



華夏英才基金學術文庫

束洪春 著

行波暂态量分析与 故障测距 (上册)



科学出版社



華夏英才基金學術文庫

行波暫態量分析与故障测距

(上册)

束洪春 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书分上、下两册,上册包括第1~5章,下册包括第6~10章。本书结合作者多年研究和实践的积累,重点对线路故障所引起的行波及暂态量如何应用于故障测距进行系统的解析。上册主要介绍输电线路电磁暂态计算、雷击分析及雷电绕击故障与反击故障的识别、雷电绕击导线的注入导线雷电流波形反演恢复原理、交流线路过电压机理分析和计算,以及故障行波波头标定、行波测距及其延拓、有效行波筛选、行波装置优化布点和频差法测距。下册主要介绍时域法、回归分析法和新型行波测距原理。首次公开了基于行波能量突变沿线分布特性的单端法行波测距原理及方法。研究测距应用的线路包括:架空输电线路、链式电网及三角形环网架空线路、线缆混合线路、T接线路和含有补偿元件的输电线路等。全书以阐释方法原理为主线,配有大量仿真实例和珍贵的宽频暂态电流实录波形。

本书可作为电气工程学科的高年级本科生和研究生的研修内容,也可供电力系统专业人员学习和研究参考。

图书在版编目(CIP)数据

行波暂态量分析与故障测距.上册 / 束洪春著. —北京:科学出版社, 2016

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-046771-3

I. ①行… II. ①束… III. ①暂态过电压-暂态特性-研究 IV. ①TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 312398 号

责任编辑:张海娜 王 苏 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:左讯科技

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张:30 1/4 插页:3

字数:609 000

定价:188.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电力系统受到冲击或电网突然改构的电磁暂态过程是由于保守性系统中节点电荷和回路磁链必须守恒,表现为储能动态元件的状态电气量不能突变。研究电磁暂态的主要目的在于分析计算电力系统中开关动作、短路、雷击和正常运行中出现的各种扰动所引起的电压电流暂态响应,以及电力电子装置所致暂态电压和高频率的电流振荡,为变压器、断路器等高压电气设备和输电线路的选型及绝缘配合、继电保护定值整定、过电压分析及抑制措施的制定,以及电力电子装置、控制策略的设计等提供数据支持。电磁暂态过程变化很快,通常需要分析计算毫秒级(如开关操作时的暂态恢复电压等)、微秒级(如雷击、故障线路行波等)的电压,以及电流瞬时值。该过程的本质是各元件中磁场和电场的能量分布重新达到平衡,伴随着波的多次折反射,电场、磁场能量分布变化将通过电压和电流的瞬态改变表现出来,它们既是时间的函数也是空间的函数,具有波动性,故称为行波。理论上,各种操作、故障、保护跳闸和重合闸作用,都会引起行波过程、电磁暂态,最后进入稳态过程。波过程是波沿传输线传播、反射的过程。这个过程的时间短,通常为几毫秒。线路从一端空投、一端甩负荷、故障、切除故障或重合闸时,输电线上能量突然发生变化,都会产生波过程,产生很高的瞬时过电压,称为操作浪涌。电磁暂态是行波衰减直至稳态开始的过程及对应的时段。山火故障、雷击故障或雷击未闪络的发生机理不同,故其故障电流波形存在差异;线路故障和母线故障因拓扑不同,其各回线电流的群体幅值相位关系不同。通常运行中的线路从发生故障至重合闸之前先后历经一次电弧、二次电弧、恢复电压三个不同的物理阶段。线路端部通常作为保护安装处测点、线路测点的故障暂态电气量是重要的故障与否的信息。运行线路故障引起的暂态电气量主要是指故障电压、电流暂态量,此暂态量从故障发生直至断路器分闸之前按其电路、电磁和电气约束关系和规律一直存在,其携带故障方向、故障距离、故障相别和故障初相角等丰富的故障信息。深入研究其变化规律并发掘其中所蕴涵的故障信息,是构造新型继电保护与故障定位原理的重要基础。为了适应柔性输电、分布式能源并网等技术的进步和应用发展,非常迫切地需要与电源特性弱相关、与线路电气边界有关而主要由故障线路测点处端口特性决定、不依赖于线路一次参数辨识估计的新型继电保护,以及能够由机器自动分析的故障测距技术。本书着眼于对输电线路行波暂态量分析与行波法、频差法、时域法、回归分析法和线路历史闪络案例行波数据复用智能方法的故障测距原理和方法的研究。此外,电力系统过电压是其不正常电压升高的现象,是电力系统在一定

条件下所出现的超过工作电压的异常电压升高,属于电力系统中的一种电磁扰动现象,是电力系统结构变化时产生电磁过程的一种表现形式。过电压类型较多,且其产生原因、持续时间和幅值各不相同,所采取的过电压抑制措施也不同,因此正确辨识输电线路的过电压成因,对增强线路绝缘配合具有指导意义。此外,从过电压分析和行波传播方面,仿真分析了半波长输电技术的特点和面临的技术挑战。

第1章以行波为切入点,总结行波传播与折反射规律,以及行波耦合、色散和衰耗等基本特征;给出实际线路实际闪络故障实录暂态电流波形普遍存在的后续附加振荡;当实测高频暂态波形中后续振荡不明显时,波形在行波多次传播到达的影响下呈现较为明显的阶梯状;当实测波形中存在明显的后续振荡时,后续振荡幅值都较大,且在故障初始行波浪涌和故障点反射波之后都会出现一定程度的后续振荡,其暂态电流波形阶梯特征就不明显。本章介绍常用元件的建模和系统方程的求解,以及便于计算机实现的复杂电网线路电磁暂态数字仿真算法;分别给出考虑线路雷电冲击电晕影响的时域法和考虑电弧故障、时变电阻及发展性故障仿真的频域法的电磁暂态计算及其实现;基于目前主流电磁暂态仿真软件环境,给出含FACTS线路和MTDC线路故障仿真实例。针对现有主流软件难以对沿线任意位置故障的电磁暂态仿真进行遍历的不足,给出一种基于内核调用的复杂故障批处理仿真思路 and 实现方法。最后介绍可对不同电网运行方式下输电线路进行电磁暂态仿真的数字物理混合静态模拟平台构建,以满足输电线路快速暂态行波保护和行波测距装置在实验室环境下进行较全面的考量测试的需要。

第2章围绕交流线路各种过电压的形成机理、主要特征和类型识别展开分析,分别建立1000kV输电线路、500kV输电线路、110kV线缆混合线路、35kV配电线路和牵引网线路电磁暂态仿真分析模型,仿真分析线路遭受雷击或发生内部过电压时的暂态电压特征。以1000kV半波长线路为基础,分析非对称接地故障情况下线模行波和零模行波的模混杂问题。对于架空避雷线逐塔(或部分塔)接地架空线路,探讨其线模行波对零模行波的“提速”现象和作用。分析串联补偿装置和并联补偿装置对500kV输电线路过电压的影响。利用瞬时功率曲线进行PCA聚类分析,对雷击故障与非雷击故障、反击与绕击故障、绕击未闪络与雷击避雷线未闪络进行聚类辨识,分别通过导线两端与线路上安装的Rogowski线圈所测三相初始行波极性进行绕击与雷击避雷线的识别,进而针对反演恢复绕击输电线路注入导线的雷电流波形进行探讨和尝试,并给出利用变电站端高速采集记录获取的宽频暂态电流,进行线路雷电绕击与反击辨识,以及绕击导线发生绝缘子闪络故障情况下,注入导线雷电流反演效果实例。分析不同运行工况和线路长度情况下,合闸电阻对合闸过电压的影响。针对一条具体线路,探讨合闸电阻值的合适大小。对行波在110kV线缆混合线路的传播进行简要分析,探讨线缆混合线路过电压的特殊问题,并对重合闸技术应用于线缆混合线路的可能性进行分析。介绍35kV配

电网线路的多种中性点接地方式,对因中性点不直接接地而造成的铁磁谐振过电压、普通故障和弧光接地过电压进行分析和辨识。简要介绍电铁牵引网线路的结构特点,并对因机车作为移动的非线性负荷和受电弓与线路接触不良而导致的谐波和“弓网分离”等过电压问题进行分析。

第3章把运行中输电线路的短路故障阶段粗略地划分为故障初瞬行波阶段、故障暂态阶段和故障稳态阶段。线路故障会引起从直流到故障行波高频量的宽频暂态分量,携带着故障距离、故障初相角、故障方向等丰富的故障信息。阐述运行中的电力线路短路故障所引起的暂态电压电流数据当中,其故障行波、故障暂态电气量的频差 Δf 、故障工频电气量和衰减直流分量分别能够反映和表征故障位置的机理,为建立各类故障测距原理和方法奠定基础。通常,故障测距的有效性取决于其测距可靠性和测距精度;不依赖于电源特性及一次参数的保护和测距,其品质会得以提升;故障分量的有效提取和合理应用十分重要;单端测距的现场实际启用率比双端测距高;单端量测距对于同侧半线长内近端故障测距精度高些,依赖于线路长度呼称值的双端量测距对线路中部的故障测距精度高些。

第4章从传统单端和双端行波测距原理及相关命题切入,阐述构造电流行波、方向行波、对偶故障位置、行波波到时刻与波速、相电流行波应用、波到时差时序与波头相对极性、测后模拟、故障模态等概念与范畴。研究的相关命题包括:故障点反射波的准确甄别和波头的正确标定;雷击故障及雷击点与闪络点不一致情况的识别与测距,电弧性故障单端行波测距,T接线路单端、三端行波测距及T接线路单端行波测距、频差法测距、 k -NN算法的有效性;从多通道电流暂态录波数据中筛选有效的故障行波数据;在故障线两侧母线间存在健全通路的条件下,如何利用故障线和健全线构成的回路主导波头时差信息进行基于单侧行波信息的双端测距;对于链式电网拓扑结构,在下级线路故障时如何在本级线路行波信息全覆盖条件下进行单端测距,当不满足直接延拓的条件时如何利用两个时窗内关联波头到达时刻信息进行单端测距的间接延拓;电网电流型行波装置的网络化行波测距与优化布点,以及广域电压行波测距。

第5章研究利用单端行波的频差或者自由振荡分量的频差进行测距。在线路单端量测的故障暂态电流或电压的频谱中,倘若能够获得稳定的等间隔频差 Δf ,那么稳定频差 Δf 可以直接反映故障距离。内容包括:利用单端故障电流行波数据,对三类母线接线形式输电线路相间故障模式和单相接地故障进行测距的频差法应用;利用单端故障电压行波数据,探讨线路相间故障模式下,故障引起的电磁暂态电气量、断路器分闸引起的和合闸致故障所引起的电磁暂态电气量的频谱分布,以及基于频差 Δf 的测距方法;探讨利用普通故障录波器的故障暂态量获取频差 Δf ,并讨论 Δf 用于故障测距的死区范围。

第6章主要研究架空线路时域法故障测距。时域法故障测距是利用线路保护

安装处获取的电压电流暂态数据所蕴涵的故障位置信息,通过列写含有故障位置的电路方程或建立目标函数,并对此方程或者目标函数求解即可获得故障距离。用什么已知条件、如何列写含有故障距离的电路方程或如何建立目标函数、怎样求解测距方程或如何求解目标函数来获得故障距离,以便形成各式各样的时域测距算法。求解测距方程可能会出现增根,需要剔除其伪根;求解目标函数可能会出现多个极值(点),通常取其最值。内容包括:单端时域法、双端时域法,三端 T 接线路的时域法故障测距,利用部分暂态电气量的时域法探析,以及不依赖于双端数据同步的水平排列不换位线路时域法测距。当然,除了需要做数值迭代求解的测距微分方程及可采用各种优化问题求解方法的测距目标函数之外,还有基于数学回归方法的时域法故障测距,如应用 SVM 回归函数通过回归来获得故障距离,以及基于时域故障波形相似度的单端故障测距 k -NN 算法。

第 7 章主要研究含补偿线路故障测距的行波法和时域法应用。对含有 TCSC 的线路,无论采用双端行波测距,还是采用短时窗电流行波数据的单端故障测距 k -NN 算法,都不需要计及 MOV 的动作特性,但采用短时窗暂态量的基于微分方程的传统时域法,则需要判断 MOV 是否启动。对于诸多 FACTS 装置,其端口电压、电流关系与其保护、控制策略和特性均有关系,其精确的数学模型不易建立。对于线路中间含有串联补偿装置(如 STATCOM)的输电线路,根据串联补偿装置左侧电流等于右侧电流来构建双端测距函数通式;对于中间含并联补偿装置的线路,根据并联装置左侧电压等于右侧电压来构建双端测距函数通式;对于中间含有串-并联补偿装置(如 UPFC)的输电线路,根据串-并联装置左侧功率等于右侧功率来建立双端测距函数通式。对于补偿装置线路需要判断故障位于线路的哪一侧,因此辨识故障位于补偿装置的哪一侧是关键。测后模拟原理结合测距算法是一种较理想的分析法故障测距。可以建立基于线路故障侧电压电流故障数据的单端测距算法,并结合测后模拟原理,借此单端测距算法对本段线路进行故障扫描匹配:若故障位于本段线路,则能够扫描出故障(位置),否则,本段线路没有故障。这样,在补偿线路两侧分别实施单端测距并应用测后模拟原理,既可判别故障位于补偿元件的哪一侧,又可进行故障定位,尤其对于补偿线路两侧的近端故障具有较高测距精度和测距可靠性的优势。对于含串补电容的补偿线路,建议采用双端行波测距,或于两侧分别采用基于测后模拟原理的单端时域法测距,或单端 k -NN 测距算法。对于其他补偿线路建议采用基于测后模拟原理的单端时域法测距,并分别在线路两侧单独施行、协同研判。在线路中间 TCSC 安装处可测的条件下,研究其故障区段识别的 PCA 聚类分析、单端行波测距、单端行波时差的 ANN 测距方法、单端行波数据的 k -NN 测距算法。

第 8 章研究电缆的行波法、频差法测距及线缆混合线路的行波法、 k -NN 算法和双端行波法测距。其中,线缆混合线路故障单端测距行波法:分别利用 PCA 聚

类分析和 PCA-SVM 判别模型和算法判断故障是位于电缆线路还是架空线路,再利用“测后模拟原理+波到时序匹配”进行单端行波故障测距。线缆混合线路单端故障测距的 k -NN 算法:利用同一故障类型、同一故障位置、相近故障条件下电流行波波形的相似性,以及同一故障类型、相同故障条件、不同故障位置下故障电流行波波形的差异性,构建线缆混合线路故障测距的 k -NN 算法。线缆混合线路的双端行波测距是根据故障初始行波到达混合线路两端的绝对时间之差判断出故障区段,再根据双端测距公式得到故障距离。讨论多段线缆混合线路单端故障测距的 k -NN 算法的适应性和有效性。

第 9 章分析输电线路故障电流行波的传播规律、通道选定方式和实测波形的特点,从数字图像处理角度提出基于 Hough 变换的波头标定方法,根据多个浪涌上升沿间的幅值、斜率关系来剔除相邻健全线末端反射波的干扰,甚至是对侧母线反射波的干扰,实现对故障点反射波的标定,并通过多个行波波头的时间间隔和不同分辨率下初始浪涌突变斜率一致性来校验标定结果的有效性,为行波测距奠定基础。在 $f_s=1\text{MHz}$ 下,若 N 取 5,突变检测算法 $S_2(k)$ 可以取得与小波模极大值对故障行波一样的检测标定效果;如果 N 取更大的值,有利于提高抗干扰能力,例如, N 取 10 可用于近端短路行波突变标定,或者用于对雷击故障行波标定,而取 50 可用于山火故障行波标定。以实际线路实际故障的实录行波为研究对象,采用 Hough 变换和波头突变能量 $S_2(k)$ 检测两种标定方法对故障电流行波波头进行协同标定,并形成有效行波波到时刻序列,以进一步提高行波标定的准确性和可靠性。在行波准确标定的前提下,提出单端行波协同、双端行波协同和单双端行波协同进行测距的协同测距思想和方法,以及线路历史故障案例复用的智能决策方法和智能行波测距。对于较强短路故障模态(如 LIF-SLG、LL-G)的协同测距:假设初始行波波到时刻记为 t_0 ,故障点第 1 次反射波(或对端第 1 次反射波)与其初始行波的波到时差记为 Δt_1 ,而对端第 1 次反射波(或故障点第 1 次反射波)与 $t_0 + l/v$ 时刻点的时差记为 Δt_2 ,分别在两个相继的行波观测时窗 $[t_0, t_0 + l/v]$ 和 $[t_0 + l/v, t_0 + 2l/v]$ 内,或者前 l/v 时窗长内有故障点反射波、后 l/v 时窗长内有对端反射波,或者反之,且故障点第 1 次反射波波到时刻和对端反射波第 1 次波到时刻总是关于第 1 个行波行程时刻点 $t_0 + l/v$ 对称的,它们与 $t_0 + l/v$ 时刻点时差为 $|l - 2x_f|/v$ 。根据与初始行波波到时差关系匹配判别式 $2x_f/v + 2(l - x_f)/v = 2l/v$ 或者 $\Delta t_1 + \Delta t_2 = l/v$,结合波头极性、微机线路保护给出的故障信息,可与故障线路单端协同、综合地判断较强故障模态、剔除健全线末端反射波的干扰,也可于双端进行相对于初始行波的波到时差匹配,实现不依赖于双端数据同步和不依赖于线路长度已知的新型双端行波测距。

第 10 章研究基于行波能量突变沿线分布特性的单端法行波测距原理及其方法。该测距方法的基础思想是将时域暂态行波波头突变,转变为沿线传播路径“行

波能量突变”分布,其本质是利用贝杰龙线路模型具有沿线长维度上的高通滤波器作用,并结合沿线“行波能量”不连续性的“突变”检测和表征:应用单端获取的故障电流行波数据,结合健全线路波阻抗来获取其量测母线的电压行波,应用贝杰龙线路传输方程自故障线路起端开始,推算沿线电压行波和电流行波分布,根据沿线电压行波、沿线电流行波和波阻抗进行沿线方向行波分解获取沿线分布的方向行波,再利用其正向行波和反向行波来构造测距函数 $f_u(x)$,因此可在线长维度上反映硬故障点 $A(x)$ 或者对偶故障点 $B(x)$ 处的行波突变,通过在线长维度上甄别并获取故障点位置,建立一种新型的单端行波测距原理和方法。采用时窗 $[t_0, t_0 + l/(2v)]$ 内的行波数据计算 $f_u(x)$ 在线长 $[0, l/2]$ 范围内行波波头能量突变点必然有闪络故障点 $A(x)$ (对于半线长内故障) 或者对侧反射波引起的突变点 $B(x)$ (对于半线长外故障),采用时窗 $[t_0 + l/(2v), t_0 + l/v]$ 内的行波数据计算 $f_u(x)$ 在线长 $[l/2, l]$ 范围内行波波头能量突变点必然有 $B(x)$ 突变点(对于半线长内故障)或者 $A(x)$ 突变点(对于半线长外故障),且有 $A(x) + B(x) = l$ 成立, A 点和 B 点关于 $l/2$ 点对称, A 点和 B 点与 $l/2$ 点之间的距离均为 $|l - 2x|/2$ 。给出了对雷击跳闸、山火跳闸、鸟害跳闸和普通闪络跳闸等大量实际闪络点进行定位的实例,能够实现单端行波测距计算机分析和“一键式”自动测距。探讨此种基于测距函数 $f_u(x)$ 的新型单端行波测距方法分别应用于链式架空输电线路、三角形环网架空线路、线缆混合线路、T 接线路和含有补偿元件输电线路的测距效果。

本书结合作者多年的研究和实践积累,重点对线路故障引起的行波及暂态量如何应用于故障测距进行解析,主要介绍输电线路雷击分析及雷电绕击故障与反击故障的识别、雷电绕击导线的注入导线雷电流波形反演恢复原理、交流线路过电压机理分析和计算,以及输电线路新型的行波法、频差法、时域法、回归分析法、案例推理智能决策等故障测距原理。研究测距的线路包括:架空输电线路、链式电网或者三角形环网架空线路、电缆、线缆混合线路、T 接线路和含有补偿元件的输电线路等。结构力求简练,以阐释方法原理为主线,配有大量仿真实例和效果图,并展示大量宽频暂态电流实录波形,以便读者理解掌握其要义。全书内容以作者长期的研究积累为主,并注意吸纳同行的部分研究成果作为补充,以便全书内容完整,以飨读者。

本书分上、下两册,上册包括第 1~5 章,下册包括第 6~10 章。值得指出的是,宏观世界里能量总是连续的、不能突变,为刻画暂态电气量 Δi 和 Δu 在观测时窗内不连续性的程度——一种衡量 Δi 和 Δu 不连续性的测度,取其在观测时窗内的平方和来表征并定义其为“突变能量”检测。此外,在沿线行波分布的突变检测和距离标定算法下,所谓行波沿线传播的能量突变性刻画标定是指其突变幅值相对差异达几个数量级的奇异性,而不是严格函数学意义上连续与否的描述,事实上,这里从工程应用出发,是一种对传输线波动方程沿线行波数值解奇异性程度的

表征与刻画。同时,波过程、电磁暂态和隐态阶段分属瞬态响应的不同时段,但本书并不刻意区别行波及暂态量,主旨是为行波暂态量分析与故障测距的研习者和相关科技工作者提供参考。

感谢华夏英才基金对本书的资助。本书的相关研究得到了国家自然科学基金重点项目“基于数据驱动的高原山地输电线路故障精确定位与雷击电流反演恢复研究”(编号:U1202233)、云南省自然科学基金重点项目“高原山地输电线路雷击检测识别及雷电参数反演恢复研究”(编号:2011FA032)、云南省科技攻关项目“高海拔大容量远距离输电中行波故障测距技术研究”(编号:2003GG10)、“高原山地长距离高压输电线路电弧故障检测定位技术与系统研制”(编号:2000B2-02)、云南省自然科学基金面上项目“新型时域法故障测距研究”(编号:99E006G)和“小波分析在线路故障测距应用研究”(编号:98E0409M)等的资助,同时,在与电网业界同行合作的一系列项目中有相当部分内容得到实际应用,一并谨致谢忱。

尽管作者在此领域研究二十余载,但水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2016年5月于昆明

目 录

前言

第 1 章 线路的行波与电磁暂态数字计算	1
1.1 线路的行波及其主要特征	3
1.1.1 线路的行波	3
1.1.2 行波的折反射与网格图描述	6
1.1.3 行波的耦合与色散	9
1.1.4 故障行波及其影响检测标定效果的主要因素	23
1.1.5 典型实录暂态行波分析	31
1.2 电磁暂态建模与数值计算	39
1.2.1 线路数值分析模型	39
1.2.2 集中参数元件数值模型	44
1.2.3 网络方程列写与等值历史电流源递推	46
1.2.4 考虑雷电冲击电晕的电磁暂态数字计算	50
1.2.5 频变参数线路任意故障电磁暂态数字计算频域方法	63
1.3 含 FACTS 元件的线路和 MTDC 线路故障仿真	79
1.3.1 含 STATCOM 的线路故障仿真	79
1.3.2 含 SSSC 的线路故障仿真	83
1.3.3 含 UPFC 的线路故障仿真	85
1.3.4 MTDC 线路故障仿真	88
1.4 电磁暂态仿真批处理与数模混合静态模拟	91
1.4.1 电磁暂态仿真批处理	91
1.4.2 数模混合静态模拟	93
第 2 章 电网过电压仿真分析及分类辨识	104
2.1 1000kV 输电线路	105
2.1.1 1000kV 输电线路过电压	106
2.1.2 1000kV 输电线路过电压仿真分析	115
2.1.3 1000kV 输电线路雷击过电压和故障过电压分类辨识	125
2.1.4 1000kV 输电线路过电压水平预测	127
2.1.5 半波长输电线路过电压分析	130
2.2 500kV 输电线路	143

2.2.1	带补偿的 500kV 输电线路过电压	144
2.2.2	500kV 同塔双回输电线路不平衡绝缘	153
2.2.3	500kV 输电线路雷击闪络性质分析及雷电流波形反演	157
2.2.4	断路器合闸电阻的适用条件影响分析	190
2.3	110kV 线缆混合线路	205
2.3.1	110kV 线缆混合线路过电压	208
2.3.2	110kV 线缆混合线路过电压仿真分析	211
2.4	35kV 配电网	220
2.4.1	35kV 配电网过电压	222
2.4.2	35kV 配电网过电压仿真分析	228
2.4.3	35kV 配电网线路过电压分类辨识	234
2.4.4	35kV 配电网铁磁谐振消谐	241
2.5	全并联 AT 牵引网	243
2.5.1	牵引网线路过电压	244
2.5.2	牵引网线路过电压仿真分析	246
第 3 章	行波及暂态量含有故障位置信息解析	252
3.1	行波突变反映故障距离及其测距应用	254
3.2	频差反映故障距离和频差测距原理	265
3.2.1	故障行波的频率特征分析	265
3.2.2	自由振荡分量的频率特征分析	269
3.2.3	故障行波频率特征与自由振荡分量频率特征的统一性	273
3.3	工频量反映故障位置和工频量测距原理	282
3.4	衰减直流分量反映故障位置及测距应用	285
第 4 章	架空输电线路行波测距	289
4.1	行波测距若干命题讨论	291
4.2	行波检测与波头标定方法	327
4.3	线路雷击点与闪络点不一致的识别与测距	357
4.4	电弧故障的行波测距	367
4.5	利用单端行波相对极性和时差的 ANN 故障测距	368
4.6	多端 T 接线路故障行波测距及有效性分析	372
4.7	现场实录暂态波形中行波数据的筛选	397
4.8	有限广域行波测距	409
4.8.1	链式网冗余行波信息分析及其应用	410
4.8.2	最小行波回路及其搜索算法	414
4.8.3	三角形环网冗余行波信息分析及其应用	417

4.8.4 基于电网广域行波测距的装置配置优化	430
4.8.5 基于测后模拟原理和行波路径匹配的广域电压行波测距	435
第 5 章 利用频差进行故障测距探析	438
5.1 三类母线接线形式的输电线路频差法故障测距	439
5.2 利用分闸暂态电压的频差进行故障测距	452
5.3 基于现场实录故障行波的频差法故障测距分析	455
5.4 基于普通故障录波数据的频差法故障测距	456
5.5 单相接地故障的频差法故障测距探析	457
参考文献	463

第1章 线路的行波与电磁暂态数字计算

电力系统受到冲击或电网突然改构引起的电磁暂态过程是由于保守性系统中节点电荷和回路磁链必须守恒,表现为储能动态元件的状态电气量不能突变。研究电磁暂态的目的主要在于分析计算电力系统中开关动作、短路、雷击和正常运行中出现的各种扰动所引起的电压电流暂态响应,如图 1-1 所示,以及电力电子装置所致的暂态电压和高频率的电流振荡,为变压器、断路器等高压电气设备和输电线路的选型及绝缘配合,继电保护定值整定,过电压抑制措施的制定,以及电力电子装置控制策略的设计等提供数据支持。电磁暂态过程变化很快,通常需要分析计算毫秒级(如开关操作时的暂态恢复电压等)、微秒级(如雷击、故障线路行波等)的电压、电流瞬时值。该过程的本质是各元件中磁场和电场的能量分布重新达到平衡,伴随着波的多次折反射,电场、磁场能量分布变化将通过电压和电流的瞬态改变表现出来,它们既是时间的函数也是空间的函数,具有波动性,故称为行波。对应不同性质的激励源,反映观测点处的行波暂态量响应存在差异。以如图 1-2 所示的实测暂态电流为例,如山火故障、母线故障(见文后彩图)、雷击故障、雷击未闪络,其发生机理不同导致观测到的故障电流波形存在差异;线路故障和母线故障因其拓扑不同导致所观测的各回线电流的群体幅值相位关系不同。深入研究其变化规律并发掘其中所蕴涵的故障信息,是构造新型继电保护与故障定位原理的基础。电磁暂态数字仿真是用数值计算方法对电磁暂态过程进行仿真模拟,是研究电磁暂态过程的重要手段,通常需要计及元件的电磁耦合、分布参数,甚至线路结构和参数频变特性的因素。暂态行波过程仿真准确与否,和系统中元件等效模型的选择、数值方法的选用密不可分。从建模和数值计算的角度看,难以建立一个普遍满足适于全过程分析的全参数精确模型和数值方法,需根据具体研究领域和命题的目标,建立相应的模型并采用相应的数值方法。本章以行波为切入点,总结行波传播与折反射规律,以及行波耦合、色散和衰耗等基本特征,并以此作为电力系统行波暂态量应用的理论基础。在此基础上,介绍便于计算机实现的电磁暂态数字仿真算法,对常用元件的建模和系统方程的求解进行详细介绍,分别给出一种考虑线路雷电流冲击电晕影响的时域法和考虑电弧故障、时变电阻及发展性故障仿真的频域法电磁暂态计算及其实现,同时,基于目前主流电磁暂态仿真环境,给出含 FACTS 线路和 MTDC 线路故障仿真实例。针对现有主流软件难以对沿线任意位置故障的电磁暂态仿真进行遍历的不足,给出一种基于内核调用的复杂故障批处理仿真思路和实现方法。最后介绍数字物理混合静态模拟的构建,以满足输电线路快

速暂态行波保护和行波测距装置在实验室环境下进行较全面的考量测试的需要。

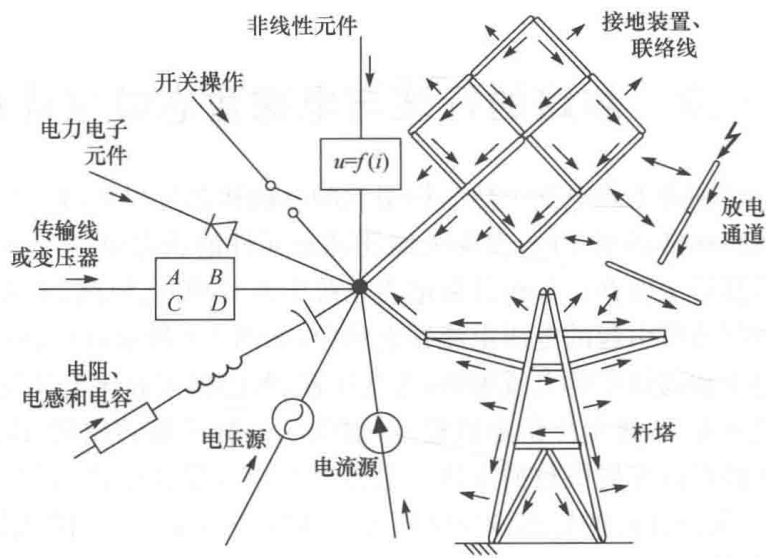


图 1-1 电力系统各类电磁暂态扰动示意图

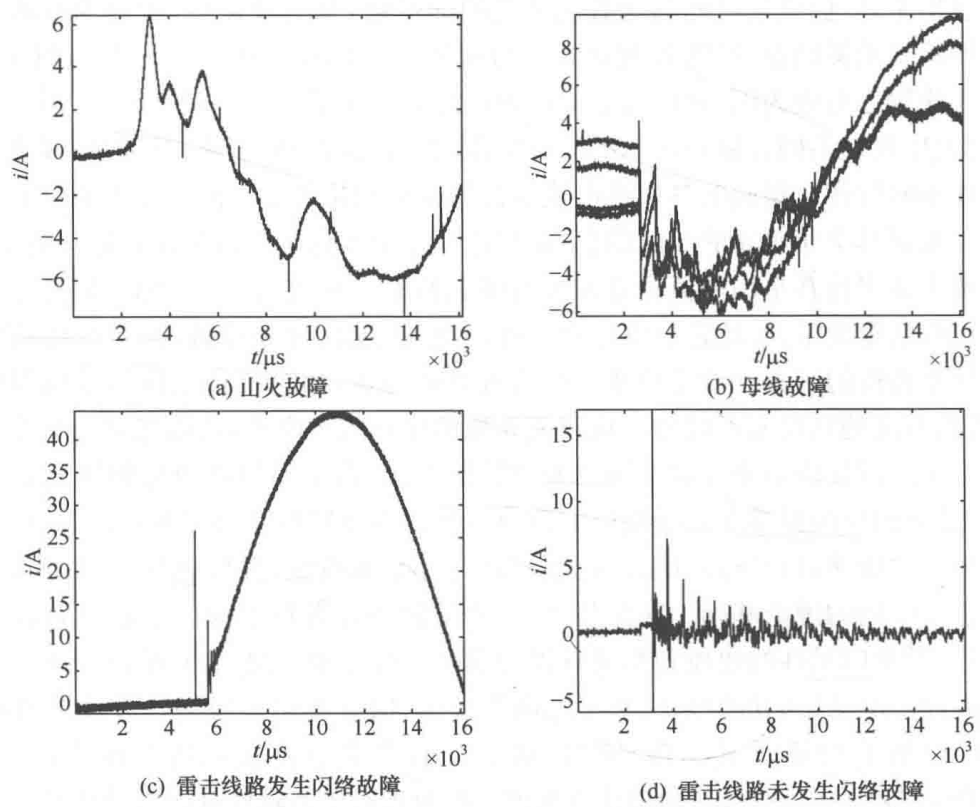


图 1-2 实际线路典型暂态电流行波录波

1.1 线路的行波及其主要特征

1.1.1 线路的行波

将一电压源接通到输电线上,从线路微元角度观察,靠近电压源的线路分布电容立即充电,并经线路分布电感向相邻分布电容放电。较远处的电容要间隔一段时间才能充上一定数量的电荷,并向更远处的电容放电。这样,电容依次充电,线路沿线逐渐建立起电场,形成电压,即有一电压行波以一定的速度沿线路方向传播。在线路电容的充放电过程中,伴有电流流过导线电感,在导线周围空间建立起磁场。因此和电压波相对应,还有电流行波以同样的速度沿线路方向传播。电压行波和电流行波沿线路的流动,满足坡印亭矢量的规定,实质就是电磁暂态能量沿线路方向的传播过程。在距传输线端 x 处取一微分长度 dx ,整个均匀传输线可视为无限多个这种微分段等效参数模型级联而成,如图 1-3 所示。

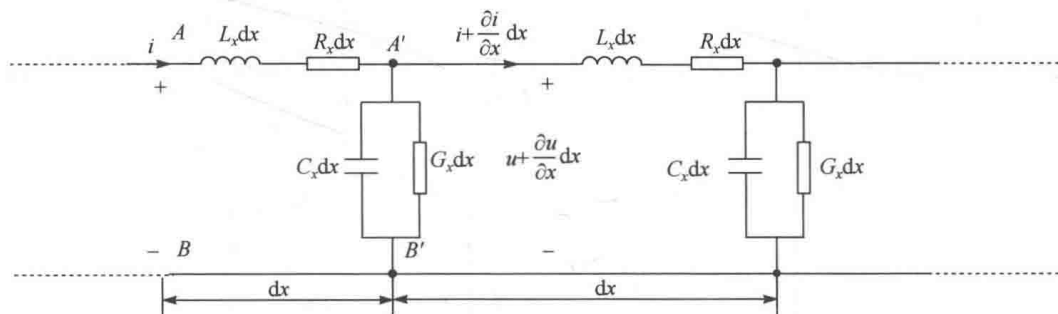


图 1-3 单相线路微元 dx 等值电路

对于一定的时间来说,沿 x 正向电压的增加率为 $\partial u / \partial x$, 电流的增加率为 $\partial i / \partial x$, 始端的电压和电流分别为 u 和 i , 则在 $A'B'$ 两端的电压和 A' 点的电流分别为 $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ 和 $i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$ 。对回路 $AA'B'BA$ 应用基尔霍夫电压定律, 对节点 A' 应用基尔霍夫电流定律, 得

$$u(x, t) - u(x + \Delta x, t) = \left[R_x i(x, t) + L_x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \right] \Delta x \quad (1-1a)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = \left[G_x u(x + \Delta x, t) + C_x \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} \right] \Delta x \quad (1-1b)$$

将式(1-1a)、式(1-1b)两端同除以 Δx 并取 $\Delta x \rightarrow 0$, 得到

$$\begin{cases} -\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = R_x i(x, t) + L_x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = G_x u(x, t) + C_x \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中, R_x, L_x, G_x, C_x 为线路单位长度的电阻、电感、电导、电容。线路全长为 l 。

传输线方程是偏微分方程组, 不易获得解析解。为了解决实际问题, 通常采用数值求解方法。其中, 时域有限差分(FDTD)法最具代表性, 其主要思想是在空间和时间上离散化, 用差分方程代替偏微分方程, 求解差分方程组, 得出各网格单元的场值, 精度较高、计算量较小。

取节点电压和两点间电流作为求解分量, 将传输线沿线路方向均分为 N 段, 每段长度为 Δx , 同时将时间以 Δt 的步长离散化。为保证算法的稳定性, 也为符合行波在行进过程中产生位移电流连续、感应电压平衡这一物理本质, 将电压电流交叉表示。将第一点设为电压节点 u_1 , 然后将间隔 Δx 的点依次设定为 $u_2, u_3, \dots, u_{N+1}$, 同理, 把电流分成 $i_1, i_2, \dots, i_{N+1}$, 则电压和相邻电流点间被分为 $\Delta x/2$, 如图 1-4 所示。对时间也进行交叉, 每个电压和相邻电流点被分割为 $\Delta t/2$, 则式(1-2)可表示为

$$\frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta x} + L_x \frac{i_{i+1/2}^{n+1/2} - i_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta t} + R_x \frac{i_{i+1/2}^{n+1/2} + i_{i-1/2}^{n+1/2}}{2} = 0 \quad (1-3a)$$

$$\frac{i_{i+1/2}^{n+1/2} - i_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} + C_x \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + G_x \frac{u_i^{n+1} + u_i^n}{2} = 0 \quad (1-3b)$$

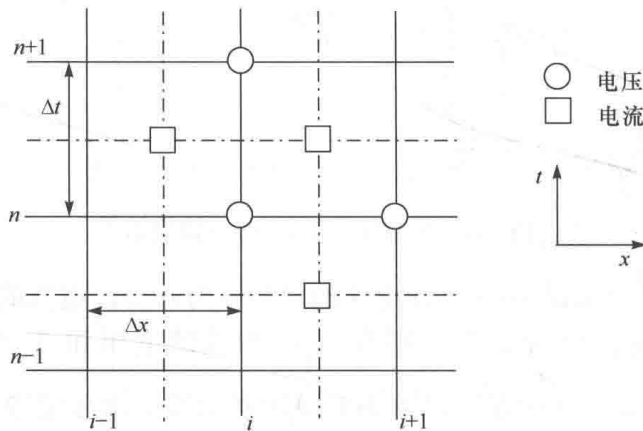


图 1-4 传输线时空网格图

传输线的电压、电流波过程变成一组时间、空间上的离散点, 按一阶差分公式, 经过简化, 可得到如下 FDTD 迭代公式:

$$\left(L_0 \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{R_0}{2} \Delta x \right) i_{i+1/2}^{n+1/2} = \left(L_0 \frac{\Delta x}{\Delta t} - \frac{R_0}{2} \Delta x \right) i_{i+1/2}^{n-1/2} - (u_{i+1}^n - u_i^n) \quad (1-4a)$$

$$\left(C_0 \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{G_0}{2} \Delta x \right) u_i^{n+1} = \left(C_0 \frac{\Delta x}{\Delta t} - \frac{G_0}{2} \Delta x \right) u_i^n - (i_{i+1/2}^{n+1/2} - i_{i-1/2}^{n+1/2}) \quad (1-4b)$$

并与根据传输线始末端节点集中参数电路模型推导出相应偏微分方程的边界条件一起构成求解传输线方程的迭代方程组。该方法的优势在于能方便计算线路上任