



高压开关开合 电容电流和 小电感电流

钱家骧 张节容 吉嘉琴
徐国政 李震彪 刘卫东

编著

中国电力出版社



高压开关开合电容电流和 小电感电流

钱家骧 张节容 吉嘉琴 编著
徐国政 李震彪 刘卫东

电力科技专著出版资金资助项目

中国电力出版社

内 容 提 要

本书叙述高压开关开合电容器组、无载长输电线路、电动机、无载变压器和并联电抗器等的工作机理,以及在电网中引起的过电压及涌流暂态过程。内容包括:①各种高压开关在开合中触头间隙击穿的机理;②各种高压开关截流的机理;③开合过程中单相和三相电网的暂态过程和相间影响;④电动机、GIS等电力设备在高陡度电压作用下的电压耐受能力;⑤减小过电压的措施等。书中包括基本原理、工程分析计算和试验结果,既有国内试验研究成果,也收入了国外近年来有关文献的内容。

本书编写力求深入浅出,满足多方面的需求,适合电力、冶金、煤炭、化工、交通等部门的发电厂、变电站和电力设备等运行维修部门,高压开关和电力设备制造厂及有关管理、研究、设计单位的技术人员阅读参考,也可供工科大专院校有关师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

高压开关开合电容电流和小电感电流/钱家骊等编著.
北京:中国电力出版社,1999
ISBN 7-5083-0063-7

I. 高… II. 钱… III. ①开关电容-电流②电感-
电流 N. TM531

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第27276号

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)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999年9月第--版 1999年9月北京第一次印刷
850毫米×1168毫米 32开本 8.75印张 229千字
印数0001—3000册 定价 19.00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)

前言

高压开关是关系到电力系统安全运行的重要电力设备。高压开关本身工作的可靠性和对周围电力设备器材有无危害自然成为倍受关注的问题。

关合和开断性能是高压开关的基本性能，是研制和运行高压开关最重要的内容。在 20 世纪 60 年代以前，由于种种原因，国产高压开关只进行关合开断短路电流试验，不少人只关心高压开关关合开断短路电流的能力。实际上，高压开关关合开断负荷电流包括无载电流会对高压开关本身及周围电力设备器材造成不同程度的危害，其中包括累积效应造成的损坏。

我国著名高压开关专家李修斌高级工程师在推进我国高压开关开合多种负荷的技术工作中曾起了重要作用。在他的策划、组织和参与下，东北电业管理局、东北电力技术改进局（现东北电力科学研究院）、北京开关厂、清华大学等单位自 20 世纪 70 年代开始先后开展了 220kV 断路器开合无载长输电线，10kV 少油断路器和真空断路器开合高压电动机和电力电容器组等一系列试验研究工作。在此后的二十年内，我国的高压开关制造厂，电力、冶金、煤矿等运行单位，试验研究单位（如电力部电力科学研究院、湖南中试所、西安高压电器研究所以及高等院校等，在这一领域中又继续做了相当多的工作，在理论和实践上都取得了很大进展。本书就是在这一背景下编写的。

本书的内容包括高压开关关合开断各种负荷电流的基本情况，各种高压开关产生击穿、复燃和截流的机理，电网出现击穿、复燃和截流时暂态过程分析，影响过电压和涌流的因素以及抑制措施等。在现有的书籍中，或偏重于电网中暂态过程的分析，或专注于开关的工作原理，而本书则综合电网和开关两方面，体现

出电网和开关的相互作用这一原理，力求给出较全面较系统的阐述。

本书是在国内外有关文献资料的基础上，包括国际大电网会议 13.02 工作组等近十五年来发表的文献以及作者所在单位多年的工作成果和经验体会写成的。国内同行对此也有丰富的经验和成果，本书限于编者所见及篇幅，只能大多割爱。

本书是集体的成果。清华大学张节容教授编写第五章和第十二章，吉嘉琴教授编写第八章，徐国政副教授编写第二章和第三章，华中理工大学李震彪教授和清华大学刘卫东副教授编写第十章，钱家骊教授编写其余九章并总成。本书中引用了世界大电网会议 13.02 工作组和曹荣江博士、王其平教授和谢广润教授等的一些成果，在此表示谢意。电力部电力科学研究院开关所曹荣江博士对全书进行审阅，指出原稿中的问题并提出宝贵意见。华中理工大学程礼椿教授做了部分章节的审阅。作者对此表示衷心的感谢。由于作者水平及见识所限，再加出稿比较仓促，错误及不恰之处在所难免，请读者鉴谅。作者热诚欢迎读者提出意见、建议和进行讨论。来信请寄北京（100084）清华大学电机系本书作者。

本书受到电力科技专著出版基金资助，作者在此表示由衷的谢意。

作者

1999 年 8 月

前言

第一章 负荷电路的基本情况和关合

开断基本原理 1

第一节 概述 1

第二节 等值电路及暂态分析基础 2

第三节 触头间隙击穿引起的暂态过程 4

第四节 截流引起的暂态过程 8

第五节 相间的相互作用 11

第六节 暂态过程对电网及设备的作用 18

第二章 关合电容器组的涌流和过电压 20

第一节 单组电容器投入时的涌流 20

第二节 并联电容器组投入时的涌流 24

第三节 涌流的限制 28

第四节 关合电容器的过电压 29

第三章 开断电容器组 32

第一节 开断单相电容器组 32

第二节 开断三相电容器组 36

第三节 电容器组发生极间击穿故障时的开断 41

第四章 关合开断无载长线 45

第一节 概述 45

第二节 稳定无载长线上的电压分布 46

第三节 关合无载长输电线 49

第四节 开断无载长线 50

第五章 油断路器电容电流开断特性 52

第一节 开断电容电流的弧后绝缘强度 52

第二节 带有并联电阻的多油断路器 55

第三节 改进少油断路器开断电容电流性能的措施 62

第六章 真空开关触头间隙的介质强度	68
第一节 概述	68
第二节 真空间隙击穿机理	70
第三节 影响真空间隙介质强度的因素	74
第四节 真空触头的老炼	80
第五节 开合后真空触头间隙的介质强度	86
第六节 真空开关弧后介质强度的恢复过程	89
第七章 SF₆ 气体触头间隙的介质强度	93
第一节 SF ₆ 气体间隙击穿的机理和影响因素	93
第二节 SF ₆ 压气式断路器无载开断时触头间隙的 介质强度	99
第八章 GIS 隔离开关开断母线的过电压	106
第一节 概述	106
第二节 特快速暂态过电压的起因	107
第三节 GIS 中特快速暂态过电压的分类和特性	126
第四节 SF ₆ 气体在 VFT 过电压作用下的绝缘特性 ...	133
第五节 特快速暂态过电压作用下绝缘损坏的原因	137
第六节 特快速暂态过电压的危害、预防措施及 建议	137
第九章 气中电弧截流	147
第一节 概述	147
第二节 气中小电流电弧的负阻特性和不稳定现象	148
第三节 电弧动伏安特性和不稳定现象	152
第四节 影响气中电弧截流的因素及实例	161
第十章 真空开关电弧截流	169
第一节 真空电弧截流现象	169
第二节 电路参数对真空开关截流的影响	171
第三节 开关参数对真空开关截流的影响	177
第四节 触头材料对截流的影响	180

第十一章	电动机的开断过程及截流过电压	187
第一节	起动中电动机的电流过零开断	187
第二节	运转中电动机的电流过零开断	190
第三节	开断电动机的截流过电压	195
第十二章	真空开关开断电动机的多次复燃和 三相同步截流过电压	203
第一节	多次复燃过电压	203
第二节	三相同步截流过电压	214
第十三章	关合电动机	217
第一节	关合电动机暂态过程	217
第二节	影响关合过电压的因素	223
第三节	真空开关关合过电压	226
第四节	交流电机绝缘耐受冲击电压强度	230
第十四章	开断无载变压器的过电压	235
第一节	概述	235
第二节	变压器的无载电流和激磁电感	236
第三节	变压器的等效电容	238
第四节	磁效率系数 η	241
第五节	开断无载变压器的截流过电压	244
第六节	开断无载变压器时的复燃和复燃过电压	248
第七节	开断无载变压器过电压的一些数据	251
第十五章	开断并联电抗器的过电压	253
第一节	概述	253
第二节	电抗器及相联电网	254
第三节	开断单相并联电抗器的截流过电压	255
第四节	开断三相并联电抗器	258
第五节	开断变压器电抗器组	262
附录 A	RC 保护电路对气中电弧截流影响公式的推导	264
参考文献		266

第一章 负荷电路的基本情况和 关合开断基本原理

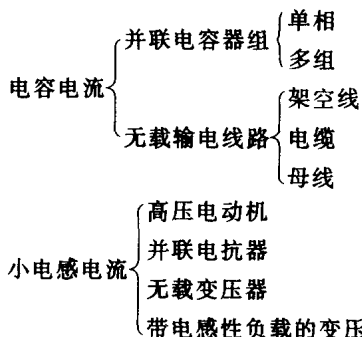
第一节 概 述

高压开关包括断路器、负荷开关、接触器、隔离开关等。高压开关应能开合多种电流，其中包含多种负载电流（包括无载电流）。根据负载性质，负载电流可以分为：

- (1) 电阻性电流（包括电阻为主的电阻-电感性电流）；
- (2) 电容性电流；
- (3) 小电感性电流。

高压开关开合电阻性和电阻-电感性电流比较容易，燃弧时间短，不会产生危险的过电压和涌流；而开合电容性和小电感性负载电路则会引起严重的过电压和涌流，对电网造成威胁，引起电网和高压开关制造厂人员的关注。电感电流前冠以“小”字是因为短路电流通常也是电感电流，但电流值大得多。

在电网中，电容电流和小电感电流可出现在以下负荷中：



在开合这些电流过程中，出现涌流和过电压的根本原因有：

- (1) 截流 (Current chopping) 现象，指开关触头间隙在流过工频电流过程中导电能力的突然丧失。

(2) 击穿 (Strike) 现象, 包括预击穿 (Pre-strike)、复燃 (Re-ignition) 和重击穿 (Re-strike), 以区别不同情况下开关触头间隙绝缘能力的丧失。根据击穿的时机不同, 击穿可分为以下三种:

1) 预击穿, 指高压开关在关合过程中触头间隙的击穿。

2) 重击穿, 指开关在开断过程中, 在电流过零后 $1/4$ 工频周期或更长时间内触头间隙的击穿。

3) 复燃, 指开关开断过程中, 在电流过零后 $1/4$ 周期内触头间隙的击穿。击穿或复燃又有一次或多次的区别。由以后章节可知, 不同形式的击穿后果即产生的过电压是明显不同的。

在本书中有时又采用重燃一词, 重燃包括复燃及重击穿两种现象。

根据截流产生原因的不同, 截流可分为:

(1) 主要由开关性能引起的截流;

(2) 实际 (Vitual) 截流—主要由其他相击穿引起, 又称等效截流。

由于截流及击穿引起的过电压类型有:

(1) 截流过电压;

(2) 重击穿过电压;

(3) 复燃过电压包括多次复燃级升过电压。

对于三相电网, 由于各相在电磁方面的相互联系 (耦合), 使现象更为复杂。

涌流为出现于关合或击穿时的暂态电流, 涌流的大小决定于有关电路的结构参数以及出现涌流的时机等。

第二节 等值电路及暂态分析基础

截流和击穿引起的过电压和涌流过程可以通过计算机瞬变电路分析程序在开关性能已知的情况下对三相等值电路进行分析, 得出数值结果。由于开关性能难以正确描述以及电路简化会产生

误差等，想得到较准确的结果十分困难，此外，在数字计算中各因素影响的直观性也比较差。

在实际工作中除进行试验外，也常采用分析估计方法。图 1-1 是单相电感负载电路的简化图，图中电容均用集中电容代替，电路中所有电阻均忽略（因电阻通常所起的作用只是对振荡的阻尼）。即使作了这些简化，电路仍比较复杂。

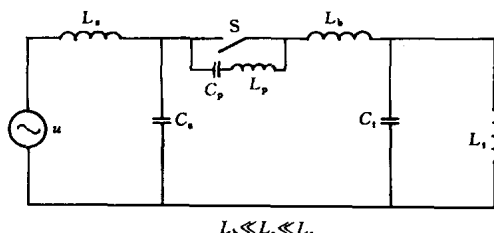


图 1-1 单相电感负载电路

图 1-1 中共有电感和电容元件 7 个，在开关开合过程中将产生共有十几种频率的暂态过程，且每个频率均与所有元件值有关。在简化的条件下，只有 4~5 个频率是重要的，而且由于各个电感及电容值差别常很大，这些振荡频率可以近似地由相关的一两对电感和电容确定如下。

(1) 电源侧振荡频率 f_s ，其值为

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} \quad (1-1)$$

电源侧振荡频率 f_s 指开关电流开断后电源侧的振荡频率，由电源电感 L_s 及电源侧电容 C_s 值确定。由于通常母线上接有不少电缆、架空线及各种电力设备，虽然 L_s 值较小，但频率值 f_s 仍较低，如在 1~20kHz 之间。

(2) 负荷侧振荡频率 f_t ，其值为

$$f_t = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_t C_t}} \quad (1-2)$$

f_t 是开关电流开断后，负荷侧的振荡频率，主要由负荷侧的电感

L_t 及电容 C_t 值确定。对于无载变压器，电感值可达百亨数量级；对长输电线，电容值可达数微法，在此情况下，振荡频率可低于数百赫。对高压电动机，由于决定振荡频率的电动机的漏感为毫亨级，因此振荡频率可达几十千赫。

(3) 开关关合第一振荡 (First parallel oscillation) 频率 f_{p1} 。
当开关触头间隙击穿后，开关两极间电容放电的振荡频率 f_{p1} 为

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_p C_p}} \quad (1-3)$$

由于 L_p 及 C_p 为微亨及皮法数量级， f_{p1} 通常极高，可达兆赫以上。

(4) 开关第二振荡 (Second parallel oscillation) 频率 f_{p2} 为

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_t + C_s}{L_b C_t C_s}} \quad (1-4)$$

开关触头间隙击穿后，首先出现的是第一振荡，接着由于 C_s 及 C_t 上电压不同，通过开关联线电感 L_b 及开关间隙放电引起第二振荡。由于 C_s 及 C_t 较大， f_{p2} 比 f_{p1} 要低得多，通常在几百千赫范围。

(5) 开关主电路振荡 (Main circuit oscillation) 频率 f_m ，开关触头间隙击穿后还产生频率为 f_m 的振荡，其值为

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_t + L_s}{L_s L_t (C_s + C_t)}} \quad (1-5)$$

当 $L_t \gg L_s$ 时有

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s (C_s + C_t)}} \quad (1-6)$$

f_m 也在千赫范围。

第三节 触头间隙击穿引起的暂态过程

无论关合过程还是开断过程，当高压开关触头间隙绝缘强度低于外施电压时，均将导致间隙绝缘能力的丧失——击穿。触头

间隙外施电压在图 1-1 中为开关两侧电容 C_1 及 C_2 上电压之差。触头间隙的绝缘状态则取决于触头间隙大小, 电极形状、材料、表面状态, 间隙介质种类及状态等多种因素。介质状态又包括介质压力、温度、流动速度等。以上不少因素与触头间隙击穿前的状态有关。

高压开关触头间隙的击穿或复燃在电网中出现的暂态过程相当复杂, 但最基本的过程可以用图 1-2 中的情况描述。图 1-2 中箭头表示击穿, U 为电源电压, U_0 为击穿前瞬间电容 C 上的电压。

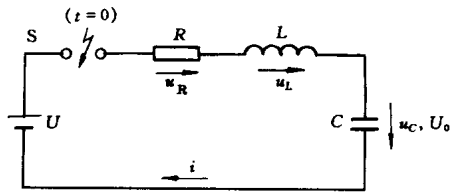


图 1-2 触头间隙击穿时的基本电路

由图 1-2 可得电路方程式组如下

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + u_C \quad (1-7)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + U_0 \quad (1-8)$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} \quad (1-9)$$

$$\frac{di}{dt} = C \frac{d^2 u_C}{dt^2} \quad (1-10)$$

将式 (1-9)、式 (1-10) 代入式 (1-7), 得

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U \quad (1-11)$$

在通常情况下, 电阻 R 很小, 电压 u_C 及电流 i 在暂态过程中将以振荡形式出现。在此情况下, 解微分方程式 (1-11), 得

$$u_C = U + (U_0 - U)e^{-\delta t} \left(\cos \omega'_0 t + \frac{\delta}{\omega'_0} \sin \omega'_0 t \right)$$

$$i = (U - U_0) \omega'_0 C e^{-\delta t} \left(\frac{\omega_0}{\omega'_0} \right)^2 \sin \omega'_0 t$$

其中

$$\delta = \frac{R}{2L}$$

$$\omega'_0 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_0$$

通常情况下, $\delta \ll \omega_0$, 则 $\omega'_0 \approx \omega_0$, 上二式可简化为

$$u_c = (U - U_0)(1 - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t) + U_0 \quad (1-12)$$

$$i = I_m e^{-\delta t} \sin \omega_0 t \quad (1-13)$$

式中
$$I_m = \frac{(U - U_0)}{\omega_0 L} = \frac{(U - U_0)}{\sqrt{L/C}} = (U - U_0) \omega_0 C \quad (1-14)$$

设 $U > 0$, 在不同 U_0 下的 u_c 及 i 的波形见图 1-3。

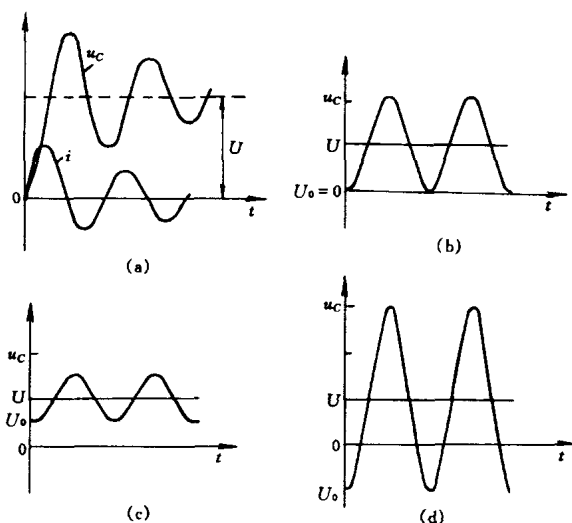


图 1-3 击穿后电压电流波形

(a) $U_0 = 0, R > 0$; (b) $U_0 = 0, R = 0$;

(c) $U_0 > 0, R = 0$; (d) $U_0 = -U, R = 0$

由式 (1-12)、式 (1-13) 及图 1-3 可见:

(1) 电压 u_c 及电流 i 都是频率为 f_0 的衰减振荡波。振荡频率 f_0 只取决于电路中负荷元件参数 L 及 C , 而与 U 及 U_0 无关。

(2) 电流 i 落后于电压 u_c 90° , 也即电流过零时, u_c 达到峰值。

(3) 电压 u_c 在振荡过程中达到的最大值 U_m (绝对值) 是一个重要参数, 称为过电压最大值。 $k_m = |U_m/U|$ 为过电压最大倍数。

设 $\delta=0$, 由式 (1-12) 可得

$$U_m = |2U - U_0| \quad (1-15)$$

$$k_m = \left| 2 - \frac{U_0}{U} \right| \quad (1-16)$$

通常 $U_0 < U$, 根据 U_0 值的不同, 可以有两种情况:

(1) $U_0 \geq 0$, 即 U_0 与 U 同方向且小于 U , 由式 (1-15) 可得

$$0 \leq k_m \leq 2$$

(2) $U_0 < 0$, 即 U_0 与 U 反方向, 同样可得

$$k_m > 2$$

在高压开关关合及开断过程中, 还会出现多次复燃或重击穿现象。多次复燃或重击穿的发展过程是: 击穿—燃弧—熄弧—击穿…。图 1-4 是高压开关开断小电感电流的多次复燃过程波形图, 由图可知, 击穿后在弧隙中将通过高频电流。当然在刚击穿后, 弧隙中也开始出现由零值开始上升的工频电流, 但因工频电流上升很慢, 故暂时可以忽略不计。在弧隙高频电流过零时, 根据开关的熄弧能力和电弧电流大小和频率等的不同, 可能在高频电流第 1、2、3、…次过零时熄弧。图 1-4 中, 多次复燃后的高频电流多在第 7 次过零后熄弧, 其中最后一次高频电流未能熄弧, 电流波形的最后水平线部分为工频电流。

第一次高频电流熄弧后, 如出现第二次击穿 (复燃), 则 U_{02} 为第二次击穿时的电容起始电压, 从而出现第二次过电压最大值 $U_{2m} = U_{02}$, 依此类推。这样, 就会出现两种典型情况:

(1) 递减过电压, 即 $U_{1m} > U_{2m} > U_{3m} > \dots$ 。

(2) 递增过电压, 即 $U_{1m} < U_{2m} < U_{3m} < \dots$ 。

显然级升 (escalation) 过电压是危险的现象, 以后章节将专门对此进行分析。

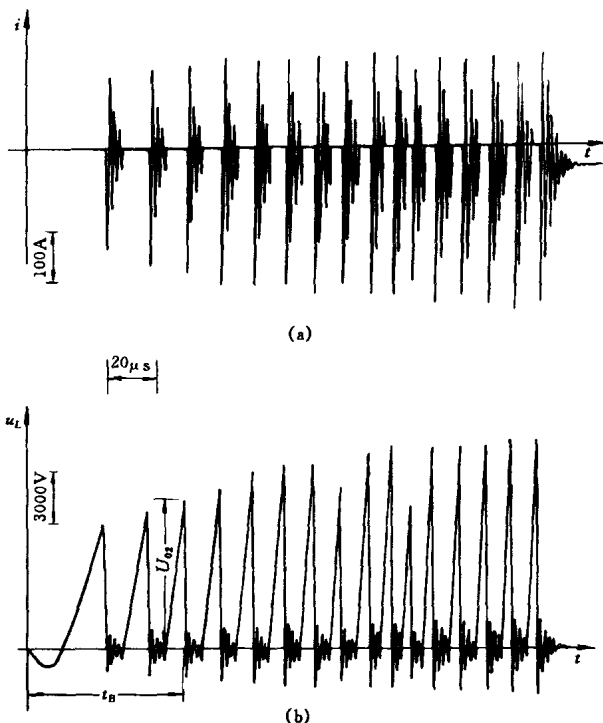


图 1-4 开断电感电路时高频熄弧
及多次复燃时 i 及 u_L 波形
(a) 电流波形；(b) 负荷电压波形

第四节 截流引起的暂态过程

截流现象是高压开关开断各种小电流时出现的普遍现象，但只有开断小电感电流才会出现问题。在开断小电流过程中，由于开关相对的灭弧能力强，此时电弧电流不是通过工频电流的零点熄弧而是电流似乎从某一电流值几乎突然下降到零而熄灭。用低频示波器拍摄到的截流波形见图 1-5。出现截流时的工频电流瞬时值称为截断电流，用 I_{ch} 表示。

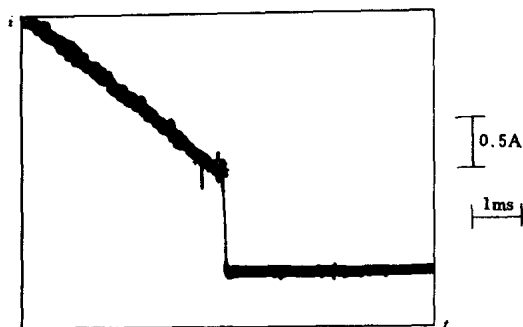


图 1-5 截流波形

高压开关的截流过程是相当复杂的，上述相对的灭弧能力很

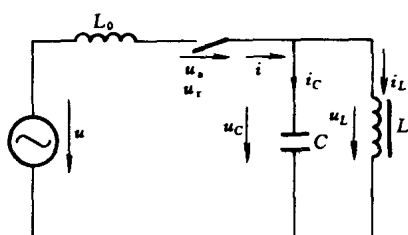


图 1-6 开断小电感电流单相电路

u —电源电压, $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$; u_C —负荷上电压, $u_C = u_L$; i —电路截流前电流, $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$; L —负荷电感; C —负荷侧等效电容

强的说法也过分概括，并不确切。真空开关与其它开关的截流机理和影响因素也完全不同。这些内容详见第九章和第十章。

高压开关在开断小电感电流的过程中出现截流的主要后果是产生截流过电压。这一情况可用图 1-6 中的简化单相电路说明。

在截流发生前，由于 C 值较小， $i_C \ll i_L$ ， $i_L \approx i$ 。设 $t=0$ 瞬间出现截流现象，截流值为 I_{ch} ，则

$$I_{ch} = I_m \sin \varphi_i$$

在此瞬间 $u_C = u = U_m \sin \varphi_u = U_0$

$t > 0$ 后 $i = 0$

$$i_C = -i_L \quad (1-17)$$

截流后，负荷侧电路暂态方程为

$$u_L = \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-18)$$