



# Transients in Power Systems

Lou van der Sluis 著

## 电力系统 暂态

王一字 周于邦 等译  
徐圣书 校



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)



# 电力系统暂态

王一宇 周于邦 等译  
章民泰 陈效杰  
徐圣书 校

---

电力科技专著出版资金资助项目

---



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

### 电力系统暂态

本书是荷兰电力专家兼学者 Lou van der Sluis 根据自 20 世纪 70 年代起在世界上最大和最具有权威性的荷兰 KEMA 大功率试验站工作和大学教授电力系统暂态过程中多年积累的成果所著, 书中就高压电力设备试验中涉及的电力系统暂态过程作了阐述, 内容较为丰富, 理论联系实际, 特别是对断路器开断的暂态过程有深入的研究。全书共分 10 章, 1~3 章介绍电力系统开关暂态的基本知识和暂态分析基本概念; 第 4 章专门介绍断路器电弧理论; 5~7 章介绍电力系统主要的暂态过程, 包括开关暂态、暂态恢复电压、雷电感应暂态等; 第 8 章介绍电气暂态的数字仿真; 第 9 章介绍绝缘配合和有关标准; 第 10 章介绍开关试验回路和大功率试验站。全书经多位具有丰富经验的专家校译, 文字准确、平实, 对我国电力工业特别是电力设备的运行、试验以及电力系统暂态研究具有一定的借鉴作用。

本书可供电力系统工程技术人员以及高等院校有关专业的师生学习参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统暂态 / (荷) 斯卢茨 (Sluis, L.) 著; 王一宇、周于邦等译. -北京: 中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1449-2

I. 电... II. ①斯... ②王... ③周... III. 电力系统-暂态特性 IV. TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 033976 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2002-3626

Transients in Power Systems

Lou van der Sluis

ISBN 0-471-48639-6

Copyright © 2001 by John Wiley & Sons Ltd.

All Right Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

Chinese (Simplified Characters Only) Trade Hardback copyright © 2003 by China Electric Power press.

Published by arrangement with John Wiley & Sons, Ltd.

### 电力系统暂态

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2003 年 7 月第一版 2003 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 8.5 印张 182 千字

印数 0001—2000 册 定价 21.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

谨以此书中译本的出版  
纪念我们的挚友  
章民泰先生

徐圣书 王一字  
周于邦 陈效杰



502179

电力系统是工程师们所设计、建设和运行的最复杂的系统之一。在现代社会中，电力系统扮演了一个不可缺少的角色，一个高质量的生活离开了稳定和可靠的电力供应简直是不可想象的。由于电力不能大量贮存，电力系统的运行要经受接入系统的发电厂发电和所接入系统负荷的平衡，以及用户端要保持恒定频率和电压值的制约。在正常的运行情况下，负荷时而投入、时而断开。因此需要连续地进行控制——电力系统永远不会处于一个稳定的状态。在年度的时间表里，规划新的发电厂、架设新的输电线路或将现有线路的电压等级升高都是要考虑的重要项目。当我们展望未来时，主要的课题是经济运行——期望的负荷情况怎么样和在发电厂中用哪一种最经济的燃料。当用重复的电力潮流计算法分析系统的可靠性时，我们用的时间标度是小时；但当在一次主要的系统扰动发生后要验证系统是否能保持稳定而分析动态稳定时，研究电力系统就要精确到秒。电力系统操作，不论是投切负荷或者是在一次短路后将故障段隔离，还是隔离外部干扰（例如在高压输电线路或其邻近的一次雷击），都有必要检验电力系统在极短时标即毫秒或微秒内的情况。我们把这种情况称作电气暂态。在系统中存在电气暂态的时间是很短的，但在暂态期间，系统中的部件被迫承受着足以导致可观损害的大电流和高电压的峰值。

本书阐述电力系统中的电气暂态。自电力系统运行的初期后，人们已经知道了许多暂态现象。这个领域内的先驱者，诸如 Charles Proteus Stienmetz 和 Oliver Heaviside，或多或少概括地集中于去理解电气暂态。他们采用的分析方法限制在线性电路。当电路变得较为复杂时，用这样的方法就变得非常费力和花时间。在第二次世界大战后，应用了开发出的新工具来研究回路的暂态现象，这在以前由于其复杂性是做不到的。系统暂态分析仪 (Transient Network Analyser, TNA) 在研究大量复杂的线性和非线性电路的性能方面是非常有用的。系统暂态分析仪是求解含有分布参数和非线性阻抗电路问题的有效的工具。使用了模拟的系统暂态分析仪结果出版了很多技术文献。在 1951 年，Harold Peterson 出版了他的著作《电力系统暂态》，其中就有很多用系统暂态分析仪研究的例子。Peterson 的著作是对能够引起暂态的特殊现象（故障、突然甩荷、操作谐波以及其他）的实际综述，并以他在美国通用电气公司工作的实践经验为基础。在 1950 年由 Reinhold Ruedenberg 根据他早期的研究用德文写的《电力系统暂态性能》是一本经典著作。此外，断路器的设计与电气暂态现象有密切的关系，由诸如 Biermanns 和 Slamecka 等作者根据他们在 AEG 公司和 Siemens 公司断路器部门的经验所写成的书都是对理解暂态现象和开关开发的历史资料。

当我在 1977 年进入 KEMA 作为有名望的 de Zoeten 大功率试验站的试验工程师工作时，

我进入了短路试验的世界。按照 IEC 和 ANSI 标准进行电力系统设备的测试、测试回路的计算、在有严重电磁干扰的环境下对大电流和高电压的进行测量等等工作，这些实践都深化了我对电机工程和物理方面的知识。最早引导我进入这个课题的是 Allan Greenwood 的《电力系统的电气暂态》一书。此后，我阅读了很多更为经典的书本和论文，使我对高压断路器的历史发展有了一个很好的概观。在我为 KEMA 工作的十五年间，我从大功率试验站以前的同事们那里学到了很多。我们共同设计新的试验回路、开发新的测试设备和建立具有暂态记录仪和计算机工作站的计算机化测量系统。KEMA 的大功率试验站一直是开发试验回路的先驱并且总是坚定地参与了 IEC 的标准化工作。

1990 年，我加入德尔夫技术学院（Delft University of Technology）作为兼职教授讲授电力系统的暂态。自 1992 年起，我成为了专职教授和电力系统实验室的领导。我经常高兴地得悉学生们对操作中发生的现象很感兴趣并被高压开关的运行以及在开关开断电流过零时的物理过程所吸引。高等数学与物理以及有时与开创性的设备很好地融合在一起。过了几年，讲课的提纲需要更新。在 1996 年，Adriaan de Lange 与我讨论了一项博士生的研究课题，他为了更新他关于操作暂态方面的知识，他参加听我的课并将我尚未写入讲课提纲而对听众解释的内容记下来。Adriaan 还研读了很多有关断路器研发、电流过零现象和测试技术方面的文献，这为他的论文取得坚实的基础。没有 Adriaan 的力助，我是不能写成这本书的。

**第 1 章基本概念和简单的操作暂态**综述了着手处理暂态现象的基本物理现象和数学工具。的确如此，基本的网络理论和透彻地理解简单的 LR 和 RLC 网络以及在一次操作中的暂态电压和电流的性能是非常必需的。在分析暂态时，人们总是要试图将复杂网络初步近似地简化为串联或并联网路。三相布置的电力系统在**第 2 章三相电力系统的暂态分析**中作了阐述，文中用对称分量网络分析了导致系统承受严重电压应力的故障。作为一个重要课题角色，行波的性能在**第 3 章行波**中作了阐述。有关高压开关操作引起的过电压只有在切断电流时在开关触头和不同灭弧介质的影响下的物理变化过程中才能预测。不同的高压断路器、电流开断过程以及电弧—电流的相互作用在**第 4 章断路器**中作了阐述。在**第 5 章操作暂态过程**中阐述了在实践中，诸如在电容性电流的开断、电容性冲击电流、小电感性电流的开断、变压器的冲击电流以及短路故障时，经常发生的电流和电压的振荡。**第 6 章电力系统暂态恢复电压**阐述了在操作时经常发生的工频暂态和足以引起对电力系统元件的不可忽视的损害，还概述了在 IEC 和 IEEE/ANSI 标准中不同短路的工作方式。**第 7 章雷电引起的暂态**中解释了雷电的机理，在这一章中主要讨论了在输电线路和变电站内或它们的邻近区域受到雷击后的影响。当今，计算电气暂态如不借助于计算机是不可思议的。在**第 8 章电气暂态的数字模拟**中阐述了电力系统暂态的数学表达式和数字处理。特别注意到在暂态计算程序诸如 EMTP、MNA、XTrans 和 MATLAB 电力系统软件包中如何引入非线性元件，例如电弧模型。在互联网 <http://eps.et.tudelft.nl> 网址中可下载 XTrans 程序的演示版本。关于绝缘配合的背景及其相关的 IEC 标准和 IEEE/ANSI 标准和有关 IEC、ANSI、CIGRE 和 STL 的简要历史在**第 9 章绝缘配合、标准制订机构和标准**中阐述。在大功率试验站对高压断路器的试验（空谈不如实践）以及相关的措施和测量设备在**第 10 章断路器的**

试验中作了阐述。

我非常感激我的秘书 Tirza Drisi 不辞艰辛地编辑了我的手稿，Henk Paling 制作了出色的插图。Pieter Schavemaker 花了很多时间艰苦地读完了我的手稿并列出了错误和不当之处。在第 8 章电气暂态的数字模拟中我引用了由 Pieter 在他的论文里为数字化暂态计算这一章开发的教学和说明举例。在写第 6 章电力系统暂态恢复电压时我从 KEMA 的大功率试验站的测试工程师 Henk te Paske 处收得有关对 IEC 和 IEEE/ANSI 标准的最新发展信息的宝贵支持。KEMA 的 Martijn Venema 还为本书提供了照片。

Lou van der Sluis 2001 年春于 Nootdrop

# 中文版序

## 电力系统暂态

拙著“电力系统暂态”一书的第一版是在荷兰 Arnhem 市 KEMA 的新建中压试验站——第六试验站开张典礼之际问世的。我有幸在那天碰到国际供电会议中国联络委员会的秘书陈效杰先生。我们在一起高兴地讨论了有关断路器、试验室试验和标准等问题。有关这方面问题的书籍并不多，因此陈先生提出将拙著翻译成中文的想法。我非常感谢他的建议并支持他投入力量进行翻译。

我第一次访问中国是在 1987 年 10 月，当时我去参加由美国电气和电子工程师协会和中国电机工程学会联合在北京召开的高压输电系统会议。作为 KEMA 高压试验站的研究员和测试工程师，我在该次会议上提出了一篇有关高压试验和测量技术发展的论文。会后我还花了三个星期访问了在西安的中国最大的断路器试验企业——西安高压电器研究所的高压试验站。对中国的第一次访问给我留下了很深刻的印象，我不仅难忘紫禁城的美丽和长城的宏伟，更为中国技术人员的智慧和技能所感动。1992 年我离开 KEMA 并在荷兰特尔夫技术大学任电力系统的专职教授。1999 年 2 月我作为特尔夫技术大学电机工程系的副主任访问了清华大学和北方交通大学，并有机会参观了装备良好的实验室、探讨了电力系统领域很多研究的课题，这次访问使我再次熟悉中国并有了新的感受。

我希望拙著的中文版能对电力系统暂态知识的交流和高电压大功率试验技术的研究作出贡献。

Lou van der Sluis

于荷兰特尔夫市特尔夫技术大学电力系统实验室



# 目 录

## 电力系统暂态

序言

中文版序

### 第 1 章

基本概念与简单的操作暂态 .....	1
1.1 接通一个 LR 电路 .....	2
1.2 接通一个 LC 电路 .....	3
1.3 接通一个 RLC 电路 .....	5
1.4 进一步阅读的参考资料 .....	8

### 第 2 章

三相电力系统的暂态分析 .....	9
2.1 三相系统中的对称分量 .....	9
2.2 不平衡网络阻抗的相序分量 .....	10
2.3 相序网络 .....	12
2.4 不对称三相故障的分析 .....	13
2.4.1 单相对地故障 .....	14
2.4.2 三相对地故障 .....	15
2.5 进一步阅读的参考资料 .....	18

### 第 3 章

行波 .....	19
3.1 行波速度与特性阻抗 .....	20
3.2 行波的能量 .....	21
3.3 电磁波的衰减和畸变 .....	22

3.4	电报方程	23
3.4.1	无损耗线	24
3.4.2	无畸变线	25
3.5	行波的反射和折射	25
3.6	变压器和发电机绕组上的行波反射	27
3.7	暂态恢复电压的起源	29
3.8	网格图	31
3.9	进一步阅读的参考资料	33

## 第 4 章

断路器	35	
4.1	分合闸电弧	36
4.2	充油断路器	38
4.3	空气断路器	39
4.4	六氟化硫 (SF <sub>6</sub> ) 断路器	39
4.5	真空断路器	40
4.6	分合闸电弧的建模	41
4.7	电弧-电路的相互影响	44
4.8	进一步阅读的参考资料	48

## 第 5 章

操作暂态过程	51	
5.1	开断电容性电流	51
5.2	电容性冲击电流	56
5.3	开断小的电感性电流	57
5.4	变压器的冲击电流	58
5.5	短线故障	59
5.6	进一步阅读的参考资料	63

## 第 6 章

电力系统暂态恢复电压	65	
6.1	暂态恢复电压的特性	67
6.1.1	根据 IEC 60056—1987 的短路试验负载	67
6.1.2	根据 ANSI/IEEE 标准的短路试验负载	70

6.1.3 IEC 和 ANSI/IEEE 标准之间关于短路试验负载的协调 .....	70
6.2 不同故障类型的暂态恢复电压 .....	70
6.3 参考文献 .....	72

## 第 7 章

<b>雷电引起的暂态</b> .....	74
7.1 雷电的机理 .....	74
7.2 雷电流的波形 .....	75
7.3 输电线路杆塔上的直击雷 .....	76
7.4 线路上的直击雷 .....	77
7.5 进一步阅读的参考资料 .....	81

## 第 8 章

<b>电气暂态的数字模拟</b> .....	82
8.1 电磁暂态程序 .....	83
8.2 MNA 程序 .....	86
8.3 XTRANS 程序 .....	88
8.4 MATLAB 电力系统程序块 .....	92
8.5 进一步阅读的参考资料 .....	95

## 第 9 章

<b>绝缘配合、标准制订机构和有关标准</b> .....	97
9.1 国际电工委员会——IEC .....	98
9.2 美国国家标准协会——ANSI .....	99
9.3 国际大电网会议——CIGRE .....	99
9.4 短路试验联络会——STL .....	99
9.5 有关高压电气设备的一些标准 .....	100
9.6 进一步阅读的参考资料 .....	102

## 第 10 章

<b>断路器的试验</b> .....	103
10.1 大功率试验室 .....	103
10.2 断路器试验的历史性进展 .....	105

10.3	直接试验电路 .....	106
10.4	合成试验电路 .....	110
10.5	短线故障试验 .....	113
10.6	暂态电流和电压的测量 .....	114
10.6.1	测量电流用的传感器 .....	115
10.6.2	测量电压用的传感器 .....	118
10.7	测量暂态电压和电流的测量装备 .....	119
10.8	进一步阅读的参考资料 .....	121

## 基本概念与简单的操作暂态

电力系统的目的就在于将发电厂中所产生的电能以安全可靠的方式传输并分配到用户。用铝和铜导线来导通电流，用变压器把电能调节到适当的电压水平，而用发电机来使机械能转变为电能。当我们说到电的时候，我们想到的是电流从发电机经过导体流向负荷，这样的想法是因为电力系统的物理尺寸与电流电压的波长相比很大才有效的；对于 50Hz 的信号，波长为 6000km。这就便于我们在模拟电力系统时应用基尔霍夫电流与电压定律与集中参数。事实上，电能的传输是由导体周围的电磁场进行的，而能流方向决定于波印亭矢量。

对于稳态的功率潮流分析，当电力为 50Hz 或 60Hz 时，我们可以成功地使用复数计算和相量来表示电流、电压。电力系统暂态包括高得多的频率，直达几千赫与几兆赫。频率变化迅速，复数计算和相量表示不再能用，这时必须求解描述系统现象的微分方程。此外，如果要用基尔霍夫电压与电流定律，系统元件的集总参数模拟必须小心从事。就电力变压器来说，在正常的工频运行情况下，变压比是由一次侧绕组匝数之比决定的。但对于雷击引起的电压波，绕组间的杂散电容与一次线圈间的杂散电容决定了变压比。这两种情况下，电力变压器的模拟必须不同。

当不能用代表磁场的电感，和代表带电阻损失的电场的电容组成的集中参数表示法来解决问题的时候，就必须用行波来进行分析。把具体的电力系统及其元件正确“变换”成适当的模型来分析计算电力系统，需要透彻地理解基本的物理现象。因而，需要详加考虑，但并不简单。

电网络从一个稳态变换到另一个稳态时便发生暂态。例如可能是雷击在高压输电线近旁或变电所遭直接雷击的情况。但多数电力系统暂态是开关操作的结果。如负荷开关与断路器在负载或无载情况下与电网的一部分接通和开断，或熔丝和断路器切断较大的电流并清除在系统故障部分的短路电流。发生暂态电压电流振荡的时间在毫秒至微秒的范围内。在这个时间尺度上，系统故障时短路电流的存在可看作为一种稳态状态。其中能量主要在磁场中，而当故障电流被切断后，系统便转换为另一种稳态情况，其中能量主要在电场中。从集中参数来看系统，能量从磁场到电场的变换可见到电流、电压的振荡。

本章中，透彻分析了几个简单开关操作暂态的例子，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。作为开关操作器件，我们利用理想开关。理想开关在闭

合时是理想的导体（零电阻），而在开断时是理想的绝缘体（无限大电阻）。理想开关从闭合到断开位置是瞬时的，而正弦波电流总是在零电流时遮断。

## 1.1 接通一个 LR 电路

一个正弦波电压接通到一个电感与电阻串联的电路上，见图 1.1 所示。这实际上是一个高压断路器闭合到短路的输电线或短路的地缆的最简单单相表示法。电压源  $E$  代表连接的同步发电机的电动势。电感  $L$  包括这些发电机的同步电感、电力变压器的漏电感与母线、电缆与输电线的电感。供电电路的电阻损耗由电阻  $R$  代表。因为只有线性的元件，接通后电路中的电流可以看作是暂态与稳态电流的叠加。

暂态电流分量决定于电感与电阻，不受网络电源的影响（此例中为电压源  $E$ ）。它形成一阶齐次微分方程的通解，而稳态电流分量则为非齐次微分方程的特解。在其中，暂态振荡受到阻尼作用，因为其能量消耗在电路的电阻部分中。应用基尔霍夫电压定律得到图 1.1 中电路非齐次微分方程式为

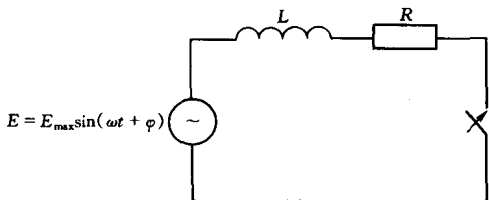


图 1.1 正弦波电压源接到 LR 串联电路

$$E_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

开关可在任何瞬时闭合电路，而相位角可取  $0$  与  $2\pi$  间的值。要求解微分方程的通解，须解齐次微分方程的特征方程式

$$Ri + L\lambda i = 0 \quad (1.2)$$

标量  $\lambda$  是特征方程的本征值，得出  $\lambda = -(R/L)$ ，因而方程 (1.1) 的通解为

$$i_h(t) = C_1 e^{-(R/L)t} \quad (1.3)$$

将电流一般表达式代入式 (1.1) 得到特解

$$i_p(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.4)$$

可确定  $A$  及  $B$

$$A = \frac{RE_{\max}}{R^2 + \omega^2 L^2}; \quad B = -\frac{\omega LE_{\max}}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (1.5)$$

电流特解为

$$i_p(t) = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left[\omega t + \varphi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right] \quad (1.6)$$

完全解为特解与通解之和

$$\begin{aligned} i(t) &= i_h(t) + i_p(t) \\ &= C_1 e^{-(R/L)t} + \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left[\omega t + \varphi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right] \end{aligned} \quad (1.7)$$

在开关闭合之前（图 1.1），电感  $L$  中的磁通等于  $0$ ，由于磁通守恒定律，它一直保持到闭

合后的瞬间。因而， $t = 0$  时，即在闭合的瞬间，可以写成

$$C_1 + \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left[\varphi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right] = 0 \quad (1.8)$$

由此得出  $C_1$  的值，从而电流的完全表达式为

$$i(t) = e^{-(R/L)t} \left\{ \frac{-E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left[\varphi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right] \right\} + \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left[\omega t + \varphi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right] \quad (1.9)$$

式 (1.9) 的第一项含有  $\exp[-(R/L)t]$  要逐渐衰减，这称为直流分量。方括号中的表达式为常数，其值决定于电流合闸瞬间，在  $[\varphi - \tan^{-1}(\omega L/R)] = 0$  或  $\pi$  的整数倍时，直流分量为 0，电流立即进入稳态。换言之，不存在暂态振荡。但当开关闭合电路在  $90^\circ$  前后时，暂态电流将达到最大幅值，可见图 1.2。

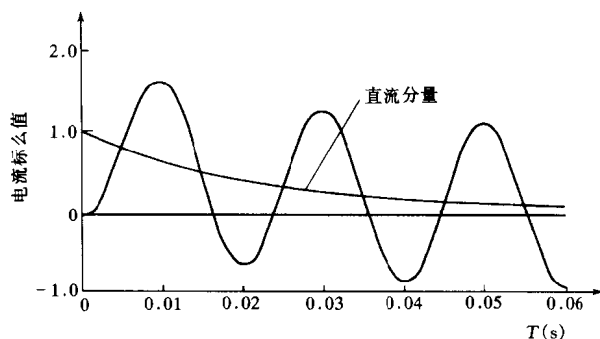


图 1.2 电感电路中决定于开关瞬间的暂态电流波形

图 1.2 中的电流被称为不对称电流。在不发生暂态振荡而电流立即进入稳态的则称为对称电流。不对称电流可能达到一个峰值，几乎近于对称电流的两倍，视供电电路包含的时间常数  $L/R$  而定。这意味着，例如断路器闭合到一个短路的高压电路，由于电流很大，将有很强大的动力作用于接连的母线与导线上。

当供电电路的时间常数相当高时，即在短路故障发生在近发电机端，同步发电机的暂态与次暂态电抗会引起短路电流极高的第一个峰值。约 20ms 之后，当暂态与次暂态电抗的影响不再存在时，同步电抗将短路电流的均方值降低。这种情况下，由于较大的直流分量，使得一个没有电流零值的交变电流在故障的一相中流过几个周期。这个电流不能被断开，因为断开电流所需的电流过零现象不存在。

## 1.2 接通一个 LC 电路

另一种基本的网络是电感和电容的串联，这其实是高压断路器接通一个电容器组或一个电缆网络最简单的表示法。为简便起见，我们首先分析直流电源通过（理想）开关闭合来使网络充电的情况。

由图 1.3 可见，电路中共有两个储能元件——电感储存磁能和电容储存电能。在开关闭合后，网络中可能产生振荡，这是由于在两个储能器件间发生了具有一定频率的能量交换。应用基尔霍夫电压定律，有

$$E = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (1.10)$$

要解这个微分方程，将它变换到拉普拉斯域，得到下列代数方程式

$$\frac{E}{p} = pLi(p) - Li(0) + \frac{i(p)}{pC} + \frac{U_c(0)}{p} \quad (1.11)$$

式中， $p$  为复拉普拉斯变量。

这可以写作

$$i(p) \left( p^2 + \frac{1}{LC} \right) = \frac{E - U_c(0)}{L} + pi(0) \quad (1.12)$$

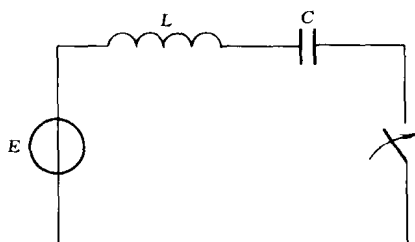


图 1.3 直流电源接通到 LC 串联电路

当求初始条件时，显然  $i(0) = 0$ ，因为网络中的电流在合闸前为 0，而且遵循磁通守恒的物理定律，这些是开关闭合瞬时的情况。就电容器来说，情况并不如此简单，因为电容器可能有初始电压，例如在一个电容器组上有捕获的电荷。

假设在电容器上没有电荷，因而  $U_c(0) = 0$  而

$$\omega_0^2 = 1/LC$$

则式 (1.12) 变为

$$i(p) = E \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2} \quad (1.13)$$

从拉普拉斯域反变换回时间域，得到式 (1.10) 的解

$$i(t) = E \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega_0 t) \quad (1.14)$$

在式 (1.14) 中，可以看出 LC 串联网络的两个重要性质：

- 在时间  $t = 0$  闭合开关后，有一个振荡电流开始以自然频率流动、自然频率为

$$\omega_0 = \sqrt{LC} \quad (\text{译注：原文有误，应为 } 1/\sqrt{LC})$$

- 由特性阻抗， $Z_0 = (L/C)$ ，以及电压源值  $E$ ，可以确定振荡电流的峰值。

当在电容器上有电荷时，拉普拉斯域中的电流变为

$$i(p) = [E - U_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2} \quad (1.15)$$

拉普拉斯域中的电容器电压为

$$U_c(p) = \frac{E}{p} - pLi(p) = \frac{E}{p} - [E - U_c(0)] \frac{p}{p^2 + \omega_0^2} \quad (1.16)$$

在反变换到时间域后

$$U_c(t) = E - [E - U_c(0)] \cos(\omega_0 t) \quad (1.17)$$

图 1.14 表示电容器电压具有三个初始值时的电压波形，从图 1.4 的波形可以看出



$U_c(0) = 0$  时, 电压波形具有所谓  $(1 - \cosine)$  的形状, 它可以达到电源电压峰值的二倍。若为负电荷时, 峰值电值可以超过此值, 因为电荷在开关闭合后不能瞬时改变。

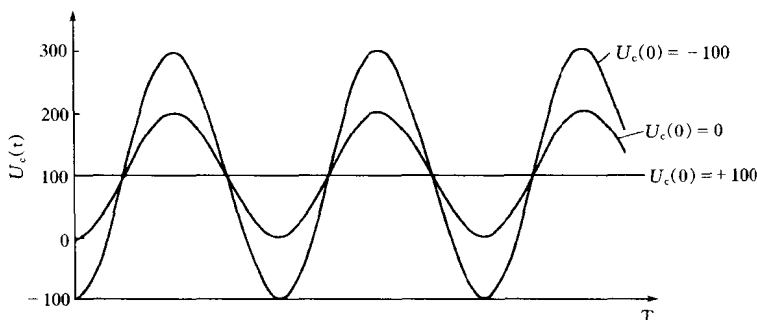


图 1.4 电容器电压具有三个不同初始值时电容器两端电压的波形, 直流电压源  $E = 100V$

此外, 当电路特性阻抗值较低时, 例如在接通电容器组 ( $C$  很大) 而电源强 ( $L$  很小) 时, 开关闭合后的涌流峰值可能达到很高值。

### 1.3 接通一个 RLC 电路

事实上, 在串联电路中总是有阻尼, 因而可用加上的串联电阻表示。当一个正弦波电压源  $E_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$  在  $t = 0$  时接通到 RLC 串联电路中时 (见图 1.5), 基尔霍夫电压定律给出

$$E_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt \quad (1.18)$$

要求解网络的暂态 (或自然) 响应, 必须解齐次微分方程式

$$0 = \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i \quad (1.19)$$

齐次微分方程的通解是

$$i_h(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (1.20)$$

其中  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  是特征方程式的根

$$0 = \lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} \quad (1.21)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (1.22)$$

电感、电容与电阻的值, 因为是物理元件, 所以总是为正值。表达式  $[(R/2L)^2 - (1/LC)]^{1/2}$  的绝对值小于  $R/2L$ 。当  $(R/2L)^2 - (1/LC)$  为正时, 根  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  为负, 当  $(R/2L)^2 - (1/LC)$  为负时, 根  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  为复数, 但其实数部分为负。这表明通解中

$$i_h(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (1.23)$$

指数函数随  $t$  增大而衰减为 0 但特解仍保留。特解可以写作