂态分析中得到了大量应用。主要的方法包括时域有限差分法,矩量法,有限元法,传输线矩阵法,部分元等值电路法等。

本书的主要内容体系如图 1.2 所示,电磁暂态波过程理论和场路耦合理论构成了传导电磁暂态的理论基础,场线耦合理论是连接辐射电磁暂态与传导电磁暂态的桥梁,可获得外界电磁场在传导系统产生的电磁暂态。基于电路理论的分析方法涵盖了目前电磁暂态程序 EMTP 的主要分析模型及数值计算方法。全波电磁暂态分析模型主要介绍基于切比雪夫(Chebyshev)多项式的时域分析方法,时域有限差分法,任意复杂导体结构电磁暂态的数值计算方法,以及电磁暂态分析的智能拟合方法。目前,各种新能源装置投入使用,而新能源装置的电磁暂态过程不同于常规的电磁暂态,其直接与这些装置本身的复杂物理和化学过程有关,需要研究基于设备本身物理化学过程的电磁暂态分析方法。最后,还要介绍电磁暂态波形的小波变换理论及其在故障测距和定位方面的应用。

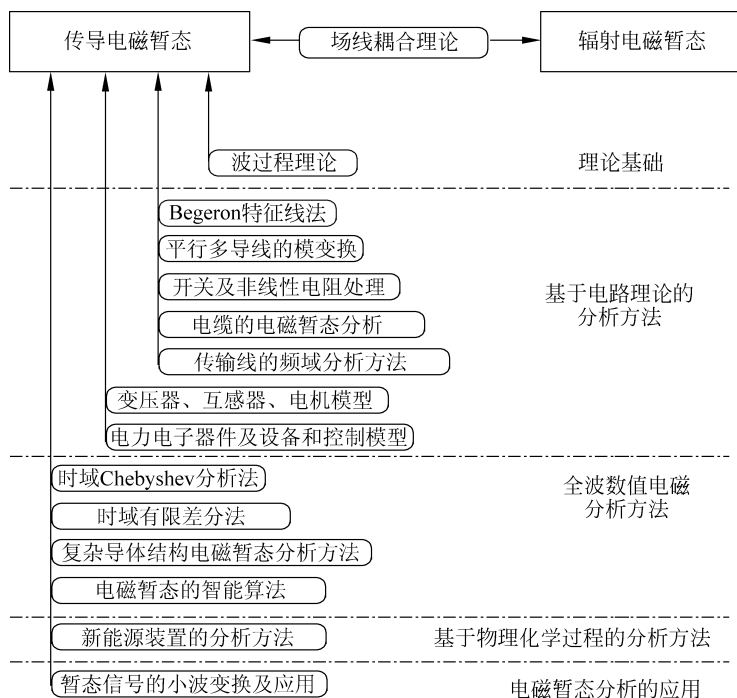


图 1.2 本书的主要内容体系

1.4.2 传导电磁暂态的主要研究方向

进行传导电磁暂态分析不仅能解决电力系统的过电压、次同步谐振和