

大功率开关装置

的
物理基础
与
工程应用

〔美〕李天和 著

电力工业出版社

T.H.Lee
Physics and Engineering of High Power
Switching Devices
The MIT Press 1975

大功率开关装置的物理基础与工程应用

[美]李天和著

程礼椿 谢家治 钱家骊 张节容 王伯翰 译

刘绍峻 钟兆璜 校

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 14.25印张 379千字

1982年9月第一版 1982年9月北京第一次印刷

印数 0001—4140册 定价 1.75元

书号 15036·4342

译 序

本书作者应用近代物理学上的成就，对大功率开关装置中的电弧和等离子体，在理论上作了比较系统、深入的分析，并介绍了作者本人的研究成果。这在目前国内有关开关电器的理论书籍中是比较少见的。书中还对各种断路器和操动机构的工作原理、性能以及设计要点进行了分析与讨论。

本书可供从事电弧及等离子体方面的研究人员，大功率开关装置的设计、制造、研究、试验方面的工程技术人员使用，也可供高等院校有关专业的师生作为教学参考书。

华中工学院的谢家治、程礼椿同志分别翻译了本书的第一、四、六章和第二、三、七、八章，并合译了第五章。清华大学的王伯翰、张节容、钱家骊同志分别翻译了本书的作者序言、第九章和第十章，王伯翰、张节容同志还合译了本书的第十一章。刘绍峻同志和钟兆骥同志对全部译稿作了校订。

由于译者各方面水平有限，错误不当之处在所难免，希望读者指正。

作者序言

(节 译)

1948年10月,我开始我的第一件高压开关工作,在通用电气公司搞试验。任务是进行断路器的短路试验,检验断路器开断短路电流的能力是否达到设计要求。当时,给我深刻印象的是进行这些试验所需的实验室投资十分巨大,同时,我也难以理解为什么谁都对开关电器的工作过程缺少基本的了解。作为一个刚刚到这个国家来的年青工程师,我以为在科学技术高度发展的今日,人们应该了解关合、开断电路中所涉及的一切问题,但竟没人能够预先确定这些开关的性能。这个现实使我感然。

随着这个电气行业和我自己的成长,这些困惑感在一定程度上更增加了。我发现,有关实际电力系统运行中的其它很多极为重要课题的科学知识也是很贫乏的。我们并不真正懂得绝缘材料的科学,不了解什么东西形成硅钢片的特性。然而我终于懂得了,现实生活中,在许多情况下,工程实践往往领先于科学理论。高压开关电器正是这些情况之一。

因为开关装置最早使我困惑,我花了多年的时间努力来充实自己在高气压电弧以及等离子体方面的科学知识。所以我感到,最近二十年是我最有收获的,因为我已经置身在这个领域的研究之中,并且自己的困惑在逐步解决。

本书主要写下了我自己对这个迷惑的问题的理解是怎样改进的。从做一个工程师开始,我必须学习物理学的基础内容,诸如热力学、量子力学、动力学和原子现象等。从这个意义上讲,这些年,我与其说是做工程师的工作,不如说更象个物理学家在工作。我决定要为对基础知识感兴趣的工程师们写这本书。

对于那些在电弧开断方面卓有贡献的作者们,我感到很抱

歉，因为我不可能涉及所有已发表的优秀著作。本书并不想写成一本全面而详尽的专著，而只想把自己在这个领域中的有关知识写出来。

我还应该向很多朋友致谢。这些年来，我有幸与P.巴肯(P. Barkan)，G.埃克(G.Ecker)，G.弗林德(G. Frind)，A.N.格林沃德(A.N.Greenwood)，E.埃德尔兹(E.Edels)，M.P.里斯(M.P.Reece)，W.里德(W.Rieder)，A.M.克西(A.M.Cassie)，A.H.夏鲍(A.H.Sharbaugh)，D.R.怀特(D.R.White)诸博士以及其他人士进行了讨论，他们给予我很大的启发。我邀请巴肯博士编写本书的第十一章。因为我确实感到，自己无法写得和他一样好。我还要感谢我的上司，通用电气公司副董事长，执行董事A.E.佩托沙罗(A.E.Peltosalo)先生在我写这本书时不断地给我鼓励。他使我相信，从长远观点看，这样的工作对于本公司的业务和整个电器工业都有好处。

目 录

译序

作者序言(节译)

第一章 电力系统中断路器的工作	1
1-1 引言	1
1-2 机电式开关装置的工作	1
1-3 分闸操作引起的瞬态过程	6
1-4 合闸操作引起的瞬态过程	14
1-5 高速操作的重要性	16
1-6 一些特殊的切换任务	18
1-7 开关装置的技术规范	23
第二章 一些基础的论题	27
I. 热力学和电子发射	27
2-1 引言	27
2-2 高温气体中的热平衡	27
2-3 统计热力学简述	29
2-4 化学平衡	36
2-5 固体-气体相间的某些反应	40
第三章 一些基础的论题	58
II. 分子运动论和运输特性	58
3-1 初等分子运动论的概念	58
3-2 运输特性的初步探讨	63
3-3 玻耳兹曼方程	70
3-4 玻耳兹曼方程的解	76
3-5 相互作用特别定律的应用	82
第四章 高压部分电离等离子体的特性	87
4-1 引言	87
4-2 组分和比热	87
4-3 电离电位的降低	103

4-4	电导率	107
4-5	热传导率	115
4-6	内能引起的热传输	120
4-7	热传导率和粘性的数字结果	128
4-8	辐射损耗	128
第五章 电极现象		140
5-1	引言	140
5-2	电极现象	140
5-3	电弧中电子的发射	142
5-4	探针理论	145
5-5	高压电弧阴极区域的自适应模型	148
5-6	对真空电弧的阴极现象的应用	168
5-7	真空电弧阳极收缩的不稳定性	179
第六章 电弧的动态特性		195
6-1	动态电弧的特性	195
6-2	迈尔 (Mayr) 方程	195
6-3	弗林德 (Frind) 对时间常数的推导	197
6-4	菲利普 (Phillips) 对动态电弧的处理	204
6-5	迈尔 (Mayr) 理论对近区故障的应用	214
6-6	弧后期间的不平衡情况	218
6-7	克西 (Cassie) 方程	218
6-8	布朗 (Browne) 的分析	221
第七章 流场中的电弧		225
7-1	引言	225
7-2	流场中弧柱的成长	226
7-3	边界层方法对流场中电弧稳态特性的应用	231
7-4	气吹断路器中随时间变化的电弧的边界层分析	235
7-5	紊流中的电弧	241
第八章 高温气体的电击穿		247
8-1	引言	247
8-2	适用于激波的兰金-休格里奥特 (Rankine-Hugoniot) 方程	247
8-3	实验的建立和观察	251

8-4	游离度和击穿电压之间的关系	261
8-5	热击穿机理	264
第九章 开关电器的特征与设计		271
9-1	油断路器	271
9-2	产气材料用作灭弧介质	279
9-3	磁吹断路器	285
9-4	气吹断路器	302
9-5	真空断路器	317
9-6	电路开断技术与经济的一般论述	325
第十章 其它开断装置		330
10-1	转移原理	330
10-2	高压直流断路器	331
10-3	用可控硅元件开断大功率回路	339
第十一章 断路器中的机械现象		
	[菲利普·巴肯 (Philip Barkan)]	345
11-1	引言	345
11-2	接触现象	347
11-3	触头的分断	382
11-4	合闸	404
11-5	有关合闸操动机构的能源评述	418

第一章 电力系统中断路器的工作

1-1 引言

本书的目的是论述在输配电系统中执行切换和保护作用的大功率开关装置的技术发展水平。因此，对小功率控制线路的装置，例如按钮、簧片开关、水银开关、晶体管和其它的电子开关装置将不详细涉及，虽然有关电弧的许多讨论对许多小功率开关装置同样是适用的。

一般地说，如果一种装置的基本功用是关合和切断负载线路，则称它为开关，在短路电流下不要求它对系统进行保护。这后一功能是断路器的任务。这些装置必须应付的电流的大小，负载电流一般为几百到几千安，而短路电流可从几千安到几百千安不等。这样，小断路器的短路负荷可能比大系统中开关开断负载的负荷还小。因此，单凭电流不能区分开关和断路器。但是，它们的功能有相当大的不同使这种区分成为必要。断路器的作用是保护系统免遭短路的破坏，所以，速度对于它通常比对开关更为重要。因为，只需要将系统中出现短路的部分隔离开，所以电力系统中不同断路器之间的配合是极为重要的。同样的要求，对开关来说，无疑是不适用的。由于这些要求，断路器基本上是个很复杂的装置。在本书中，我们将主要讨论断路器，虽然许多问题对开关也同样适用。

1-2 机电式开关装置的工作

除了电子开关装置，例如闸流管、引燃管、汞弧整流器和半

导体开关元件外，大多数的开关装置是机电式的（电子电力开关装置将在第十章讨论）。基本上，它们有一对触头，一个是固定的，另一个是可动的。用一个机构操作动触头使电路关合和开断。这种机构可以是简单的螺管电磁铁、弹簧储能机构、液压操动机构或气动操动机构。

当触头在关合位置时，线路接通而且通过电流。当要求开断线路时，机构使触头分离，在触头间引起电弧。电弧基本上是一种高温电离气体，其总的导电性比得上像石墨一类材料。因此，甚至在触头分开后仍能继续导电。所以，断路器的任务之一是熄灭电弧使电路开断。

在60赫的交流线路中，电流一秒钟改变方向120次。于是，每秒有120次电流非常小的短暂时间出现。由于输入到电弧的功率等于电弧电压和电弧电流的乘积，因此电流过零期间是从电弧移走能量超过从电力系统输入能量的理想时间。这样，电弧尺寸减少，在成功的断路器操作中，高温电离气体被转变为低温绝缘介质。

在直流系统中，我们没有可利用的电流过零时间，为了开断直流线路，断路器必须建立一个电流零点。要做到这一点，一般有两种方法，传统的方法是产生一个电弧电压比系统电压还要大的电弧。这样就使得系统电压不可能强制任何电流通过线路。高的电弧电压能用拉长电弧或加快从电弧中移走能量的方法来实现。加快从电弧中移走能量的方法是使电弧紧压在固体表面，加热固体表面到很高温度，使得气化的能量成为从电弧中移走能量的十分有效的途径。限流式银砂熔断器的工作就是建立在这个原理上的。

建立电流零点的第二种方法是利用转移线路。在图1-1中，A可以是一台一般的断路器或者是一台像可控硅元件的电子开关装置。在合闸位置，它的运行和其它开关装置一样，是把电流传送给负载。转移电容器C充电到图示的极性。 L_2 代表转移线路的杂散电感（或者是为转移线路故意设置的一个低值电感）。当要

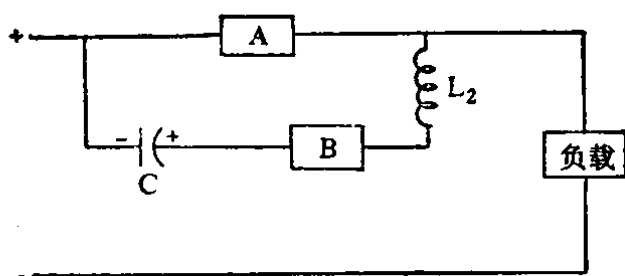


图 1-1 转移线路

求开断直流电流时，把开关 B 关合了，产生一个由下式给出的振荡电流 i ：

$$i = V \sqrt{\frac{C}{L_2}} \sin \frac{1}{\sqrt{L_2 C}} t \quad (1-1)$$

式中 V 为转移开始之前电容器上的电压。如果 i 大于需要开断的直流系统的电流，则在主切断装置 A 中，就能建立起一个电流零点。如果是一次成功的操作，A 应该在这个电流零点时中断导电。此后，直流电流继续流经 C、B 和负载。这样，转移操作实际上起着插入阻抗的作用。由于在直流线路中插入了电容，导电将最后停止。

用于系统电压为几千伏或略低的大多数直流断路器采用高电弧电压原理。转移原理很广泛地用于以可控硅作为开关元件的逆变器中^[1]。最近，转移线路已用于静态限流断路器^[2]。在那里也是用可控硅作为开关元件。将来转移原理可能用于高压直流输电系统的断路器^[3]。这些将在第十章更详细地讨论。

在电力系统的运行中，人们不仅必须确信造成破坏的短路部分应尽快与系统的其余部分隔离，而且同样重要的是必须确信只有最靠近故障的断路器被用来开断线路。例如在输电系统中，若干线路一起引到开关站一条母线上（图 1-2）。从母线出来几条线路分支到不同的负载地点。如果在 O 点发生故障，只有断路器 A 和 B 应该断开，而 C、D、E 和 F 则仍应闭合，以便在 A、B 隔开故障后，能立即恢复送电。图 1-3 示出配电系统中的类似情况。当在 X 点发生故障时，只有开关 C 应该断开，而系统中所有其它

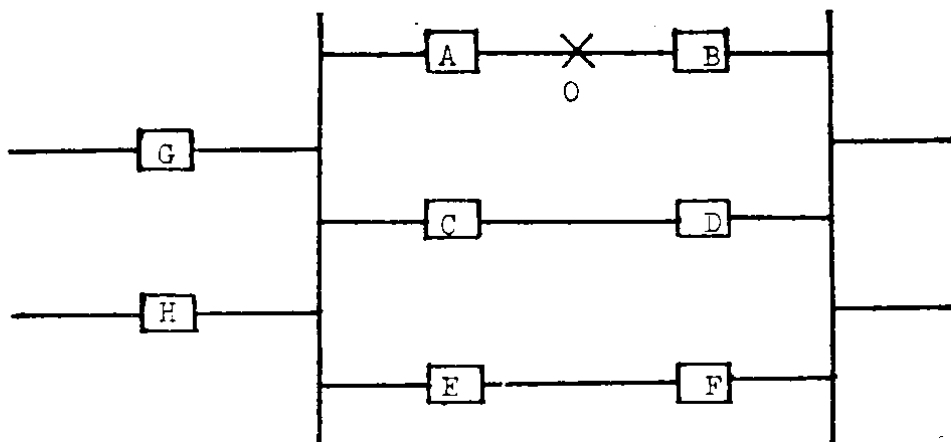


图 1-2 表示故障地点的输电系统

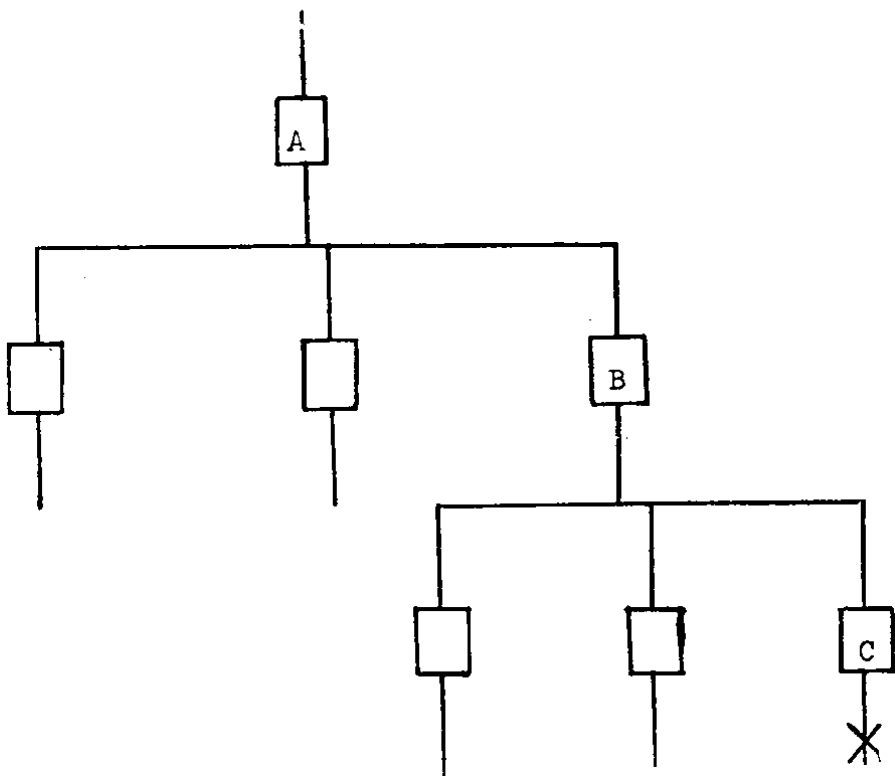


图 1-3 表示故障地点的配电系统

开关则应继续闭合。要确定哪一个断路器应该动作则是保护继电器的任务。

在输电系统中不仅发展了能反应过电流，而且也发展了能测量故障点阻抗和能测知电流方向的继电器^[4]。在配电系统中，我们通常依靠继电器的时间-电流特性，来保证主馈电线上的开关闭合，而开断支路上的断路器。图1-4示出一组这样的典型特性。

当短路电流流经处于闭合位置的一对触头时，就有一个倾向于推开触头的电磁力。只要考虑图 1-5 所示的简单情况，这个力

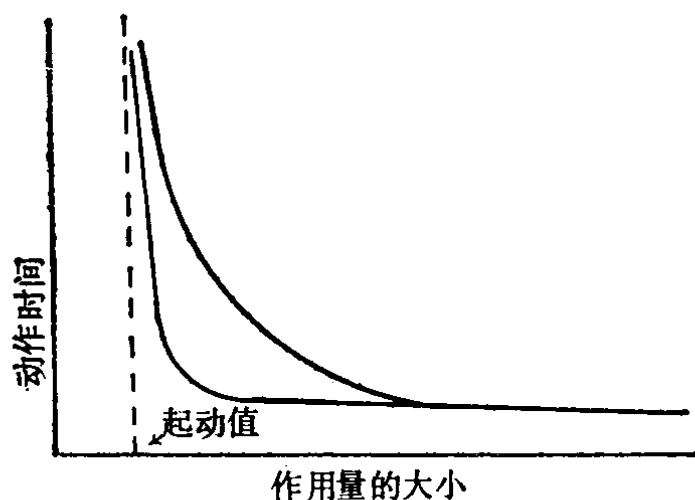


图 1-4 动作时间对于电流值的曲线

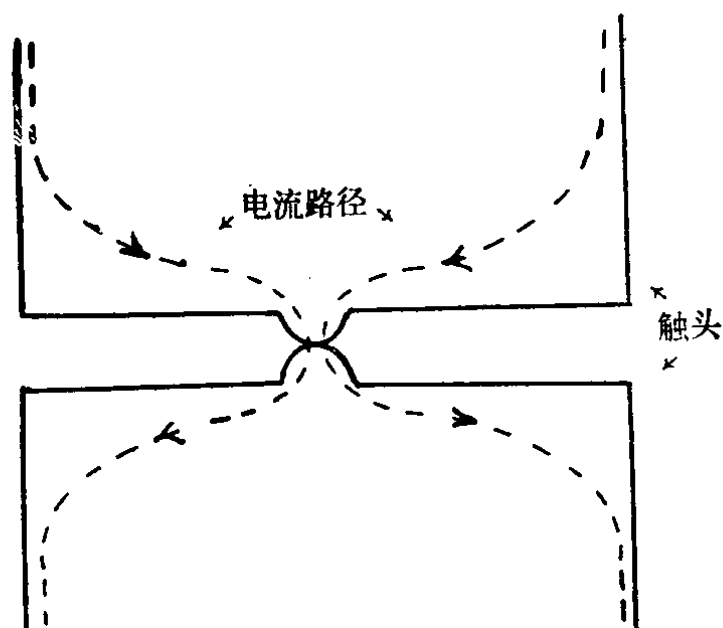


图 1-5 表示电流路径的点接触

的由来就很容易明白，图中假定两个表面只是通过一个小点接触^[5]。虚线表示触头中电流的路径。由于两个触头中的电流元的方向彼此相反，因此净力作用要使触头推开。

当一个断路器必须停留在闭合位置以等待支路开关断开时，重要的是触头不会由于电磁力的作用突然弹开。为此，机构必须提供一个足够大的反力阻止触头弹开。这在断路器设计中，通常是一个十分重要的需要考虑的问题。

1-3 分闸操作引起的瞬态过程

1-3-1 简单的交流线路

让我们考虑一下如图 1-6 所示的简单交流线路在电流零点期间的电现象。电源用一台发电机和一个电感 L 代表。分布电容 C 直接表示在 L 两端。电流过零前后的电流、电压波形如图 1-7 所示。当电力系统出现短路时，工频下的系统阻抗几乎完全是电感性的。因此，电流波滞后电压波 90° 。在电流零点时，系统电压是在峰值。对于许多的交流切断装置，电弧电压只是总的系统电压中的很小部分。因此，大致上总的系统电压出现在电感两端，同时电容 C 充电到这个电压。在电流零点时，线路切断装置内的导电中止。在 C 和 L 之间引起一个振荡，振荡的频率通常比工频高得多。在电流过零后一个短的时间内（小于 1 毫秒）， C 两端的电压的极性改变，切断装置的两端出现一个几乎两倍于系统峰值的电压。要使操作成功，线路切断装置必须能耐受这一电压而不发生电击穿。正是由于这个高频振荡，就要求在极短时间内完成从电弧（导体）到绝缘气体的转换。

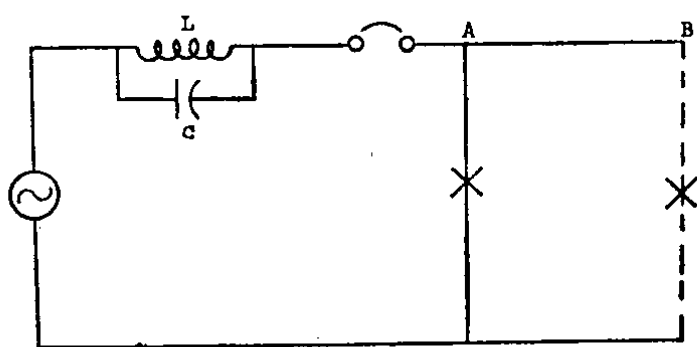


图 1-6 表示两个可能短路点的简单交流线路

研究一下恢复电压上升速度的典型值可能是有意义的。考虑一个通过有效短路电流为 25000 安的 115 千伏系统，则短路电感：

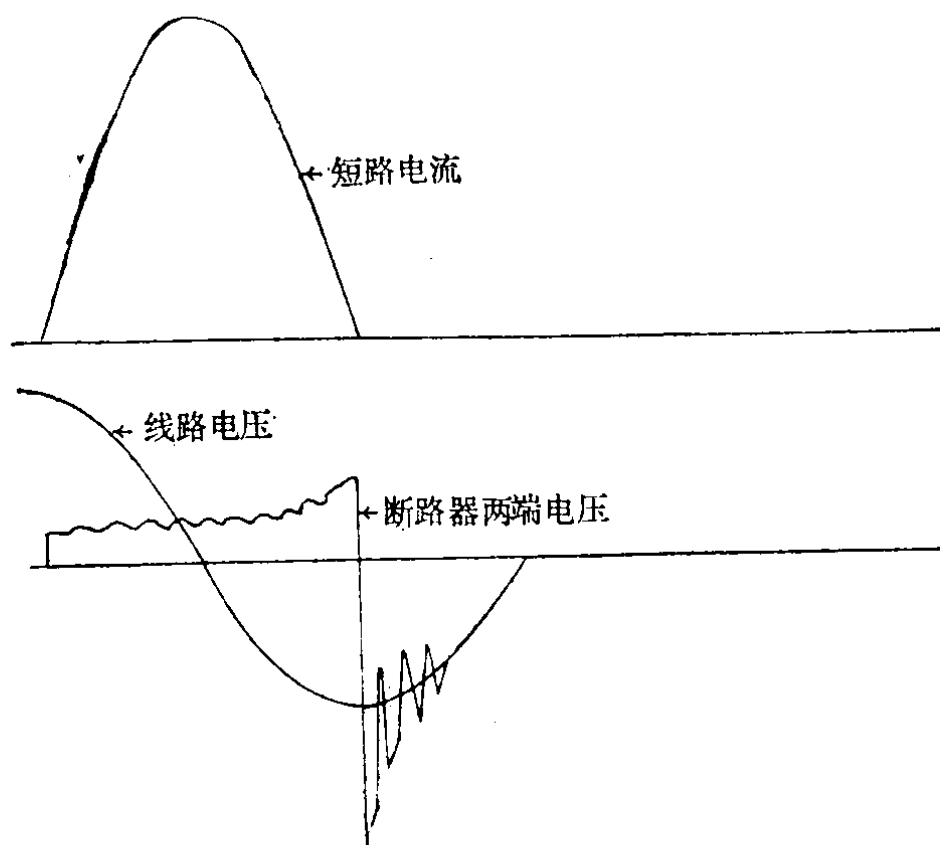


图 1-7 电流过零前后的电流和电压波形

$$L = \frac{115000}{\sqrt{3} \times 25000 \times 377} = 7 \text{ 毫亨} \text{①} \quad (1-2)$$

具有代表性的线路的电容值可能约为 4×10^{-9} 法。恢复电压振荡频率约为10千赫。由于阻尼作用，重击穿电压的峰值一般小于2倍系统电压，典型的数值可能为1.6倍系统电压的峰值。在半个振荡周期内达到这个数值，恢复电压的平均上升速度约为3200伏/微秒。在电力系统中，电容可能与这个例题中所用的值有相当大的不同。但是，由于上升速度反比于电容的平方根，电容由10变化到1，仅仅意味着上升速度由3变化到1。因此，在典型的系统中，我们发现恢复电压上升速度在每微秒几百伏到每微秒几千伏之间变化。

大多数系统的主要电容可能在变压器绕组和地之间，其它有

① 原文为 $\frac{115000}{\sqrt{3 \times 25000 \times 377}} = 70\text{mh}$ ，有错。——译者注

影响的因素可能是在套管和地之间的电容。如果将一个悬挂在空气中的空心电抗器接到断路器一侧，则可能出现异常高的上升速度。在这种情况下，从电抗器一端到另一端的电容可能很小。这种方法经常用以产生高的恢复电压上升速度来试验断路器^[6]。如果断路器的每一侧都连接到一根长的电缆，则可能出现异常低的上升速度。在以后的讨论中，我们将处理这些特殊情况。

1-3-2 输电系统的恢复电压

实际输电系统的构造通常要复杂得多。典型地说，在高压系统中，断路器可能一侧接到母线，另一侧接到输电线。连接到母线的可能是一些变压器和几根输电线路。因此，断路器两端的恢复电压通常不是单频振荡。作为一个例子，我们将分析图1-8(a)所示的单相线路的起始恢复电压。向从断路器接线端子往回看的等效线路中注入一个大小和短路电流相等而方向相反的电流，我们就能够计算出恢复电压的起始上升速度。开始，连接到母线的输电线的作用如同一个电阻。因此，在反射波到达母线之前，等效电路看来就像图1-8(b)所示的线路。这是一个大家所熟知的线路。线路是振荡的还是超过临界阻尼的取决于 Z 是大于还是小于临界值 $1/2\sqrt{L/C}$ 。输电线的波阻抗通常约为300~500欧。如果接到母线的线路有两条或三条， Z 约为100欧，母线上的波阻抗 $\sqrt{L/C}$ 通常为这个数字的好几倍。这样，在反射波到达母线之前，起始的重击穿电压通常是一个指数强阻尼振荡^[7]。在那以后，图1-8(b)的等效电路就不再有效。视系统的构造不同，恢复电压出现的波形可与单频振荡的有很大的不同。图1-9为一个220千伏系统的重击穿电压的示波图。

1-3-3 近区故障

线路上的行波对于断路器的性能有着十分重要的影响。拿图1-6所示的另一种简化情况来看看。断路器的右侧为输电线。如果短路发生在A点，决定短路电流的唯一电感是电源电感 L 。如果短路发生在B点，线路电感在限制短路电流值方面起着附加的作用。这样，即令B点离A点只有一英里左右，B点的工频短

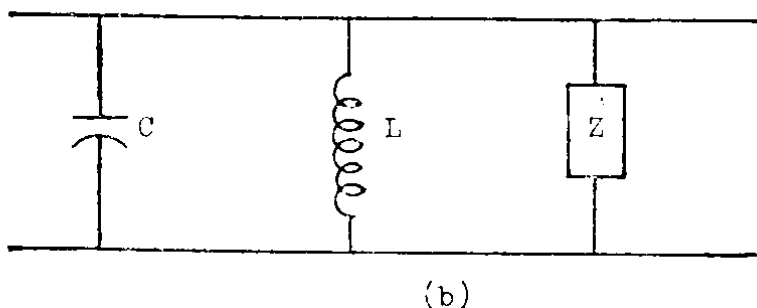
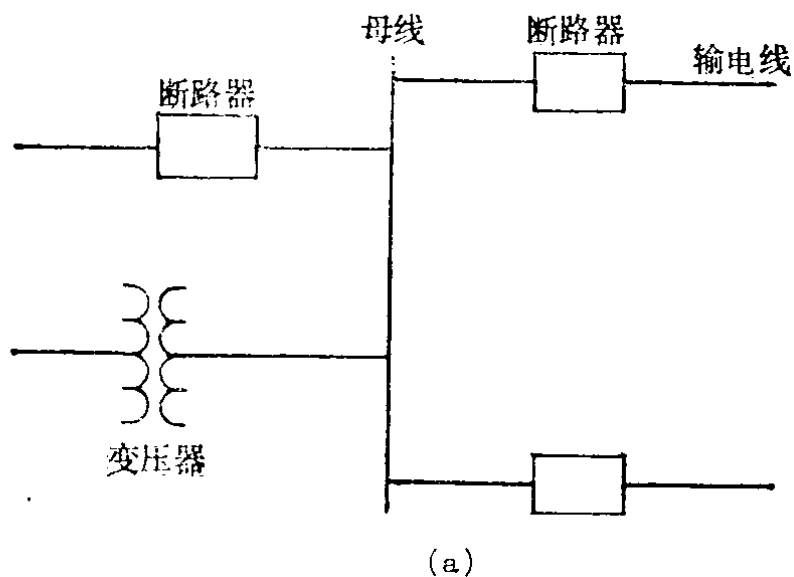


图 1-8 单相高压系统及等效电路
(a)单相高压系统；(b)等效电路

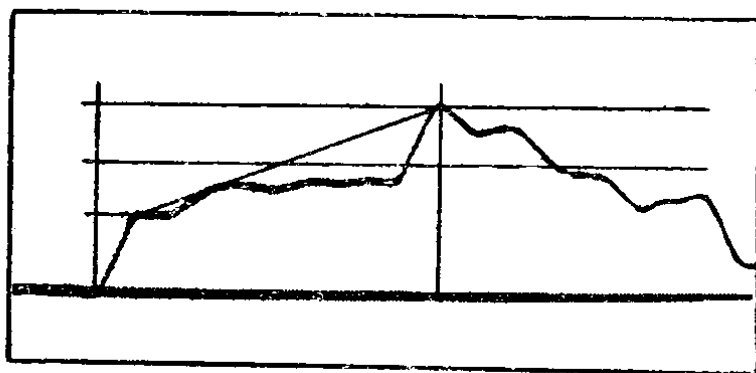


图 1-9 220千伏电网的重击穿电压

来源：A. Hochrainer, *A Proposal for the Establishment of an Equivalent Restriking Voltage for Circuit Breakers (Four-Parameter Method)*, Appendix II-CIGRE Report No. 151, 1958.

路电流可能甚低于A点。作为有代表性的例子，在A点短路电流有效值可能为40000安，而在B点则可能为25000安。但是，我们应该考虑一下，在这两种情况下电流过零后会发生什么现象？在A点短路时，恢复电压主要由L和C之间的振荡决定。即使这个频