



普通高等教育“十二五”规划教材

华东交通大学教材（专著）基金资助项目

电力系统电磁暂态计算 与EMTP应用

吴文辉 曹祥麟 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

电力系统电磁暂态计算 与EMTP应用

吴文辉 曹祥麟 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书将 EMTP 工具与电力系统电磁暂态理论计算知识相结合,对 ATP-EMTP 在电力系统电磁暂态中的仿真计算原理与应用做了详细介绍,尤其对 ATPDraw 的应用做了详细介绍。全书共分 9 章,第 1 章对电力系统电磁暂态进行了概述;第 2 章介绍了电磁暂态计算用的电力系统设备模型;第 3 章对电磁暂态仿真程序 EMTP 原理进行了详细介绍;第 4 章介绍 ATP-EMTP 的视窗接口程序 ATPDraw 的应用基础;第 5 章阐述了工频过电压计算及其仿真;第 6 章阐述了各种操作过电压计算及其仿真;第 7 章阐述了雷电过电压计算及其仿真;第 8 章阐述了特快速暂态过电压计算及其仿真;第 9 章阐述了高压直流输电的电磁暂态过程计算及其仿真。

本书可作为高等院校电气工程专业高年级本科生教材,也可供电气工程专业研究生、电力工程专业技术人员和电力系统电磁暂态领域广大科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统电磁暂态计算与EMTP应用 / 吴文辉, 曹祥麟编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 9
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0217-8

I. ①电… II. ①吴… ②曹… III. ①电力系统—暂态特性—电磁计算—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TM74

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第230447号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用
作 者	吴文辉 曹祥麟 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 19.25 印张 456 千字
版 次	2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	36.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

电力系统发生故障或进行操作时，系统的运行参数发生急剧变化，系统的运行状态有可能急促地从一种运行状态过渡到另一种运行状态，也有可能使正常运行的电力系统局部甚至全部遭到破坏，这个过渡过程称作电力系统的暂态。电磁暂态过程分析的主要目的在于分析和计算故障或进行操作后可能出现的暂态过电压和过电流，以便对电力设备进行合理设计。另外，调查事故原因，寻找对策；计算电力系统过电压发生概率，预测事故率；检查电气设备的动作责能，如断路器的暂态恢复电压和零点偏移；检查继电保护和自动装置的响应等，都离不开电磁暂态过程的计算和模拟。

电力系统数字仿真是研究电磁暂态过程的重要方法，时域仿真研究中的 Bergeron 模型经 Dommel 实用化改进后，业已成功地应用于著名的 EMTP 当中，广泛应用于电力领域的规划、设计、维护、运行和培训各部门。但 EMTP 的严重不足在于对各种故障和操作进行暂态仿真前的预处理工作是相当繁杂的，使许多电力工程专业技术人员望而生畏，迟迟不敢尝试，ATP-Draw 解决了这个问题，它是建立计算模型用的人—机对话图形接口，是基于 Windows 操作系统的 ATP-EMTP 程序的图形预处理程序，本书将 EMTP 工具与电力系统电磁暂态理论计算知识相结合，对 ATP-EMTP 在电力系统电磁暂态中的仿真计算原理与应用，尤其对 ATPDraw 应用做了详细介绍。希望该书能为初学者和喜欢 EMTP 的电力工作者打开一扇窗。

全书阐述严谨、脉络分明、内容丰富、文字精练，还有大量以 ATP-EMTP 作为计算工具的举例和习题。

本书由吴文辉和曹祥麟编著，华东交通大学吴文辉完成了第 1 章、第 3~9 章内容的编写，参与了第 2 章部分内容的编写；广东电力设计研究院曹祥麟完成了第 2 章大部分内容的编写并进行了统稿。

华东交通大学王勳教授和广东电力设计研究院李志泰教授级高工审查了书稿并提出了宝贵意见，在此致以诚挚的谢意！

本书获得华东交通大学本科生规划教材基金的资助，得到中国水利水电出版社的大力支持，在此一并表示感谢！

限于作者的水平和经验，书中难免有不当或错漏之处，诚请读者批评指正，并请发送邮件至 wwh7@ecjtu.jx.cn。

编者

2012年5月

目 录

前言

第 1 章 电力系统电磁暂态概述	1
1.1 电力系统电磁暂态现象	1
1.2 电力系统电磁暂态分析的目的	3
1.3 电力系统电磁暂态研究的方法	3
1.4 电力系统电磁暂态的特点	5
1.5 电力系统数字仿真.....	13
习题	19
第 2 章 电磁暂态计算用的电力系统设备模型	20
2.1 架空线路和电缆.....	20
2.2 电机模型.....	45
2.3 变压器、互感器和电抗器模型.....	54
2.4 母线.....	62
2.5 断路器和隔离开关.....	64
2.6 避雷器.....	69
2.7 接地网.....	71
2.8 铁塔和塔脚电阻.....	72
2.9 空气间隙放电.....	77
2.10 电晕	85
2.11 换流阀	90
习题	92
第 3 章 电磁暂态计算程序 EMTP	93
3.1 EMTP 简介	93
3.2 单相暂态等值计算网络的求解	103
3.3 多相暂态等值计算网络的求解	106
3.4 带开关操作的网络解法	114
3.5 非线性元件的处理	117

3.6	非零初始状态的确定	122
3.7	EMTP 仿真计算的功能	128
	习题	129
第 4 章	ATPDraw 应用基础	130
4.1	ATPDraw 简介	130
4.2	ATPDraw 的主窗口	131
4.3	ATPDraw 元件选择菜单	148
4.4	ATPDraw 的基本操作	154
4.5	ATPDraw 仿真实例	157
	习题	172
第 5 章	工频过电压计算	173
5.1	空载长线路的电容效应	173
5.2	线路甩负荷引起的工频过电压	177
5.3	单相接地故障引起的工频过电压	178
5.4	自动电压调节器和调速器的影响	180
5.5	限制工频过电压的其他可能措施	180
5.6	工频过电压的 EMTP 仿真	181
	习题	184
第 6 章	操作过电压计算	185
6.1	分闸操作过电压	185
6.2	合闸操作过电压	192
6.3	暂态恢复电压计算	200
6.4	电容性冲击电流	214
6.5	开断小的电感性电流	216
6.6	变压器的冲击电流	218
6.7	间歇电弧接地过电压	225
	习题	231
第 7 章	雷电过电压计算	232
7.1	雷电放电过程	232
7.2	雷电流的波形	233
7.3	杆塔上的直击雷过电压计算	236
7.4	线路上的直击雷过电压计算	239
7.5	线路上的感应雷过电压计算	241
7.6	波通过串联电感和并联电容	243
7.7	流经避雷器的雷电流计算	245
7.8	被保护设备上的过电压计算	247
7.9	雷电暂态 EMTP 仿真	249

习题	258
第 8 章 特快速暂态过电压计算	259
8.1 特快速暂态过电压产生的机理	259
8.2 特快速暂态过电压的特性	260
8.3 特快速暂态过电压的影响因素	260
8.4 特快速暂态过电压的防护	262
8.5 等效模型及参数	262
8.6 EMTP 仿真分析	263
习题	268
第 9 章 高压直流输电系统的暂态计算	269
9.1 高压直流输电概述	269
9.2 高压直流输电系统中换流器的数学模型	274
9.3 高压直流输电控制系统的数学模型	278
9.4 高压直流输电系统的暂态计算	283
9.5 GIGRE 直流输电标准测试系统的暂态响应特性	292
9.6 高压直流系统事故分析	295
习题	298
参考文献	299

第 1 章 电力系统电磁暂态概述

1.1 电力系统电磁暂态现象

电力系统稳态运行时，发电厂发出的功率与用户所需要的功率及电网中损耗的功率相平衡，系统的电压和频率都是稳定的。但电力系统在运行过程中常常会发生故障或需要进行操作，常见的电力系统故障有：雷击电力设备等雷害故障，短路、接地故障和谐振等电气故障，断线等机械故障。常见的电力系统操作有：

(1) 断路器的投切操作，如合空载线路、合空载变压器、切空载线路、重合闸、甩负荷等。

(2) 隔离开关的投切操作，如母线投切等。

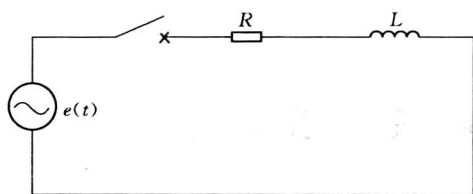
电力系统发生故障或进行操作时，系统的运行参数发生急剧变化，系统的运行状态有可能急促地从一种运行状态过渡到另一种运行状态，也有可能使正常运行的电力系统局部甚至全部遭到破坏，其运行参数大大偏离正常值，如不采取特别措施，系统很难恢复正常运行，这将给国民经济生产和人民生活带来严重的后果。

电力系统运行状态的改变，不是瞬时完成的，而要经历一个过渡状态，这种过渡状态称为暂态过程。电力系统的暂态过程通常可以分为电磁暂态过程和机电暂态过程。电磁暂态过程指电力系统各元件中电场和磁场以及相应的电压和电流的变化过程，机电暂态过程指由于发动机和电动机电磁转矩的变化所引起的电机转子机械运动的变化过程。

虽然电磁暂态过程和机电暂态过程同时发生并且相互影响，但由于现代电力系统规模的不断扩大，结构愈益复杂，需要考虑的因素繁多，再加上这两个暂态过程的变化速度相差很大，要对它们统一分析是十分复杂的工作，因此在工程上通常近似地对它们分别进行分析。例如，在电磁暂态过程分析中，由于在刚开始的一段时间内，系统中的发电机和电动机等转动机械的转速由于惯性作用还来不及变化，暂态过程主要决定于系统各元件的电磁参数，故常不计发动机和电动机的转速变化，即忽略机电暂态过程。而在静态稳定性和暂态稳定性等机电暂态过程分析中，转动机械的转速已有了变化，暂态过程不仅与电磁参数有关，而且还与转动机械的机械参数（转速、角位移）有关，分析时往往近似考虑或甚至忽略电磁暂态过程。只在分析由发动机轴系引起的次同步谐振现象、计算大扰动后轴系的暂态扭矩等问题中，才不得不同时考虑电磁暂态过程和机电暂态过程。

下面以一个简单开关接通 RL 电路的例子，以便获得对在电力系统暂态时起关键作用的物理过程的充分了解。

一个正弦波电压接通到一个电感与电阻串联的电路，如图 1-1 所示。这实际上是

图 1-1 正弦波电压源接通到 RL 串联电路

一个高压断路器闭合到短路的输电线路或短路的电缆的最简单单相表示法。电压源 $e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta)$ 代表连接的同步发电机的电动势。电感 L 包括发电机的同步电感、电力变压器的漏电感与母线、电缆与输电线的电感，电阻 R 表示供电电路的电阻损耗。

得到电路方程为

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1-1)$$

该方程为一阶常系数、线性、非齐次常微分方程，其解就是合闸电路的全电流，它由两部分组成：稳态分量和暂态分量，即

$$i = i_p + i_{ap}$$

其中稳态分量为

$$i_p = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\omega t + \theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right) \quad (1-2)$$

暂态分量，也就是合闸电流的自由分量，记为

$$i_{ap} = Ce^{pt} = Ce^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1-3)$$

$$p = -\frac{R}{L}$$

$$T_a = -\frac{1}{p} = \frac{L}{R}$$

式中： p 为特征方程 $R + pL = 0$ 的根； T_a 为暂态分量电流衰减的时间常数； C 为由初始条件决定的积分常数。

假定在开关闭合之前，电感 L 中的磁通为 0，根据磁通守恒定律，在闭合的瞬间，即

$$C + \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right) = 0$$

由此得到

$$C = \frac{-E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right) \quad (1-4)$$

从而得到合闸的全电流表达式为

$$i(t) = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\omega t + \theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right) + \frac{-E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right) e^{-(R/L)t} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 中的暂态分量含有 $e^{-(R/L)t}$ 衰减项，也称为直流分量，其系数为常数，数值大小取决于电流合闸瞬间，在 $\left(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right)$ 为 $k\pi$ (其中 $k=0, 1, 2, \dots$) 时，直流分量为 0，电流立即进入稳态，换言之，不存在暂态振荡过程。但当开关闭合电路不在 $\left(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right)$ 为 $k\pi$ (其中 $k=0, 1, 2, \dots$) 时，合闸过程将引起电磁暂态过程，在

$(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R})$ 为 90° 时, 暂态过程将达到最大电流, 如图 1-2 所示。

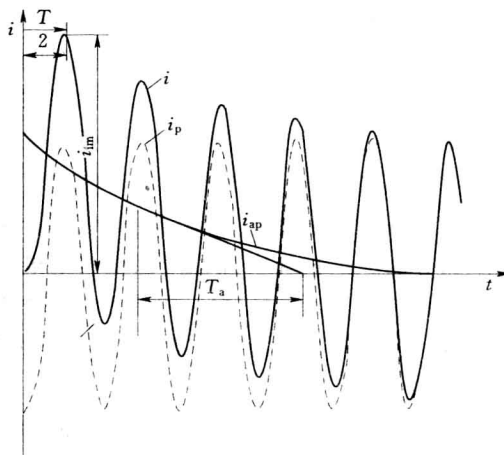


图 1-2 开关合闸的暂态过程电流波形

1.2 电力系统电磁暂态分析的目的

电磁暂态过程分析的主要目的在于分析和计算故障或进行操作后可能出现的暂态过电压和过电流, 以便对电力设备进行合理设计。通常情况下, 电力系统电磁暂态产生的过电压在确定设备绝缘水平中起决定作用, 据此制定高电压试验电压标准, 确定已有设备能否安全运行, 并研究相应的限制和保护措施。此外, 对于研究电力系统新型快速保护装置的动作原理及其工况分析, 故障测距原理与定点方法以及电磁干扰等问题, 也常需要进行电磁暂态过程分析。另外, 调查事故原因, 寻找对策; 计算电力系统过电压发生概率, 预测事故率; 检查电气设备的动作责能, 如断路器的暂态恢复电压和零点偏移; 检查继电保护和自动装置的响应等, 也离不开电磁暂态过程的计算和模拟。

电磁暂态过程变化很快, 一般需要分析和计算持续时间在 ms 级, 甚至是 μs 级以内的电压、电流瞬时值变化情况, 因此, 在分析中需要考虑元件的电磁耦合, 计及输电线路分布参数所引起的波过程, 有时甚至要考虑三相结构的不对称、线路参数的频率特性以及电晕等因素的影响。

1.3 电力系统电磁暂态研究的方法

为了保证电力系统运行的可靠性、安全性和经济性, 在电力系统设计、运行、分析和研究中必须全面地了解实际系统的电磁暂态特性。目前, 研究电力系统电磁暂态过程的手段有 3 种:

- (1) 系统的现场实测方法。
- (2) 应用暂态网络分析仪 (Transient Network Analyzer, 简称 TNA) 的物理模拟

方法。

(3) 计算机的数字仿真（或称数值计算）方法。

系统的现场实测方法是在实际的电力系统中直接进行试验和研究，20 世纪 60 年代之前经常要在实际电力系统进行短路、操作等试验，这种试验对电力系统的考验是真实和严格的，以确保电力系统运行的可靠性、安全性和经济性，但是系统的现场实测方法会对电力系统的正常运行和电气设备带来很大危害，短路点的电弧有可能烧坏电气设备，很大的短路电流通过设备会使发热增加，当持续一定时间后，可能使设备过热而损伤；很大的短路电流引起的电动力有可能使设备变形或遭到不同程度的破坏；操作试验过程中产生的过电压可能引起电气设备载流部分的绝缘损坏，加剧绝缘材料的老化。即便如此，实测对于研究电力系统电磁暂态过程仍是非常重要的，它一方面验证 TNA 及数字仿真的准确性，为系统安全运行提供依据；另一方面可以全面研究系统各类元件的参数特性，为 TNA 及数字仿真提供更精确的原始数据。

系统的现场实测常常会遇到困难，有些困难甚至是不可能解决的，利用模型系统进行试验和分析就成为一种非常有效的途径。暂态网络分析仪就是一种用于研究电力系统动态特性的物理模型系统。TNA 方法多用于模拟操作过电压和交流过电压的暂态现象，同时通过改变元件特性，TNA 也可用来模拟更高频率下的暂态现象。它是在相似理论的指导下，把实际电力系统的各个部分，如同步发电机、变压器、输配电线路、电力负荷等按照相似条件设计、建造并组成一个电力系统模型，这样将一个高电压、大电流、体积庞大的电力系统，按照一定的比例转化为一个低电压、小电流、体积较小的模拟试验台，在模拟台中出现的电磁暂态现象，电压和电流的波形与它模拟的电力系统是一样的，用这种模型代替实际电力系统进行各种正常运行与故障状态的试验和分析。与系统的现场实测相比，TNA 方法对电力系统的正常运行和电气设备不产生影响，为了缩小模拟装置的尺寸，节省电感元件和电容元件，减少模拟设备的昂贵费用，并考虑到现有的技术条件、模拟精度要求等，选择恰当的比例尺是非常重要的。TNA 具有物理意义清晰，易于理解和使用的优点，可以多次重复试验现象，便于观察和研究，北美不少大的电力公司都将 TNA 作为培训新员工的一种工具。

随着现代电力系统的发展，电力系统的规模和复杂程度发生很大变化，采取物理模型的动态模拟方法受到很大限制。与此同时，数字计算机和数值计算技术飞速发展，数字计算机的性能价格比不断提高，出现了用数学模型代替物理模型的新型模型系统。电力系统数字仿真（Digital Simulation of Power System）就是将电力系统的电源、网络和负荷元件建立其数学模型，用数学模型在数字计算机上进行实验和分析的过程。电力系统数字仿真的主要步骤为建立各元件数学模型、建立数字仿真模型和进行仿真试验。建立数学模型是处理物理原型与数学模型之间的关系。有些数学模型是利用数字计算机和模拟计算机的混合数学模型系统。电力系统数字仿真是一门新兴的技术科学，它的产生和发展是同现代科学技术发展分不开的，数字仿真与实际系统试验和动态物理模拟相比，不仅节省了大量的人力、物力和财力，而且不受外部条件的限制，几乎不受系统规模和时间跨度的约束，甚至不受各种暂态现象频率范围的限制（理论上它可以对各类暂态过程进行计算，但是，它需要相关设备真实的频率特性，有时候，这种频率特性是很难得到的）。具有无可比拟

的灵活性，能达到试验不可达到的广度和深度。譬如我国南北联网这样的课题，地理上相距数千公里，跨越了几个大电网，没有办法用试验来分析联网可能出现的问题，但通过数字仿真发现南北联网可能会出现低频振荡问题。今天实际系统的现场实测方法主要是为了建立数学模型，取得数学模型的参数。

1.4 电力系统电磁暂态的特点

1.4.1 频率范围广

电力系统中暂态现象的研究所涉及的频率范围广，从直流到大约 50MHz 的范围。高于系统频率的暂态现象通常涉及到电磁暂态，而低于系统频率的暂态现象主要涉及到机电暂态过程。表 1-1 给出了多种暂态现象的起因以及它们通常的频率范围。

表 1-1 电力系统暂态的起因及频率范围

起 因	频 率 范 围	起 因	频 率 范 围
投入变压器时的铁磁谐振	(DC) 0.1Hz~1kHz	断路器端部故障 (BTF)	50/60Hz~20kHz
甩负荷	0.1Hz~3kHz	短路故障	50/60Hz~100kHz
故障清除	50/60Hz~3kHz	断路器多次重燃	10kHz~1MHz
故障发生	50/60Hz~20kHz	雷击	10kHz~3MHz
线路充电	50/60Hz~20kHz	GIS 故障和隔离开关操作	100kHz~50MHz
线路重合闸	(DC) 50/60Hz~20kHz		

网络中每个元件的模拟都要与所研究的特定暂态现象的频率范围相符合。当所研究现象的频率大于 1MHz 时，如 GIS 中由于隔离开关操作所引起的快速暂态现象，则不仅在母线上产生波的传播，而且施加在变压器、支柱绝缘子以及在某些情况下管形母线上的弯管处，它们非常小的电容和电感对模拟结果都将产生非常重要的影响。

表 1-1 中所列电磁暂态现象的频率范围可以分成 4 组，对应于各暂态现象的频率范围之间存在着重叠，图 1-3 是国际大电网会议 (CIGRE) 对各种过电压的频率分类；各类的频率范围是与其所表示的过电压波形的实际陡度相关的。研究者必须清楚自己的研究

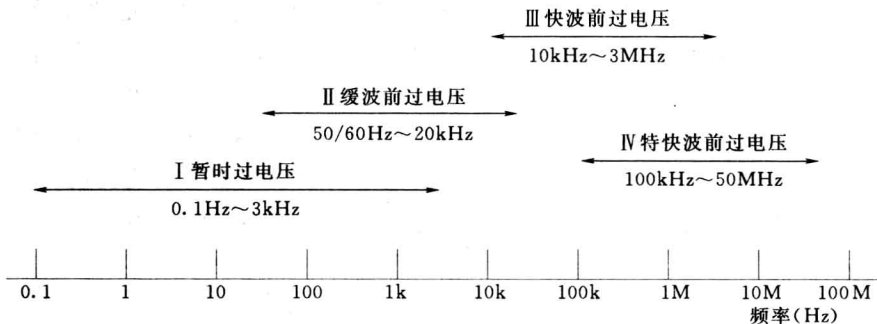


图 1-3 各种过电压的频率范围

对象所在的频率范围，如操作过电压属于缓波前过电压波形范围，雷电过电压属于快波前过电压波形范围，以确定被模拟设备的频率特性，只有这样，才能得到满意的电磁暂态分析计算结果。

通常，频率越高，所考虑的现象（如过电压）在时间上空间上的衰减越快，因此所考虑的物理范围（模拟范围）越小，模拟时间越短。相对地，在工频或与此接近的频率领域，为了掌握现象的性质，需要大范围长时间的模拟。图 1-4 表示电力系统数字仿真中各种计算所考虑现象的时间幅度和计算涉及的系统规模。SSR 为发电机轴系统引起的次同步谐振。

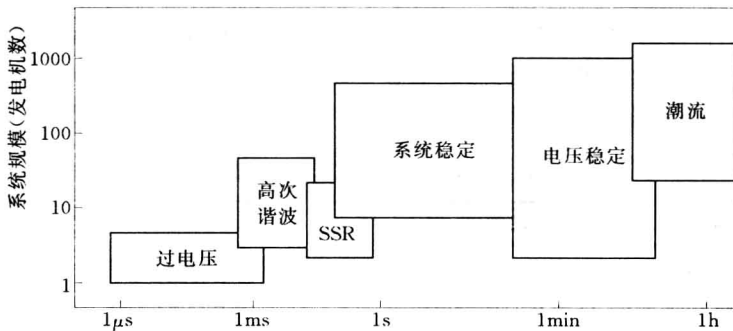


图 1-4 电力系统各种现象的变化速度和计算范围

1.4.2 元件模型因计算目的而异

电力系统由各种不同的元件所组成，元件的动态特性对于系统的暂态过程有直接的影响。为此，首先需要研究各元件的动态特性，建立它们的数学模型。在此基础上，根据系统的具体结构，即各元件之间的相互关系，组成全系统的数学模型，然后采用适当的数学方法进行求解，这便是电力系统暂态分析的一般方法。

然而，由于各元件的动态响应有所不同，系统各种暂态过程的性质也不相同。因此，在不同目的暂态过程分析中，所考虑的元件种类和对它们数学模型的要求并不相同。例如，在电磁暂态过程分析中，所研究的暂态过程持续时间通常较短，在此情况下，一些动态响应比较缓慢的元件，如原动机及调速系统等的影响往往可以忽略不计，而发电机定子回路和电力网中的电磁暂态过程则需加以考虑。相反，在电力系统稳定性分析中，则通常忽略发电机定子回路和电力网中的电磁暂态过程，而将线路和变压器等元件用它们的等值阻抗来描述。另外，就同一种系统暂态过程来说，对于不同的分析精度和速度要求，元件所用数学模型的精确程度也不相同。一般地说，在进行系统规划和设计时，暂态分析的精度要求可以适当降低，这时各元件可以采用较粗略的数学模型，以便提高分析速度。因此，在建立元件数学模型时，不但需要研究它们的精确模型，而且需要考虑各种简化模型，以适应不同的需要。

在建立元件模型时还必须注意研究对象所处的频率范围。例如，在计算交流过电压时，变压器采用通常的以互感及绕组漏感和电阻表示的模型，如图 1-5 (a) 所示；但在计算操作过电压时，除了上述要素外，还需要考虑绕组的对地电容和端子间电容及绕组间

电容，如图 1-5 (b) 所示；而在计算雷过电压时，变压器模型通常用冲击电容表示，无需考虑电感和电阻要素，如图 1-5 (c) 所示。当研究现象的频率很高时，变压器和互感器的杂散电容、引线的微小电感对计算结果都有举足轻重的影响。

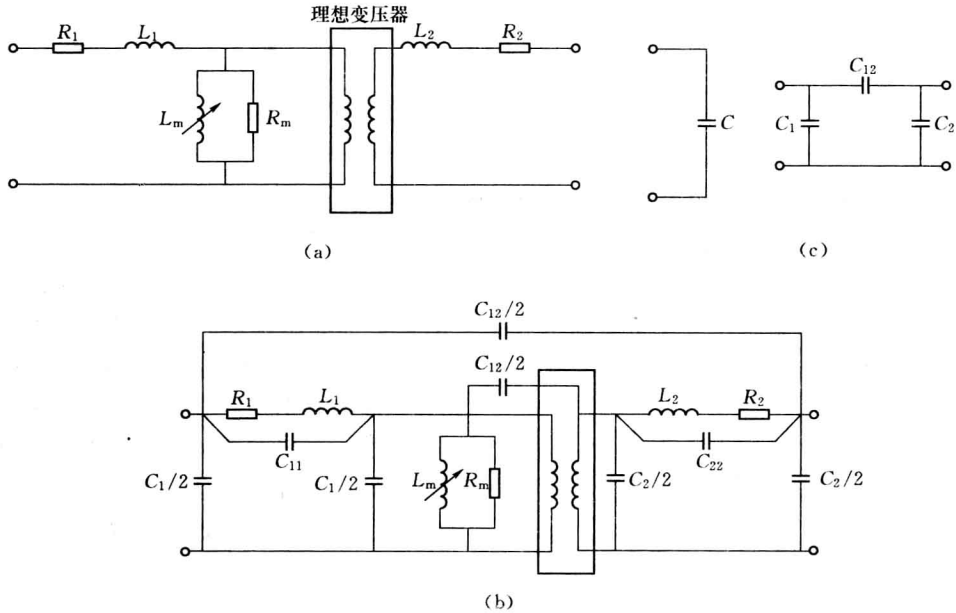


图 1-5 变压器的模型
(a) 交流过电压计算用；(b) 操作过电压计算用；(c) 雷过电压计算相

1.4.3 行波现象和分布参数

电力系统采用长线路将能源中心发出的电能输送给各电力用户，长线路的具体形式有架空输电线路和电缆线路两种，每微段的线路都呈现自感和对地电容，即线路是具有分布参数特性的电路元件。当电力系统中某一点突然发生雷电过电压或操作过电压时，这一变化并不能立即在系统其他各点出现，而是以电磁波的形式按一定的速度从电压或电流突变点向系统其他部位传播。例如，当架空输电线路遭受雷击时，雷击点导线将产生雷电过电压，该电压将沿着导线向两侧传播。这个沿线路传播的电压以及与其相伴而行的电流波称为行波。当行波到达变电站或其他节点时，由于电路参数的改变，将引起波的折射和反射。这种在分布参数电路中产生的暂态过程本质上是电磁波的传播过程，简称波过程。

实际电力系统采用三相交流或双极直流输电，属于多导线线路，而且沿线路的电场、磁场和损耗情况也不尽相同，因此所谓的均匀无损单导线线路实际上是不存在的。但为了揭示线路波过程的物理本质和基本规律，可暂时不考虑线路的电阻和电导损耗，并假定沿线线路参数处处相同，即首先研究均匀无损单导线中的波过程。

1. 波传播的物理概念

假设有一无限长的均匀无损单导线，见图 1-6 (a)， $t=0$ 时刻合闸直流电源，形成无限长直角波，单位长度线路的电容、电感分别为 C_0 、 L_0 ，线路参数看成是由无数很小的长度单元 Δx 构成，如图 1-6 (b) 所示。

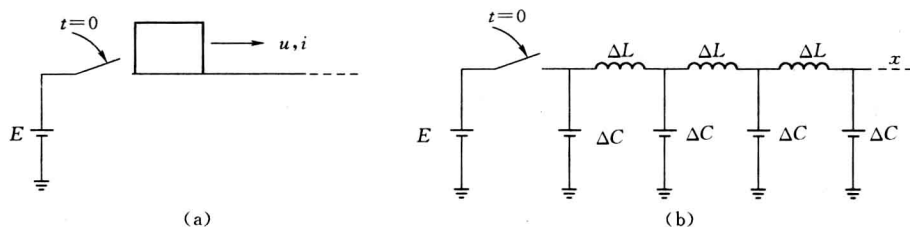


图 1-6 均匀无损的单导线
(a) 单根无损线首端合闸于 E; (b) 等效电路

合闸后，电源向线路电容充电，在导线周围空间建立起电场，形成电压。靠近电源的电容立即充电，并向相邻的电容放电，由于线路电感的作用，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，沿线路逐渐建立起电场，将电场能储存于线路对地电容中，也就是说电压波以一定的速度沿线路 x 方向传播。随着线路的充放电将有电流流过导线的电感，即在导线周围空间建立起磁场，因此和电压波相对应，还有电流波以同样的速度沿 x 方向流动。综上所述，电压波和电流波沿线路的传播过程实质上就是电磁波沿线路传播的过程，电压波和电流波是在线路中传播的伴随而行的统一体。

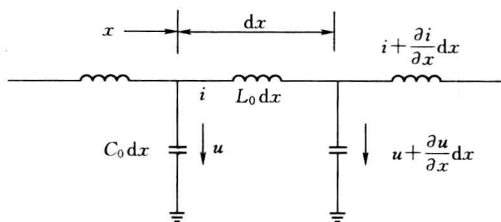


图 1-7 均匀无损单导线的单元等值电路

为了求出无损单导线线路行波的表达式，令 x 为线路首端到线路上任意一点的距离。线路每一单元长度 dx 具有电感 $L_0 dx$ 和电容 $C_0 dx$ ，如图 1-7 所示，线路上的电压和电流 i 都是距离和时间的函数。

根据节点电流方程 $\sum i = 0$ 可知

$$i = C_0 dx \frac{\partial u}{\partial t} + i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$$

根据回路电压方程 $\sum u = 0$ 可知

$$u = L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$$

整理得

$$\frac{\partial i}{\partial x} + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \tag{1-6}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} = 0 \tag{1-7}$$

由式 (1-6) 对 x 再求导数，由式 (1-7) 对 t 再求导数，然后消去 i ，并用类似的方法消去 u 得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{1-8}$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \tag{1-9}$$

式中： L_0 、 C_0 为单位长度电感和电容。

通过拉普拉斯变换将 $u(x, t)$ 变换成 $U(x, S)$ ， $i(x, t)$ 变换成 $I(x, S)$ ，并假定线路电压和电流初始条件为零，利用拉氏变换的时域导数性质，将式 (1-8)、式 (1-9) 变换成

$$\frac{\partial^2 U(x, S)}{\partial x^2} - R^2(S)U(x, S) = 0 \quad (1-10)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, S)}{\partial x^2} - R^2(S)I(x, S) = 0 \quad (1-11)$$

其中 $R(S) = \pm \frac{S}{v}$ 。

根据 2 阶齐次线性微分方程性质，令 $v = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}}$ ，则式 (1-10)、式 (1-11) 解为

$$U(x, S) = U_f(S)e^{-\frac{S}{v}x} + U_b(S)e^{\frac{S}{v}x} \quad (1-12)$$

$$I(x, S) = I_f(S)e^{-\frac{S}{v}x} + I_b(S)e^{\frac{S}{v}x} \quad (1-13)$$

将以上频域形式解变换到时域形式为

$$i(x, t) = i_f\left(t - \frac{x}{v}\right) + i_b\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (1-14)$$

$$u(x, t) = u_f\left(t - \frac{x}{v}\right) + u_b\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (1-15)$$

式 (1-14)、式 (1-15) 就是均匀无损单导线波动方程的解。

3. 波速和波阻抗

在波动方程中定义

$$v = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}}$$

v 为波传播的速度。对于架空线路

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

即沿架空线传播的电磁波波速等于空气中的光速度。而一般对于电缆，波速 $v \approx 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，其传播速度低于架空线，因此减小电缆介质的介电常数可提高电磁波在电缆中传播速度。

定义波阻抗

$$Z = \frac{u_f}{i_f} = -\frac{u_b}{i_b} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \text{ (}\Omega\text{)}$$

一般对单导线架空线而言， Z 为 500Ω 左右，考虑电晕影响时取 400Ω 左右。由于分裂导线和电缆的 L_0 较小而 C_0 较大，故分裂导线架空线路和电缆的波阻抗都较小，电缆的波阻抗约为十几欧姆至几十欧姆不等。

波阻抗 Z 表示了线路中同方向传播的电流波与电压波的数值关系，但不同极性的行波向不同的方向传播，需要规定一个正方向。电压波的符号只取决于导线对地电容上相应电荷的符号，和运动方向无关。而电流波的符号不但与相应的电荷符号有关，而且与电荷